



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Integración de los procesos de secado por atomización y aglomeración para la elaboración de un alimento de fresa con potencial efecto antioxidante**

**Hader Iván Castaño Peláez**

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



# **Integración de los procesos de secado por atomización y aglomeración para la elaboración de un alimento de fresa con potencial efecto antioxidante**

**Hader Iván Castaño Peláez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Doctor en Ciencia y Tecnología de Alimentos**

Director:

Ph.D. Misael Cortés Rodríguez

Codirector:

Ph.D. Jesús Humberto Gil González

Línea de Investigación:

Alimentos funcionales

Grupo de Investigación: Grupo de Investigación en Alimentos Funcionales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento Ingeniería Agrícola y de Alimentos

Medellín, Colombia

2022



Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, DD, MM, AA

*Dedicatoria*

*A mis padres, en especial a mi viejo que partió prematuramente.*

*A mi esposa Cristina, por mi inspiración y su apoyo incondicional*

*A mis hijas María José e Isabella por ser la otra inspiración de mi vida*

# Agradecimientos

Al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y sus directivas, por su voto de confianza en permitirme disfrutar de la comisión de estudios para realizar los estudios de doctorado. A la Universidad Nacional de Colombia, a su Facultad de Ciencias Agrarias, al departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos y al posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos; al núcleo de docentes.-investigadores que me compartieron su experiencia y conocimiento, a María Eugenia Duque por su paciencia y colaboración en las actividades del laboratorio de Control Calidad de los Alimentos; y a todos mis compañeros por su amistad, respeto y colaboración.

Especial agradecimiento a los docentes Misael Cortes Rodríguez y Jesús Gil González en su importante labor como director y codirector, por su tiempo y dedicación.

A Minciencias y a la gobernación de Antioquia por la financiación del proyecto: Fortalecimiento de la competitividad de las cadenas productivas de mora, fresa y uchuva en el departamento de Antioquia, mediante el desarrollo y escalamiento industrial de alimentos funcionales aglomerados con potencial efecto antioxidante, proyecto en el que se inscribió mi desarrollo formativo doctoral

## Resumen general

La fresa es una baya que se caracteriza por su agradable sabor y sus reconocidas características funcionales, rica en compuestos con un potente poder antioxidante que ayudan a disminuir el riesgo de eventos cardiovasculares; pero que tiene la desventaja de ser una fruta con una alta tasa respiratoria que la hace muy perecedera, generando pérdidas en las etapas de cosecha y pos-cosecha hasta un 45%. El secado por atomización como solución a la problemática de comercialización de frutas frescas perecederas, permite producir polvos de frutas con bajo contenido de humedad y baja actividad acuosa, confiriéndole estabilidad microbiológica y mayor tiempo de vida útil. Dada la naturaleza de los azúcares que tiene la fresa (mayoritariamente fructosa y glucosa), los polvos de fresa presentan bajas temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ) y su alta higroscopicidad y pegajosidad hacen que en el proceso de secado se presenten problemas de adhesión en las paredes del equipo y que los polvos colapsen. Las dificultades que presenta el secado por atomización y la calidad de los polvos obtenidos en el proceso se pueden solucionar mediante el uso de hidrocoloides como ayudantes de secado que incrementan la  $T_g$ ; sin embargo, las microcápsulas de las mezclas de polvos obtenidas presentan problemas de instantanización y fluidez; aspecto que se puede solucionar con la aglomeración de las partículas. El objetivo de la investigación fue desarrollar un protocolo de integración de los procesos de secado por atomización y aglomeración a escala piloto para la elaboración de un alimento funcional de fresa con potencial efecto antioxidante que permitiera obtener un polvo aglomerado de fresa con buenas propiedades de instantanización y con adecuadas condiciones para el almacenamiento y la distribución; además, de desarrollar un producto innovador para la cadena productiva de la fresa en Colombia para los mercados nacional e internacional. La investigación se planteó en cuatro fases las cuales se realizaron a escala piloto en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. La primera fase incluyó el desarrollo de la suspensión de fresa con fines de secado por atomización; en la segunda fase se desarrolló el estudio del proceso de secado por atomización, la tercera fase involucró el estudio del proceso de



aglomeración en lecho fluidizado y la cuarta se centró en realizar la estabilidad en el almacenamiento de los polvos aglomerados de fresa por un espacio de 180 días. En la primera fase se evaluó la influencia de las variables de proceso de homogenización (presión y tiempo) y el uso de la goma arábica (GA) sobre la estabilidad de las suspensiones de fresa. Se usó un diseño central compuesto de cara centrada: presión (P) (4,14-10,34 Mpa), tiempo (t) (3-5 min) y GA (0,2-0,4%) y fueron evaluadas como variables dependientes: potencial zeta ( $\zeta$ ), índice de absorción espectral (R), viscosidad ( $\mu$ ) y tamaño de partícula. La suspensión fue estabilizada por el incremento  $\zeta$  debido al efecto de t y GA, y la interacción de t-GA. El tamaño de partícula fue afectado por P y no por t; mientras, que GA afectó principalmente  $D_{[3,2]}$ ,  $D_{[4,3]}$  and  $D_{90}$ . Los resultados indicaron que la homogenización y el uso de la GA como hidrocoloide, confirieron estabilidad fisicoquímica a la suspensión de fresa, y la hacen apta como alimentación al secado por atomización. En la segunda fase se analizó el efecto de la formulación de alimentación y del proceso de secado por aspersion sobre la calidad de las microcápsulas de extracto de fresa. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) con un diseño central compuesto centrado en la cara ( $\alpha=1$ ), considerando los factores: maltodextrina (MD) (7.5 – 11.5 % p/p), temperatura de entrada de aire (IAT) (140 - 160°C), temperatura de salida del aire (OAT) (80 - 90 °C) y velocidad del disco atomizador (ADS) (16.000 –20.000 rpm), y las variables de respuesta: humedad ( $X_w$ ), actividad acuosa ( $a_w$ ), solubilidad (S), humectabilidad (Hu), higroscopicidad (Hy), densidad bulk ( $\rho_b$ ), densidad compactada ( $\rho_c$ ), fenoles totales (TF), capacidad antioxidante (métodos DPPH y ABTS), ángulo de reposo (AR), tamaño de partícula del polvo de fresa ( $D_{[3,2]}$ ), color (CIE-LAB) y rendimiento del proceso (Y). Para los niveles evaluados no hubo efecto de las variables independientes sobre  $X_w$ ,  $a_w$ ,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , DPPH, fenoles totales, cromaticidad  $b^*$  y  $D_{[3,2]}$ . La S fue afectada por OAT y ADS, y la interacción IAT\*MD, ADS\*MD, IAT<sup>2</sup> y MD<sup>2</sup>. La Hu dependió de los factores IAT, OAT y las interacciones IAT\*OAT y IAT\*MD. La actividad ABTS fue afectada por los factores ADS, ADS\*MD y IAT<sup>2</sup>. El Y del proceso fue afectado por OAT, MD, IAT\*OAT, IOT\*ADS, IOT\*MD, OAT\*ADS, ADS\*MD, IOT<sup>2</sup> y OAT<sup>2</sup>. El incremento de MD causó disminución de Hy. El valor de  $L^*$  se vio afectado por la ADS y MD, las afectaciones por la temperatura no presentaron efecto en los niveles evaluados, la cromaticidad  $a^*$  fue afectada positivamente por el incremento de ADS. IAT y MD presentaron efecto estadístico sobre AR. La optimización experimental alcanzó una deseabilidad del 73,7% siendo las condiciones óptimas: IAT 154 °C, OAT 89 °C, DSA 16,805 rpm y MD 11,5%.

En la tercera fase se evaluó la influencia del proceso de aglomeración en lecho fluidizado sobre las propiedades del polvo de fresa (PF) obtenido por SD. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) con un diseño central compuesto centrado en la cara ( $\alpha=1$ ), considerando los factores: temperatura de aire de fluidización (50-70 °C), tiempo (30-50min) y presión de aire de atomización del agente ligante (1-2 bar). Las variables de respuesta fueron:  $X_w$ ,  $a_w$ , S, Hu, Hy,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , IC, IH,  $D_{[3,2]}$ , TF, capacidad antioxidante (métodos DPPH y ABTS), AR, color (CIE-LAB). Se observó en el proceso de aglomeración un incremento en el tamaño de partícula; las partículas aglomeradas mostraron una disminución importante en el tiempo de humectación, los aglomerados de mezclas de polvos de fresa presentaron una excelente instantaneización y fluidez, solucionando los problemas identificados en las microcápsulas obtenidas por SD. Si, bien se incrementaron los niveles de humedad y  $a_w$  en el proceso de aglomeración, los valores se encuentran en el intervalo de seguridad microbiológica y fisicoquímica de los alimentos; además, no se presentó afectación en los contenidos de fenoles y capacidad antioxidante. La optimización experimental alcanzó una deseabilidad del 68,4% siendo las condiciones óptimas 70 °C, 30 min y 1 bar. El ajuste de la validación experimental arrojó un  $R^2$  de 0,92 con un porcentaje de error absoluto medio de 21,1%. En la última fase se estudió la estabilidad durante el almacenamiento (6 meses) de la mezcla en polvo de fresa aglomerada por lecho fluidizado a tres temperaturas (15, 25 y 25°C), ambiente controlado a humedad relativa del 65% y utilizando como empaque bolsas de película laminada de PET con foil de aluminio. Se realizó seguimiento a la  $X_w$ ,  $a_w$ , S, Hu, Hy,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , IC, IH,  $D_{[3,2]}$ , TF, capacidad antioxidante (métodos DPPH y ABTS), AR, color (CIE-LAB). Antocianinas y vitamina C. El ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) de todas las variables dependientes respecto al tiempo de almacenamiento; la temperatura de almacenamiento no presentó efecto estadísticamente significativo sobre la S, ABTS, DPPH y Hu. La interacción tiempo-temperatura durante el almacenamiento no presentó efecto significativo ( $p > 0,05$ ) sobre la S, ABTS, DPPH, Hu y L. El aglomerado presentó valores de  $X_w$  y  $a_w$  que les confieren muy buena estabilidad frente a reacciones de deterioro; conservó una fluidez buena, una cohesividad baja y retenciones superiores al 50% para capacidad antioxidante, al 76% para fenoles totales, al 39 % para antocianinas y del 40% para vitamina C; se conservó el tamaño de partícula durante la evaluación. El color sólo se vio afectado en el tratamiento a 35°C a partir del quinto mes. La integración del proceso de aglomeración en lecho fluidizado como etapa posterior al secado; mejoró las propiedades de instantaneidad y fluidez de los polvos obtenidos en el secado por atomización; además, durante el almacenamiento se presentó estabilidad en las propiedades de fluidez e instantaneidad. Se alcanzaron buenas retenciones de compuestos bioactivos durante el almacenamiento: capacidades antioxidantes > 50%, FT > 76%, AT > 39% y Vit.C > 40% (58 y 44% DR según OMS para 15-25°C y 35°C, durante 180 días). Finalmente, la investigación definió un t de almacenamiento de la MPAF de 180 días a 15 y 25°C, y de 120 días a 35°C, utilizando como empaque una bolsa con película laminada de PET foil de aluminio.

De cara a generar un producto innovador en la cadena agrícola de la fresa, fue posible identificar las condiciones óptimas de proceso para transformar la fruta fresca en un producto aglomerado empacado en bolsas con películas laminadas de PET foil de aluminio que conserva en alto grado sus propiedades fisicoquímicas y funcionales y que permitirá reducir los costos logísticos de transporte y almacenamiento; además, de ser una nueva presentación de materia prima para la industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica.

**Palabras clave:** Fresa, estabilidad de la suspensión, secado por atomización, aglomeración en lecho fluidizado y estabilidad en el almacenamiento

# **Integration of spray drying and agglomeration processes for the preparation of a strawberry food with potential antioxidant effect**

## **General abstract**

Strawberry is a berry that is characterized by its pleasant flavor and its recognized functional characteristics, rich in compounds with powerful antioxidant power that help reduce the risk of cardiovascular events; but it has the disadvantage of being a fruit with a high respiratory rate that makes it very perishable, generating losses in the harvest and post-harvest stages of up to 45%. Spray drying as a solution to the problem of marketing fresh perishable fruits allows the production of fruit powders with low moisture content and low water activity, conferring microbiological stability and longer shelf life. Given the nature of the sugars found in strawberries (mainly fructose and glucose), strawberry powders have low glass transition temperatures ( $T_g$ ) and their high hygroscopicity and stickiness cause adhesion problems to occur during the drying process. equipment walls and dust collapsing. The difficulties presented by spray drying and the quality of the powders obtained in the process can be solved by using hydrocolloids as drying aids that increase  $T_g$ ; however, the microcapsules of the powder mixtures obtained present instantaneous and fluidity problems; aspect that can be solved with the agglomeration of the particles. The objective of the research was to develop a protocol for the integration of the spray-drying and agglomeration processes on a pilot scale for the elaboration of a functional strawberry food with a potential antioxidant effect that would allow obtaining an agglomerated strawberry powder with good properties of instantization and with adequate conditions for storage and distribution; In addition, to develop an innovative product for the strawberry production chain in Colombia for the national and international markets. The research was planned in four phases which were carried out on a pilot scale at the National University of Colombia, Medellin. The first phase included the development of

strawberry suspension for spray drying purposes; in the second phase, the study of the spray-drying process was developed, the third one involved the study of the agglomeration process in a fluidized bed, and the fourth one focused on achieving stability in the storage of agglomerated strawberry powders for a period of 180 days. In the first phase, the influence of the homogenization process variables (pressure and time) and the use of gum arabic (GA) on the stability of strawberry suspensions was evaluated. A central design composed of centered face was used: pressure (P) (4.14-10.34 Mpa), time (t) (3-5 min) and GA (0.2-0.4%) and were evaluated. as dependent variables: zeta potential ( $\zeta$ ), spectral absorption index (R), viscosity ( $\mu$ ) and particle size. The suspension was stabilized by the increase in  $\zeta$  because of t and GA, and the interaction of t-GA. Particle size was affected by P and not by t ; while GA mainly affected D [3.2], D [4.3] and D90. The results indicated that the homogenization and the use of GA as a hydrocolloid conferred physicochemical stability to the strawberry suspension and make it suitable as a feed stream for spray drying. In the second phase, the effect of the feed formulation and the spray-drying process on the quality of the strawberry extract microcapsules was analyzed. The response surface methodology (RSM) was used with a central composite design centered on the face ( $\alpha=1$ ), considering the factors: maltodextrin (MD) (7.5 – 11.5% p/p), air inlet temperature (IAT) (140 - 160°C), air outlet temperature (OAT) (80 - 90 °C) and atomizing disk speed (ADS) (16,000 –20,000 rpm), and the response variables: humidity ( $X_w$ ), water activity ( $a_w$ ), solubility (S), wettability (Hu), hygroscopicity (Hy), bulk density ( $\rho_b$ ), compacted density ( $\rho_c$ ), total phenols (TF), antioxidant capacity (DPPH and ABTS methods), angle of repose (AR), strawberry powder particle size (D[3;2]), color (CIE-LAB), and process yield (Y). For the levels evaluated, there was no effect of the independent variables on  $X_w$ ,  $a_w$ ,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , DPPH, total phenols, chromaticity  $b^*$  and D[3;2]. The S was affected by OAT and ADS, and the interaction IAT\*MD, ADS\*MD, IAT<sup>2</sup> and MD<sup>2</sup>. The Hu depended on the factors IAT, OAT and the interactions IAT\*OAT and IAT\*MD. ABTS activity was affected by the factors ADS, ADS\*MD and IAT<sup>2</sup>. The Y of the process was affected by OAT, MD, IAT\*OAT, IOT\*ADS, IOT\*MD, OAT\*ADS, ADS\*MD, IOT<sup>2</sup> and OAT<sup>2</sup>. The increase in MD caused a decrease in Hy. The value of L\* was affected by ADS and MD, effects due to temperature had no effect on the levels evaluated, chromaticity  $a^*$  was positively affected by the increase in ADS. IAT and MD presented a statistical effect on AR. The experimental optimization reached a desirability of 73.7%, being the optimal conditions: IAT 154 °C, OAT 89 °C, DSA 16,805 rpm and MD

11.5%. In the third phase, the influence of the fluidized bed agglomeration process on the properties of the strawberry powder (PF) obtained by SD was evaluated. The response surface methodology (RSM) was used with a central centered face centered composite design ( $\alpha=1$ ), considering the factors: fluidization air temperature (50-70 °C), time (30-50min) and pressure. of air for atomizing the binding agent (1-2 bar). The response variables were:  $X_w$ ,  $a_w$ , S, Hu, Hy,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , IC, IH,  $D_{[3,2]}$ , TF, antioxidant capacity (DPPH and ABTS methods), AR, color (CIE- LAB). An increase in particle size was observed in the agglomeration process; the agglomerated particles showed a significant decrease in the wetting time, the agglomerates of strawberry powder mixtures presented excellent instantization and fluidity, solving the problems identified in the microcapsules obtained by SD. If, although the levels of moisture and  $a_w$  were increased in the agglomeration process, the values are within the range of microbiological and physicochemical safety of foods; In addition, there was no affectation in the contents of phenols and antioxidant capacity. The experimental optimization reached a desirability of 68.4%, with the optimal conditions being 70 °C, 30 min and 1 bar. The experimental validation fit yielded an  $R^2$  of 0.92 with a mean absolute error rate of 21.1%.

In the last phase, the stability during storage (6 months) of the strawberry powder mix agglomerated by fluidized bed was studied at three temperatures (15, 25 and 25°C), controlled environment at 65% relative humidity and using as Pack PET laminated film bags with aluminum foil.  $X_w$ ,  $a_w$ , S, Hu, Hy,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , IC, IH,  $D_{[3,2]}$ , TF, antioxidant capacity (DPPH and ABTS methods), AR, color (CIE-LAB ). Anthocyanins, and vitamin C. The ANOVA showed statistically significant differences ( $p<0.05$ ) of all the dependent variables with respect to storage time; storage temperature did not present a statistically significant effect on S, ABTS, DPPH and Hu. The time-temperature interaction during storage did not present a significant effect ( $p>0.05$ ) on S, ABTS, DPPH, Hu and L. The agglomerate presented values of  $X_w$  and  $a_w$  that give them very good stability against reactions of deterioration; it preserved a good fluidity, a low cohesiveness, and retentions higher than 50% for antioxidant capacity, 76% for total phenols, 39% for anthocyanins and 40% for vitamin C; the particle size was preserved during the evaluation. The color was only affected in the treatment at 35°C from the fifth month. As a general conclusion, the integration of the fluidized bed agglomeration process as a stage after drying; it improved

the properties of instantaneity and fluidity of the powders obtained in spray drying; In addition, during storage, stability in the properties of fluidity and instantaneity was presented. Good retention of bioactive compounds during storage was achieved: antioxidant capacities > 50%, FT > 76%, AT > 39% and Vit.C > 40% (58 and 44% DR according to WHO for 15-25°C and 35°C). C, for 180 days). Finally, the research defined a MPAF storage t of 180 days at 15 and 25°C, and 120 days at 35°C, using an aluminum foil PET laminated film bag as packaging.

In order to generate an innovative product in the strawberry agricultural chain, it was possible to identify the optimal process conditions to transform the fresh fruit into an agglomerated product packed in bags with laminated PET foil aluminum films that will retain to a high degree its physicochemical and functional properties that allows to reduce the logistical costs of transport and storage and to be a new offer of raw material for the food, cosmetic and pharmaceutical industries.

**Keywords:** Strawberry, suspension stability, spray drying, fluized bed agglomeration, storage stability

# Contenido

	Pág.
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XX</b>
<b>Interés del estudio</b> .....	<b>21</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>23</b>
Generalidades de la fresa .....	23
Efectos sobre la salud .....	24
Producción internacional .....	25
Producción nacional .....	25
La importancia de los antioxidantes en la fresa .....	26
Secado por aspersión .....	27
Efecto de las variables del proceso de secado sobre las propiedades de los polvos	30
Limitaciones del secado por atomización .....	33
Secado por aspersión de fresa .....	33
Aglomeración.....	35
Propiedades de los polvos aglomerados .....	37
Aglomeración en lecho fluidizado .....	37
Aglomeración de polvos de frutas .....	38
<b>Objetivos</b> .....	<b>40</b>
Objetivo general.....	40
Objetivos específicos .....	40
<b>Capítulo 1 Avances tecnológicos en secado de fresas: revisión</b> .....	<b>41</b>
1.1 Resumen .....	41
Abstract .....	41
1.2 Introducción .....	42
1.3 Desarrollo del tema.....	43
1.3.1 Pretratamientos .....	43
1.3.2 Tecnologías de secado. ....	43
1.3.3 Integración de tecnologías.....	50
1.4 Conclusiones .....	51
1.5 Referencias.....	52



<b>Capítulo 2 Influence of the formulation and homogenization process on the physicochemical stability of strawberry suspensions .....</b>	<b>57</b>
2.1 Abstract .....	57
2.2 Introduction .....	57
2.3 Methodology .....	59
2.3.1 Materials .....	59
2.3.2 Strawberry characterization .....	59
2.3.3 Preparation of strawberry suspensions .....	59
2.3.4 Characterization of the suspensions .....	60
2.3.5 Statistical design .....	60
2.4 Results and discussion .....	60
2.4.1 Characterization of the strawberry in fresh state .....	60
2.4.2 Characterization of strawberry-based suspensions .....	62
2.4.3 Experimental optimization .....	69
2.5 Conclusion .....	70
2.6 Acknowledgement .....	70
2.7 Bibliographic .....	70
<b>Capítulo 3 Microencapsulación de extracto de fresa: optimización experimental del proceso y formulación .....</b>	<b>77</b>
3.1 Resumen .....	77
3.2 Introducción .....	78
3.3 Materiales y métodos .....	81
3.3.1 Materias primas .....	81
3.3.2 Preparación de las suspensiones de alimentación al SD .....	81
3.3.3 Proceso de obtención de las microcápsulas de extracto de fresa (SEM) .....	81
3.3.4 Caracterización de la pulpa y las SEM .....	82
3.3.5 Análisis estadístico .....	83
3.4 Resultados y discusión .....	84
3.4.1 Pulpa de fresa homogenizada .....	84
3.4.2 Proceso de microencapsulación de las suspensiones de HSP .....	84
3.4.3 Humedad y actividad acuosa .....	85
3.4.3 Propiedades de flujo de las SEM .....	89
3.4.5 Instantanización de los SEM .....	91
3.4.6 Capacidad antioxidante (ABTS, DPPH) y fenoles totales de las SEM .....	94
3.4.7 Rendimiento .....	96
3.4.8 Color .....	98
3.4.9 Tamaño de partícula $D_{[3;2]}$ .....	99
3.5 Optimización experimental del proceso .....	99
3.6 Conclusiones .....	101
3.7 Bibliografía .....	101
<b>Capítulo 4 Aglomeración en lecho fluidizado de mezclas de polvo de fresa obtenidas por secado por atomización .....</b>	<b>110</b>
4.1 Resumen .....	110
4.2 Introducción .....	111
4.3 Materiales y métodos .....	113
4.3.1 Materia prima .....	113
4.3.2 Proceso de aglomeración .....	114
4.3.3 Caracterización de los productos .....	114
4.3.4 Morfología de las partículas (SEM) .....	115

4.3.5 Temperatura de transición vítrea (Tg).....	116
4.3.6 Análisis de datos. ....	116
4.4 Resultados y discusión .....	116
4.4.1 Humedad y actividad acuosa.....	116
4.4.2 Propiedades de flujo de la MPFA. ....	120
4.4.3 Tamaño de partícula de la MPFA. ....	123
4.4.4 Instantanización de la MPFA. ....	124
4.4.5 Capacidad antioxidante y fenoles totales de la MPFA. ....	125
4.5 Optimización y validación experimental .....	126
4.6 Morfología de las partículas (SEM). ....	128
4.7 Temperatura de transición vítrea. ....	131
4.8 Conclusiones .....	132
4.9 Bibliografía.....	132
<b>Capítulo 5 Estabilidad durante el almacenamiento de una mezcla de polvo de fresa obtenida por secado por atomización y aglomerada en lecho fluidizado.....</b>	<b>137</b>
5.1 Resumen .....	137
5.2 Introducción .....	138
5.2 Materiales y métodos.....	140
5.2.1 Materias primas.....	140
5.2.2 Preparación de la suspensión de alimentación al secador por atomización... 140	
5.2.3 Proceso de secado por aspersion. ....	140
5.2.4 Proceso de aglomeración. ....	141
5.2.5 Almacenamiento.....	141
5.2.6 Caracterización de propiedades de la MPAF.....	141
5.2.7 Análisis de datos. ....	143
5.3 Resultados y discusión .....	143
5.3.1 Humedad y actividad acuosa.....	143
5.3.2 Propiedades de Flujo.....	148
5.3.3 Propiedades de Instantanización.....	149
5.3.4 Capacidad antioxidante y fenoles totales.....	151
5.3.5 Vitamina C.....	153
5.3.6 Antocianinas.....	154
5.3.7 Color.....	155
<b>5.4 Conclusiones.....</b>	<b>157</b>
5.5 Referencias bibliográficas .....	157
5.7 Referencias bibliográficas de la introducción .....	164
<b>Anexos .....</b>	<b>169</b>
Anexo 1 Revista Biotecnología del Sector Agropecuario y Agroindustrial .....	169
<b>Directrices para autores/as .....</b>	<b>169</b>
<b>Aviso de derechos de autor/a .....</b>	<b>173</b>
<b>Declaración de privacidad.....</b>	<b>173</b>
Anexo 2 Instructions to authors Food Science and Technology .....	174

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1</b> Área cosechada y producción de fresa en Colombia (MADR, 2018).....	26
<b>Figura 2</b> Response surface graphs of strawberry-based suspensions .....	67
<b>Figura 3</b> Efecto de IAT y MD sobre AR.....	90
<b>Figura 4</b> Efecto de IAT y ADS sobre S (a y b); Efecto de IAT y OAT sobre S (c) .....	91
<b>Figura 5</b> A) Efecto de IAT y OAT sobre Hu; b. Efecto de IAT y MD sobre Hu; c. Efecto de MD y VDA sobre Hu .....	92
<b>Figura 6</b> Efecto de MD y IAT sobre Hy .....	94
<b>Figura 7</b> Gráfico de superficie de respuesta del ABTS de las SEM.....	96
<b>Figura 8</b> Gráficos de superficie de respuesta del Y de las SEM.....	97
<b>Figura 9</b> Gráficos de superficie de respuesta de la L* de las SEM.... ¡Error! Marcador no definido.	
<b>Figura 10</b> Gráficos de superficie de respuesta de Xw y aw de la MPFA .....	120
<b>Figura 11</b> Gráficos de superficie de respuesta de las propiedades de flujo de la MPFA .....	122
<b>Figura 12</b> Gráficos de superficie de respuesta de la $[\sqrt{D}]_{-0,2}$ de la MPFA.....	124
<b>Figura 13</b> Micrografías por SEM de las partículas: materia prima (a) 100X, (b) 300X y (c) 1000X, y MPF aglomerada: (d) 100X, (e) 200X y (f) 600X.....	130
<b>Figura 14</b> Evolución en el tiempo (días) de los atributos de calidad de los MPAF durante el almacenamiento ( azul-15°C, rojo- 25°C y naranja-35°).....	145
<b>Figura 15</b> Color de los aglomerados a 150 y 180 días a las T de 15,25 y 35 °C .....	

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1</b> Physical-chemical and physical characterization of strawberry pulp .....	60
<b>Tabla 2</b> Stability assessment of strawberry-based suspension.....	63
<b>Tabla 3</b> p-values for the response surface models of the dependent variables as a function of the independent ones.....	65
<b>Tabla 4</b> Optimization using the design optimization module .....	70
<b>Tabla 5</b> Relación entre CI and HI .....	83
<b>Tabla 6</b> Propiedades de las SEM según diseño experimental.....	86
<b>Tabla 7</b> Criterios y resultados de la optimización validación experimental y PEA.....	100
<b>Tabla 8</b> Clasificación de fluidez y cohesividad de acuerdo con los IC e IH.....	115
<b>Tabla 9</b> Caracterización del MPFA según diseño experimental.....	118
<b>Tabla 10</b> Valores p para los modelos de superficie de respuesta de la MPFA .....	119
<b>Tabla 11</b> Coeficientes y R <sup>2</sup> para los modelos de las var. dependientes de las MPFA....	127
<b>Tabla 12</b> Criterios de optimización y optimización experimental multi-objetivo del proceso de aglomeración de la MPFA .....	128
<b>Tabla 13</b> Resultados del ANOVA del almacenamiento de la MPFA .....	147

## Interés del estudio

El presente trabajo de investigación corresponde a la Integración a escala piloto de los procesos de secado por atomización y aglomeración para la elaboración de un alimento de fresa con potencial efecto antioxidante, como parte del proyecto “Fortalecimiento de la competitividad de las cadenas productivas de mora, fresa y uchuva en el departamento de Antioquia, mediante el desarrollo y escalamiento industrial de alimentos funcionales aglomerados con potencial efecto antioxidante, financiado mediante la Convocatoria 805-2018 convocatoria regional cierre de brechas departamento de Antioquia, del programa nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Ciencias Agropecuarias.

El proyecto se realizó bajo los lineamientos del Grupo de Investigación en Alimentos Funcionales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, utilizando la técnica de secado por aspersion y la integración del proceso de aglomeración por la técnica de lecho fluidizado.

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y la secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural del departamento de Antioquia en marco del programa Siembra y Cadenas Productivas han identificado las cadenas productivas de mayor importancia para el desarrollo sostenible del sector agropecuario. Dentro de ellas, las cadenas productivas de frutas pequeñas buscan suplir algunas demandas a través del cierre de brechas tecnológicas que les permitan a los actores de la cadena fortalecer su posición a través de la agregación de valor a sus procesos. La Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, a través del Grupo de Investigación de Alimentos Funcionales (GAF), ha venido conformando redes de conocimiento que involucran a la academia, la empresa y los centros de investigación que contribuyen a suplir estas demandas. Las posibilidades de aprovechamiento de las características de la fresa se ven afectadas por el alto nivel de perecibilidad dada las características morfológicas y metabólicas del fruto, lo que representa un porcentaje alto de pérdidas en la producción, cosecha y pos-cosecha (Restrepo & Aristizábal, 2010); además, del encarecimiento de los costos logísticos para llevarla a mercados nacionales e internacionales. Se requiere de la adopción de tecnologías

de transformación que subsanen estas deficiencias; razón por lo cual se propone evaluar la agregación de valor a través de la transformación del producto fresco en un producto alimenticio funcional utilizando las tecnologías de secado por atomización y aglomeración. Las características del nuevo producto permitirán acceder a mercados nacionales e internacionales sin incurrir en los altos costos de comercialización de productos refrigerados o congelados y satisfacer las características de calidad y funcionalidad de un producto instantáneo.

La obtención de polvos aglomerados de frutas requiere del estudio del efecto de las variables de proceso sobre la calidad y la microestructura del producto, que permitan identificar las condiciones de operación en las etapas de preparación de la suspensión de la fresa, del proceso de secado por atomización y del proceso de aglomeración, que garanticen la idoneidad del producto en las etapas de almacenamiento, transporte, distribución y consumo.

En el documento CONPES 3527 de 2008, Política de Competitividad y Productividad se destaca dentro de los quince planes de acción; el plan de acción tres, competitividad en el sector agropecuario. La implementación de los 15 planes de acción tiene por objetivo para el año 2032 la transformación productiva del país, potencializando sectores de clase mundial, para situar a la economía Colombiana en una economía de ingresos medios en el contexto internacional. El plan de acción de Competitividad para el sector agropecuario es liderado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. El sector agropecuario presenta grandes oportunidades de participar en las metas de crecimiento de la economía y esto se ha evidenciado con los resultados de crecimiento del 25% del PIB agropecuario entre los años 2010-2017, y se previó un crecimiento del 2.5% para el año 2018 (La República, 2018).

La finalidad de este proyecto fue integrar a escala piloto los procesos de secado por atomización y aglomeración para la elaboración de un alimento de fresa con potencial efecto antioxidante.

# Introducción

## Generalidades de la fresa

La fresa (*fragaria spp*) es una fruta de distribución mundial, muy apreciada para consumo fresco y la elaboración de postres, debido a sus cualidades de color, aroma y acidez, además es una fruta rica en vitaminas A y C. La fresa es una planta rastrera que pertenece a la familia de las rosáceas y al género *Fragaria*, cultivada por su fruto comestible. Las variedades cultivadas comercialmente son por lo general híbridos. La planta de fresa es perenne ya que, por su sistema de crecimiento, constantemente está formando nuevos tallos, lo que hace que permanezca viva en forma indefinida. El fruto, que se conoce como "fresa", es en realidad un engrosamiento del receptáculo floral, siendo los puntitos que hay sobre ella los auténticos frutos. Dentro de las más de 160 especies del género *Fragaria* se puede mencionar el híbrido resultante del cruce de *Fragaria chiloensis* y *Fragaria virginiana*, dando como resultado *Fragaria ananassa* nombre con el que se conoce todas las variedades de fresa (Angulo, 2009).

La fresa es un cultivo que se adapta a muchos climas prefiriendo aquellos en que predomina el frío, tolera temperaturas bajas, pero no soporta las heladas que producen un deterioro notable en su sistema reproductor; en Colombia se adapta muy bien a alturas comprendidas entre los 1.900 a los 2.600 msnm, con temperaturas que van desde los 10° a los 18° centígrados (Angulo, 2009). La fresa prefiere suelos sueltos, franco-arcillosos o franco-arenosos con pH entre 5.5 y 6.5, con buen drenaje para evitar los encharcamientos y posibles problemas de pudriciones en las raíces, ricos en materia orgánica (Angulo, 2009). El sabor es definido por el balance de azúcar y acidez, ya que cuenta con una serie de azúcares y ácidos con diferente grado de concentración según la variedad. Generalmente son cónicas y alargadas; sin embargo, dependiendo de la variedad puede variar la forma. La fresa ha de tener un brillo intenso y un color rojizo oscuro y uniforme, aunque puede ser más rosado o anaranjado dependiendo de la variedad. El color natural en estado maduro es rojo y solo dos variedades maduran con un color blanco. Su pulpa es de color blanco, pero también puede ser rojizo de acuerdo con la variedad. Su textura es suave y presenta una firmeza media (Cámara Comercio de Bogotá, 2015). Se destaca en la composición de la fresa, su alto contenido de humedad (90,7%), su alta actividad acuosa (0.983),

propiedades que explican su alto nivel de deterioro; y la composición de compuestos bioactivos (compuestos fenólicos y vitamina c), relacionadas con las propiedades funcionales de la fresa.

## **Efectos sobre la salud**

Las fresas son una rica fuente de compuestos nutricionales incluyendo minerales, vitaminas, ácidos grasos, fibra y metabolitos secundarios, como son los polifenoles, los cuales son los compuestos bioactivos de mayor interés presentes en esta fruta (Forbes-Hernandez et al., 2016). La principal clase de polifenoles de la fresa son los flavonoides, seguido por los ellagitaninas y ácidos fenólicos; todos estos compuestos muestran una enorme potencialidad en humanos gracias a su capacidad antioxidante, antiinflamatoria, antihipertensiva y habilidades anti proliferativas (Hakkinen, Mykkanen, Karenlampi, Heinonen, & Torronen, 1996). Estudios poblacionales proveen algunas observaciones de los efectos potenciales preventivos de los compuestos fotoquímicos de la fresa sobre el riesgo de tipos particulares de cáncer, los cuales han sido postulados en varios estudios experimentales a nivel celular e investigaciones en animales (Basu, Nguyen, Betts, & Lyons, 2014). Extractos de fresa, así como compuestos fenólicos purificados y productos de hidrólisis que incluyen el tirosol y el ácido hidroxifenil acético, mostraron actividad anticancerígena en estudios *in vitro* e *in vivo* (Forbes-Hernandez *et al.*, 2016).

Dentro de las frutas, las bayas presentan una alta contribución en la mejora de la salud cardiovascular y es un tópico de interés médico; en el caso particular de la fresa, su principal efecto positivo en la prevención de efectos cardiovasculares se puede asociar a tres aspectos: antioxidante, antihipertensivo y anti arterioesclerótico. Evidencia científica en modelos de estudios celulares y animales indican su papel en la reducción de daño oxidativo e inflamatorio, el cual juega un papel crucial en el inicio y progresión de la arterioesclerosis (Basu *et al.*, 2010). Evaluaciones desarrolladas sobre modelos de estudios de obesidad y diabetes mostraron que el consumo de fresa o extractos de antocianinas purificadas pueden normalizar los niveles de glucosa en sangre y limitar la asimilación y el transporte, a través de la inhibición de las enzimas amilasa y la lipasa pancreática y la angiotensina, las cuales se pueden relacionar con el manejo terapéutico de la hiperglicemia y la hipertensión (Lyons & Basu, 2012).



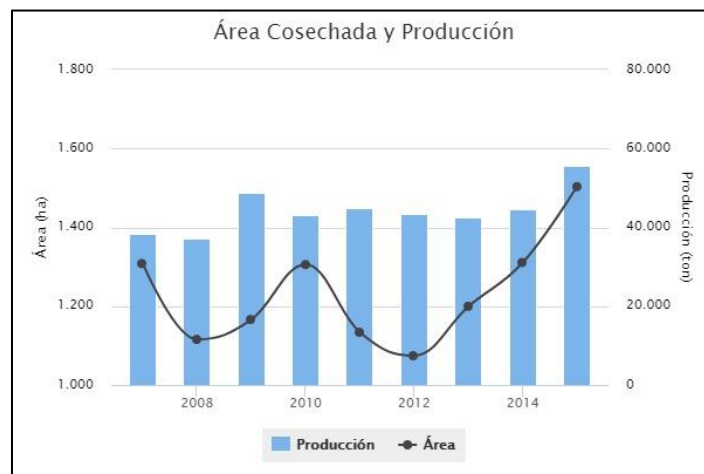
## **Producción internacional**

De acuerdo con los más recientes datos publicados por la FAO (2018), los cuales presentan información hasta el año 2016, los cinco países con mayor producción de fresa (ton) en el mundo son China (3.801.865), Estados Unidos (1.420.570), Turquía (470.548), México (468.248) y España (366.161). La producción mundial de fresa en el año 2016 fue de 9.200 millones de toneladas. Colombia participa con el 0,61% de la producción mundial. Se proyecta un mercado mundial creciente con demandas insatisfechas, que plantea la posibilidad de cubrir esos espacios. Para el 2029 se calcula un crecimiento del volumen comercial mundial del 19,3%, lo cual permitiría que Colombia pudiera incursionar de manera representativa en el mercado internacional. Los principales países exportadores de fresa en el mundo son: España, Estados Unidos, México y los países bajos; ellos representan el 70% del mercado internacional de la fresa. Si se cruza las cifras de producción y exportación, se puede inferir que la producción en China sule las demandas internas del país. El consumo per cápita (kg/año) en economías emergentes presionan una fuerte demanda por el cultivo; Turquía presenta la mayor tasa per cápita de consumo de fresa (5,2), le sigue Egipto (4,9) y Estados Unidos (4,5). México incrementó su consumo per cápita en 11% en el año 2016, similar comportamiento presenta la población China (FAO, 2018).

## **Producción nacional**

En la figura 1 se presenta información del comportamiento del cultivo de la fresa en Colombia entre los años 2007-2015. Se identifica un área promedio de siembre de 1.500 ha por año, con una producción para el año 2016 de 57.000 ton, lo que equivale a un rendimiento de 38 ton/ha (MADR, 2018). El departamento de Cundinamarca es el principal productor de fresa en Colombia; su producción representa el 67,39%, seguido muy de lejos por el departamento de Antioquia con un 16,7%. El departamento de Cundinamarca también se destaca por liderar en el país la cifra de rendimiento del cultivo; 51,48 ton/ha vs 36,6 ton/ha para Antioquia (MADR, 2018). En el ámbito regional en los municipios del Altiplano del Oriente se concentra la producción de fresa, gracias a que estos territorios satisfacen las necesidades agronómicas del cultivo. Se identifica el liderazgo en la producción de fresa por parte de los municipios de La Unión y San Vicente Ferrer. La producción en el departamento corresponde aproximadamente al 10.000 ton, centralizada en su mayoría en el municipio de La Unión (MADR, 2018; Inforural, 2018).

**Figura 1-1** Área cosechada y producción de fresa en Colombia (MADR, 2018)



Fuente: MADR 2018

## La importancia de los antioxidantes en la fresa

La química de los radicales libres y los antioxidantes está basada en un equilibrio entre ambos. Los radicales libres son compuestos reactivos que tienden a capturar electrones de moléculas biológicas más estables con el objetivo de estabilizarse ellas mismas (F. Shahidi, 2000). Los antioxidantes son sustancias químicas que retrasan, previenen o retardan la acción de los radicales libres. En condiciones patológicas, se presenta una sobreproducción de radicales debido a la presencia de compuestos prooxidantes y de otros diferentes factores de riesgo como fumar, el estrés, el sedentarismo, entre otros, generando un incremento en el estrés oxidativo.

Químicamente se han identificado tres etapas en el proceso oxidativo; el primero, denominado iniciación, en el cual los radicales son formados; la segunda fase, etapa de propagación donde los radicales libres reaccionan con otras moléculas; y por último, la tercera etapa, de terminación, en donde se forman otras moléculas ya estables, como aldehídos, cetonas, alcoholes, hidrocarburos, etc. (Choe & Min, 2009). Si los radicales libres no se neutralizan a tiempo, estos pueden producir muchas enfermedades en muchos órganos; Alzheimer, parkinson, diabetes, artritis reumatoides, esclerosis múltiple, hipertensión, asma, dislipedemia, entre otras. Para contrarrestar estas enfermedades, el cuerpo tiene un sistema de antioxidantes endógenos que actúan como la primera línea de defensa, pero si esta batería de enzimas y otras moléculas no son suficientes, es donde el

cuerpo humano echa mano de los antioxidantes de los alimentos, generalmente frutas, verduras y carne, como fuente de compuestos de antioxidantes exógenos, de ahí la importancia del consumo de frutas y verduras frescas como mecanismo de ayuda al sistema antioxidante endógeno. (Lobo, Patil, Phatak, & Chandra, 2010). Estos antioxidantes exógenos pueden ser flavonoides, compuestos fenólicos, carotenoides, vitaminas, minerales y compuestos organosulfurados; siendo la principal fuente de estos compuestos la frutas y vegetales. (Carocho & Ferreira, 2013). Estos compuestos ejercen su actividad a través de varios mecanismos: (1) Atrapador de radicales libres, (2) por transferencia de electrones y (3) quelación de iones metálicos que son sustancias prooxidantes (catalizan la reacciones oxidativas) (Fereidoon Shahidi, Janitha, & Wanasundara, 1992). Son muchos los tejidos de plantas (frutos, hojas, tallos y flores) que han sido objeto de cuantificación de compuestos con capacidad antioxidante, en estos estudios se han identificado en los extractos los compuestos a los que se les atribuye tal actividad.

Las fresas han atraído la atención de consumidores e investigadores debido a que poseen mayor actividad antioxidante total comparada con otras frutas como la toronja, naranja, uva roja, kiwi, banano, manzana, tomate, pera y melón, evaluadas como frutas frescas (Carvajal *et al.*, 2011). Se han cuantificado 13,03  $\mu$  mol Trolox/g fresa fresca (Serrano, Sousa, Trigo, & Bronze, 2012). En un estudio que evaluó el contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en frutas cultivadas en Colombia, se encontró que la curuba, seguida por la mora y la fresa, son las frutas con mayor contenido fenólico; en referencia a la capacidad antioxidante la fresa le sigue a la curuba como la fruta con mayor capacidad antioxidante (Zapata, Piedrahita, & Rojano, 2014).

## **Secado por aspersión**

Hoy en día, el rápido desarrollo económico ha cambiado la tendencia del consumo de alimentos ricos en calorías por la garantía de la ingestión de nutrientes en la dieta. Los consumidores de hoy son conscientes de la importancia de las vitaminas; este escenario ha aumentado la demanda del mercado global hacia las frutas frescas (Shishir & Chen, 2017). Con el fin de manejar la demanda del mercado durante todo el año, las frutas frescas se conservan utilizando diferentes técnicas. El alto contenido de humedad influye de manera directa en la alta  $a_w$  que conduce a la pérdida de calidad al aumentar la actividad

de las enzimas y el crecimiento microbiano (Phisut, 2012). Diversos métodos de secado han sido utilizados para conservar las frutas, debido a que su objetivo es reducir la  $a_w$ . Dentro de las técnicas de secado aplicadas en alimentos, se resaltan las siguientes: secado conectivo con aire, secado al vacío, liofilización, secado por atomización o aspersión (SA), secado en ventanas refractivas, entre otros. Dentro de las técnicas de secado, el secado por atomización es aplicado para producir polvos de frutas; se utiliza ampliamente en la industria láctea, bebidas de chocolate, entre otros (Johansen Crosby, 1989).

El SA es una operación unitaria por la cual un producto líquido se atomiza en una corriente de gas caliente para obtener instantáneamente un polvo. El gas que se usa generalmente es aire o, más raramente, un gas inerte, particularmente gas nitrógeno con el objetivo de evitar reacciones de oxidación que pueden deteriorar la calidad del producto. La alimentación líquida inicial puede ser una solución, una emulsión o una suspensión que se obtiene de la transformación de la fruta en una pulpa a la que se le mezcla algunos componentes que mejoran la estabilidad del polvo y mejora las condiciones de secado (Gharsallaoui, Roudaut, Chambin, Voilley, & Saurel, 2007). El SA puede usarse tanto para productos resistentes al calor como para productos sensibles al calor, debido a que el tiempo de contacto entre la partícula atomizada y la corriente de aire caliente es muy corto. El proceso de SA puede producir un producto final de buena calidad con poca actividad de agua y reducir el peso, lo que resulta en un fácil almacenamiento y transporte. Las propiedades fisicoquímicas del producto final dependen principalmente de la temperatura de entrada y salida del aire, flujo de aire, flujo de alimentación, la velocidad del atomizador, los tipos de ayudantes de secado y su concentración (Phisut, 2012). La atomización de las partículas permite el incremento sustancial del área superficial de contacto con la corriente gaseosa, produciendo el secado instantáneo (formación del polvo). El atomizado de la corriente se puede obtener por medio de boquillas difusoras o través del uso de discos que giran a velocidades comprendidas entre los 10.000-24.000 rpm. La fruta en polvo generada en el proceso generalmente se separa de la corriente del gas con la ayuda de un ciclón (Gharsallaoui *et al.*, 2007).

El SA está integrado por las siguientes etapas:

Preparación de la alimentación. Se obtiene la pulpa de fruta homogenizada y estabilizada con hidrocoloides; también se adiciona agentes de secado para incrementar la temperatura de transición vítrea de la mezcla. En procesos a gran escala se concentra el jugo de la fruta a 50 ° Brix con el objetivo de reducir los costos de la operación (Tontul & Topuz, 2017).

Atomización. La atomización es el proceso de reducción del tamaño de partícula de una corriente líquida en gotas con un diámetro entre 20 - 180  $\mu\text{m}$ , y tiene por objetivo incrementar el área de contacto entre la corriente líquida y la corriente gaseosa para el desarrollo de los procesos simultáneos de transferencia de calor y masa. La elección de la configuración del atomizador depende de la naturaleza y la viscosidad de la alimentación y las características deseadas del producto seco (Johansen Crosby, 1989).

El contacto entre la corriente líquida atomizada y la corriente gaseosa se realiza a través de una de las siguientes configuraciones de flujo: contracorriente; las dos corrientes se mueven en direcciones contrarias y co-corriente; las dos corrientes se mueven en la misma dirección.

Secado de las partículas. El área de transferencia para el proceso de secado está definida por el contacto interfacial de las partículas atomizadas y el gas. Las características de suministro del gas de secado (alta temperatura 150-220 °C y baja humedad relativa) favorecen las condiciones para la evaporación instantánea del agua de las partículas atomizadas, haciendo que la temperatura del gas descienda rápidamente (50-80°C) y se forme el polvo (Shishir & Chen, 2017).

Separación de los polvos. Las partículas de mayor peso se depositan en la sección inferior cónica del equipo; los polvos que son arrastrados por la corriente de gas son separados por un ciclón exterior evitando emisión de material particulado a la atmósfera.

El polvo de frutas obtenido por secado por atomización puede tener algunos problemas con sus propiedades, como la pegajosidad, la higroscopicidad y la solubilidad; debido a la presencia de azúcares y ácidos de bajo peso molecular, que tienen una baja temperatura de transición vítrea (Bhandari *et al.*, 1993). La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), es la temperatura a la cual la fase amorfa del polímero se convierte entre estados gomosos y vítreos. La baja  $T_g$ , la alta hidroscofia, el bajo punto de fusión y la alta solubilidad en agua de los sólidos secos producen los productos altamente pegajosos, característica no deseable en los procesos de secado, almacenamiento, transporte y distribución. Estos

problemas pueden resolverse mediante la adición de algunos ayudantes de secado, como polímeros y gomas a la corriente de alimentación antes de ser atomizados. Adicionalmente, los ayudantes de secado también se utilizan para microencapsular las partículas de los polvos y conferirle protección a la humedad y al oxígeno. Los ayudantes de secado pueden proteger los componentes sensibles de los alimentos contra las condiciones ambientales desfavorables, enmascarar o preservar sabores y aromas, reducir la volatilidad y la reactividad y proporcionar un atractivo adicional para la comercialización de productos alimenticios (Jittanit, Niti-Att, & Techanuntachaikul, 2010). Los ayudantes de secado más comunes utilizados para los jugos de frutas son maltodextrinas y goma arábica. Son muchos los estudios en donde evalúan el efecto del grado de hidrólisis de la maltodextrina y la concentración de estos hidrocoloides sobre las propiedades de los polvos; en especial su efecto sobre la Tg, humedad y actividad acuosa. Últimamente se han evaluado proteínas separadas de suero y caseinatos cálcicos como surfactantes, obteniéndose mejores rendimientos; no se ha observado efecto de la adición de las proteínas sobre la Tg (Tontul & Topuz, 2017).

### **Efecto de las variables del proceso de secado sobre las propiedades de los polvos**

Temperatura del aire de entrada. Propiedades como contenido de humedad, densidad al granel, tamaño de partícula, higroscopicidad y morfología de los polvos se afectan con la temperatura de entrada. Como es de esperarse al incrementar la temperatura de entrada, se disminuye la humedad de los polvos secados por atomización por un mayor incremento de la velocidad de secado (Shishir & Chen, 2017). Un incremento en la temperatura de secado causa una más rápida evaporación del agua, la cual forma micro esferas rápidamente sin que se presente encogimiento de las partículas, generando partículas más grandes; este comportamiento fue identificado en el secado de açai al incrementar la temperatura de 132 a 220°C (Tonon, Brabet, Pallet, Brat, & Hubinger, 2009). y en el secado de guayaba rosada (Islam Shishir, Taip, Aziz, Talib, & Hossain Sarker, 2016). Un mayor tamaño de partícula está relacionado con la obtención de una menor densidad a granel del material. Se presentan resultados contrarios sobre el efecto de la temperatura de entrada sobre la productividad de polvos secados por atomización (Tontul & Topuz, 2017). Se ha observado efecto adverso sobre el rendimiento en el secado de azúcar de caña; de otro lado, se ha encontrado una mayor productividad a incrementar la temperatura de entrada

en el secado de tomate (Athanasia M. Goula, Adamopoulos, & Kazakis, 2004), tamarindo (Muzaffar & Kumar, 2015) y morera negra (Fazaeli, Emam-Djomeh, Kalbasi Ashtari, & Omid, 2012). El efecto positivo del incremento de la temperatura del aire sobre el rendimiento se explica en que a estas condiciones se alcanzan mayores eficiencias en los procesos de transferencia de masa y calor. En el secado de jugo de açai y tomate se encontró que el incremento de la temperatura del aire produce polvos más higroscópicos, ya que a mayor temperatura el polvo presenta menor humedad residual, incrementando su capacidad de adsorción de humedad ambiental (Tonon, Brabet, & Hubinger, 2008).

Se ha identificado que los polvos secados a altas temperaturas presentan estructuras más rígidas y con costras más porosas; mientras que los polvos secados a menores temperaturas presentan estructuras más friables y susceptibles al colapso (Nijdam & Langrish, 2006). En los procesos de secado con gases a alta temperatura se presenta deterioro de los pigmentos y vitaminas de las matrices alimentarias; el SA; aunque el deterioro se ve reducido si se compara con otras técnicas de secado, debido al reducido tiempo de contacto entre las gotas atomizadas y la corriente de gas; es necesario identificar las condiciones que permitan mantener controlados estos deterioros. Se han reportado reducciones en los contenidos de carotenoides y antocianinas de las matrices alimentarias en el proceso de secado por atomización en pulpa de tomate (Athanasia M. Goula & Adamopoulos, 2008) y antocianinas en açai (Tonon et al., 2009). El mecanismo de deterioro se explica en el desarrollo de procesos oxidativos de los pigmentos que entran en contacto con el oxígeno presente en el aire de secado, en condiciones de temperatura alta y de actividad acuosa ( $a_w$ ) que favorecen los procesos degradativos.

La temperatura de transición vítrea de los polvos se afecta principalmente por la composición de la materia prima (azúcares y ácidos orgánicos) y los contenidos finales de humedad. Un incremento leve en la humedad puede transformar el polvo en estado gomoso. Hay controversia en el efecto de la temperatura de secado sobre la  $T_g$ , este comportamiento puede ser sustentado más en el efecto de la composición del material que en la temperatura de secado (Shishir & Chen, 2017). Por supuesto que la contribución de la humedad final del polvo sobre la  $T_g$  puede ser modulada con el incremento de la temperatura de secado y el uso de ayudantes de secado que tienen la característica de poseer una alta  $T_g$  debido a su naturaleza de ser polímeros de alto peso molecular.

Flujo de aire. El flujo de aire y la temperatura de este tienen un papel importante en la cinética y los procesos de transferencia de masa y calor en procesos de secado por atomización. El incremento en el flujo de aire de secado causa un incremento en la humedad de los polvos, ya que se reduce el tiempo de residencia de las partículas en el equipo (Phisut, 2012).

Ayudantes de secado. El rendimiento del proceso de secado se incrementa con el aumento del contenido del auxiliar de secado, la principal explicación de este comportamiento se sustenta en el incremento de la  $T_g$ , lo que permite operar a temperaturas en el proceso de secado inferiores a la  $T_g$ , evitando así que el producto se pegue en las paredes del equipo (Tontul & Topuz, 2017). El uso de ayudantes de secado tiene una concentración óptima, ya que concentraciones superiores pueden afectar la viscosidad de la corriente de alimentación, además de afectar las propiedades sensoriales del polvo de frutas por excederse en la dosificación. A su vez, el incremento en la concentración de los ayudantes de secado de fuentes como los carbohidratos hacen que los polvos de frutas presenten menos contenidos de humedad, obteniéndose polvos con menores contenidos de  $a_w$ ; un comportamiento diferente presentan las proteínas debido al incremento en la capacidad ligante de agua en su estado amorfo (Bhusari, Muzaffar, & Kumar, 2014). La solubilidad de los polvos de fruta puede incrementarse con el aumento del contenido de maltodextrina como ayudante de secado (Largo *et al.*, 2014). Un efecto similar presenta el incremento de la concentración de carbohidratos como agentes de secado sobre la densidad a granel del polvo de frutas; además, su efecto es mayor que el efecto de las proteínas como agentes de secado (Bhusari *et al.*, 2014). Los ayudantes de secado reducen la pegajosidad y la higroscopicidad de los polvos de frutas y vegetales; su selección depende del comportamiento fisicoquímico del material a procesar, que como ya se describió, se ve principalmente afectado por las bajas  $T_g$  de los azúcares y ácidos orgánicos (sacarosa 62°C, fructosa 5°C y glucosa 31°C) y los contenidos de humedad residual de los polvos (Shishir & Chen, 2017). Cuando la temperatura de secado es superior en 20 ° C a la  $T_g$  de producto, la movilidad molecular de los compuestos se incrementa, generando un producto pegajoso, higroscópico, de poca fluidez y bajo rendimiento (Bhandari *et al.*, 1993).

Flujo de alimentación. Se sabe que se incrementa el tamaño de las gotas si se aumenta el flujo de alimentación (manteniendo constante la presión en la boquilla de atomización o velocidad de giro del disco); esto trae como consecuencia que el proceso de secado ocurra



a una relación superficie/volumen más pequeña afectando el proceso de transferencia de calor y masa; y por lo tanto la remoción de agua (Muzaffar & Kumar, 2015). La situación puede ser tan extrema que se presenten problemas de goteo en el proceso. El incremento en la velocidad del disco o la presión de las boquillas permite obtener tamaños de gota más pequeñas, esto facilita el proceso de secado y se traduce en polvos de menor densidad (Athanasia M. Goula *et al.*, 2004). Al mismo tiempo, el incremento en la velocidad del disco reduce el tamaño de la gota y por ende produce polvos más finos y disminuye la densidad a granel.

### **Limitaciones del secado por atomización**

Aunque el secado por atomización se caracteriza por tener tiempos de secado muy cortos, el proceso requiere de temperaturas de secado relativamente altas, que puede deteriorar compuestos sensibles térmicamente (vitaminas, pigmentos, colores y olores); además, los materiales ricos en azúcares y ácidos orgánicos, son difíciles de secar directamente sin la ayuda de vehículos (agentes de secado), debido a su comportamiento pegajoso y sus bajas Tg, lo que produce problemas de deposición en el equipo y dificultades en el secado, lo mismo que la afectación en las propiedades de los polvos obtenidos (propiedades físicas, químicas y funcionales), de las que sobresalen las propie

dades de instantanización. Debido al gran número de variables de proceso a controlar y las particularidades de cada matriz alimentaria se hace necesario la evaluación del efecto de estas sobre las propiedades de los sólidos; es esencial encontrar las condiciones óptimas, las cuales aseguren eficiencia en el proceso y calidad del producto (Shishir & Chen, 2017).

### **Secado por aspersión de fresa**

Feguš *et al.* (2015) evaluaron el efecto de la temperatura de secado y el uso de ayudantes de secado sobre las propiedades de polvos de fruta, entre ellos la fresa; encontraron que fue necesario el uso de agentes de secado debido a las bajas Tg de los componentes de la fresa (glucosa, fructosa y sacarosa); además, el uso de la maltodextrina y las temperaturas de operación (130 °C -160 °C) afectaron el color del polvo de fresa. La alimentación al secador fue formulada en una proporción de sólidos de la pulpa: maltodextrina 2:1; esta fue alimentada al equipo a 25 °C. El equipo operó a un flujo de aire de 6.200 m<sup>3</sup>/h y a una velocidad del disco de 17.500 rpm. A diferencia de los procesos para la obtención de polvos

de banano y piña, no se presentó efecto de la temperatura sobre la capacidad antioxidante. Se identificó además que el incremento en la concentración de maltodextrina disminuyó la pegajosidad del polvo de fresa. En otro estudio se evaluó el efecto de la maltodextrina y la goma arábica sobre el secado de jugos de frutas (manzana, piña y fresa) (Freixo *et al.*, 2016). Los parámetros de operación del proceso fueron: presión de la boquilla 6,5 bar con boquilla 1 mm, temperatura de alimentación 40 °C, temperatura de secado 120/130 °C, temperatura de salida de gases 65/70°C, agentes de secado: maltodextrina/goma arábica evaluadas 1- 2 %; en la alimentación los sólidos como ayudante de secado fueron dosificados en una relación 4:1 frente a los sólidos de la fruta; como variable de respuesta se evaluó el rendimiento del proceso y  $a_w$ ; se encontró en el caso de la fresa, que para las dos temperaturas evaluadas y para los dos niveles de los ayudantes de secado, que los polvos dosificados con goma arábica presentaron menores  $a_w$  (0,3 vs 0,45); además el rendimiento del proceso mejoró con el incremento en la concentración de los agentes de secado y no se evidenció incremento en el rendimiento con el incremento de la temperatura. Se realizó un estudio de estabilidad de la pulpa de fresa secada por atomización, cuyo objetivo fue evaluar el efecto de la maltodextrina (MD) (equivalente de dextrosa DE 5 y DE 10), goma arábica y un almidón modificado, sobre la densidad aparente, la solubilidad, el contenido de antocianinas y la capacidad antioxidante. La alimentación fue preparada a 18° Brix, manteniendo una relación de auxiliares de secado: sólidos de fresa en una relación 2:1; la presión en la boquilla 7 bar, flujo de aire de 700 l/h, flujo de alimentación de la suspensión 15 ml/min, temperatura de entrada y salida del aire 180 °C y 90 °C respectivamente. El estudio de estabilidad se realizó por 90 días con evaluaciones cada 15 días. Las solubilidades de los polvos fueron muy similares; un poco inferior para la goma arábica, las densidades para los polvos con maltodextrinas fueron inferiores a los polvos secados con goma arábica y almidón modificado (0,4 g/cm<sup>3</sup> vs 0,5 g/cm<sup>3</sup>). El modelamiento de las isotermas de sorción por el método GAB no muestra grandes diferencias en la humedad de la monocapa (0,058 g agua/ g ss.). El seguimiento hecho en el tiempo de los contenidos de antocianinas y capacidad antioxidante de los polvos de fresa, muestra como los polvos obtenidos con goma arábica presentan mayor estabilidad (Oliveira *et al.*, 2013).

Se han realizado estudios de secado por atomización de mezclas de leche entera y pulpas de fresa, aprovechando las proteínas de la leche como ayudantes de secado (Bahnasawy,

Okasha, & Gonbeej, 2010); se evaluó el efecto de la temperatura de secado (190, 220 y 250 °C) y velocidad del disco atomizador (18.000, 22.000 y 26.000 rpm) sobre las propiedades de los polvos. La alimentación fue compuesta por una mezcla de leche: pulpa fresa (1:2), los gases de salida fueron mantenidos a 85 °C. Para cada una de las temperaturas, el incremento en la velocidad del disco generó polvos con menor densidad aparente; para cada velocidad del disco, no hubo efecto de la temperatura sobre la densidad de los polvos. El tiempo de humectación se ve afectado por la temperatura de secado y la velocidad del disco; el incremento en la temperatura para las velocidades evaluadas generó un menor tiempo de humectación; el incremento en las velocidades para cada una de las temperaturas sobre el tiempo de humectación también fue significativo (reducción); no obstante, los tiempos de humectación son altos (16 min en promedio) por causa del contenido de grasa en la mezcla. En concordancia con parámetros de operación de los secadores por atomización los incrementos en la temperatura de secado y velocidad de atomización producen mezclas en polvo con menores contenidos de humedad (2,72% a 250 °C y 26.000 rpm).

Los estudios de secado por atomización de fresa son escasos y los pocos realizados se han abordado manejando relaciones de sólidos de ayudantes de secado: sólidos de fruta en proporciones muy altas (2 y 4), lo que afecta las características sensoriales de los polvos de frutas, estos estudios adolecen de evaluaciones integrales de las condiciones de operación sobre propiedades químicas, físicas, estructurales, sensoriales y estabilidad, como son: humedad,  $a_w$ , tamaño de partícula, ángulo de reposo, higroscopicidad, solubilidad, dispersabilidad, fluidez, humectación, temperatura de transición vítrea, microestructura, rendimiento, capacidad antioxidante y polifenoles totales. No se reportan a la fecha estudios de optimización del proceso de secado para atomización de pulpa de fresa, ni estudios que desarrollen evaluaciones de la estabilidad de la corriente de alimentación al secador.

## **Aglomeración**

La aglomeración se define como un proceso durante el cual las partículas primarias se unen unas a otras, de forma tal que las partículas secundarias forman conglomerados. De acuerdo a esta definición, aún la compactación de materiales higroscópicos durante el almacenamiento, puede ser considerado como un tipo de aglomeración indeseable (Palzer,

2011). La aglomeración es el proceso en donde las partículas son forzadas a adherirse entre ellas en forma aleatoria, generando una estructura agregada porosa de un tamaño mayor al original (Mehr, Elahi, & Razavi, 2012). La aglomeración es un fenómeno físico que se describe como la unión de partículas sólidas, que es causado por efecto de interacciones físicas o químicas de corta distancia entre las partículas dando como resultado la modificación química de la superficie del sólido y las propiedades físicas del sólido (Dhanalakshmi, Ghosal, & Bhattacharya, 2011). Últimamente la aglomeración ha merecido especial interés en los polvos de alimentos por el efecto que tiene sobre la densidad y la porosidad. Es bien conocido el hecho que la instantanización o aglomeración mejora la reconstitución y las propiedades de flujo de los polvos; mejora la humectabilidad, la dispersión y la solubilidad y produce unas mejores propiedades de flujo (compactación y cohesión) (Benković & Bauman, 2011, Dhanalakshmi *et al.*, 2011). La instantanización también se aplica para el mejoramiento de las propiedades de transporte del material (fluidez) y el mejoramiento de las características visuales y sensoriales del producto y disminución de su densidad, como también la prevención de la compactación durante el almacenamiento (Szulc & Lenart, 2016, Dacanal & Menegalli, 2008).

El primer paso en cualquier proceso de aglomeración es hacer que las partículas primarias se pongan en contacto entre ellas ejerciendo algún tipo de fuerza externa. El siguiente paso es hacer que las fuerzas de adhesión sean fuertes para contrarrestar las fuerzas de ruptura. En alimentos en polvo esto se logra humedeciendo (solubilización parcial y formación de puentes líquidos) y posteriormente secando el material (puentes líquidos a puentes sólidos). Las tecnologías de aglomeración varían ampliamente en sus condiciones de proceso y en los principios de adhesión para unir las partículas entre ellas. Según el proceso de aglomeración se puede realizar a través de varias formas en conjunción con otras operaciones unitarias, tales como la atomización, la vaporización y el secado. La selección de un proceso específico de aglomeración depende de varios factores que incluyen propiedades físicas y químicas, tamaños de partícula de las materias primas y del producto deseado del aglomerado, sensibilidad térmica, y de los requerimientos de propiedades especiales como la solubilidad instantánea y la facilidad de la fluidez del material, entre otros. (Dhanalakshmi *et al.*, 2011). Los procesos de aglomeración se pueden clasificar en tres tipos de proceso: a) aglomeración por presión, b) Peletizado y granulación en húmedo y en seco y c) aglomeración por secado. Sobre la base del uso de agentes ligantes, la aglomeración se puede realizar en seco o en húmedo.

## Propiedades de los polvos aglomerados

El producto final debe tener las siguientes propiedades: aglomerado suficientemente poroso lo que favorece la succión rápida de líquidos por acción capilar, tamaño de partícula en un intervalo comprendido entre 0.2 mm y 2 mm y aglomerados suficientemente resistentes para facilitar su manejo, almacenamiento y transporte. Las propiedades más deseables de los polvos en el proceso de aglomeración se miden a través de la evaluación de las propiedades de disolución cuando los aglomerados se extienden sobre la superficie de un líquido. Los polvos aglomerados son evaluados a través del seguimiento de las siguientes propiedades (Dhanalakshmi *et al.*, 2011):

**Humectabilidad:** penetración de un líquido en los poros de un sistema aglomerado por acción capilar. Las condiciones que mejoran la humectabilidad son agregados con grandes tamaños de partícula y poros entre las partículas tan grandes que no excedan la porosidad crítica.

**Hundimiento:** capacidad de un aglomerado de hundirse en un líquido. Es el tiempo necesario para completar la humectación completa y la inmersión del polvo en la superficie del líquido.

**Dispersabilidad:** capacidad de dispersión con la aplicación de poca agitación.

**Solubilidad:** capacidad de disolverse el agregado en el líquido.

**Fluidez:** movimiento relativo de una masa de partículas y las partículas vecinas o las paredes de un contenedor. Las fuerzas involucradas en la fluidez del polvo son la fuerza gravitatoria, fricción, cohesión (atracción intra-partícula) y adhesión (atracción partícula superficie). Las propiedades de la superficie del sólido, forma y tamaño también afectan la fluidez de los polvos.

## Aglomeración en lecho fluidizado

El principio de operación de aglomeración en lecho fluidizado consiste en la fluidización de las partículas por un flujo de aire caliente y la humectación de las superficies de las partículas por la atomización del líquido ligante. Las colisiones entre partículas húmedas en el lecho de fluido forman puentes líquidos y las partículas coalescen. En el proceso de secado de estas partículas los puentes se solidifican produciendo una consolidación de los

agregados (Iveson, Litster, Hapgood, & Ennis, 2001). La aglomeración en lecho fluidizado es un proceso adecuado que produce gránulos sólidos con propiedades mejoradas, por ejemplo: alta porosidad, alta fluidez, resistencia mecánica y humectabilidad, las cuales son muy importantes en el manejo y empaque de productos alimentarios y farmacéuticos (Mehr *et al.*, 2012). El crecimiento del agregado depende de las condiciones operacionales, incluyendo la temperatura y flujo del aire de fluidización; naturaleza y carga del producto a aglomerar y las características del sistema de atomización; además de la característica del agente aglomerante. La aglomeración en lecho fluidizado es adecuada para obtener productos en forma de aglomerados con alta porosidad y una significativa mejora en la resistencia mecánica en procesos posteriores (Barbosa, Ortega, Juliano & Yan, 2014).

### **Aglomeración de polvos de frutas**

El proceso de aglomeración de polvos de frutas da respuesta a la problemática de las propiedades de los polvos relacionadas con la higroscopicidad, humectabilidad, solubilidad y dispersabilidad. En el proceso de aglomeración de polvos de *bayberry* se mejoró la humectabilidad (2 min para polvos vs 15 segundos para aglomerados), se redujo en un 40 % la densidad a granel y se incrementó el tamaño de partícula del material (Gong, Zhang, Mujumdar & Sun, 2008). En el proceso de aglomeración de la leche, se ha evaluado el efecto de la carga de polvos, composición de la leche (entera/descremada) y el flujo del material ligante sobre la cinética de crecimiento de partículas y las propiedades de instantanización (Barkouti, Turchiuli, Carcel, & Dumoulin, 2013). Se han clasificado en dos categorías las variables de proceso que afectan la distribución de tamaño de partícula de los productos aglomerados; unas referidas al producto: composición, distribución de tamaño de partícula de los polvos y la reactividad de la superficie; y las otras, referidas al equipo: geometría de la cámara, forma de inyección del ligante y la forma de distribución del gas de fluidización.

En el proceso de aglomeración de polvos de acerola (*Malpighia emarginata*) se evaluó el efecto de la temperatura del aire de fluidización, velocidad del aire de fluidización, flujo del aire de atomización y la altura de la boquilla de atomización en la cámara de aglomeración; se identificó el efecto del incremento de la temperatura del aire de fluidización sobre la disminución en la humedad y el tiempo de humectación. El incremento en la velocidad del aire de fluidización impidió el fenómeno de incrustación del material sobre la superficie de

la cámara y se disminuyó la compactación del material al aumentar la altura de la boquilla de atomización (Dacanal & Menegalli, 2008). En el proceso de optimización de instantanización de azúcar de caña en polvo se determinó que los efectos cuadráticos entre el flujo de agua y el tiempo de proceso tienen efecto sobre la fluidez y la densidad de las partículas; y el tiempo de atomización y la temperatura de entrada de aire de fluidización presentaron efecto sobre el tamaño de partícula del aglomerado; además, se disminuyó como resultado del proceso la reducción en el tiempo de disolución en agua (Mehr *et al.*, 2012).

Soportado en la poca identificación de literatura sobre el proceso de optimización del secado de fresa por atomización, de la inexistencia de estudios científicos de aglomeración de fresa incluida su integración con el proceso de secado por atomización, surge la necesidad de realizar este proyecto de investigación que permita generar el conocimiento suficiente del estudio del efecto de las variables de proceso en la elaboración de la suspensión de fresa, en el secado por atomización y la aglomeración en lecho fluidizado, con el objetivo de generar un producto innovador para la cadena productiva de la fresa en Colombia para los mercados nacional e internacional

# Objetivos

## Objetivo general

Desarrollar un protocolo de integración de los procesos de secado por atomización y aglomeración a escala piloto para la elaboración de un alimento funcional de fresa con potencial efecto antioxidante

## Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la presión y tiempo homogenización, y uso de goma arábiga sobre la estabilidad de la suspensión de fresa como corriente de alimentación al secado por atomización.
- Analizar el efecto de la maltodextrina, temperaturas de entrada y salida de aire y velocidad del disco de atomización sobre las propiedades físicas, químicas de los polvos de fresa obtenidos en el secado.
- Evaluar el efecto de la temperatura de entrada del aire de fluidización, presión de atomización del ligante y tiempo del proceso de aglomeración sobre las propiedades físicas y químicas de los aglomerados de fresa.
- Realizar un estudio de estabilidad en el almacenamiento de los polvos de fresa obtenidos en la integración de los procesos de secado por atomización y aglomeración.



# Capítulo 1 Avances tecnológicos en secado de fresas: revisión

TECHNOLOGICAL ADVANCES IN STRAWBERRIES DRYING: REVIEW

AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA SECAGEM DE MORANGO: REVISÃO

## 1.1 Resumen

La fresa es una baya con una tasa respiratoria alta que tiene muchos beneficios para la salud, presenta una demanda alta para consumo en fresco e industrial que requiere del uso de tecnologías de conservación. El secado es una operación utilizada para conservar productos agrícolas y su mayor reto es mantener la calidad organoléptica, nutricional y fisicoquímica; desafortunadamente el secado convectivo afecta estos atributos; razón por la cual se han adoptado las tecnologías de liofilización, microondas y vacío. Esta revisión recoge los resultados de la implementación de tecnologías emergentes, la integración de estas con los procesos de secado convencionales y su efecto sobre la calidad del producto y demandas del proceso. La integración de las tecnologías ha reducido la energía, tiempo y temperaturas de proceso, aumentando la retención de compuestos bioactivos y generando productos con mejor calidad.

**PALABRAS CLAVE:** Secado, Fresa, Tecnologías emergentes, Propiedades.

## Abstract

Strawberry is a berry with a high respiratory rate that has many health benefits, it presents a high demand for fresh and industrial consumption that requires the use of conservation technologies. Drying is an operation used to preserve agricultural products and its greatest challenge is to maintain organoleptic, nutritional, and physicochemical quality; unfortunately, convective drying affects these attributes; which is why freeze drying, microwave and vacuum technologies have been adopted. This review collects the results of the implementation of emerging technologies, their integration with conventional drying processes and their effect on product quality and process demands. The integration of technologies has reduced energy, time and process temperatures, increased the retention of bioactive compounds and generated better quality products.

**KEY WORDS:** Drying, *Fragaria anannasa*, Emerging technologies, Properties.

## Resumo

O morango é uma baya com uma alta taxa respiratória que traz muitos benefícios à saúde, apresenta uma alta demanda por consumo fresco e industrial que requer o uso de tecnologias de conservação. A secagem é uma operação usada para preservar produtos agrícolas e seu maior desafio é manter a qualidade organoléptica, nutricional e fisicoquímica; infelizmente a secagem por convecção afeta esses atributos; É por isso que as tecnologias de liofilização, microondas e vácuo foram adotadas. Esta revisão coleta os resultados da implementação de tecnologias emergentes, sua integração com os processos de secagem convencionais e seu efeito na qualidade do produto e nas demandas do processo. A integração de tecnologias reduziu a energia, o tempo e as temperaturas do processo, aumentando a retenção de compostos bioativos e gerando produtos de melhor qualidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Secagem, *Fragaria annanasa*, Tecnologías emergentes, Propriedades

## 1.2 Introducción

La remoción de humedad genera en el alimento unas condiciones que reducen la susceptibilidad del alimento al deterioro microbiológico y químico [1]. La reducción de humedad facilita las operaciones de transporte, almacenamiento y distribución, reduciendo los costos notablemente [1,2,3] Se reconocen los efectos negativos del secado convectivo (SC) o secado con aire caliente sobre los atributos de calidad de los alimentos [4,5].

Se ha generado una fuerte necesidad para desarrollar tecnologías de secado alternativas que consideran parámetros tan importantes como la capacidad operacional, control de proceso, tiempo, aspectos económicos, calidad del producto y aspectos de seguridad y ambientales. Estas nuevas tecnologías son integraciones de tecnologías convencionales y no convencionales, requeridas para dar respuesta a los requerimientos y necesidades de los consumidores y del mercado [6]. El secado influencia cambios en el color, textura, valor nutricional y actividad biológica, y es importante conocer el efecto de los diferentes pretratamientos, métodos de secado e integración de métodos sobre los atributos de calidad de la fresa [7].

Tomando como referente el tamaño del mercado del consumo de la fresa en el mundo, sus perspectivas de crecimiento, la tasa alta de deterioro y los beneficios sobre la salud, se hace necesario revisar los resultados de investigaciones de secado aplicadas a esta baya para ser utilizadas como referente para ser comparadas con la técnica de secado por atomización que será utilizada en el desarrollo experimental de esta propuesta investigativa e identificar los estudios elaborados sobre la problemática del secado por atomización y la aglomeración como proceso que mejora las propiedades de instantización de polvos secados por atomización.

La revisión recoge el producto de la búsqueda en bases de datos referenciales: Science Direct, Springer link, Pubmed, Scielo y Taylor & Francis en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2020 y con énfasis en secado de fresas, queriendo dar respuesta a la pregunta: que tipo de tecnologías se han utilizado en el secado de fresas, ¿cuáles son sus características principales y elementos diferenciadores? El documento presenta la siguiente estructura: 1. Pretratamientos utilizados en los procesos de secado 2. Tecnologías utilizadas en el secado de la fresa: secado solar, secado convectivo por aire caliente,

deshidratación osmótica, liofilización, secado por atomización, secado por microondas, secado por infrarrojo, secado asistido por ultrasonido y secado por radiofrecuencia; y, por último, en la última parte se describen y discuten la estrategia de integración de tecnologías, su efecto sobre la calidad y costo del proceso.

## 1.3 Desarrollo del tema

### 1.3.1 Pretratamientos

Un pretratamiento del secado es una operación previa que tiene por objetivo aumentar la velocidad y/o minimizar las pérdidas de calidad del producto. Los pretratamientos pueden ser físicos o químicos y se caracterizan por reducir la velocidad de las reacciones degradativas y/o generar micro canales, poros o eliminar ceras de la superficie para aumentar la porosidad [8]. El escaldado es un pretratamiento físico que inactiva enzimas degradativas, especialmente las polifenoloxidasas. El escaldado en vapor es más recomendado que el escaldado por inmersión en agua, ya que protege el color y mejora la velocidad de secado. Con el propósito de alcanzar mejores resultados sobre la calidad del producto, una serie de nuevas tecnologías han emergido como fuentes de energía: escaldado óhmico, escaldado por microondas, escaldado por ultrasonido asistido por calor y escaldado por radiofrecuencia [7]

La fresa está protegida por una delgada película de cera que reduce la difusión de la humedad [9, 10]; para acelerar el proceso de secado las frutas son pretratadas químicamente con esterres etílicos o metílicos o soluciones causticas para modificar la permeabilidad de la cutícula y acelerar el proceso de secado [10,11]. Desde el punto de vista biológico los pretratamientos térmicos buscan la inactivación de la enzima polifenoloxidasa, minimizando así la degradación de compuestos polifenolicos; además de conservar las propiedades bioactivas propias de estos compuestos; se identifica, además, los objetivos que persiguen los pretratamientos físicos, el incremento de la difusión del agua a través de los tejidos de la fresa, reduciendo costos de proceso asociados al tiempo. En el caso de la fresa es fundamental evitar la degradación de las antocianinas por efecto de la PPO, ya que se deteriora el color y el valor nutricional de la fruta

### 1.3.2 Tecnologías de secado.

- Secado solar (SS)

El SS es el método más común y simple de secado, los costos de operación son bajos gracias al aprovechamiento de las condiciones ambientales; tiene como restricción los riesgos de contaminación [12]. La fresa en el SS necesita ser protegida de los rayos directos del sol para evitar la decoloración [9,10]. La exposición de la fresa a los rayos solares y al aire caliente afecta el contenido de compuestos fenólicos, afectando su capacidad antioxidante [10].

Se ha evaluado el secado de fresas enteras, cortadas en medias, cuartos y discos de 3 mm, inmersas en soluciones de: (1) metabisulfito de sodio (1 %)/ ácido cítrico (1 %), (2) ácido ascórbico (1 %)/ ácido cítrico (1 %), (3) ácido cítrico (1 %), (4) meta bisulfito de sodio

(2 %)[13]. Las fresas fueron deshidratadas en un secador solar indirecto y el secado se ajustó a un modelo exponencial; la constante de la velocidad de secado fue afectada por el área superficial de los cortes, la temperatura del aire inducido y por la relación del área proyectada por unidad de masa. Los cortes de fresa remojados en la solución (4) presentaron la mayor velocidad de rehidratación. El tiempo de secado en un SS directo generalmente es mayor que un SS indirecto. López et al. (2015) [14] encontraron una diferencia de 2 h de proceso entre los sistemas en el secado de fresa, no obstante, la humedad de equilibrio fue la misma; la máxima temperatura alcanzada en el sistema directo fue de 52 °C, mientras que en el sistema indirecto fue de 48 °C, lo que explicó el mayor deterioro de compuestos bioactivos en el sistema directo.

- Secado convectivo por aire caliente (SC)

El SC es un método de bajo consumo energético, fácil manejo operacional y altos rendimientos, pero presenta varias limitaciones: producto no uniforme, tiempos de proceso largos, endurecimiento y cambios en la estructura del alimento y atributos sensoriales, pérdida de compuestos bioactivos e índices bajos de rehidratación [15].

De las condiciones de proceso en SC; la velocidad, la temperatura y el espesor del material son las variables más importantes. Se evaluaron los efectos de la temperatura (50, 60 y 70 °C) y la velocidad del aire (0,18, 0,22 y 0,26 m/s) sobre los parámetros de la cinética de secado de películas de 3 mm. La cinética se ajustó al modelo de capa delgada; la ley de difusión de Fick describió el transporte de agua, los coeficientes de difusión fueron 5,39, 7,41, y  $8,59 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  para las temperaturas evaluadas; y la energía de activación según ajuste de modelo de Arrhenius fue de  $21,49 \text{ kJkmol}^{-1}$  [9].

Doymaz [10] estudió la cinética de SC de fresa a  $1,2 \text{ ms}^{-1}$  a temperaturas de 50, 55 y 65 °C; además, evaluó el efecto del pretratamiento de la superficie de la fruta con oleato de etilo alcalino. El modelo de capa delgada logarítmico fue el de mejor ajuste a 50 y 55 °C, mientras que los modelos de Wang y Shing presentaron el mejor ajuste a 60 °C, los valores de difusividad efectiva estuvieron entre  $4,95 \times 10^{-10}$  y  $1,42 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Los tiempos de secado de las fresas pretratadas estuvieron entre 21 y 35 % por debajo de las fresas no pretratadas; además, para cada una de las temperaturas evaluadas, las fresas deshidratadas y sometidas al pretratamiento presentaron mayores índices de rehidratación.

Debido al efecto negativo de SC sobre los atributos de calidad de la fresa, se ha evaluado el efecto de las variables de proceso sobre las pérdidas de compuestos bioactivos. Se evaluó la cinética de degradación de actividad antioxidante, contenido de antocianinas y compuestos fenólicos totales; a 50 °C se presentaron pérdidas de 74, 45 y 78 % respectivamente. Las mayores pérdidas de los compuestos bioactivos se presentaron al inicio y al final del proceso; esto se explica en términos de alta movilidad de sustancias solubles al inicio del proceso (alta humedad) y a la alta concentración de estos en las etapas finales del secado (baja humedad) [16]. En otros trabajos se determinaron pérdidas de antocianinas del 37 % a 60 °C y 55 % a 90 °C en SC a una velocidad de aire de  $1 \text{ ms}^{-1}$  [17].

Se observa en los estudios de SC la preocupación por la conservación del valor nutricional de la fresa, aspecto que en el pasado se pasaba por alto; ya que la preocupación se centraba en la fenomenología del proceso de secado, la textura del producto y las características de rehidratación del material. Dicha preocupación es el producto de la

presión comercial de consumidores más críticos frente al valor nutricional de los productos que consumen.

#### Deshidratación osmótica (DO)

Changrue *et al.*, [18] evaluaron la DO en solución de sacarosa 60 %, 24 h, 20 °C y relación sólido: líquido 1:9, potencia del microondas (1,0 y 1,5 W/g) y tipo de pulso de la radiación de la microonda (continua, 45 s *on* y 15 s *off*, 30s *on* y 30s *off*) a una presión vacío de 8 KPa. El sistema continuo generó las mayores temperaturas, mientras que el pulso 30 s *on*/30 s *off* desarrolló las menores; las mayores velocidades de secado fueron registradas para la exposición continua del producto a las microondas. No se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para la actividad acuosa final, alcanzando valores de 0,53; la DO como etapa previa al secado por microondas al vacío generó 10 % menos de reducción del volumen de las fresas (74% vs 84%).

La DO utiliza como medios osmóticos jarabes de azúcares, últimamente se han usado jarabes de frutas con propiedades bioactivas [19]. Concentrados de *aronia melanocarpa* a 50°Brix en relación 1:1 jarabes de sacarosa al 50 % fueron usados como solución DO como pretratamiento (60 °C por 120 min) a dos procesos de secado integrados: a) SC (50 °C x 120 min seguido de secado al vacío en equipo de microondas (400 w, 35 hPa x 6 min y temperaturas 50 - 70 °C) y b) liofilización (-40 °C por 120 min, vacío a 100 Pa, 25 °C por 24 h). El pretratamiento de DO en los procesos permitió conservar el contenido de vitamina C frente a los controles (secados a y b sin DO); el medio de DO compuesto sacarosa/concentrado de aronia presentó mayor conservación de vitamina C (20 % mayor) frente al medio DO de jarabe de sacarosa; además, como era de esperarse se presentó mayor conservación de la vitamina C en las fresas sometidas a liofilización (menores  $a_w$ ); se redujo el contenido de polifenoles en todos los tratamientos aplicados, siendo más críticos para el control; además, el medio DO mixto desarrolló una menor pérdida de polifenoles en los dos procesos, con mejores resultados en el proceso b. No hubo efecto de DO sobre la capacidad antioxidante [20]. El proceso de DO al ser un proceso no térmico permite conservar los compuestos bioactivos presentes en la fresa, no obstante, se modifica el perfil de sabor y textura de la fruta deshidratada debido a los procesos de transferencia de masa, se identifican diferentes integraciones de proceso con otras tecnologías que buscan reducir los tiempos de proceso y la conservación del valor nutricional.

- Liofilización

Comparadas con las tecnologías de secado clásicas, las principales ventajas del proceso de liofilización son: (i) conservación de propiedades (forma, apariencia, color, sabor, textura y actividad biológica) y (ii) alta capacidad de rehidratación del producto seco; como desventajas está su alto costo y baja productividad [1].

Se ha evaluado el efecto de la presión (15-200 Pa) y la temperatura del plato (20 y 90 °C) sobre la calidad de la fresa liofilizada. El encogimiento se redujo a presiones de 30-40 Pa, la afectación en el color dependió de la temperatura del plato, y su deterioro se minimizó 50-55 °C; las condiciones optimizadas fueron de 30 Pa y 50°C [21]. En un estudio que evaluó el efecto de la temperatura del plato (30-70 °C) y espesor de cortes (5 -10 mm y fresa entera) sobre la cinética de secado, retracción y colapso de la estructura de la fresa; se encontró que para temperaturas de plato mayores a 50 °C, la temperatura interna del

producto superaba la  $T_g$  de fresa liofilizada ( $38\text{ }^\circ\text{C}$ ) y se presentó un colapso del 20 % de las muestras; además, el nivel de retracción no se afectó por la temperatura del plato (8 % para fruta entera y 2 % para los cortes) [1]. El incremento en la temperatura en el proceso de liofilización afectó la higroscopicidad de las fresas [22].

Prosapio *et al.*, [23] utilizaron la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para evaluar los impactos ambientales de fresa liofilizadas (congelamiento:  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  x 18 h, congelamiento al vacío:  $-110\text{ }^\circ\text{C}$ , 18 h y 10 Pa) vs fresas sometidas al proceso combinado de DO y liofilización (pretratamiento osmótico  $50\text{ }^\circ\text{C}$  x 3h, congelamiento  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  X 18 h, congelamiento al vacío  $110\text{ }^\circ\text{C}$  x 7 h y 10 Pa), encontrando que la liofilización generó mayores impactos ambientales en todas las categorías ambientales, el proceso combinado redujo en un 25 % las emisiones ambientales.

Indudablemente el secado por liofilización de la fresa presenta unas ventajas comparativas frente a otras tecnologías de secado : color, sabor, textura y conservación de actividad biológica, sin embargo, los costos incurridos en el proceso la hacen una tecnología no masiva, los estudios de análisis de ciclo de vida arrojan datos preocupantes frente a los impactos ambientales si se les compara con otras tecnologías de secado; debido a esto se vienen realizando estudios de integración del proceso de liofilización con otras tecnologías; los mayores costos de proceso están asociados a los requerimientos calóricos en el proceso de congelación y sublimación; además, el producto liofilizado por razones de su alta higroscopicidad, debe ser empacado en empaques de alta barrera al vapor de agua; además, debido a la baja densidad de la estructura requiere de mayor área de empaque/masa.

#### ▪ Secado por atomización (SA)

El SA es un proceso continuo donde una suspensión de fruta atomizada por un disco o boquilla se pone en contacto con aire caliente, obteniéndose como producto un polvo deshidratado.

Feguš *et al.*, [24] evaluaron el efecto de la temperatura y el uso de ayudantes de secado (AS) en la deshidratación de pulpa de fresa; fue necesario el uso de AS debido a la baja temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de la fresa ( $-35\text{ }^\circ\text{C}$ ); además, el uso de la maltodextrina (MD) y las temperaturas de operación ( $130\text{-}160\text{ }^\circ\text{C}$ ) afectaron el color del producto. La mezcla de alimentación a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  fue formulada en una proporción de sólidos de la pulpa: MD 2:1. El equipo operó a un flujo de aire de  $620\text{ m}^3/\text{h}$  y a una velocidad del disco de 17.500 rpm. No se presentó efecto de la temperatura sobre la capacidad antioxidante de la fresa deshidratada. El incremento en la concentración de MD disminuyó la pegajosidad del polvo de fresa.

En otro estudio, se evaluó el efecto de la MD y la goma arábica (GA) sobre el secado de jugos de frutas (manzana, piña y fresa) [25]. Los parámetros de operación fueron: presión de la boquilla 6,5 bar con boquilla 1 mm, temperatura de alimentación  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura de secado  $120/130\text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura de salida  $65/70\text{ }^\circ\text{C}$ , contenido de MD/GA  $\frac{1}{2}\%$ ; relación sólidos de secado: los sólidos de la fruta 4:1. La temperatura no afectó el  $a_w$  del polvo de fresa; ésta se afectó por el tipo de AS (0,3 vs 0,45); además, el rendimiento del proceso

mejoró con el incremento en la concentración de los AS; la temperatura no afectó el rendimiento del proceso.

La estructura química de los AS afecta las características del proceso y los polvos de fresa obtenidos en el SA. Se evaluó el efecto de la maltodextrina (MD) (equivalente de dextrosa (DE) 5 y 10), GA y almidón modificado sobre las propiedades de los polvos de fresa. La alimentación a 18 °Brix, con una relación de AS: sólidos de fresa de 2:1; la presión en la boquilla fue 7 bar, flujo de aire de 700 L/h, flujo de alimentación de la suspensión 15 mL/min, temperatura de entrada y salida del aire de 180 y 90 °C, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas respecto a la solubilidad de los polvos de fresa obtenidos bajo diferentes condiciones de operación, mientras que la densidad para las muestras formuladas con MD fue inferior a los polvos secados con GA y almidón modificado (0,4 vs 0,5g/cm<sup>3</sup>). No hubo grandes diferencias en la humedad de la monocapa (0,058 g agua/g ss) para los polvos. Los polvos obtenidos con GA presentaron mayor estabilidad para antocianinas y capacidad antioxidante [26].

Bahnasawy *et al.*, [27] evaluaron el efecto de la temperatura de secado (190, 220 y 250 °C) y velocidad del disco atomizador (18.000, 22.000 y 26.000 rpm) sobre la humedad, densidad y humectación de los polvos de fresa. La mezcla de alimentación fue compuesta por leche y pulpa fresa en relación 1:2, los gases de salida fueron mantenidos a 85 °C. Para cada una de las temperaturas, el incremento en la velocidad del disco generó polvos con menor densidad aparente. El incremento en la temperatura para las velocidades evaluadas generó un menor tiempo de humectación; el incremento en las velocidades para cada una de las temperaturas también mejoró la humectación; no obstante, los tiempos de humectación fueron altos (16 min) debido al contenido graso aportado por la leche. En concordancia con parámetros de operación de los SA, los incrementos en la temperatura y velocidad de atomización produjeron polvos con menores contenidos de humedad (2,72 % a 250 °C y 26.000 rpm).

Se ha evaluado el aislado de proteína de suero de leche como sustituto a la MD empleada como AS en la fabricación de fresa en polvo. En el proceso de secado con formulaciones de sólidos de fresa, MD y aislado de proteína 60:40:0 y 60:39:1, se observó el efecto de la proteína sobre la recuperación de polvo, pasando de 39,2 % a 56,5 %. El aislado presenta propiedades como surfactante debido a las propiedades anfífilica de las proteínas [28,29], funcionalidad que modifica las propiedades de superficie de las gotas y las partículas sólidas del puré fresa, disminuyendo la tensión superficial. No se presentó variación significativa en la Tg de los polvos de fresa, los polvos procesados con el aislado proteico presentaron una textura vítrea; esto se explica por la migración de la proteína a la interfaz aire/agua, formando una película sobre la superficie de las partículas [30].

Como se observa son pocos los trabajos de SA en fresa, se identifica la necesidad del uso de AS para solucionar el problema de la baja Tg del producto, que generan dificultades en las propiedades de los polvos que tiene que ver con su estabilidad: higroscopicidad y humectabilidad. Los niveles de uso de sólidos de AS vs sólidos de la fruta en los estudios son altos, lo que representa un reto tecnológico desde el punto de vista sensorial y nutricional debida al aporte mayoritario en la formulación del ayudante de secado. Se observa además que el número de propiedades evaluadas de los polvos es bajo y que amerita el estudio de un mayor número de propiedades, de índole físico, químico y funcional. Son muchos los desafíos aun por superar en el proceso SD, mejoramiento de propiedades de fluidez e instantaneidad de los polvos, disminución de la carga de AS para

no afectar las propiedades sensoriales y nutricionales de los productos, la integración de procesos de aglomeración en la cámara de secado por atomización; y la conservación de los compuestos bioactivos de las suspensiones de fruta secadas.

#### Secado por microondas (SM)

El SM hace parte de las tecnologías no convencionales de conservación de alimentos que involucra calentamiento y transferencia de masa. El vapor generado al interior del alimento es liberado por efecto del gradiente de presión de vapor y previene la contracción del material [31,32].

Se ha encontrado que el SM ofrece ventajas sobre los SC en reducción de tiempos, aumento de la eficiencia energética y equipos de menor tamaño [33]. En el secado de fresa en cubos de 1 cm de arista a una potencia de 10 kW a 2,45G Hz durante 45 min, fue posible reducir en un 85 % el peso de la muestra. La temperatura alcanzó los 62 °C durante los primeros 15 minutos del proceso, donde se removió la mayor cantidad de agua (60 %); posteriormente la temperatura descendió a 47 °C debido a la remoción de humedad [34].

La aplicación del vacío en SM presenta las siguientes ventajas: vaporiza el agua a una menor temperatura, mantiene los atributos nutricionales y sensoriales y disminuye la velocidad de las reacciones de oxidación [35]. Con el objetivo de optimizar el proceso de SM asistido con vacío, se desarrolló un algoritmo de control con la siguiente estrategia: a) vacío en la cámara de secado y disminución la temperatura y b) aplicar la radiación de la microonda con control de temperatura para maximizar la eficiencia del secado. A una presión de 47 mm Hg y 700 W, fijando el *set point* a 50 °C se alcanzó el secado en 180 min; el color de la fresa no presentó diferencia significativa con la fresa fresca; además, se alcanzó un 55 % de rehidratación [34]. El uso de SM con integración por vacío ofrece a la agroindustria un proceso con enormes bondades en términos de costos y conservación de nutricionales, existe un gran reto tecnológico en el escalamiento del proceso, ya que todos las investigaciones se han realizado a escala de laboratorio, esta característica es una condición particular de todas las tecnologías emergentes de secado, es un reto para profesionales de ingeniería mecánica, eléctrica, de control y de alimentos, entre otros, el poder llevar estos procesos a escalas industriales y poder competir con los procesos tradicionales de secado convectivo o solar

- Secado por Infrarrojo

El calentamiento por radiación infrarroja ofrece ventajas sobre SC bajo similares condiciones; estudios comparativos mostraron que el secado bajo radiación infrarroja es más rápido que el SC. El mecanismo se basa en la transferencia de calor del elemento calefactor al producto por radiación, calentando al producto de una forma rápida y homogénea; la velocidad de evaporación de agua de la superficie irradiada es alta reduciendo el tiempo de secado; bajo esta perspectiva, la radiación infrarroja ha sido integrada con otras tecnologías de secado [36]. Se evaluaron tres diseños de proceso: a) temperatura y velocidad de 80 °C y 2 m/s a potencias de 100, 200 y 300 W), b) potencia y velocidad de 200 W y 2 ms<sup>-1</sup> a temperaturas de 60, 80 y 100 °C y c) potencia y temperatura constantes de 200 W y 80 °C para velocidades de 1,0, 1,5 y 2,0 m/s. El incremento en la potencia, temperatura y velocidad permitieron la disminución del tiempo del proceso. La disminución de la potencia de radiación, la temperatura y velocidad del aire mejoraron los atributos de color de la fresa; sin embargo, en los intervalos de condiciones de secado 200-



300 W, 60-100 °C y 1-1,5 ms<sup>-1</sup> fueron adecuados para la retención de actividad antioxidante, antocianinas, fenoles totales y nutrientes [36].

- Ultrasonido (US)

El US es una onda con frecuencias superiores a 20 kHz, la interacción del material con el tren de ondas está formado por tres efectos: térmico, mecánico y cavitación. El tratamiento presenta ciclos alternativos de expansión y compresión, fenómeno conocido como efecto esponja [37,38]. La velocidad de secado del material es influenciada por la potencia, el tiempo y las propiedades del alimento [39]. Se han realizado estudios de evaluación del efecto de la aplicación de US como pretratamiento al proceso de liofilización, comparando sus resultados con los obtenidos bajo condiciones de DO como pretratamiento. Las fresas tratadas presentaron una mayor claridad y menor tonalidad frente a las fresas frescas y no pretratadas. Las fresas sometidas a US y DO fueron más rojizas y con un color más vivo que las muestras control.

Se ha estudiado la cinética de secado de fresa en SC asistido por US (40 - 70°C y 0-60 W), se observó un incremento significativo en la difusividad y el coeficiente de transferencia de masa respecto al SC [40]. La aplicación de US a 30 y 60 W para las temperaturas de secado de 40 y 50 °C no afectó la vitamina C en procesos de secado con velocidad de aire a 2 ms<sup>-1</sup>. A 60 y 70 °C la degradación de la vitamina se debió a la mayor temperatura y no por el efecto de la potencia aplicada del US. Los porcentajes de retención de vitamina C para los procesos asistidos con ultrasonido a 30 y 60 W y temperaturas del secado de 40 y 50 °C fueron del 78 %. Las pérdidas de lisina y arginina debido a las reacciones de Maillard en los procesos asistidos con US son similares a las obtenidas en procesos convencionales de secado [37]. La asistencia del US en los procesos de secado presenta los mismos retos de escalamiento que la integración de SM acoplado al vacío; los resultados son prometedores en términos de economías de proceso y conservación de valor nutricional, pero se adolece de estudios a escala industrial que ofrezcan una alternativa tecnológica y económicamente viable a la agroindustria del secado de frutas. La tecnología de ultrasonido se ha venido utilizando también en procesos de extracción de compuestos bioactivos, reduciendo tiempos de proceso, permitiendo el uso de solventes verdes y reduciendo el riesgo ambiental de los procesos.

- Secado por energía de radio frecuencia (SRF)

Aunque los principios de calentamiento y deshidratación son los mismos en el SRF y SM, los métodos y los equipos de generación de calor son diferentes, la radiofrecuencia se transforma en calor al interactuar con la materia y gracias a las características de propagación de las ondas, el material se calienta instantáneamente debido a la propiedad dieléctrica de los compuestos polares presentes en el alimento, especialmente el agua [41].

Se han identificado cambios físicos y químicos de la fresa sometidos a SRF y estas variaciones se han comparado con tecnologías de SM, liofilización y SC [42]. El secado dieléctrico mostró ventajas en términos de velocidad de secado. Comparado con el secado SM el SRF generó una mayor uniformidad en la distribución de la temperatura y la transformación de energía causada por sinergia de la acción de la polarización dipolar y de la conducción iónica. El SRF conservó mejor el color de las fresas y generó una mayor retención de carotenoides, antocianinas y compuestos fenólicos respecto al SC y SM.

### 1.3.3 Integración de tecnologías

Los sistemas SS, SC, liofilización y secado al vacío son los métodos usados masivamente para el secado de frutas y vegetales [43]; sin embargo, estos procesos presentan desventajas para la calidad del producto/proceso; tales como el significativo deterioro de los compuestos bioactivos, daños texturales, rendimientos y/o altos costos [44]. Con el objetivo de reducir el tiempo y el consumo de energía y minimizar las pérdidas de atributos de calidad, estrategias de integración de tecnologías de secado de han sido estudiadas [38,45].

Se ha desarrollado una técnica alternativa de secado en donde una etapa instantánea de caída de presión controlada es insertada entre los dos periodos del SC; es llamada en francés *Détente instantanée Contrôlée* (DIC) [46]; y en inglés como *Swell Drying* (SD) [44,47]. Este proceso asegura el control de los microorganismos y la obtención de textura con altos atributos de calidad con propiedades sensoriales y funcionales mejoradas. Estos cambios texturales resultan en una mayor porosidad, incremento en el área superficial y reducción en la resistencia a la difusión de humedad durante la etapa final del secado [44]. El SD es un tratamiento de alta temperatura y corto tiempo, seguido de una abrupta caída de presión por medio de un vacío, que implica una auto vaporización de una pequeña cantidad de agua del material, lo que induce un enfriamiento instantáneo del producto, previniendo su degradación térmica [46]. La temperatura alta generada por la inyección de vapor saturado (0,1 - 0,6 MPa), evaporó parte del agua por el vacío a 5 kPa con un gradiente de  $0,5 \text{ MPas}^{-1}$  permitiendo que el producto cruce la frontera de la transición vítrea, conservando la estructura dilatada (hinchada) después del cambio brusco de presión, lo que se traduce en una mejor calidad textural y mejora en la cinética de deshidratación y rehidratación, conservando características sensoriales y nutricionales.

Alonzo *et al.*, [43] compararon el SC, liofilización y SD. La implementación del proceso SD en el SC mostró reducción en el tiempo de proceso. Se observó que el proceso SD fue una solución relevante al problema de retracción de productos secados mediante SC. El cambio súbito de presión en el sistema generó una matriz esponjosa abierta que mejoró la difusión efectiva del agua en los procesos de deshidratación y rehidratación, lo que se tradujo en una reducción del tiempo de secado de la fresa pasando de 448 min a 49,63 min. Los valores de difusividad efectivos fueron muy altos en los procesos SD sobre el control (3 - 49 veces superior). En la evaluación del efecto SD sobre la textura, fue posible controlar la crugencia de la fresa, ésta dependió de las condiciones de presión y tiempo, por lo que la textura se pudo modificar a las necesidades del consumidor; la micro-alveolación producida en el proceso de descompresión generó una alta relación de expansión y una significativa crugencia del material.

Xu *et al.*, [48] evaluaron la integración del proceso de liofilización seguido de SC; encontrando que la calidad final fue similar al del producto liofilizado, permitiendo la reducción de los costos del proceso. En el proceso se obtuvieron productos con calidades organolépticas intermedias (valoración sensorial 9 para liofilización, 2,2 para secado en aire caliente y 4,1 - 5,5 para los procesos integrados). Similar comportamiento presentó el consumo de energía y densidad. El proceso de integración en donde la humedad de corte para integrar los procesos fue de 32 % presentó propiedades más parecidas a la calidad de la fresa deshidratada por liofilización.

La aplicación del vacío en el secado mejora las características del producto y proceso; se evaluaron diferentes estrategias de secado: a) SC, b) SM al vacío, c) integración del SC seguido del SM al vacío y d) pulso de vacío seguido de DO y por último aplicación de SM al vacío. La mayor velocidad de secado se obtuvo en el proceso al aplicarse vacío en el SM (12 % superior que el SC), se presentó buen ajuste del modelo GAB para isoterma de sorción para la fresa deshidratada obtenida por el proceso de SM al vacío, la variación en el color de las fresas para todos los tratamientos estuvo por debajo de 13 %; el mejor resultado en la retención del color se alcanzó con el proceso de SM al vacío [45].

Gamboa *et al.*, [40] evaluaron la aplicación del US en el proceso de SC de fresa; estudiaron el efecto de la potencia acústica del US (0, 30 y 60 W) y la temperatura (40, 50, 60 y 70 °C) sobre el proceso de secado; se encontró que los factores evaluados tienen efecto sobre la reducción del tiempo de secado; la potencia del US presentó efecto sobre el incremento de la difusividad efectiva del agua y el coeficiente de transferencia de masa, lo que impactó en la reducción del tiempo de secado [49,50]. El proceso de secado a 60 °C con la aplicación de 60 W de US redujo el tiempo de secado en 1,9 h (4,4 a 0 W vs 2,50 a 60 W), la reducción del tiempo varió entre el 13 y 44 % mediante la aplicación del US. En estudios de aplicación de US (25 kHz) como etapa previa al secado por DO (en 50 % de sacarosa, 30 °C x 30 min) se redujo el tiempo de secado en 50 % [8].

Estudios recientes han evaluado el efecto de integrar la aplicación de las tecnologías de US y SM al SC de la fresa; se evaluó el efecto del proceso integrado sobre la cinética de secado, consumo total de energía y la calidad final del producto. Se logró validar que el SC asistido con US y microondas mejora significativamente la transferencia de masa y calor, reduciendo el tiempo de proceso (1200 min SC, 600 min para SC asistido con US y 300 min para SC asistido por microondas). El cambio de color de la fresa durante el proceso fue menor en el SC asistido por US; el secado asistido con las dos tecnologías presentó los mayores cambios de color en la matriz alimentaria; el efecto de calentamiento por la radiación con microondas afectó la calidad del producto [38].

Con el objetivo de reducir el tiempo y el consumo de energía durante el secado y minimizar las pérdidas de atributos de calidad de la fresa, se ha realizado la estrategia de integración del proceso con tecnologías emergentes. La integración de procesos de secado ha permitido la mejora de los procesos de SC, secado por liofilización y SM. Se espera que en el corto plazo la estrategia de integración de proceso sea adoptada por la industria alimenticia con el objetivo de ofrecer al mercado fresa deshidratada de mejor calidad y precio. Las tecnologías de secado no convencionales que se han integrado a procesos de secado convencionales incluyen pretratamientos físicos y químicos, aplicación de vacío, uso de radiaciones de tipo infrarrojo, ultrasonido y microondas. Se hace importante en los currículos de los programas de Ingeniería de Alimentos, Ingeniería Agroindustrial, Ingeniería Agrícola y afines, que se incluya el desarrollo de competencias para el desarrollo de las tecnologías emergentes que asisten los procesos de secado con el objetivo que estas innovaciones se implementen a escala industrial en nuestro país.

## 1.4 Conclusiones

Con el objetivo de reducir el tiempo y consumo de energía durante el secado y minimizar las pérdidas de atributos de calidad, la integración de métodos de secado de dos y tres etapas ha sido usadas para la conservación de la fresa. La integración de las tecnologías

permite la reducción de la energía, tiempo y temperaturas de proceso, con las consecuentes retenciones de compuestos bioactivos, generando productos con mejor calidad. La integración permite la mejora de los procesos de SC, secado por liofilización y secado por microondas. Las tecnologías de secado no convencionales que se han integrado a procesos de secado convencionales incluyen pretratamiento de escaldado, DO y campo eléctrico pulsado; y tecnologías de aplicación de vacío, radiaciones de tipo infrarrojo, ultrasonido y microondas.

El SD si bien es un proceso de secado que afecta la estructura del material al requerir una corriente de alimentación en suspensión, es uno de los pocos procesos que se puede realizar en continuo lo que redundará en las mayores productividades en los procesos de secado; pese a ser un proceso de secado convectivo dada las características de contacto aire caliente- suspensión atomizada desarrolla temperaturas de proceso (temperaturas de saturación adiabáticas) inferiores a 100°C por tiempos muy reducidos (tiempos de residencia), que se traducen en altas conservaciones de compuestos bioactivos; además, el uso de ayudantes de secado cuya función es incrementar la Tg del productos, también sirve de formación de película protectora de los polvos obtenidos. El SD tiene el reto tecnológico de producir polvos de frutas con mejores propiedades de fluidez, instantaneización y conservación del valor nutricional de los polvos obtenidos.

## 1.5 Referencias

- [1] SHISHEHGARHA, F., MAKHLOUF, J. and RATTI C. Freeze-drying characteristics of strawberries. *Dry Technol*, 20(1), 2002, p. 131-145. doi: 10.1081/DRT-120001370
- [2] KARAM, M.C. *et al.* Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, 2016, p.32-49. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001
- [3] RAGHAVAN, G.S.V. *et al.* Overview of new techniques for drying biological materials with emphasis on energy aspects. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(2), 2005, p. 195-201. doi: 10.1590/S0104-66322005000200005.
- [4] ZAREIN, M., SAMADI, S. H., and GHOBADIAN, B. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 14, 2015, p. 41-47. doi: 10.1016/j.jssas.2013.06.002.
- [5] VEGA-GÁLVEZ, A. *et al.* Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). *Food Chem*, 117(4),2009, p.647-653. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.04.066
- [6] RAGHAVI, L. M., MOSES, J.A., and ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 222, 2018, p. 267-275. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032.
- [7] SUN, Y., ZHANG, M. and MUJUMDAR, A. Berry Drying: Mechanism, Pretreatment, Drying Technology, Nutrient Preservation, and Mathematical Models. *Food Engineering Reviews*, 11, 2019, p. 61-67. doi: 10.1007/s12393-019-9188-3.

- [8] GARCIA, J. *et al.* Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration of Strawberries: Effect of Pretreatment Time and Ultrasonic Frequency. *Drying technology*, 28(2), 2010, p. 294-303. doi:10.1080/07373930903530402
- [9] JOHNSON, A. C. and ALI AL MUKHAINI, E. M. Drying studies on peach and strawberry slices. *Cogent Food Agric.*, 2(1), 2016, p. 1141654 doi: 10.1080/23311932.2016.1141654.
- [10] DOYMAZ, I. Convective drying kinetics of strawberry. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 47(5), 2008, p. 914-919. doi: 10.1016/j.cep.2007.02.003.
- [11] SUNJKA, P. S. and RAGHAVAN, G. S. V. Assessment of pretreatment methods and osmotic dehydration for cranberries. *Can. Biosyst. Eng. / Le Genie des Biosyst. au Canada*, 46, 2004, p. 335-340.
- [12] ARORA, S., BHARTI, S. and SEHGAL, VK. Convective drying kinetics of red chillies. *Dry Technol.*, 22(4), 2006, p. 189-193. doi: 10.1080/07373930600559068
- [13] EL-BELTAGY, A., GAMEA, G. R., and ESSA, A. H. A. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 2007, p. 456-464. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.10.015.
- [14] LOPEZ, E.C.; PILATOWSKY, I. and NAVARRO, A. Drying of Strawberry in a Direct and Indirect Solar Dryer (Effects of Drying Methods on Total Phenolic Content). *Int'l Journal of Advances in Agricultural & Environmental Eng.*, 2(2), 2015, p. 61-63.
- [15] WOJDYŁO, A., FIGIEL, A. and OSZMIAŃSKI, J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. *J. Agric. Food Chem.*, 57(4), 2009, p.1337-43. Doi:10.1021/jf802507j.
- [16] MÉNDEZ-LAGUNAS, L. *et al.* Convective drying kinetics of strawberry (*Fragaria ananassa*): Effects on antioxidant activity, anthocyanins, and total phenolic content. *Food Chem.*, 230, 2017, p. 174-181. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.010.
- [17] MORALES-DELGADO, D.Y. *et al.* Effect of Convective Drying on Total Anthocyanin Content, Antioxidant Activity and Cell Morphometric Parameters of Strawberry Parenchymal Tissue (*Fragaria X Ananassa* Dutch). *Rev. Mex. Ing. Quim.*, 13 (1), 2014, p. 179-187.
- [18] CHANGRUE, V., ORSAT, V., and RAGHAVAN, G.S.V. Osmotically dehydrated microwave-vacuum drying of strawberries. *J. Food Process. Preserv.*, 32, 2008, p.798-816. doi: 10.1111/j.1745-4549.2008.00215. x.
- [19] SAMBORSKA, K. *et al.* The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extract to sugar solution on osmotic dehydration and sensory properties of apples. *J Food Sci. Technol. (United Kingdom)*. 56, 2019, p.1927–1938. doi:org/10.1007/s13197-019-03658-0

- [20] KOWALSKA, J. *et al.* Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack. *Food Science and Biotechnol.* (South Korea). 27(3), 2018, p. 799-808. Doi:/10.1007/s10068-018-0304-6
- [21] HAMMAMI, C. and RENÉ, F. Determination of Freeze-drying Process Variables for Strawberries. *Journal of Food Engineering.* (Netherlands). 32(2), 1997. p.133-154. doi:/10.1016/S0260-8774(97)00023-X
- [22] PÄÄKKÖNEN K. and MATTILA M. Processing, Packaging, and Storage Effects on Quality of Freeze-Dried Strawberries. *J Food Sci*, 56(5),1991, p. 1388-1392. doi: 10.1111/j.1365-2621.1991.tb04781.x
- [23] PROSAPIO, V., NORTON, I. and DE MARCO, I. Optimization of freeze-drying using a Life Cycle Assessment approach: Strawberries' case study. *J. Clean. Prod.*, 168(1), 2017, p. 1171-1179. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.125.
- [24] FEGUŠ, U. *et al.* Effect of drying parameters on physiochemical and sensory properties of fruit powders processed by PGSS-, vacuum- and spray-drying. *Acta Chim. Slov.*, 62(2), 2015, p.479-487. doi: 10.17344/acsi.2014.969.
- [25] FREIXO, R. *et al.* Prebiotics as drying aids for spray drying fruit juices. *Sci. Study Res. Chem. Chem. Eng. Biotechnol. Food Ind.*, 17(3), 2016, p. 309-313.
- [26] OLIVEIRA, M.I.S. *et al.* Estabilidade da polpa de morango atomizada utilizando diferentes agentes carreadores. *Brazilian J. Food Technol.*, 16(4), 2013, p. 310-318. doi: 10.1590/S1981-67232013005000037.
- [27] BAHNASAWY, A.H., OKASHA, A.E. and GONBEEJ, E.E. Performance evaluation of a laboratory scale spray dryer. *J. Agric. Eng.*, 27(1), 2010, p. 326-346.
- [28] SOBEL, R., VERSIC, R and, GAONKAR, A.G. En: Introduction to Microencapsulation and Controlled Delivery in Foods. In: *Microencapsulation in the Food Industry.1* Ed. NY (USA): Academic Press, 2014, p. 412-424.
- [29] DIAS, M.I., FERREIRA, ICFR, and BARREIRO, M.F. Microencapsulation of bioactives for food applications. *Food and Function*, 6(4), 2015, p. 1035-52. doi: 10.1039/c4fo01175a.
- [30] GONG, Z. *et al.* Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. *Int. J. Food Prop.*, 21(1), 2018, p. 2229-2238. doi: 10.1080/10942912.2018.1506477.
- [31] BÓRQUEZ, R., MELO, D. and SAAVEDRA, C. Microwave–Vacuum Drying of Strawberries with Automatic Temperature Control. *Food Bioprocess Technol.*, 8(2), 2015, p. 266-276. doi: 10.1007/s11947-014-1400-0.
- [32] GUO, Q. *et al.* Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, 21(1) 2017, p. 2229-2238. doi: 10.1016/j.tifs.2017.07.007.

- [33] ALTAN, A. and MASKAN, M. Microwave assisted drying of short-cut (ditalini) macaroni: Drying characteristics and effect of drying processes on starch properties. *Food Res. Int.*, 38(7), 2005, p. 787-796. doi: 10.1016/j.foodres.2005.02.006.
- [34] ALVARADO, M. B. Estudio del proceso de secado de fresa usando horno microondas/Study of the strawberry drying process using microwave dryer. *Prospectiva*, 15(1), 2017, p. 29-34. doi: 10.15665/rp.v15i1.658
- [35] ERLE, U. and SCHUBERT, H. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *J. Food Eng.*, 49(2-3), 2001, p. 193-199. doi: 10.1016/S0260-8774(00)00207-7.
- [35] ERLE, U. and SCHUBERT, H. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *J. Food Eng.*, 49(2-3), 2001, p. 193-199. doi: 10.1016/S0260-8774(00)00207-7.
- [36] Adak, N., Heybeli, N. and Ertekin, C. Infrared drying of strawberry, *Food Chem.*, 219, 2017, p. 109-116. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.103
- [37] GAMBOA-SANTOS, J. *et al.* Impact of power ultrasound on chemical and physicochemical quality indicators of strawberries dried by convection, *Food Chem.*, 161, 2014, p. 40-46. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.03.106.
- [38] SZADZIŃSKA, J., KOWALSKI, S. J. and STASIAK, M. Microwave and ultrasound enhancement of convective drying of strawberries: Experimental and modeling efficiency. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 103, 2016, p. 1065-1074. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.001
- [39] MIERZWA, D. S., KOWALSKI, J. and KROEHNKE, J. Hybrid drying of carrot preliminary processed with ultrasonically assisted osmotic dehydration. *Food Technol. Biotechnol.*, 55(2), 2017, p. 197-205. doi: 10.17113/tb.55.02.17.4942.
- [40] GAMBOA-SANTOS, J. *et al.* Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry. *J. Food Eng.*, 128, 2014, p. 132-139. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.12.021
- [41] MAUPOEY, P.F. *et al.* Introducción al secado de alimentos por aire caliente. 1 ed. Barcelona (España) ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2016, 211 p.
- [42] JIANG, H. *et al.* Evaluation of strawberries dried by radio frequency energy. *Drying Technology*, 37(3), 2018, p. 312-321. doi.org/10.1080/07373937.2018.1439503
- [43] ALONZO-MACÍAS, M. *et al.* Comparative Study of the Effects of Drying Methods on Antioxidant Activity of Dried Strawberry (*Fragaria Var. Camarosa*). *J. Food Res.*, 2(2), 2013, p. 84-92. doi: 10.5539/jfr.v2n2p92.
- [44] MOUNIR, S. *et al.* Swell Drying: Coupling Instant Controlled Pressure Drop DIC to Standard Convection Drying Processes to Intensify Transfer Phenomena and Improve Quality-An Overview. *Dry. Technol.*, 30(14), 2012, p. 1508- 1531. doi: 10.1080/07373937.2012.693145.

- [45] DE BRUIJN, J. and BÓRQUEZ, R. Quality retention in strawberries dried by emerging dehydration methods. *Food Res. Int.*, 63, 2014, p.42-48. doi: 10.1016/j.foodres.2014.03.029.
- [46] ALONZO-MACÍAS, M., MONTEJANO-GAITÁN, G. and ALLAF, K. Impact of drying processes on strawberry (*Fragaria* var. Camarosa) texture: Identification of crispy and crunchy features by instrumental measurement. *J. Texture Stud.*, 45(3), 2014, p. 246-259. doi: 10.1111/jtxs.12070.
- [47] MARITZA, A.M. *et al.* Comparative study of various drying processes at physical and chemical properties of strawberries (*Fragaria* var. camarosa). *Procedia Engineering*, 14, 2012, p. 267-282. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.418.
- [48] XU, Y. *et al.* A two-stage vacuum freeze and convective air-drying method for strawberries. *Dry. Technol.*, 24(8), 2006, p. 1019-1023. doi: 10.1080/07373930600776209.
- [49] CAMPO, Y., VILLADA, D. y GELVEZ, V. Efecto de la aplicación de ultrasonido sobre las cinéticas de secado convectivo de fresa (*Fragaria vesca*). *Revista Vitae*, 23, 2016, p. 100-104.
- [50] MUSIELAK, G., MIERZWA, D. and KROEHNKE, J. Food drying enhancement by ultrasound – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 2016, p. 126-141. doi:10.1016/j.tifs.2016.08.003



# Capítulo 2 Influence of the formulation and homogenization process on the physicochemical stability of strawberry suspensions

## 2.1 Abstract

The generation of value of the strawberry agrochain implies in some cases the disintegration of the structure and formulation, resulting in suspensions that behave as thermodynamically unstable colloidal systems, affected by various forces: Van der Waals, electrostatic, steric, hydration, hydrophobic and phase separation. The aim of this research was to evaluate the influence of the homogenization process and the concentration of gum arabic (GA) on the stability of strawberry-based suspensions. Strawberries with a 9 % solids content were used and a centralized composite design was proposed (pressure (P) (4,14-10,34 MPa), time (t) (3-5 min) and GA (0.2-0.4%)), and the dependent variables: zeta potential ( $\zeta$ ), spectral absorption index (R), viscosity ( $\mu$ ) and particle sizes were evaluated. The  $\zeta$  potential and the R-index were not affected by the homogenization process and GA; the suspension was stabilized by the increase of  $\zeta$  due to the t and GA effect, and the t-GA interaction. Particle sizes were affected by P and not by t; whereas, GA mainly affected D [3,2], D [4,3] and D90. The results indicate that the homogenization and the use of AG as a hydrocolloid confer physicochemical stability to the strawberry suspension.

**Keywords:** *Fragaria ananassa*, colloidal stability, strawberry-based suspension, gum Arabic, homogenization

## 2.2 Introduction

The strawberry (*Fragaria ananassa*) is a fruit that contains important components with physiological activity: vitamin C, tannins, flavonoids, anthocyanins, catechin, quercetin and kaempferol, organic acids (citric, malic, oxalic, salicylic and ellagic) and minerals (K, P, Ca, Na and Fe) [1,2], which makes it be considered as functional food with multiple health benefits demonstrated by its antioxidant, anti-inflammatory, anti-hypertensive, and anti-proliferative properties [3]. Besides, the strawberry is characterized by a bright red color, a flavor defined by the balance of sugar and acidity, the pulp is white or red according to the variety, its texture is soft with medium firmness, which makes it susceptible to physical damage (abrasion, cuts and bruises), contributing to the loss of native fluids and the growth of pathogenic microorganisms [4,5].

Spray drying (SD) is a technological alternative for the preservation of perishable fruits such as strawberries, where the quality of the powder depends on various factors associated with the stability of the feed and the SD process [6]. Typically, the feeding to the SD behaves as a thermodynamically unstable colloidal system and its structure is fundamental to the properties associated with its stability. In this context, colloidal particles with a larger size than the molecules of the dispersing medium present an important interfacial area, which causes a high accumulation of free energy and this, added to a diversity of forces present (Van der Waals, electrostatic, steric, hydration and hydrophobic) [7,8] contribute to the stability of the system, which is directly related to its composition and the applied homogenization process [9]. In strawberry-based suspensions, the presence of sugars, acids, minerals, polymers such as structural carbohydrates and pectins, leads to interactions of a repulsive nature and Van der Waals type attraction, discussed through the DLVO theory, where the predominance of repulsive forces allows to guarantee the physical stability of the colloidal system [10,11,12]. This electrostatic repulsion is important when the particles approach, providing the double electrical layer, the necessary energy barrier to prevent the union between the particles [13].

Different methods have been used to stabilize a colloidal system, all exerting a synergistic effect: modification of the ionic strength of the medium, modification of the pH, addition of compounds of surface activity, use of hydrocolloids to increase the strength of viscous nature and reduce the molecular mobility of particles in the continuous phase, reduction of the size of dispersed particles (shear, ultrasound or other), among others [14-18]. Under this context, a diversity of properties related to the stability of colloidal systems have been associated: Viscosity ( $\mu$ ), ionic strength, zeta potential ( $\zeta$ ), dielectric constant of the continuous medium ( $\epsilon$ ), stability index by spectral absorption (R), pH, particle sizes ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ ,  $D_{[3,2]}$ ,  $D_{[4,3]}$  or other), density, surface tension, among others [10,19,20].

Several authors have applied homogenization processes to stabilize fruit drinks/pulps with positive results on banana [14], on rosehip nectar [15]; on orange juices [21] and on mango juice [16]. However, other authors have reported a decrease in the stability of strawberry nectar with increasing homogenization pressure, despite the reduction in particle size [22]; furthermore, the same situation occurs in strawberry suspensions obtained from vegetable processors due to the high particle sizes produced.

The objective of the research was to evaluate the influence of the high-pressure (time-pressure) homogenization process and the concentration of gum arabic (GA) on the stability of strawberry-based suspensions for spray-drying purposes.

## 2.3 Methodology

### 2.3.1 Materials

Fresh strawberries (*fragaria ananassa* Dutch, var. Monterrey) were used, refrigerated at 277,15 K until use, with a degree of maturity in the 5-6 scale according to the Colombian technical standard NTC 4103 and eliminating samples with some type of deterioration. The selected fruit had its pedicle and sepal removed; subsequently, they were washed and disinfected with citrosan®. Additionally, GA (Master Gum FT) was used.

### 2.3.2 Strawberry characterization

Moisture (Xw) was determined by the official AOAC 930.15/90 method. Total solids (TS) were determined by difference with Xw. The water activity (aw), aw point hygrometer at 25 °C (Aqualab series 3TE, Decagon) was used. The °Brix were determined according to AOAC 932.12/90 methodology, using Carl Zeiss ABBE ATAGO 89553 refractometer, with sensitivity of 0.01 °Brix. The pH was determined according to the AOAC 981.12/90 method, using Metler Toledo potentiometer. Acidity was determined according to AOAC Method 942.05/90, using 0.1 N NaOH solution evaluated with primary standard and phenolphthalein as indicator and expressed as percentage of citric acid. The extracts for the evaluation of Total Phenols (TF) and free radical catching activity by DPPH and ABTS methodologies were obtained following the methodology proposed by Shivashankara *et al.*, [23]. The quantification of TF was done by the method described by Singleton and Rossi [24]; DPPH according to the methodology of Brand-Williams *et al.*, [25] and the ABTS by the methodology of Re *et al.*, [26]. The color of strawberry pulp was determined from the CIE-L\*a\*b\* coordinates, using an X-RITE sphere spectrophotometer, model SP64, illuminant D65, observer 10° and specular component included [27]. Texture was determined in a TA: XT2 Stable Micro Systems texture analyzer, applying puncture tests, metal plunger (= 2 mm), 50 kg load cell, test speed 2 mm/s and a penetration distance of 10 mm and was reported as the maximum epidermal breaking force (Fmax). Pulp viscosity was determined after homogenization (Silverson mixer series L5 at 10000 rpm for 3 min) and using a Brookfield DVIII Ultra viscometer, accessory RV4 and 100 rpm.

### 2.3.3 Preparation of strawberry suspensions

Batches of 3 kg of strawberry suspensions were prepared, where initially the washed and disinfected fruits were crushed in an Oster Classic vegetable processor, operating at speed 3 for 2 min. Subsequently, this pulp was homogenized in a Silverson L5 series mixer at 10000 rpm for 10 min (strawberry pulp total solids 9 %), then the GA was added, keeping the container in a thermostated water bath at 293,15 K; finally, the suspension was subjected to a 2nd phase of homogenization using a ST REGIS piston homogenizer, 3DD13-2941, Chicago US at the pressure and time defined in the experimental design.

### 2.3.4 Characterization of the suspensions

The zeta potential ( $\zeta$ ) of the suspensions was determined with a Zetasizer Nano ZS90 (Malvern Instruments Ltd.), diluting the suspensions (1:100) [28]. The spectral absorption stability index (R) was determined by the ratio of absorptions (A800/A400) [29], using a UV-Visible spectrophotometer (Thermo Scientific Evolution 60) and diluting the suspensions in water (1:100). The viscosity ( $\mu$ ) of the suspension was determined with a viscometer (Brookfield DV-III Ultra) -coupled with a thermostated bath model Brookfield TC-502, temperature: 25°C, RV4 spindle, speed from 0,01 to 100 rpm, reporting the value at a speed of 100 rpm [30]. The particle size was determined with the Mastersizer 3000 (Malver Instrument) analyzer, using the LV system for liquids, and the diameters relative to the equivalent surface ( $D_{[3;2]}$ ), equivalent volume ( $D_{[3;4]}$ ), and the percentiles at 10, 50, and 90 % ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , and  $D_{90}$  respectively) were reported.

### 2.3.5 Statistical design

The response surface methodology was used, with a central composite design centered ( $\alpha=1$ ), considering the independent variables: homogenization pressure (P) (4,14-10,34 MPa), homogenization time (t) (3-5 min) and GA (0.2-0.4%), and the dependent variables were:  $\zeta$ , R,  $\mu$ , and the particle sizes ( $D_{[3;2]}$ ,  $D_{[4;3]}$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{90}$ ). The analysis of variance was worked with a significance level of 5 % and a multi-response optimization was performed, using the Desing Expert 11 ® software (Stat-easy, Inc, USA), establishing criteria that favor the stability of the colloidal system, and impacts and weights according to the ANOVA. All the variables were measured in triplicate, including the optimum obtained and the mathematical modeling of the dependent variables was made from a quadratic model, adjusting from the test of the non-adjustment and the determination coefficient ( $R^2$ ).

## 2.4 Results and discussion

### 2.4.1 Characterization of the strawberry in fresh state

Table 2-1. presents the physicochemical and physical characterization of the fresh strawberry and its pulp.

**Table 2-1** Physical-chemical and physical characterization of strawberry pulp

Parameter	Value	Parameter	Value
Xw (% bh)	91,16± 0,002	DPPH (mg Trolox/g)	1,4±0,6
TS (%)	8,84±0,002	Fmax (N)	2,6±0,4
°Brix (%)	7,74 ±0,135	L*	34,0±2,0
Acidity (%)	0,891±0,055 <sup>a</sup>	a*	15,6±3,0

$a_w$	0,962±0,002	$b^*$	4,9±1,4
Maturity Index	8,827±1,487	Cab*	16,5±3,2
TP (mg GAE/g)	5,72±0,48	hab*	16,3±3,10
ABTS (mg Trolox/g)	2,2±0,1	Pulp Viscosity (Pas)	11,93±0,0

<sup>a</sup> Expressed as citric acid

The characterization of the strawberry (*fragaria ananassa* Duch, var. Monterrey) corresponded with the values reported in the literature. Values of  $X_w$  and TS were in the range of values reported by Gil et al., [31] (86-91%); while the  $a_w$  was lower than that reported by Gil et al., [31] ( $a_w = 0,983$ ). On the other hand, Fischer *et al.*, [32] reported higher values for TS. The °Brix obtained were lower than those reported by Martinez et al., [33] in strawberry variety Festival (8,78%) and by Beltran and Ramos [34] in strawberry of the genus *fragaria vesca* (9,2±0,91%). Soluble solids in strawberries are mainly provided by sugars present in ripe fruit, mainly sucrose, glucose, and fructose, in addition to other components that are in low proportions (sorbitol, xylitol and xylose) [35]. The acidity presented similar results to the values reported by Gil et al., [31], but higher than those reported by Fischer et al., [32], being citric acid its main organic acid present, although malic and oxalic acids are also present [1].

The maturity grade identified the batches of strawberries used, on a scale of 6 according to the NTC 4103 standard. As for the TP, the values obtained were higher than those reported by Zapata *et al.*, [36] (1, 59 mg GAE/g) and by Restrepo *et al.*, [37] (1, 80 mg GAE/g). The antioxidant activity determined in terms of ABTS was lower than the values reported by Rios de Souza et al., [38] (3, 25 ± 0,38 mg Trolox/g). DPPH values were like those reported by Carvajal *et al.*, [37] (1,75 mg Trolox/g however, a high deviation is highlighted in this study, which is attributed to a lower degree of maturity in one of the evaluated batches. In general, there is a lot of research that highlights the benefits of strawberries as the 3rd fruit with the highest TP content after curuba (*passiflora mollissima*) and blackberry, and the 2nd in antioxidant capacity after curuba [36]. Finally, the pulp presented a viscosity value of 1,193 ±10 Pas, mainly caused by the pectin content of the cell walls and the fiber present [39].

The color in the peel of the strawberry is a quality factor highly appreciated by the modern consumer [40, 41], which eventually contribute to the decrease of  $L^*$ . The color exhibiting a bright and lively "pinkish-red" color, which changes over time, temperatures and other factors to a "brownish-red" color, less vivid and more opaque, due to the effect of various reactions: enzymatic browning, Maillard, ascorbic acid degradation, and others [42] or of the strawberry suspension is located in the first quadrant of the  $a^*b^*$  color plane ( $a^*$ : 15,6 ± 3,0 y  $b^*$ : 4,9 ± 1,4), attributable to the content of anthocyanins, specifically glycoside 3 pelargonidin [43, 44]. There is a difference in the color parameters of the strawberry suspension with respect to the values reported by Sanz *et al.*, [45] in the color evaluation of the whole fruit ( $a^*$  29,98 ± 2,89 y  $b^*$  19,44 ± 4,07). This difference is attributed to the anisotropic color characteristic of the tissues (red on the periphery and whitish on inside), that when being disintegrated in the suspension formation takes a lighter shade.

### 2.4.2 Characterization of strawberry-based suspensions

Table 2-2. shows the mean values and standard deviation of the dependent variables evaluated in the study of the influence of the homogenization process and the GA on the stability of strawberry suspensions. Table 2-3. presents the results of the  $p$ -values for the response surface models of the dependent variables as a function of the independent ones. On the other hand, figure 2-1. presents the response surface graphs of the dependent variables ( $R$ ,  $\mu$ ,  $\zeta$ ,  $D_{[3;2]}$ ,  $D_{[4;3]}$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$ ) a function of the independent variables ( $P$ ,  $t$  y  $GA$ ).

Table 1 2- Stability assessment of strawberry-based suspension

Run	P (MPa)	t (min)	GA (% w/w)	- $\zeta$ (mV)	R	$\mu$ (Pas)	D <sub>[3:2]</sub> ( $\mu$ m)	D <sub>[4:3]</sub> ( $\mu$ m)	D <sub>10</sub> ( $\mu$ m)	D <sub>50</sub> ( $\mu$ m)	D <sub>90</sub> ( $\mu$ m)
1	4,14	4	0,3	25,3±0,9	0,51±0,01	10,96,0±0,05	110,4±54,3	259,7±9,03	91,3±1,2	220,0±1,7	484,3±22,5
2	10,34	3	0,4	27,0±0,7	0,50±0,00	8,62±0,02	47,7±0,6	242,0±16,5	61,1±0,6	168,7±2,1	464,3±11,5
3	10,34	3	0,2	25,3±1,0	0,47±0,00	9,53 ±0,07	80,1±35,3	145,3±1,1	53,7±1,3	135,7±1,3	253,0±5,0
4	7,24	4	0,3	28,3±0,6	0,48±0,01	11,45±0,01	38,3±0,8	187,6 ±3,5	54,4±0,7	150,7 ± 2,8	372,7 ±7,7
5	10,34	4	0,3	25,7±0,6	0,47±0,01	9,69±0,11	48,2±3,0	171,7±8,1	54,7±2,0	145,7±6,4	331,3±17,2
6	7,24	4	0,2	26,1±1,2	0,51±0,01	8,55±0,03	44,6±0,5	199,3±8,1	56,1±0,3	152,3±1,5	393,3±15,0
7	7,24	4	0,3	26,4±0,8	0,49±0,01	11,77±0,06	41,9±2,9	193,3±6,4	59,8±3,1	158,3±4,2	378,3±11,3
8	7,24	3	0,3	25,3±0,5	0,53±0,01	8,48±0,06	62,0±0,8	213,0±1,0	72,2±1,1	180,7±1,5	405,7±1,5
9	4,14	3	0,4	28,1±1,1	0,52±0,01	8,69±0,08	63,9±0,9	265,3±8,3	82,0±0,4	207,7±2,1	515,0±14,8
10	4,14	3	0,2	26,1±1,2	0,50±0,01	9,67±0,01	65,9±0,9	273,0±6,6	81,0±0,9	203,7±2,3	508,7±12,8
11	10,34	5	0,2	26,3±0,6	0,47±0,02	9,87±0,13	89,1±13,6	140,3±12,8	49,2±3,9	130,3±10,1	248,3±28,3
12	10,34	5	0,4	24,8±1,2	0,48±0,01	13,020±0,03	38,5±0,3	208,7±7,5	50,8±0,5	156,3±2,1	432,7±21,6
13	4,14	5	0,2	26,0±1,1	0,52±0,13	10,54±0,07	68,0±0,7	279,3±19,4	82,5±0,3	204,0±2,6	510,7±12,0
14	7,24	4	0,4	26,1±1,0	0,49±0,01	10,83±0,07	48,9±0,6	206,3±9,9	59,0±0,7	154,7±1,6	400,7±12,8
15	7,24	5	0,3	25,9±0,9	0,50±0,01	11,10±0,07	45,1±0,2	191,3±1,1	57,8±0,1	152,3±1,1	377,3±5,5
16	7,24	4	0,3	25,5±0,6	0,46±0,01	11,78±0,02	34,4±0,1	179,0 ±1,4	47,4±0,1	139,0±0,7	362,3±2,8
17	7,24	4	0,3	27,7±0,6	0,46±0,01	11,13±0,03	30,6±0,2	191,0±7,0	48,6±0,8	148,3±3,1	392,7±16,0
18	7,24	4	0,3	25,4±0,6	0,51±0,01	11,13±0,08	55,0±0,7	241,7±10,7	73,6±0,5	189,3±2,0	480,7±26,8
19	4,14	5	0,4	25,7±1,4	0,52±0,01	13,22±0,10	54,9±1,4	233,7±10,0	70,6±1,2	185,0±4,6	465,7±24,1
20	7,24	4	0,3	25,4±0,9	0,50±0,01	10,88±0,19	51,4±1,5	241,7±39,6	67,7±1,0	175,3±3,0	458,3±40,5





The  $\zeta$  varied between -24.79 and -28.3 mV, denoting a negative electrical potential contributed mainly by anions from the dissociation of salts present in the strawberry (citrates, malates and ascorbates of potassium, magnesium and calcium, among others) [1], [36]; In addition to G, the fruit has pectin in its cell walls. Pectins and GA have carboxyl groups susceptible to ionization, (glucuronic acid in the case of gum arabic and galacturonic acid in pectin) that depends on its degree of methoxylation (in pectin) [47], [48]. At pH 3.5, the pH value of the suspension, pectin is negatively charged, because this polyacid has a pKa between 3.5 and 4.0, so the predominant species in this pH range is in the form of galacturonate [49]. This anion charge is located in the coion layer attached to the interphase of the dispersed particles; while a high density of positive charge contributed by the dissociated ions is located in the double electrical layer or Stern layer, contributing to strengthen the repulsive forces between particles and therefore to the stability of the colloidal system [50]. The  $\zeta$  did not present significant differences ( $p > 0.05$ ) with respect to the independent variables, a situation that has also been reported in mango-based colloidal systems ( $-16,1 \pm 0,2$  mV) [16]. The small changes observed can be associated with a greater or lesser release of ionizing compounds [50].

Some researchers have reported that when a colloidal system presents a  $|\zeta| > 25$  mV, there is a strong electrostatic repulsion of the particles, which gives it an adequate physicochemical stability [18], [27], [29]. Similar values have been reported for stable guacamole emulsions ( $|\zeta| = 27,7 \pm 0,3$  mV) [51]. Other research has reported superior values in coconut-based colloidal systems ( $|\zeta| = 45,6 \pm 2,5$  mV) [52] and in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) suspensions ( $|\zeta| = 33.8 \pm 4,0$  mV) [27]; however, Marin et al., [53] reported stable blackberry suspensions with probiotics and prebiotics with  $|\zeta| = 13.3 \pm 0.3$  mV. An increase of the amount of probiotic suspension with the addition of GA and xanthan gum is highlighted in some studies [27], [29], conferring greater stability to fruit pulps and their beverages.

In this context, strawberry-based suspensions have an important electrostatic component which, along with the viscous forces of the colloidal system, gives them physicochemical stabilization.

**Table 2- 3** p-values for the response surface models of the dependent variables as a function of the independent ones

A: P (MPa); B: t (min); C: GA (%)

Variable	Principal effects			Quadratic effects			Interaction effects			R <sup>2</sup>
	A	B	C	AA	BB	CC	AB	AC	BC	
$\zeta$	0,546	0,369	0,559	0,657	0,751	0,414	0,651	0,619	0,098	0,37
R	0,020*	0,531	0,618	0,555	0,276	0,685	0,586	0,855	0,515	0,53
$\mu$	0,375	0,001*	0,050	0,769	0,469	0,370	0,796	0,817	0,01*	0,81
D <sub>[3;2]</sub>	0,914	0,463	0,015*	0,475	0,114	0,498	0,816	0,039*	0,323	0,79
D <sub>[4;3]</sub>	0,001*	0,223	0,101	0,255	0,900	0,859	0,829	0,004*	0,285	0,86
D <sub>10</sub>	0,004*	0,172	0,969	0,078	0,688	0,314	0,836	0,422	0,450	0,78
D <sub>50</sub>	0,000*	0,174	0,345	0,049*	0,726	0,298	0,913	0,107	0,489	0,83
D <sub>90</sub>	0,0001*	0,394	0,016*	0,517	0,994	0,830	0,924	0,003*	0,503	0,86

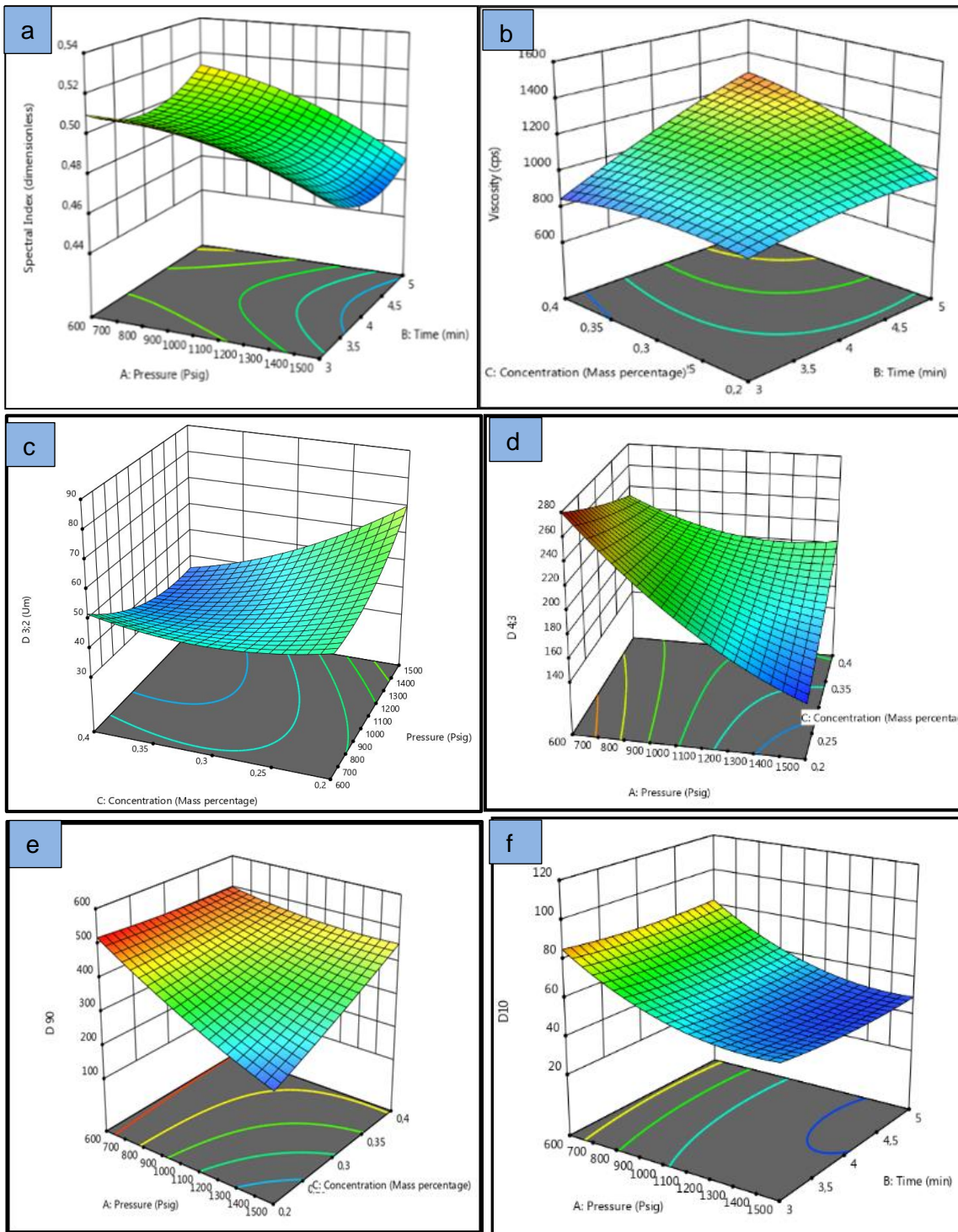
The R index presented significant differences ( $p < 0.05$ ) with respect to P; while there were no differences with respect to t and GA. Average values fluctuated between  $0.46 \pm 0.01$  and  $0.53 \pm 0.01$ . According to the behavior of the response surface graph (figure 2-1 a), R presents a decrease in its value with the increase of P, being more favorable to  $P = 1500$  psi (10,34 Mpa), which is consistent with a greater disintegration of the particles, which confers a change in the optical properties of the suspension, since R is related to the properties of light scattering, average particle size and wavelength [54]. In agreement with Kaufman and Garti [55], colloidal systems with low R values show good physicochemical stability due to the smaller particle size; therefore, the strawberry suspension was consistent with this hypothesis and was enhanced by the previously mentioned effect of the  $\zeta$ . Similar R values have been reported in stable yacon (*smallanthus sonchifolius*) suspensions (0.446 - 0.607) [27].

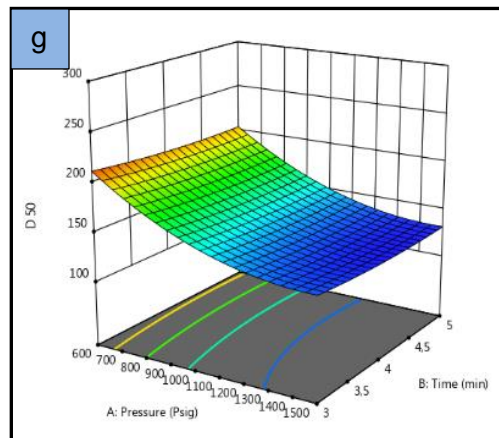
The  $\mu$  is fundamental in the definition of the stability of colloidal systems, where the presence of hydrocolloids contributes to form networks that greatly influence the mobility of particles in the continuous phase and enhance viscous forces against gravitational forces [13], [56]. The  $\mu$  showed significant differences ( $p < 0.05$ ) with respect to t and with the linear interaction t-GA; while there was no significant effect ( $p > 0.05$ ) in the interval of P evaluated (8.27-10.34 Mpa). A consistent behavior was observed with respect to GA and t, increasing the one with the increase of GA and t; on the other hand, the t-GA interaction was positive, denoting the highest  $\mu$  when the system operates at higher t (5 min) and higher GA (0.4%) (figure 2-1 b). On the other hand, it is considered that cell wall pectin has a synergistic effect with added GA, enhancing at higher t, where a higher release from the cell structure is favored and the values reached are comparatively high compared to banana suspensions (204 Pas) and similar to suspensions of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) (1000 Pas) [27], and avocado emulsions (1034 Pas) [51].

The  $\mu$  of the SD feed is a critical parameter for the properties of the powders to be obtained; since it generates a resistance to displacement, greatly influencing the radial and tangential velocity components during atomization, and therefore the drying kinetics and other properties [57], [58]. This situation has made it possible to define criteria for the operability of the pilot unit in which the milling cutter suspension (Vibrasec, model PASALAB 1.5) with  $\mu < 1000$  Pas will be used.

The effect of P is very characteristic for each product and on its stability; for example, Moscovici Joubran *et al.* [14] reported a destabilization of strawberry nectars when the  $\mu$  was reduced by the effect of the increase in P (50, 100 y 150 Mpa); Augusto, Ibarz, and Cristianini [59] reported a modification of the rheological parameters of tomato pulp, decreasing the resistance of the gel with the increase in P; Yu *et al.*, [60] reported a positive effect of homogenization in taro (*Colocasia esculenta*) suspensions, reducing particle size and sedimentation due to increased P; the same situation is reported by Leite, Augusto and Cristianini, in cashew apple juice [61].

Figure 2-1 Response surface graphs of strawberry-based suspensions





In general, piston or high-pressure homogenizers affect the behavior of the physicochemical properties of the colloidal system, since they force the structure to a debilitation according to the level of P applied. At the same time, there is a stretching of the macromolecules present in the original food or in the added additives, which are mostly solved, trapping more water between the macromolecular segments during their relaxation stage (search for the state in the form of a statistical sphere). In this way, the rheological behavior of the system is modified, according to the interactions segment-solvent and segment-segment present [62], [63]. In the case of strawberry suspensions, viscous forces contribute to the physicochemical stability of the colloidal system

The particle sizes ( $D_{[3;2]}$ ,  $D_{[4;3]}$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , and  $D_{90}$ ) were mainly significant ( $p < 0.05$ ) with respect to the independent variables P, GA, and the P-GA interaction. The  $D_{[3;2]}$  fluctuated between  $30,6 \pm 0,2$  and  $110,4 \pm 54,3$   $\mu\text{m}$ , where the behavior showed a decrease of the  $\phi$  at higher levels of GA in the formulation; moreover, the effect of the P is mainly observed with the negative interaction with GA, where it is minimized at 600 Psi (4,14 Mpa) and in the whole range of GA; while it tends to be maximized at 1500 psi (10,34 Mpa) and 0.2% GA (figure 2-1 c).

As for the average diameter of Brouckere ( $D_{[4;3]}$ ), it fluctuated between  $140.3 \pm 12.8$  and  $279.3 \pm 19.4$   $\mu\text{m}$ , showing a clear behaviour of P by reducing the particle size with its increase; while, the effect of GA is more evident when it interacts with P, being the biggest decrease when the system operates at 1500 psi (10,34 Mpa) and 0.2 % GA ( $280 \rightarrow 140$   $\mu\text{m}$ ), where the fluid behaves with less  $\mu$  and the shear effect becomes more effective in the disintegration of the particles (figure 2-1 d). Any increase in GA ( $> \mu$ ) does not favor the reduction of  $D_{[4;3]}$  reaching 1500 psi (10,34 Mpa) and 0.4 % GA ( $230 \rightarrow 200$   $\mu\text{m}$ ). This characteristic can be attributed to the protective effect of the hydrocolloid by retaining the solid particles of the bur suspension in its cross-linked structure and protecting the solids from shear stresses.

The percentile D90 presented significant differences ( $p < 0.05$ ) with respect to P, GA and the linear interaction P-GA, while t was not an influential variable. As for  $D_{10}$  and  $D_{50}$ , it

was observed that  $D_{90}$  decreases with increasing  $P$ ; however, the level of reduction depends on the negative interaction with  $GA$  (figure 2-1 e). When the formulation contains low levels of  $GA$  (0.2 %) and  $P = 1500$  psi (10,34 Mpa),  $D_{90}$  is minimized ( $\approx 248 \mu\text{m}$ ); while, at  $P = 1500$  psi (10,34 Mpa) and high levels of  $GA$  (0.4 %), the value of  $D_{90}$  was  $430 \mu\text{m}$ . On the other hand, it is observed that the system operating at  $P = 600$  psi (4,14 Mpa) the synergy with the  $GA$  is negligible. This situation was already mentioned above, attributable to the protective effect of  $GA$ ; this behavior was also observed in yacon suspensions; where xanthan gum presented a protective effect against shear stress in the homogenization ( $D_{50}$ ); the different percentiles  $D_{10}$  ( $127.8 \pm 8.2$ ),  $D_{50}$  ( $251.2 \pm 16.3$ ), and  $D_{90}$  ( $424.3 \pm 28.7$ ) for the yacon suspension were higher than the particle sizes for the strawberry suspension; this is attributed to the higher fiber content in the yacon suspension [27].

Percentiles  $D_{10}$  and  $D_{50}$  showed significant differences ( $p < 0.05$ ) with  $P$  (figure 2-1 f y g), while  $t$  and  $GA$  were not critical independent variables. A similar behavior is observed in both variables, where fluctuations were low: ( $91,3 \pm 1,2 - 47,4 \pm 0,1 \mu\text{m}$ ) and ( $220,0 \pm 1,7 - 130,3 \pm 10,1 \mu\text{m}$ ) and their average values of  $63,6 \pm 13,0$  and  $167,9 \pm 26,3 \mu\text{m}$  respectively. The behavior of both variables was as expected, where a decrease in particle size is observed with an increase in  $P$ , reaching  $D_{10}$  approximately  $204,17 \mu\text{m}$  ( $P = 600$  psi (4,14 Mpa)) y  $147,75 \mu\text{m}$  ( $P = 1500$  psi (10,34 MPa)).

### 2.4.3 Experimental optimization

The experimental optimization was defined under the following criteria: minimize  $\zeta$ ,  $R$ ,  $D_{[3,2]}$ ,  $D_{[4,3]}$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , and  $D_{90}$  and fixed  $\mu$  in  $10,0$  Pas, achieving 84 % desirability at  $P = 9,89$  MPa,  $t = 4.7$  min and  $GA = 0.22$  %. Table 4 shows the values of the experimental validation and the theoretical values obtained from the quadratic models at the determined optimal condition. The variables  $\zeta$ ,  $R$ ,  $\mu$ ,  $D_{10}$ , and  $D_{50}$  presented experimental values obtained from triplicates with percentage errors against the theoretical one of less than 11 %, while for  $D_{[3,2]}$ ,  $D_{[4,3]}$ , and  $D_{90}$  the differences represented high percentages due to the complexity of adjusting for multiple responses.

The values of  $D_{[3,2]}$  y  $D_{[4,3]}$  obtained in the experimental validation at the pressure of  $10.24$  MPa,  $41.8 \pm 0.6$  and  $186.7 \pm 2.5 \mu\text{m}$  were higher than those obtained by Moscovici Joubran et al., [22] in the process of homogenizing strawberry nectar at the pressure of  $50$  MPa ( $11.6 \pm 0.8 \mu\text{m}$  and  $132.0 \pm 1.5$  respectively); which is consistent due to the effect of higher shear forces by the higher  $P$  applied. On the other hand, other authors reported  $D_{[4,3]}$  of  $1 \mu\text{m}$  for the strawberry juice homogenization process at  $100$  MPa, these values conferred good stability to the sedimentation [44]

**Table 2-2** Optimization using the design optimization module

Parameters	Weight	Impact	Experimental value	Theoretical value	Percentage error
$\zeta$ (mV)	1	++	-27,0±0,8	-26,1	3,4
R	0,1	+++++	0,47±0,02	0,47	0,0
$\mu$ (Pas)	1	+++++	890,0±47,5	10,00	11,0
D <sub>[3,2]</sub> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	+++	41,8±0,7	71,2	41,2
D <sub>[4,3]</sub> ( $\mu\text{m}$ )	1	++++	186,7±2,5	145,9	27,9
D <sub>10</sub> ( $\mu\text{m}$ )	1,04	++++	54,3±0,6	49,7	9,1
D <sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ )	1,0	+++	148,3±1,5	153,4	3,3
D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )	0,1	+++	370,3± 8,1	268,5	37,9

## 2.5 Conclusion

The evaluation of a strawberry-based colloidal system for use in spray drying processes in the PASLAB 1.5 pilot unit (Vibrasec S.A.S), fulfilled the requirements for processing in terms of physical-chemical stability and ( $\mu < 1000$  Pas). In general, the strawberry suspension was mainly affected by P, GA and P-AG interaction, while t was not a critical variable. The strawberry-based colloidal system showed good physicochemical stability, caused by several synergistic effects; on the one hand, it has an important electrical potential in the vicinity of the co-ion layer (-27 mV), which contributes to enhance the repulsive forces between the particles against the attractive forces; on the other hand, viscous forces (favored by the presence of the added GA and native pectin) predominate over gravitational forces, which are directly related to particle size, a variable highly favored by the effect of higher applied P.

## 2.6 Acknowledgement

The authors would like to thank the Secretary of Agriculture and Rural Development of the Department of Antioquia, the Ministry of Science, Technology and Innovation, Colombia (Minciencias) (formerly Colciencias) and the National University of Colombia, Medellin, for funding the project: strengthening the competitiveness of the production chains of blackberry, strawberry and cape gooseberry in the Department of Antioquia, through the development and industrial scale-up of agglomerated functional foods with potential antioxidant effect. This project allowed the development of this research.

## 2.7 Bibliographic

[1] Heikki, K., M. Hakala, A.M. Pelkkikangas, and A. Lapveteläinen. 2000. Sugars and Acids of Strawberry Varieties. *European Food Research and Technology*. 212(1):81-85. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002170000244>

- [2] Mosquera, L.H. 2010. 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 no publicada]. Universitat Politècnica de València. DOI: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/9035>.
- [3] Gasperotti, M., D. Masuero, F. Mattivi, and U. Vrhovsek. 2015. Overall Dietary Polyphenol Intake in a Bowl of Strawberries: The Influence of *Fragaria* Spp. in Nutritional Studies." *Journal of Functional Foods*. 18:1057–1069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.08.013>
- [4] Gol, N., P.R. Patel, and T.V.R. Rao. 2013. Improvement of Quality and Shelf-Life of Strawberries with Edible Coatings Enriched with Chitosan. *Postharvest Biology and Technology*. 85:185-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.008>
- [5] Feliziani, E., and G. Romanazzi. 2016. Postharvest Decay of Strawberry Fruit: Etiology, Epidemiology, and Disease Management. *Journal of Berry Research*. 6(1):47-63. DOI: <https://doi.org/10.3233/JBR-150113>
- [6] Phisut, N. 2012. Spray Drying Technique of Fruit Juice Powder: Some Factors Influencing the Properties of Product. *International Food Research Journal*. 19(4):1297-1306.
- [7] Piorkowski, D.T., and D.J. McClements. 2014. Beverage Emulsions: Recent Developments in Formulation, Production, and Applications. *Food Hydrocolloids*. 42 (part 1):5-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.009>
- [8] McClements, D.J. 2004. *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques: Second Edition*. Boca Ratón. CRC Press
- [9] Kubo, M. T. K., P. Augusto, and M. Cristianini. 2013. Effect of High-Pressure Homogenization (HPH) on the Physical Stability of Tomato Juice. *Food Research International*. 51(1):170-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.004>
- [10] McClements, D.J. 2007. Critical Review of Techniques and Methodologies for Characterization of Emulsion Stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 47(7):611-649. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390701289292>
- [11] Coupland, J.N., and H. Sigfusson. 2005. Food Emulsions. in *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering - 4 Volume Set*. Boca Ratón. CRC Press Taylor and Francis. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420029581.ch9>
- [12] Missana, T., and A. Adell. 2000. On the Applicability of DLVO Theory to the Prediction of Clay Colloids Stability. *Journal of Colloid and Interface Science*. 230(1):150-156. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7003>
- [13] Dickinson, Eric. 2009. Hydrocolloids as Emulsifiers and Emulsion Stabilizers. *Food Hydrocolloids*. 23(6):1473-1482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>

- [14] Calligaris, S., M. Foschia, I. Bartolomeoli, M. Maifreni, and L. Manzocco. 2012. Study on the applicability of high-pressure homogenization to produce banana juices. *LWT-Food Science and Technology*, 45: 117-121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.07.026>
- [15] Saricaoglu, F.T., I. Atalar, V. A. Yilmaz, H. I. Odabas, and O. Gul. 2019. Application of Multi Pass High Pressure Homogenization to Improve Stability, Physical and Bioactive Properties of Rosehip (*Rosa Canina L.*) Nectar. *Food Chemistry*.282:67-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.002>
- [16] Zhou, L., Y. Guan, J. Bi, X. Liu, J. Yi, Q. Chen, X. Wu, and M. Zhou. 2017. Change of the Rheological Properties of Mango Juice by High Pressure Homogenization. *LWT*.82: 121-130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.038>
- [17] McClements, David Julian. 2009. Biopolymers in Food Emulsions. in *Modern Biopolymer Science*. Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374195-0.X0001-8>
- [18] Dickinson, Eric. 2014. Understanding Food Structures: The Colloid Science Approach. in *Food Structures, Digestion and Health*. Sidney. Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02243-0>
- [19] Yu, Z. Y., S.W. Jiang, X. M. Cao, S. T. Jiang, and L. J. Pan. 2016. Effect of High-Pressure Homogenization (HPH) on the Physical Properties of Taro (*Colocasia Esculenta L.*) Schott) Pulp. *Journal of Food Engineering*. 177:1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.042>
- [20] Dickinson, Eric. 2003. Hydrocolloids at Interfaces and the Influence on the Properties of Dispersed Systems. *Food Hydrocolloids*. 17(1): 25-39. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00120-5)
- [21] Leite, T. S., P. E. Augusto, and M. Cristianini. 2014. The use of high-pressure homogenization (HPH) to reduce consistency of concentrated orange juice (COJ). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 26: 124-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.08.005>
- [22] Moscovici, A., I. H. Katz, Z. Okun, M. Davidovich and A. Shpigelman. 2019. The Effect of Pressure Level and Cycling in High-Pressure Homogenization on Physicochemical, Structural and Functional Properties of Filtered and Non-Filtered Strawberry Nectar. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 57:102203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102203>
- [23] Shivashankara, K.S, S. Isobe, M. I. Al-Haq, M. Takenak and T. Shiina .2004. Fruit antioxidant activity, ascorbic acid, total phenol, quercetin, and carotene of Irwin mango fruits stored at low temperature after high electric field pretreatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(5): 1281-1286. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf030243l>.



- [24] Singleton, V. L., J. A. Rossi. 1965. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagent. *Am J Enol Vitic.* 16:144-158.
- [25] W. Brand-Williams, W., M. E. Cuvelier and C. Berset. 1994. Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. *Lebensm. -Wiss. u.-Technol* 28:25-30.
- [26] Re, R., N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang, Rice-C.A. Evans. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biol. Med.* 26, 1231–1237.
- [27] Arango. M.I., M. Cortés and E. Largo. 2019. Stability of a colloidal suspension of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) intended for spray drying. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín.* 72(2): 8863-8871. DOI: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.75362>
- [28] Rezvani, E., G. Schleining, and A.R. Taherian. 2012. Assessment of physical and mechanical properties of orange oil-in-water beverage emulsions using response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology.* 48(1):82-88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.025>
- [29] Mirhosseini, H., C. H. Ping, S. A. Nazimah, and S. Yusof. 2008. Effect of Arabic Gum, Xanthan Gum and Orange Oil Contents on  $\zeta$ -Potential, Conductivity, Stability, Size Index and PH of Orange Beverage Emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 315(1-3): 47-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.07.007>
- [30] Mirhosseini, H., C. H. Ping, S. A. Nazimah, and S. Yusof and B. H. Chern. 2009. Characterization of the Influence of Main Emulsion Components on the Physicochemical Properties of Orange Beverage Emulsion Using Response Surface Methodology. *Food Hydrocolloids.* 23(2): 271-280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.02.007>
- [31] Gil, E. Y., A.L. Duque, and V.D. Quintero, 2019. Obtaining minimally processed strawberry (*fragaria x ananassa*) products and their physicochemical, microbiological, and sensory characterization by using edible coatings. *DYNA.* 85(207):183-191. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.72982>
- [32] Fischer, G., D. López, M. Sánchez, and J.F. Acuña. 2018. Physicochemical properties of seven outstanding strawberries (*fragaria x ananassa* Duch.) varieties cultivated in Cundinamarca (Colombia) during maturation. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria.* 19(1):147-162. DOI: [https://doi.org/10.21930/rcta.vol19\\_num1\\_art:848](https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num1_art:848)
- [33] Martínez, G., J. Mercado, M. López, and Z. Prieto. 2009. Propiedades Físicoquímicas de Seis Variedades de Fresa (*Fragaria ananassa*) que se Cultivan en Guanajuato. Instituto de Ciencias Agrícolas de La Universidad de Guanajuato.
- [34] Beltrán, A., and M. Ramos. 2010. Estudio de La Vida Útil de Fresas (*Fragaria Vesca*) Mediante Tratamiento Con Radiación Ultravioleta de Onda Corta (UV-C). *Revista Tecnológica ESPOL – RTE.* 23(2): 17-24.

- [35] Giampieri, F., S. Tulipani, J. M. Alvarez, J. L. Quiles, B. Mezzetti, and M. Battino. 2012. The Strawberry: Composition, Nutritional Quality, and Impact on Human Health. *Nutrition*. 28(1):9-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.08.009>
- [36] Zapata, S, A. M. Piedrahita and B. Rojano. 2014. Capacidad Atrapadora de Radicales Oxígeno (ORAC) y Fenoles Totales de Frutas y Hortalizas de Colombia. *Perspectivas en nutrición humana*. 16(1): 25-36. DOI: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/nutricion/article/view/20310>
- [37] Carvajal de Pabón, L. M., S. Turbay, B. Rojano, L.M. Álvarez, S. Restrepo, J.M. Álvarez, Bonilla, K.C. C, Ochoa, & N. 2011. Algunas especies de Passiflora y su capacidad antioxidante. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*. 16(4): 354-363. DOI: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1028-47962011000400007&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962011000400007&lng=es&tlng=es).
- [38] Rios de Souza, V., P.A. Pimenta, T. L. Teodoro, L. C. de Oliveira, R. Pio and F. Queiroz. *Food Chemistry*. 156:362-368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.125>
- [39] Haminiuk, C. W. I., M. R. Sierakowski, D. R. Izidoro, G. M. Maciel, A. de P. Scheer, and M. L. Masson. 2009. Comportamento Reológico de Sistemas Pécticos de Polpas de Frutas Vermelhas. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*. 9(1):225-231. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000100035>.
- [40] Šamec, D., M. Maretić, I. Lugarić, A. Mešić, B. Salopek-Sondi, and B. Duralija. 2016. Assessment of the Differences in the Physical, Chemical and Phytochemical Properties of Four Strawberry Cultivars Using Principal Component analysis. *Food Chemistry*. 194(1):828-834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.095>
- [41] Almenar, E. R. 2006. Envasado Activo de Fresas Silvestres. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [42] Tiwari, B. K., C. P. O'Donnell, A. Patras, and P. J. Cullen. 2008. Anthocyanin and Ascorbic Acid Degradation in Sonicated Strawberry Juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56(21):10071-10077. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf801824v>
- [43] Cao, X., X. Bi, W. Huang, J. Wu, X. Hu, and X. Liao. 2012. Changes of Quality of High Hydrostatic Pressure Processed Cloudy and Clear Strawberry Juices during Storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 16:181-190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.05.008>
- [44] Karacam, C. H., S. Sahin, and M.H. Oztop, 2015. Effect of high pressure homogenization (microfluidization) on the quality of Ottoman Strawberry (F. Ananassa) juice. *LWT - Food Science and Technology*. 64(2)932: 937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.064>

- [45] Sanz, C., A.G. Pérez, R. Olías, and J.M. Olías. 1999. Quality of strawberries packed with perforated polypropylene. *Journal of Food Science*. 8(2):65-71. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15124.x>
- [46] Mahmood, T., F. Anwar, M. Abbas, M.C Boyce N. Saari, (2012). Compositional variation in sugars and organic acids at different maturity stages in selected small fruits from Pakistan. *International Journal of Molecular Sciences*. 13(2):1380-1392. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms13021380>
- [47] McClements, D. J. 2009. Biopolymers in Food Emulsions. In *Modern Biopolymer Science*. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374195-0.00004-5>
- [48] Alba, K., L.M.C. Sagis, and V. Kontogiorgos. 2016. Engineering of acidic O/W emulsions with pectin. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 145:301-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.05.016>
- [49] Croak, S. and M. Corredig. 200). The role of pectin in orange juice stabilization: Effect of pectin methylesterase and pectinase activity on the size of cloud particles. *Food Hydrocolloids*. 20(7):91-965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.10.016>
- [50] Cano, C., D.I. Téllez, R. Viveros, M. Cornejo, C.Y. Figueroa, E. García, L. Alamill, H.S. García, and GF. Gutiérrez. 2018. Zeta Potential of Food Matrices. In *Food Engineering Reviews*. 10: 113-138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9176-z>
- [51] Estrada, E. M., M.C. Rodríguez, and G.A. Correa. 2017. Stability of a colloidal system based on avocado (*Persea americana* Mill. cv. Hass) and others: Effect of process and composition. *Acta Agronomica*. 66(3):338-346. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v66n3.57582>
- [52] Lucas, J.C., L. C. Tobón and M. Cortés. 2018. Influence of the Composition of Coconut-Based Emulsions on the Stability of the Colloidal System. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 14(3):77-92. DOI: <https://doi.org/10.19026/ajfst.14.5841>
- [53] Marin, Z. T., M. Cortés, O.I. Montoya and J.C. Arango. 2019. Viability of *Lactobacillus casei* ATCC 393 and properties in Andean blackberry suspensions with probiotic and prebiotic characteristics. *DYNA*. 86(202):179-186. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.72929>
- [54] Aizawa, H. 2014. Novel pragmatic turbidimetric data analysis method for evaluating the stability of emulsions. *International Journal of Food Properties*. 17(6); 1264-1274. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.685674>
- [55] Kaufman, V.R. and N. Garti. 1981. Spectral absorption measurements for determination of ease of formation and stability of oil in water emulsions. *Journal of dispersion science technology*. 2(4): 475-490. DOI: <https://doi.org/10.1080/01932698108943925>

- [56] Williams, P. A., and G.O. Phillips. 2009. Introduction to food hydrocolloids. In Handbook of Hydrocolloids: Second Edition. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845695873.1>
- [57] Lopez, M, B. E., L. M. Carvajal and L. D. J. Millan. 2009. Establecimiento de condiciones de la mezcla de pulpa de banano (*Musa paradisiaca* L.) para someter a secado por aspersión. *Vitae*, 16(3), 287–296.
- [58] Miller, D. A., D. Ellenberger, and M. Gil. 2016. Spray-Drying Technology. July, 437–525. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_10)
- [59] Augusto, E. D., A. Ibarz, and M. Cristianini. 2013. Effect of High-Pressure Homogenization (HPH) on the Rheological Properties of Tomato Juice: Viscoelastic Properties and the Cox-Merz Rule. *Journal of Food Engineering*. 114(1): 57-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.07.025>
- [60] Yu, Z. Y., S. W. Jiang, X. M. Cao, S. T. Jiang, and L. J. Pan. 2016. Effect of high-pressure homogenization (HPH) on the physical properties of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) pulp. *Journal of Food Engineering*. 177:1-8. DO: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.042>
- [61] Leite, T. S., P. E. D., Augusto, and M. Cristianini. 2015. Using High Pressure Homogenization (HPH) to Change the Physical Properties of Cashew Apple Juice. *Food Biophysics*. 10:169-180. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9385-9>
- [62] Semenova, M. G., E. Dickinson, Burlakova and G. Zaiko. 2010. Biopolymers in food colloids: Thermodynamics and molecular interactions. In *Biopolymers in Food Colloids: Thermodynamics and Molecular Interactions*. DOI: <https://doi.org/10.1201/b12817>
- [63] Nguyen, P. M., W. Guiga, and O. Vitrac. 2016. Molecular thermodynamics for food science and engineering. *Food Research International*. 88(part A):91-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.03.014>

# Capítulo 3 Microencapsulación de extracto de fresa: optimización experimental del proceso y formulación

## 3.1 Resumen

La fresa es un fruto con gran aceptación por el consumidor, debido a su agradable sabor y funcionalidad; es rico en vitamina C, taninos, flavonoides, antocianinas, catequina, quercetina y kaempferol, ácidos orgánicos (cítrico, málico, oxálico, salicílico y elágico) y minerales (K, P, Ca, Na y Fe). Su composición le confiere un alto poder antioxidante; por lo que, el proceso de microencapsulación utilizando el secado por aspersion (SD), representa una alternativa tecnológica efectiva en la protección de sus componentes activos y en la conservación del producto. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la formulación de alimentación y del proceso de secado por aspersion sobre la calidad de las microcápsulas de extracto de fresa. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) con un diseño central compuesto centrado en la cara ( $\alpha=1$ ), considerando los factores: maltodextrina (MD) (7.5 – 11.5 % p/p), temperatura de entrada de aire (IAT) (140 - 160°C), temperatura de salida del aire (OAT) (80 - 90 °C) y velocidad del disco atomizador (ADS) (16.000 – 20.000 rpm), y las variables de respuesta: humedad ( $X_w$ ), actividad acuosa ( $a_w$ ), solubilidad (S), humectabilidad (Hu), higroscopicidad (Hy), densidad bulk ( $\rho_b$ ), densidad compactada ( $\rho_c$ ), retención de fenoles totales (TF), retención de capacidad antioxidante (métodos DPPH y ABTS), ángulo de reposo (AR), tamaño de partícula del polvo de fresa ( $D_{[3;2]}$ ), color (CIE-LAB) y rendimiento del proceso (Y). Para los niveles evaluados no hubo efecto de las variables independientes sobre  $X_w$ ,  $a_w$ ,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , DPPH, fenoles totales, cromaticidad  $b^*$  y  $D_{[3;2]}$ . La S fue afectada por OAT y ADS, y la interacción IAT\*MD, ADS\*MD, IAT<sup>2</sup> y MD<sup>2</sup>. La Hu dependió de los factores IAT, OAT y las interacciones IAT\*OAT y IAT\*MD. La retención de la actividad ABTS fue afectada por los factores ADS, ADS\*MD y IAT<sup>2</sup>. El Y del proceso fue afectado por OAT, MD, IAT\*OAT, IOT\*ADS, IOT\*MD, OAT\*ADS, ADS\*MD, IOT<sup>2</sup> y OAT<sup>2</sup>. El incremento de MD causó disminución de Hy. El valor de L\* se vio afectado por la ADS y MD, las afectaciones por la temperatura no presentaron efecto en los niveles evaluados, la cromaticidad  $a^*$  fue afectada positivamente por el incremento de ADS. IAT y MD presentaron efecto estadístico sobre AR. La optimización

experimental alcanzó una deseabilidad del 73,7% siendo las condiciones óptimas: IAT 154 °C, OAT 89 °C, DSA 16,805 rpm y MD 11,5%.

**Palabras clave:** *Fragaria ananassa* Dutch, secado por atomización, optimización experimental.

## 3.2 Introducción

En el mundo se presenta una creciente demanda por el consumo de frutas; esta condición se basa en las tendencias alimentarias de la población por el consumo de alimentos saludables con actividad funcional (Forbes-Hernandez *et al.*, 2016). La fresa (*Fragaria ananassa* Dutch.) es una planta perteneciente a la familia Rosaceae, considerada fruta de placer por excelencia. Se destaca su fruto por su contenido de vitamina C, taninos, flavonoides, antocianinas, catequina, quercetina y kaempferol, ácidos orgánicos (cítrico, málico, oxálico, salicílico y elágico) y minerales (K, P, Ca, Na y Fe) (Basu *et al.*, 2014). Estos compuestos presentes en la fresa tienen un potente poder antioxidante y ayudan a disminuir el riesgo de eventos cardiovasculares, mejoran la función endotelial vascular y disminuyen la trombosis (Forbes-Hernández *et al.*, 2016).

El secado por atomización (SD), como solución a la problemática de comercialización de frutas frescas percederas que requieren cadena de frío, permite producir microcápsulas de extractos de frutas con bajo contenido de humedad ( $X_w$ ) y actividad acuosa ( $a_w$ ), confiriéndole estabilidad microbiológica, mayor tiempo de vida útil y facilidad en las operaciones de almacenamiento, transporte y comercialización del producto (Oliveira *et al.*, 2013). Dada la naturaleza y contenido de los azúcares de la fresa (glucosa 3,2%, fructosa 3,5% y sacarosa 0,6%) (Mosquera, 2010); Feguš *et al.*, 2015), las microcápsulas del extracto de fresa (SEM) presentan bajas temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ) y alta higroscopicidad ( $H_y$ ) y pegajosidad, lo que hace que el proceso de microencapsulación por SD presente problemas de adhesión a las paredes del equipo y cohesión interpartículas, que contribuye a su colapso microestructural, afectando la estabilidad fisicoquímica del producto (Johnson y Ali Al Mukhaini., 2016). Durante el SD la suspensión de fruta es expuesta a altas temperaturas que superan la  $T_g$ , produciendo cambios físicos (expansión térmica del material, incremento en la capacidad calorífica y disminución de la viscosidad), que generan transiciones de fases termodinámicas y no termodinámicas en las microcápsulas, afectando sus propiedades finales (Feguš *et al.*, 2015). El uso de encapsulantes permite que las microcápsulas incrementen la  $T_g$ , confiriendo una mayor

estabilidad fisicoquímica durante el proceso y almacenamiento (Gong *et al.*, 2018). Variables de proceso como, temperatura de la alimentación, temperatura de entrada del aire (IAT), temperatura de salida de aire (OAT), velocidad del disco (ADS), flujo de aire circulante o tiempo de residencia o presión en la cámara de secado; además de, aquellas variables asociadas a la formulación de la alimentación, aditivos de secado, estabilizantes, entre otros, afectan las características de los polvos SD (Castaño-Peláez *et al.*, 2021; Mirhosseini *et al.*, 2009; Feguš *et al.*, 2015). La optimización experimental de los procesos utilizando herramientas estadísticas, ha sido aplicada en forma efectiva para la obtención de las condiciones más favorables de proceso y mejor calidad del producto (física, fisicoquímica, sensorial, nutricional, componentes activos, entre otros (Moghaddam *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2018).

Son pocas las investigaciones que han evaluado el proceso de SD en fresa. Feguš *et al.*, (2015) evaluaron el efecto de la IAT, la OAT y la maltodextrina (MD) con dextrosa equivalente (DE) de 19-20, sobre las propiedades de las SEM; reportando la necesidad del uso de la MD ( $T_g = 140\text{ }^\circ\text{C}$ ) debido a las bajas  $T_g$  de los carbohidratos nativos del fruto. En otro estudio, Freixo *et al.*, (2016), evaluaron el efecto de IAT, MD y goma arábica (GA) sobre el rendimiento del proceso ( $Y$ ) y la actividad acuosa ( $a_w$ ), encontrando que, las microcápsulas con GA presentaron menores  $a_w$  que con MD (0,301 vs 0,450); además, el  $Y$  mejoró con el incremento en la concentración de los agentes de secado y no se afectó con el incremento de la IAT. Oliveira *et al.*, (2013) evaluaron el efecto de la MD (DE 5 y 10), GA y Capsul (almidón modificado) sobre la densidad bulk ( $\rho_b$ ), la solubilidad ( $S$ ), el contenido de antocianinas y la capacidad antioxidante de las microcápsulas de fresa. La  $S$  fue similar en todos los tratamientos; mientras que, la  $\rho_b$  fue menor con MD. Por otro lado, las propiedades de sorción evaluadas a partir de las isoterms (modelo GAB) no mostraron diferencias significativas en la  $X_w$  de la monocapa (0,058 g agua/ g dry base (db)). Las antocianinas y la capacidad antioxidante de las SEM obtenidas con GA presentaron mayor estabilidad en el tiempo. Bahnasawy *et al.*, (2010) aprovecharon la proteína láctea como ayudantes de secado y evaluaron el efecto de IAT (190, 220 y 250  $^\circ\text{C}$ ) y ADS (18000, 22000 y 26000 rpm), sobre las propiedades de microcápsulas en mezclas de leche entera y pulpas de fresa, obtenidas por SD. Se presentó reducción de la densidad por efecto de IAT, así como por la ADS. La humectabilidad ( $H_u$ ) estuvo afectada por la IAT y la ADS, donde los

incrementos de ambas generaron disminución de la  $H_u$  y de la  $X_w$  (2,72% a 250 °C y 26.000 rpm); no obstante, la  $H_u$  fue alta ( $\cong$  16 min) debido al contenido graso aportado por la leche.

A diferencia de la evaluación de propiedades relacionadas con la estabilidad fisicoquímica como  $X_w$ ,  $a_w$ , determinación de isothermas de sorción y de  $T_g$ ; de propiedades económicas como  $Y$  y de propiedades de transporte y almacenamiento como  $\rho_b$  y  $\rho_c$ , cobra importancia la evaluación de las propiedades físicas : IC, IH, S,  $H_u$ , HY, AR que miden las aptitudes de los polvos para ser almacenados, transportados y reconstituidos como materias primas en plantas industriales, al igual, que la determinación de la conservación de compuestos bioactivos responsables de actividades funcionales. En lo que respecta con las propiedades de fluidez e instantanización, los polvos obtenidos por SD presentan problemas debido al predominio de las fuerzas tipo Van der Waals sobre las fuerzas gravitatorias, generando polvos cohesivos que afectan las propiedades de fluidez e instantanización.

En general, se identificaron un número reducido de investigaciones de SD de fresa; además, también fue reducido en estas el número de factores estudiados y pocas propiedades de las SEM evaluadas; dejando de lado, propiedades de instantanización, fluidez y funcionalidad como son:  $\rho_c$ , IC, IH, S,  $H_u$ , HY, AR,  $D_{[3,2]}$ ; retención de la capacidad antioxidante (ABTS y DPPH) y TF. Por otra parte, se resalta que la mayoría de las investigaciones han usado pulpas refinadas (menor aprovechamiento de la fruta) y han manejado bajas relaciones de  $TS_{PULPA}/TS_{ADITIVOS}$ , lo que le confiere una baja participación del extracto del fruto en las microcápsulas; además de afectación en las características sensoriales y nutricionales (Gong *et al.*, 2018). No hay antecedentes de estudios que usen metodologías de optimización multiobjetivo, para la identificación de las condiciones más favorables de proceso y mejor calidad de las SEM con el objetivo de obtener un producto estable con alto valor nutricional y con adecuadas propiedades de fluidez e instantanización.

Bajo este contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la formulación de alimentación (nivel de uso de MD) y del proceso de SD (IAT, OAT y ADS), sobre los atributos de calidad físicos, químicos y nutricionales de las SEM, considerando un



aprovechamiento integral de toda la fruta; además, de realizar la optimización de proceso para la identificación de las condiciones de proceso más favorables en la producción de un polvo de fresa estable.

### **3.3 Materiales y métodos**

#### **3.3.1 Materias primas.**

Se utilizaron fresas frescas (*Fragaria ananassa* Duch, var. Monterrey) adquiridas en el mercado mayorista de la ciudad de Medellín y refrigeradas a 4 °C hasta su uso. El grado de madurez de las fresas correspondió a la escala 5 – 6, según la Norma Técnica Colombiana NTC 4103. Adicionalmente, se utilizó GA (Tic Pretested gum arabic FT Powder, Tic Gums, USA) y MD, con dextrosa equivalente 19-20 (Ingredion), como aditivos de secado.

#### **3.3.2 Preparación de las suspensiones de alimentación al SD.**

Las fresas sin pedúnculos y sépalos fueron lavadas y desinfectadas con citrosan® (0,25% v/v). Posteriormente fueron homogenizadas en un molino coloidal IKA, modelo MK 2000/5 (3660 rpm, holgura en mínimo, flujo: 240 mL/minuto, hasta obtener la pulpa de fresa homogenizada (HSP), la cual fue almacenada en congelación (-18 °C) hasta su uso. Las suspensiones de alimentación al SD fueron preparadas como sigue: 1) se descongeló la HSP, 2) se pesaron la HSP, la GA (0,22 %) y la MD correspondientes a lotes de 3000 g de suspensión, y 3) se mezcló en forma lenta la GA y MD bajo homogenización en un Ultra Turrax, IKA - UTL 50 (10000 rpm y tiempo = 5 minutos).

#### **3.3.3 Proceso de obtención de las microcápsulas de extracto de fresa (SEM).**

El proceso de SD se realizó en un equipo piloto de flujo en co-corriente (Vibrasec, modelo PSALAB 1.5), operando en condiciones subatmosféricas (0,324 kPa). La evaluación del proceso SD se realizó utilizando la metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto centrado ( $\alpha = 1$ ) (21 experimentos), considerando los factores: MD (7.5 -

11,5 % p/p), AIT (140 - 160 °C), AOT (80 - 90 °C) y ADS (16000 - 20000 rpm), y las variables de respuesta:  $X_w$ ,  $a_w$ ,  $p_b$ ,  $p_c$ , S, Hu, Hy, TP, DPPH, ABTS, AR,  $D_{[3;2]}$ , CIE-Lab y Y.

Bajo el diseño planteado, las formulaciones de alimentación al SD presentaron una relación  $ST_{PULPA}/ST_{MD+GA}$  entre 0,65-1,03. Adicionalmente, se realizó una optimización experimental del proceso a partir de la función “*optimal*” del software Design Expert 11.0, buscando maximizar el valor de deseabilidad y fijando criterios que favorezcan la calidad de las SEM.

### 3.3.4 Caracterización de la pulpa y las SEM.

La (HSP) se caracterizó en función de las siguientes propiedades:  $X_w$  y ° Brix según el método oficial AOAC (2003), utilizando refractómetro ABBE ATAGO 89553 de Carl Zeiss. El extracto para evaluar capacidad antioxidantes y FT se obtuvo según la metodología descrita por (Shivashankara et al., 2004); mientras que, los fenoles totales (TP) se determinaron según el método descrito por Singleton & Jr., (1965), el DPPH según el método descrito por Brand-Williams *et al.*, (1995) y el ABTS según el método descrito por (Re et al., 1999). El potencial zeta ( $\zeta$ ) se determinó con el Zetasizer Nano ZS90 (Malvern Instruments Ltd.), diluyendo las suspensiones (1:100) (Rezvani *et al.*, 2012). El índice de estabilidad por absorción espectral (R) se determinó por la relación de las absorbancias (A800/A400) (Mirhosseini *et al.*, 2008), utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (Thermo Scientific Evolution 60) y diluyendo las suspensiones en agua (1:100). La viscosidad ( $\mu$ ) se determinó en un reómetro (Brookfield DV-III Ultra) acoplado con un baño termostático marca Brookfield modelo TC-502, temperatura: 25°C, husillo RV4, velocidad de 0,01 a 100 rpm, reportándose la  $\mu$  a 100 rpm (Mirhosseini et al., 2009). El tamaño de partícula se determinó con el analizador Mastersizer 3000 (Malver Instrument), utilizando el módulo de líquidos (Hydro LV) y reportándose los percentiles al 10, 50 y 90% ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$  respectivamente).

Las SEM se caracterizaron en función de  $X_w$ , retenciones de TF, ABTS y DPPH utilizando las metodologías descritas anteriormente. Adicionalmente, se determinó la actividad de agua ( $a_w$ ) utilizando un higrómetro de punto de rocío a 25 °C (Aqualab serie 3TE, Decagon); el color a partir de las coordenadas CIE-Lab, utilizando un espectrofotómetro de esfera X-RITE, modelo SP64, iluminante  $D_{65}$ , ángulo del observador a 2° y el componente especular incluido; el tamaño de partícula se determinó como diámetro medio de volumen equivalente

( $D_{[3;2]}$ ), utilizando el analizador Mastersizer 3000 (Malver Instrument) y el módulo de sólidos (Aero S); el ángulo de reposo (AR) se determinó según la metodología descrita por Barbosa-Cánovas & Juliano, (2005); Larrauri *et al.*, (1996) y Teunou *et al.*, (1999); la Hy se determinó utilizando el método gravimétrico para isotermas de sorción, a temperatura de 25°C, humedad relativa constante (68%), controlada con una solución sobresaturada de KI; la S se determinó de acuerdo al método (Chauhan & Patil, 2013), modificado por Marulanda *et al.*, (2018); y la Hu como el tiempo requerido para que 1 g SEM desaparezca de la superficie de un volumen de 100 mL de agua a 20 °C (Marulanda, *et al*, 2018). Por otro lado, se determinó el Y de SD, como  $(\text{kg TS de las SEM } (TS_{SEM}) \text{ y los kg TS de la suspensión de alimentación al SD}) * 100$

La fluidez de las SEM se caracterizó a partir del índice de Hausner (HI) y el índice de Carr (CI), calculados a partir de las densidades bulk ( $\rho_b$ ) y densidad compactada ( $\rho_c$ ) (ecuaciones 1 y 2 respectivamente). La tabla 3-1 describe el comportamiento de flujo de polvos en función del CI y HI (Carr, 1965).

$$HI = \frac{\rho_b}{\rho_c} \quad (\text{Ecuación 1}) \quad CI = \frac{(\rho_c - \rho_b)}{\rho_c} \quad (\text{Ecuación 2})$$

**Tabla 3-1.** Relación entre CI and HI

Fluidez	CI	HI
Muy buena	<15	1,00-1,11
Buena	15-20	1,12-1,18
Aceptable	20-35	1,19-1,25
Mala	35-45	1,26-1,34
Muy mala	>45	1,35-1,45

### 3.3.5 Análisis estadístico.

Los resultados fueron analizados a partir del análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95 % y los modelos matemáticos se ajustaron a una ecuación polinómica de 2° orden, aplicando la prueba de falta de ajuste y los coeficientes de correlación ( $R^2$ ). Las condiciones del punto óptimo fueron validadas experimentalmente por triplicado y fue calculado el error medio relativo (ERM) con respecto al valor teórico predicho por los modelos matemáticos.

## 3.4 Resultados y discusión

### 3.4.1 Pulpa de fresa homogenizada.

La HSP presentó altos valores de  $X_w$  y  $a_w$  ( $89,9 \pm 0,3$  % y  $0,948 \pm 0,02$ , respectivamente), que la identifican como un sustrato favorable al crecimiento microbiano (Gil-Giraldo et al., 2019). El contenido de sólidos solubles y ST fue de  $8,8 \pm 0,1$  % y  $10,1 \pm 0,3$  %, respectivamente, provenientes del aporte de los azúcares (fructosa, glucosa y sacarosa), ácidos (ácido málico, ácido oxálico), sales, fibras solubles e insolubles (Kallio *et al.*, 2000; Ribeiro *et al.*, 2018), entre otros. Por otro lado, la HSP como sistema coloidal presentó un potencial eléctrico negativo próximo a la capa de co-iones, adjunta a la interfase de las partículas ( $\zeta = -26,02 \pm 0,67$  mV), que contribuye a su estabilidad fisicoquímica a partir de las fuerzas repulsivas conferidas por los cationes ubicados en la doble capa eléctrica (Dickinson, 2014). Adicionalmente, se considera que la viscosidad ( $890 \pm 47,5$  cP), la distribución de tamaño de partícula ( $D_{10} = 33,6 \pm 0,4$   $\mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 115,3 \pm 1,5$   $\mu\text{m}$  y  $D_{90} = 260,3 \pm 7,6$   $\mu\text{m}$ ) y el R ( $0,5 \pm 0,2$ ) tienen un efecto sinérgico con el  $\zeta$  en la estabilidad fisicoquímica del sistema coloidal, ya que confieren una menor movilidad de las partículas en la fase continua, sin llegar a observarse fenómenos de separación de fases, debido a una posible sedimentación de partículas insolubles de mayor dureza (semillas principalmente), representadas en los valores del percentil  $D_{90}$ . En general, los resultados muestran un mayor aprovechamiento de la matriz alimentaria, y una acción efectiva del proceso de homogenización, debido a la inclusión total del material de la fresa en la HSP, lo cual favorece la viabilidad económica del proceso de SD, por su mayor aporte de ST en la alimentación.

### 3.4.2 Proceso de microencapsulación de las suspensiones de HSP.

La tabla 2 presenta los valores medios y la desviación estándar de las propiedades de las SEM obtenidas por SD. Los resultados del ANOVA no mostraron diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ) en las variables respuesta  $X_w$ ,  $a_w$ ,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , retención de DPPH y TF, cromaticidad  $b^*$  y  $D_{[3;2]}$  con respecto a las variables independientes, y sus interacciones. Esta situación se atribuye a la alta variabilidad presentada en la mayoría de las propiedades de las SEM, que las hace ver estadísticamente como un solo grupo homogéneo; sin embargo, podrían estar siendo afectadas, no solamente por los factores considerados en

la investigación, por otros factores de cosecha: condiciones bioclimáticas, condiciones del suelo, madurez y composición del fruto, entre otras (Palencia *et al.*, 2013), y de proceso no controlados: homogenización y temperatura de homogenización, variabilidad de las condiciones ambientales en los días de proceso, que modifica las cinéticas de secado, tiempos de residencia en la cámara de secado (Tontul & Topuz, 2017), entre otros.

### 3.4.3 Humedad y actividad acuosa.

La  $X_w$  y la  $a_w$  de las SEM presentaron valores en los intervalos  $2,90 \pm 0,12\%$  -  $4,83 \pm 0,02\%$  y  $0,129 \pm 0,005$  -  $0,261 \pm 0,002$ , respectivamente; valores que garantizan su estabilidad microbiológica y control sobre reacciones degradativas (Quek *et al.*, 2007). La  $X_w$  disminuyó con el incremento IAT, lo cual confiere al proceso una mayor fuerza motriz a la transferencia de masa durante la evaporación (Santos *et al.*, 2018); sin embargo, esta fenomenología fue contraria a lo reportado por Bahnasawy *et al.*, (2010) en polvo de fresa y leche. Por otro lado, el aumento en la ADS mostró una tendencia no esperada de incremento en los tamaños de partículas y por consiguiente en los perfiles internos de temperatura, que reduce la capacidad de evaporación y hace que de la  $X_w$  igualmente incremente.

Gong *et al.*, (2018) reportaron valores similares de  $X_w$  (4,52 - 4,92 %) y de  $a_w$  (0.208 - 0.218) durante el secado de HSP, procesado a IAT = 165 °C y OAT = 85 °C y utilizando relaciones de  $ST_{\text{fresa}}: ST_{\text{MD (DE 10)}}: TS_{\text{Aislado de proteína de suero (WPI)}}$  de 60:39:1. Adicionalmente, los valores de  $a_w$  fueron similares a los encontrados en la presente investigación. Por otro lado, los valores de  $a_w$  fueron inferiores a los reportados por Freixo *et al.*, (2016) en el SD (boquilla) de fresa, utilizando MD (DE 10) como encapsulantes (0,435, IAT: 120-130 °C) y GA (0,252-0.301). Por otro lado, la  $a_w$  presentó una tendencia a disminuir con el incremento de la OAT, lo cual es coherente con la mayor presión parcial del vapor de agua superficial (Andrade *et al.*, 2011).

Tabla 3-2. Propiedades de las SEM según diseño experimental

RUN	IAT (°C)	OAT (°C)	ADS (rpm)	MD (%)	Xw (%)	$a_w$	$p_b$ (g/mL)	$\rho_c$ (g/mL)	S (%)	Hu (Minutos/g)	% Retención ABTS	% Retención DPPH
1	140	85	18000	9,5	4,0±0,0	0,218±0,008	0,606±0,020	0,76±0,02	79,9±0,5	16,6±0,7	26,11±0,60	37,63±0,64
2	150	85	18000	9,5	3,3±0,1	0,216±0,009	0,677±0,009	0,78±0,02	88,8±4,0	19,1±0,4	27,48±0,81	37,23±1,72
3	140	90	16000	11,5	2,0±0,2	0,171±0,008	0,658±0,008	0,79±0,02	84,1±1,5	16,1±0,1	25,67±0,37	35,21±0,78
4	160	90	20000	7,5	4,1±0,0	0,182±0,009	0,565±0,006	0,67±0,02	81,4±1,7	10,5±0,5	28,23±1,08	39,32±0,78
5	150	85	18000	9,5	3,8±0,0	0,202±0,008	0,671±0,011	0,79±0,03	87,3±3,6	11,5±0,3	26,14±1,28	34,53±1,08
6	150	85	18000	7,5	4,0±0,1	0,207±0,008	0,624±0,019	0,71±0,01	89,3±1,9	16,9±0,2	27,22±0,56	37,69±0,94
7	150	85	18000	9,5	3,8±0,2	0,195±0,001	0,660±0,026	0,79±0,01	86,7±0,9	12,4±0,6	26,10±0,33	32,80±0,53
8	140	80	16000	7,5	3,7±0,2	0,197±0,004	0,635±0,008	0,76±0,03	90,0±2,3	13,1±0,4	25,66±0,51	36,84±1,17
9	160	90	16000	7,5	3,5±0,0	0,157±0,006	0,649±0,015	0,80±0,01	93,8±1,1	10,7±0,4	21,99±1,00	34,64±0,25
10	150	90	18000	9,5	3,6±0,1	0,129±0,005	0,642±0,014	0,83±0,00	91,0±2,8	16,2±0,1	25,48±1,22	37,30±1,18
11	150	85	18000	9,5	3,8±0,1	0,179±0,003	0,583±0,003	0,79±0,03	86,9±3,0	16,1±0,3	28,14±0,30	46,98±0,77
12	160	80	16000	11,5	3,6±0,1	0,180±0,005	0,611±0,028	0,85±0,01	91,3±0,3	13,6±0,3	27,49±0,95	42,81±0,69
13	150	85	18000	9,5	3,9±0,0	0,172±0,002	0,551±0,019	0,76±0,01	83,0±0,5	12,4±0,34	27,72±1,23	43,23±1,49
14	150	80	18000	9,5	4,5±0,2	0,216±0,007	0,557±0,009	0,73±0,02	82,3±1,3	10,7±0,5	27,30±0,76	44,16±1,08
15	150	85	18000	11,5	3,5±0,2	0,191±0,002	0,552±0,024	0,80±0,04	90,5±0,8	13,2±0,6	28,21±1,30	39,63±1,35
16	140	80	20000	7,5	4,8±0,1	0,197±0,003	0,533±0,013	0,76±0,04	82,4±1,4	11,1±0,4	33,08±1,20	40,56±1,68
17	160	85	18000	9,5	5,4±0,1	0,261±0,002	0,522±0,015	0,69±0,01	82,4±4,0	11,4±0,2	24,51±0,26	40,79±0,73
18	150	85	20000	9,5	5,2±0,2	0,245±0,004	0,527±0,005	0,67±0,02	83,0±3,9	12,1±0,5	29,17±0,71	40,47±0,54
19	160	80	20000	11,5	4,3±0,2	0,236±0,007	0,645±0,024	0,75±0,04	91,2±1,4	15,4±0,3	26,04±1,25	34,70±0,17
20	150	85	16000	9,5	4,8±0,0	0,233±0,004	0,544±0,005	0,73±0,01	86,0±3,7	11,0±0,1	27,56±0,17	44,63±0,07
21	140	90	20000	11,5	3,6±0,1	0,185±0,006	0,684±0,027	0,81±0,02	88,7±2,4	15,2±0,2	23,56±0,91	33,32±1,86

Tabla 3-2 (Continuación)

RUN	IAT (°C)	OAT (°C)	ADS (rpm)	MD (%)	% Retención FT	AR (°)	Y (%)	Hy (%)	L	a*	b*	D <sub>[3,2]</sub> (µm)	CI (%)	HI
1	140	85	18000	9,5	57,46±2,10	32,9±1,3	33,8	19,6±0,7	41,2±1,6	21,4±1,0	12,7±0,7	7,1±0,2	20,31±2,16	1,25±0,03
2	150	85	18000	9,5	61,02±1,64	34,3±1,6	38,7	18,0±0,7	40,4±1,5	20,3±1,0	13,0±0,7	5,5±0,1	12,78±0,95	1,15±0,01
3	140	90	16000	11,5	51,14±2,13	38,7±1,1	45,1	17,0±0,1	40,1±1,8	19,7±0,9	12,9±0,7	8,5±0,5	16,21±3,42	1,19±0,04
4	160	90	20000	7,5	64,52±1,29	37,7±1,7	37,6	20,1±0,4	41,9±2,1	22,1±0,8	14,7±0,6	5,7±0,3	15,87±1,37	1,19±0,05
5	150	85	18000	9,5	59,31±1,91	33,5±0,6	34,1	20,3±0,9	41,2±1,0	20,6±0,6	12,8±0,5	6,1±0,1	15,14±3,12	1,18±0,04
6	150	85	18000	7,5	61,10±2,36	36,3±0,9	30,7	19,3±0,0	36,7±0,6	19,6±0,2	12,6±0,1	52,6±2,5	12,55±2,57	1,14±0,03
7	150	85	18000	9,5	54,67±0,70	34,5±1,4	32,4	22,2±0,2	40,6±0,7	20,3±0,2	12,8±0,1	40,0±5,8	16,25±2,73	1,19±0,04
8	140	80	16000	7,5	60,06±2,05	33,8±1,5	32,6	20,6±0,3	38,9±0,9	21,2±0,3	13,4±0,1	25,7±1,1	16,00±4,80	1,19±0,07
9	160	90	16000	7,5	61,98±0,14	37,1±0,1	47,9	21,4±0,5	38,8±1,4	20,9±0,3	14,4±0,2	38,1±1,3	19,06±2,63	1,24±0,04
10	150	90	18000	9,5	59,85±1,32	33,6±0,6	47,3	18,1±0,4	40,2±1,4	19,4±0,6	13,5±0,5	52,9±4,1	22,21±2,19	1,28±0,03
11	150	85	18000	9,5	82,49±2,42	27,1±0,9	35,1	18,1±0,9	49,2±4,4	23,5±1,8	19,5±1,9	16,2±1,0	26,27±2,45	1,36±0,04
12	160	80	16000	11,5	67,08±1,20	21,3±0,8	37,3	16,7±0,1	40,1±1,1	20,1±0,4	14,3±0,3	15,4±0,8	27,94±2,54	1,38±0,05
13	150	85	18000	9,5	76,19±3,34	28,5±1,3	34,7	18,2±0,6	49,0±0,7	23,2±0,9	16,2±0,8	15,0±0,23	27,42±1,84	1,38±0,03
14	150	80	18000	9,5	76,07±3,64	25,8±1,0	30,0	17,5±0,3	51,8±1,5	22,8±0,7	18,7±0,4	12,5±0,4	24,07±2,07	1,32±0,04
15	150	85	18000	11,5	74,02±3,52	23,7±0,4	41,7	17,2±0,3	53,5±1,7	25,1±0,8	17,7±0,6	16,2±0,1	30,66±3,26	1,44±0,07
16	140	80	20000	7,5	84,66±1,17	27,8±0,6	56,9	17,9±0,8	50,0±2,3	20,9±1,0	16,0±1,1	13,5±0,3	29,29±2,70	1,41±0,05
17	160	85	18000	9,5	77,21±0,60	26,5±0,4	30,6	15,7±0,4	52,7±2,2	23,2±0,8	16,8±1,0	17,3±0,5	24,12±2,74	1,32±0,04
18	150	85	20000	9,5	80,06±1,70	27,0±0,8	37,2	15,9±0,1	52,6±0,8	24,5±1,2	15,6±1,0	16,7±0,7	20,58±2,33	1,26±0,04
19	160	80	20000	11,5	63,05±2,45	29,3±1,1	20,4	15,9±0,7	52,9±2,6	24,0±1,0	15,4±0,6	48,1±5,0	14,26±6,86	1,17±0,09
20	150	85	16000	9,5	76,08±0,58	26,5±1,0	38,6	16,3±0,0	39,8±1,0	18,9±0,4	11,8±0,3	30,5±1,3	25,65±1,15	1,34±1,02
21	140	90	20000	11,5	55,14±2,34	29,7±1,2	34,9	16,3±0,3	50,3±1,8	25,6±0,7	16,3±0,5	40,1±0,1	15,87±1,37	1,19±0,02



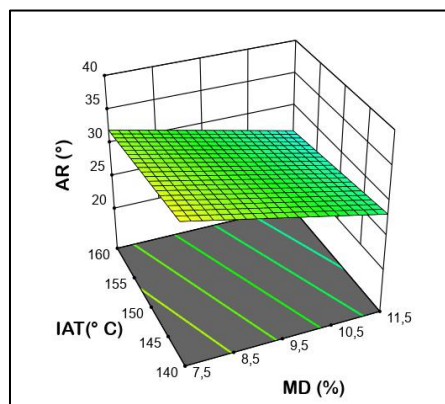


### 3.4.3 Propiedades de flujo de las SEM.

Las  $\rho_b$  y  $\rho_c$  de las SEM fluctuaron entre los intervalos ( $0,55 \pm 0,01 - 0,68 \pm 0,03$  g/mL) y ( $0,67 \pm 0,02 - 0,85 \pm 0,01$  g/mL), respectivamente, observándose un amplio espectro de fluidez, coherente con la variabilidad del CI ( $12,56 \pm 2,57 - 30,66 \pm 3,26$  %) y el IH ( $1,14 \pm 0,03 - 1,38 \pm 0,05$ ). Esta situación, permite clasificar el material entre polvos con fluidez intermedia y polvos con dificultades para fluir libremente (Lee & Yoo, 2021). Por otro lado, el análisis de fluidez a partir del seguimiento al AR presentó una fluctuación entre los intervalos  $21,3 \pm 0,8 - 38,7 \pm 1,1^\circ$ , lo cual corresponde a una variabilidad desde excelente fluidez ( $AR < 25$ ) hasta fluidez intermedia a pobre ( $AR > 25$ ) (Chinwan & Castell-Perez, 2019). Bajo este contexto y de acuerdo a los valores encontrados del  $D_{[3,2]}$  ( $5,47 \pm 0,26 - 52,93 \pm 4,11$   $\mu\text{m}$ ), las SEM son polvos finos donde existe un predominio de las fuerzas cohesivas sobre las gravitatorias, clasificándose como polvos tipo C con dificultades de fluidez, según la escala propuesta por (Geldart, 1973). Los resultados indican que, desde el punto de vista técnico, el producto requiere de condiciones especiales de manejo y almacenamiento; lo que implica la utilización de un empaque con una permeabilidad mínima al vapor de agua para reducir los fenómenos de cohesividad y apelmazamiento (Sousa et al., 2016).

El ANOVA presentó efectos significativos de la IAT y la MD sobre el AR ( $p < 0,05$ ), observándose en el gráfico de superficie de respuesta (figura 3-1) que, el incremento de la MD y de la IAT, influyen positivamente en la disminución de AR, haciendo el producto más fluido. Esta situación se atribuye a que la MD contribuye como agente de fluidización al disminuir las fuerzas de Van der Waals, responsables de la cohesividad de los polvos finos (Nortuy et al., 2018); además, el incremento de la IAT favorece la fuerza motriz a la evaporación, obteniéndose un producto más seco y con menor cohesividad de las partículas. Actualmente no se han reportado estudios de evaluación de AR en polvos SD de fresa.

**Figura 3-1** Efecto de IAT y MD sobre AR



Elaboración propia

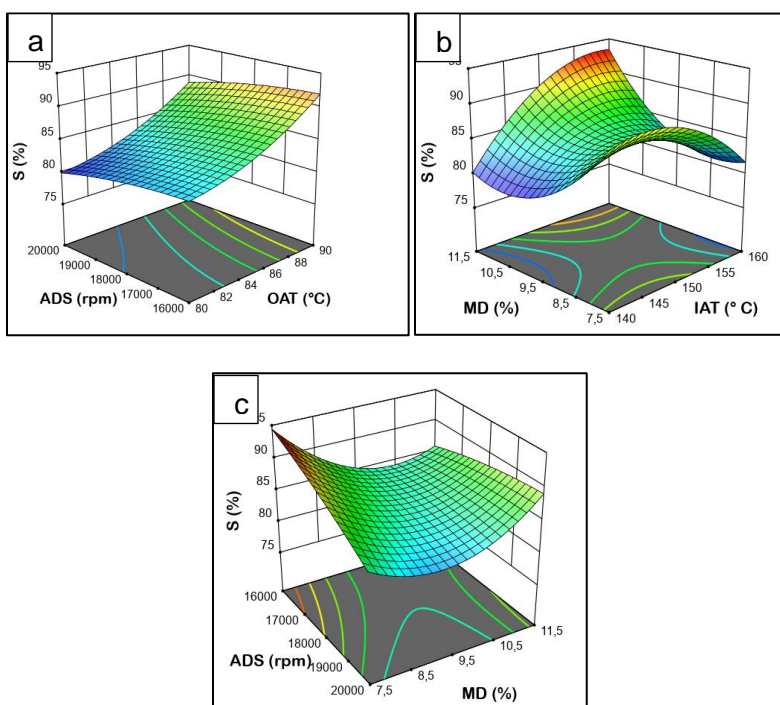
La consideración de unas buenas propiedades de flujo en las SEM representa una alternativa de calidad que es valorada por el consumidor, por lo que, una optimización previa en función de estas propiedades permite identificar una formulación y proceso adecuado: MD (11,36 %), IAT (159 °C), OAT (85,2 °C), ADS (16376 rpm) para un AR de 19,83 % ;esto se explica en que a bajas ADS y OAT intermedia se favorecen la fluidez del SEM, probablemente debido a la obtención de partículas más gruesas y por lo tanto menos cohesivas.

Oliveira *et al.*, (2013) reportaron valores de  $\rho_b$   $0,41 \pm 0,001$ ,  $0,40 \pm 0,004$ ,  $0,47 \pm 0,003$  y  $0,52 \pm 0,001$  g/mL en polvos de fresa SD utilizando como ayudantes de secado MD (DE 5), MD (DE 10), GA y Capsul® TA (almidón de tapioca modificado) respectivamente. Los mayores valores encontrados en la presente investigación se atribuyen al mayor aporte de ST desde el fruto ( $TS_{fresa}:TS_{MD+GA} = 1.0 - 0,66$ ) frente a lo utilizado por estos investigadores ( $TS_{fresa}:TS_{ayudante} = 0,5$ ). Por otro lado, Bahnasawy *et al.*, (2010) igualmente reportaron polvos de fresa con menor  $\rho_b$  (0,376-0,392 g/mL), lo cual se atribuye a la relación de TS mencionados anteriormente; así como también, a las mayores ADS utilizadas (18.000 - 26.000 rpm) (polvos más finos) y a las mayores IAT (190 a 250°C) (menor  $X_w$  y mayor porosidad y fracturabilidad del material al interior de la SEM).

### 3.4.5 Instantanización de los SEM.

En general, las SEM bajo la acción mecánica de agitación presentaron buenos valores de S entre 79,9 - 93,7 %. Valores similares han sido reportados en polvo de Jamun (80,1 - 93,1%) (Sing *et al.*, 2019) e inferiores en polvo de maracuyá (44,6 - 57,5 %)(de Oliveira *et al.*, 2007) y en polvo de piña (81,6 %) (Abadio *et al.*, 2004). La S presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto a los factores OAT y ADS, a las interacciones IAT-MD, ADS-MD,  $IAT^2$  y  $MD^2$ . La figura 3-2 presenta gráficos de superficie de respuesta, donde se observa un incremento de la S con la disminución de la ADS y con el incremento de OAT. La disminución de ADS contribuye a la formación de SEM con mayor diámetro, generando un mayor valor de la relación MD/área superficial, lo cual favorece la S del material durante la agitación; por otro lado, el incremento de la OAT podría estar generando colapsos microestructurales y hasta fracturabilidad, que permiten una mayor difusión del agua hacia su interior y mayor interacción con los grupos polares de la superficie (Marulanda *et al.*, 2018).

**Figura 3-2** Efecto de ADS y OAT (a), MD y IAT (b) ; Efecto de ADS y MD sobre S (c)



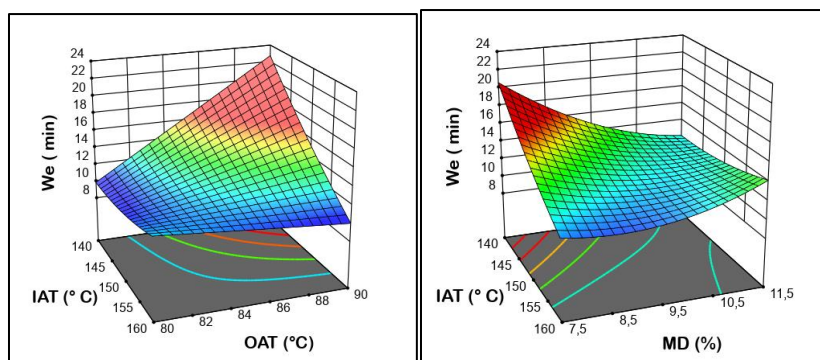
Elaboración propia

El efecto positivo de la S con la interacción IAT-MD (figura b) se observa cuando ambas variables aumentan (zona roja), lo mismo ocurre con el efecto cuadrático de IAT y MD (superficie curvilínea), identificando dos regiones donde S es máximo: 1) IAT (155 – 160°C) – MD (11,0 – 11,5%) y 2) IAT (156 – 150°C) – MD (7,5%). Singh *et al.*, (2019) reportaron efectos similares de MD y IAT sobre S en polvo de Jamun (*Syzygium cumini*). Por otro lado, en el gráfico ADS-MD se observa una interacción negativa entre ambas, donde S incrementa con la disminución de ADS y el incremento de la MD, alcanzando un máximo con niveles de MD de 11,5 % en todo el intervalo de ADS evaluado.

El uso de la MD utilizada (DE: 19-20) al tener un mayor grado de hidrólisis, confiere mayor interacción de los puentes de H en el proceso de solubilización de las SEM y una menor cantidad de residuo insoluble (Chauhan & Patil, 2013). Resultados similares han sido reportados por varios autores: Oliviera *et al.*, (2013), (91,0 %) en polvo de fresa utilizando MD (DE 10) y (87,0 %) cuando utilizó GA; Grabowski *et al.*, (2006), (20 %) en polvo de patata dulce utilizando MD (DE 11); y Cano-Chauca *et al.*, (2005), (> 90 %) en polvo de mango con una mezcla de MD (DE 10) y GA.

La figura 3-3 presenta los gráficos de superficie de respuesta de la Hu en función de las variables independientes. El análisis de Hu permitió identificar su dependencia estadística con respecto a los factores IAT, OAT y a las interacciones IAT-OAT y IAT-MD. La Hu varió en el intervalo  $10,5 \pm 0,5$  y  $19,1 \pm 0,4$  min, valores similares a los reportados por Bahnasawy *et al.*, (2010) en mezclas de leche y fresa obtenidas por SD (16 min); sin embargo, estos valores no favorecen a sus propiedades de instantaneidad.

**Figura 3-3** A) Efecto de IAT y OAT sobre Hu; b. Efecto de IAT y MD sobre Hu.



Elaboración propia

Se observa una reducción de Hu con el incremento de IAT, situación similar fue reportada por (Bahnasawy *et al.*, 2010)), y se potencia a altas OAT (90 °C) ( $\Delta Hu/\Delta IAT \approx 12 \text{ min}/20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Por otro lado, la disminución de la OAT causa el mismo efecto en Hu cuando el sistema opera a baja IAT (140 °C) ( $\Delta Hu/\Delta OAT \approx 13 \text{ min}/10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). En general, la Hu es altamente sensible a las condiciones térmicas impuestas en el proceso; lo cual se ilustra en el gráfico Hu-IAT-OAT donde se resalta una región (zona azul) favorable a las SEM ( $\lll Hu$ ): 1) Alta IAT en todo el rango de OAT y 2) baja OAT en todo el rango de IAT. Esta situación podría atribuirse a la fracturabilidad de las partículas (mayor porosidad) debido al stress térmico impuesto, que favorece una mayor difusión del agua en su interior.

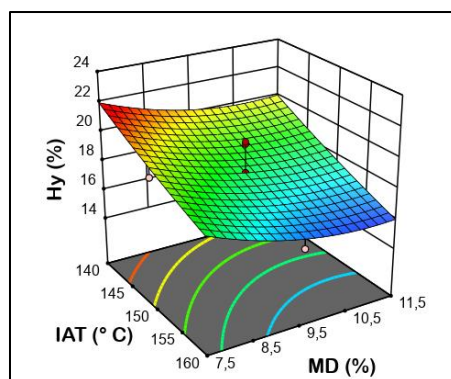
La interacción IAT-MD se focaliza principalmente cuando las SEM presentan altos valor de Hu (zona roja) (menor humectación), lo cual ocurre cuando el sistema opera a bajos valores de IAT y MD. Las bajas temperaturas de IAT conducen a microcápsulas menos fracturables que limitan la difusión del agua en su interior. Esta situación sumada a una microencapsulación con bajos contenidos de MD igualmente limita una mayor interacción de sus grupos hidroxilo en la superficie al contacto con el agua, y cuya consecuencia produce una menor humectación de SEM. La bibliografía no reporta datos de Hu en fresa, ni productos derivados; sin embargo, Braga *et al.* (2020) reportaron un efecto contrario de la MD sobre Hu en polvo de piña-menta obtenido por SD, lo cual fue atribuido al tipo de MD (DE 10) utilizada. Caliskan & Nur Dirim, 2013 reportaron reducción de Hu con el incremento de MD en la obtención de polvos de extractos de sumac (*Rhus coriaria L.*) obtenidos por SD.

La Hy juega un papel importante en los polvos obtenidos por SD, dado que afectan directamente el estado de la materia obtenida (amorfo-vítreo); al mismo tiempo, afecta la estabilidad del producto debido al incremento de la movilidad molecular que se refleja en cambios indeseables asociados con la textura, cohesividad/pegajosidad y reacciones de deterioro en general (Manickavasagan *et al.*, 2015). Las SEM presentaron valores que fluctuaron en el intervalo  $15,7 \pm 0,4 - 22,2 \pm 0,2 \%$ , lo cual implica que la estructura en su interfase presenta una importante fuerza de adsorción de los puntos activos de carácter polar, provenientes de la fresa y de los agentes encapsulantes (MD y GA) (L. C. Ribeiro *et al.*, 2016); adicionalmente, estas fuerzas de adsorción están directamente relacionadas con el número de partículas y su área superficial (Sousa *et al.*, 2016). Estos valores fueron

similares a los reportes de Bazarria & Kumar, (2018) en polvos de remolacha (15,04 – 20,68 %) e inferiores a los reportados en el polvo de piña-menta (25-37%) (Braga *et al.*, 2020).

El ANOVA presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) de la Hy solamente con respecto a la MD, lo cual fue correspondiente con los estudios reportados por Phisut, (2012) y (Verma & Singh, 2015). En el rango de las temperaturas utilizadas, el incremento de MD causó una disminución de Hy (19,2 %  $\rightarrow$  16,0 %); situación similar fue reportada por Braga *et al.*, (2020), y Bazarria y Kumar, (2018) en polvos de piña-menta y remolacha, respectivamente. Para el ADS la disminución de Hy fue menor (18,3 %  $\rightarrow$  17,3 %). Valores de Hy bajos favorecen la estabilidad de las SEM, alcanzándose principalmente a altas ADS (20000 rpm) donde se producen un mayor número de partículas de menor diámetro y una mayor área de interfase. Ahora bien, el incremento de la MD y del área superficial, finalmente genera una disminución en la relación: masa MD/área superficial ( $\text{g/m}^2$ ), que se correlaciona con la disminución de las fuerzas de adsorción, y por ende de la Hy. Adicionalmente, un mayor contenido de MD mitiga los problemas de adherencia y cohesividad (aglomeración) por incremento en la Tg final de las SEM, reduciendo la capacidad para adsorción de agua (Gabas *et al.*, 2009).

**Figura 3-4** Efecto de MD y IAT sobre Hy



Elaboración propia

### 3.4.6 Retención de Capacidad antioxidante (ABTS, DPPH) y fenoles totales de las SEM.

La conservación de propiedades bioactivas, como la capacidad antioxidante, es de suma importancia en los procesos de SA, ya que ofrece al consumidor productos con características funcionales. Los valores medios de ABTS y DPPH estuvieron en los

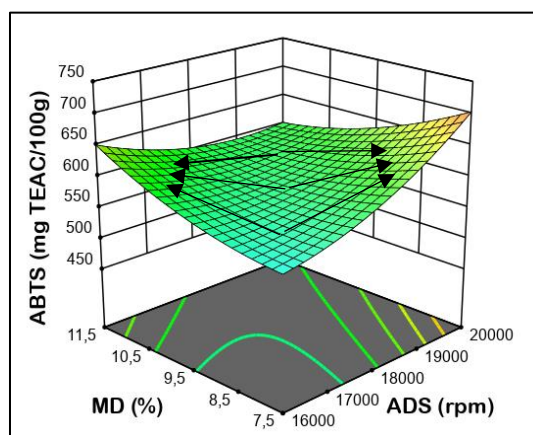
intervalos ( $490,7 \pm 22,3$  -  $728,3 \pm 26,5$  mg TE/100 g bs) y ( $669,7 \pm 23,9$  -  $959,2 \pm 14,0$  mg TE/100 g bs), respectivamente; que equivale a índices de, mientras que, el contenido de FT fluctuó entre 1183,4  $\pm$  retención en porcentaje (21,99 -33,08),( 32,80-46,98) para ABTS y DPPH 49,2 - 1902,9  $\pm$  26,3 mg GAE/100 g bs. (índices de retención entre 51,14 - 84,66) Adicionalmente, compuestos bioactivos como las antocianinas presentes en fresa pueden sufrir cambios oxidativos durante la deshidratación con calor, afectando así la actividad antioxidante. El ANOVA presentó efectos significativos para la ADS y las interacciones ADS-MD y IAT-IAT sobre el índice de retención de ABTS; mientras que, no hubo diferencias estadísticas significativas con respecto a DPPH y FT.

La figura 3-5 presenta el gráfico de superficie de respuesta del índice de retención de ABTS en función de ADS-MD, observándose un efecto positivo en el incremento del índice de retención, principalmente en dos regiones de proceso, donde la interacción ADS-MD es negativa (16000 rpm – 11,5 % y 20000 rpm – 7,5 %), situaciones que se pueden explicar debido a: 1) formación de mayores tamaños de partícula y humedad a bajas ADS, que con niveles altos de MD protegen mejor los componentes activos presentes, y 2) el efecto individual del ADS, que es notable en la producción de polvos finos y secos a mayores velocidades, que con niveles bajos de MD (7,5 %) no alcanzan a proteger los componentes activos y produce un mayor estrés térmico al interior de la SEM; sin embargo, esta degradación puede generar nuevos componentes con actividad antioxidante (Zhang *et al.*, 2020); además, el incremento en los ST de la fresa favorece los mayores niveles de ABTS. Adicionalmente, el incremento de MD favorece la actividad ABTS; posiblemente, la interacción de compuestos fenólicos, con características antioxidantes, con el material de pared hidrofílico (MD) permite la formación de complejos confiriendo mayor estabilidad a los fenoles durante el secado (Shahidi *et al.*, 1992).

En la bibliografía son escasos los trabajos relacionados con la evaluación del efecto del proceso de SD sobre contenidos de componentes activos y actividad antioxidantes en polvo fresa; sin embargo, se resalta el trabajo reportado por Feguš *et al.*, (2015), quienes no encontraron correlación en la pérdida de la capacidad antioxidante con el incremento de IAT. Algunos estudios de polvos de fresa SD mostraron estabilidad durante el almacenamiento del contenido de antocianinas y capacidad antioxidantes (M. I. S. Oliveira

*et al.*, 2013). En investigaciones con otras matrices alimentarias, Singh *et al.*, (2019) reportaron para el polvo de Jamun pérdidas entre 50 % y 60 % del contenido de antocianinas, identificando el efecto protector de la MD; Leite Neta *et al.*, (2019) no encontraron diferencia estadística significativa en el contenido de FT y la capacidad antioxidante de la pulpa fresca de guanábana y los polvos reconstituidos. Durante los tratamientos térmicos compuestos con características antioxidantes como la vitamina C, las antocianinas y los fenoles pueden sufrir cambios oxidativos durante la deshidratación con calor.

**Figura 3-5** Gráfico de superficie de respuesta de retención de ABTS de las SEM



Elaboración propia

### 3.4.7 Rendimiento.

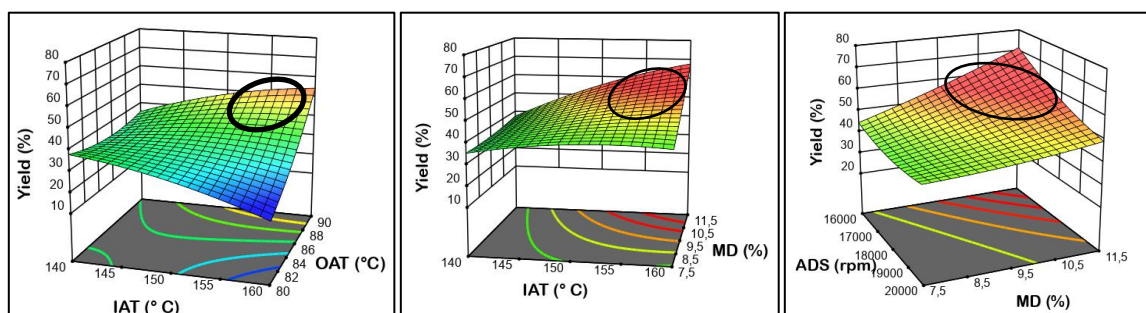
El Y es un indicador de productividad, muy relacionado con la viabilidad económica de los procesos. Los valores de Y en el proceso de obtención de las SEM por SD estuvieron en el intervalo 20,4 % - 47,9 %, valores similares a los reportados por Bazaria y Kumar (2018) en la obtención de polvo de remolacha (21,0- 54,6%); sin embargo, estos valores son bajos comparados con aquellos considerados como adecuados para escala de laboratorio (50 %) (Tontul & Topuz, 2017). El ANOVA identificó al Y como una variable crítica que depende multifactorialmente de las condiciones de proceso, así como también, de la composición (ST y aditivos de secado) y propiedades de la suspensión de alimentación; por otro lado, se suma también las pérdidas de ST debido al material adherido a los tanques de preparación y alimentación al SD, y en las tuberías del sistema de bombeo. Debido a que los lotes preparados fueron pequeños (3000 g), estas pérdidas de ST medidas



porcentualmente se hacen grandes, disminuyendo notablemente el Y. Bajo este contexto, las SEM responden de manera directa a fenómenos de adhesión o formación de anillo en las paredes de la cámara de secado (Muzaffar, 2015) y al mismo tiempo, a la posible pérdida de finos que no son retenidos en el ciclón (Maury *et al.*, 2005). Se resalta un efecto estadístico de las variables independientes OAT y MD, y de las interacciones IAT-OAT, IAT-ADS, IAT-MD, OAT-ADS, ADS-MD, IAT-IAT, OAT-OAT sobre el Y ( $p < 0.05$ ); por lo que, su respuesta está determinada por condiciones puntuales impuestas durante la operación; más no, por una tendencia definida por las variables independientes.

Los gráficos de superficie de respuesta (figura 3-6) ilustran las zonas de operación con el mayor Y ( $\approx 50\%$ ): OAT (88 – 90 °C), IAT (155 – 160 °C), MD (10,5 – 11,5 %), ADS (16000 – 17500 RPM). Se observa que, el Y se favorece a altas temperaturas de proceso, lo cual puede atribuirse a una mayor evaporación de agua que disminuye la  $X_w$  final y por lo tanto, se minimizan los fenómenos de cohesividad y adhesividad debido a la menor plasticidad de los polvos obtenidos (Cuq *et al.*, 2013). Por otro lado, el incremento de Y por efecto de MD se sustenta debido a que éste encapsulante presenta una  $T_g = 140\text{ °C}$  y, al estar en mayor proporción, confiere una  $T_g$  global en la SEM de  $37\text{ °C}$ , reduciendo la  $X_w$  y la adhesividad del material (Caliskan & Nur Dirim, 2013). Finalmente, el efecto de las bajas ADS sobre el incremento del Y, se explica por la disminución en la aceleración centrífuga y por supuesto en la velocidad tangencial de las gotículas en el borde del disco atomizador, lo que se traduce en una menor probabilidad de impacto sobre las paredes internas de la cámara de secado y la adherencia del material (Carlos *et al.*, 2018).

**Figura 3-6** Gráficos de superficie de respuesta del Y de las SEM



Elaboración propia

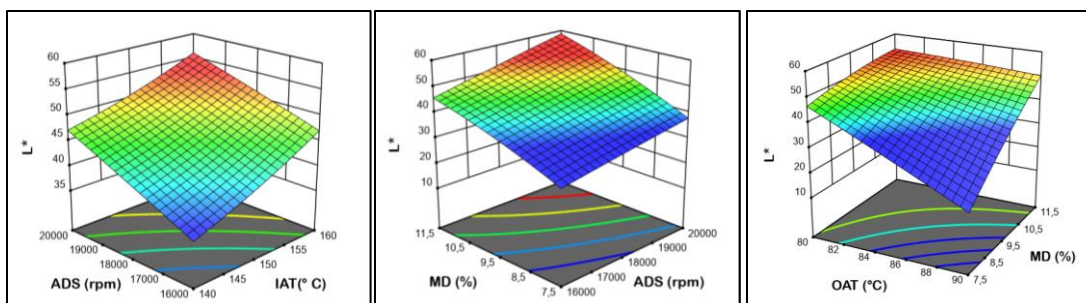
### 3.4.8 Color.

Los valores medios de los parámetros de color  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  fluctuaron en los rangos (36,7 - 52,9), (11,8 - 19,5) y (18,9 - 25,1), respectivamente. En general, los cambios de color en los productos obtenidos en los procesos de SD son consecuencia a diversos factores: 1) altas temperaturas de proceso, que favorece a reacciones de deterioro de carbohidratos (caramelización, Maillard). 2) variabilidad en el grado de maduración de los lotes procesados, y 3) concentración de ayudantes de secado, normalmente de color blanco o cremosos.

La  $L^*$  de las SEM presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto a las variables ADS y MD. Se observó que el incremento de MD en la formulación de la suspensión (7,5  $\rightarrow$  11,5 %) confirió una mayor claridad en las SEM ( $> L^*$ : 40  $\rightarrow$  48) (figura 3-7), lo cual es correspondiente con los hallazgos de Feguš et al., (2015) en polvos de fresa obtenido por SD. Con respecto al efecto de la ADS, se observa que el incremento de la ADS (16000  $\rightarrow$  20000 rpm) tuvo el mismo efecto de la MD, incrementando la  $L^*$  desde 35 a 43, generando una percepción de mayor claridad en las partículas más finas o de menor tamaño (Onipe et al., 2017).

Con respecto a la cromaticidad  $a^*$  (verde-rojo), se vio afectada ligeramente ( $> b^*$ ) por el incremento de ADS ( $p < 0,05$ ); mientras que, la cromaticidad  $b^*$  (amarillo – azul) no presentó diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) con ninguna de las variables independientes ni con sus interacciones. Contrario a lo esperado, el efecto de la MD no produjo cambios apreciables en las cromaticidades ( $\Delta a^* = 7,7$  y  $\Delta b^* = 6,6$ ); por lo que, en el plano cromático  $a^*b^*$  la saturación o intensidad del color de las SEM fue percibida como rosado claro, e inclusive estos cambios son poco perceptibles al ojo humano (Mokrzycki & Tatol, 2012). La bibliografía no reporta resultados de color en polvo de fresa obtenido por SD; sin embargo, Braga et al., (2020) reporta en polvo de piña-menta que el incremento de la MD confirió mayor claridad en el producto, incrementando la  $L^*$  y disminuyendo la cromaticidad  $b^*$ . Por otro lado, Chong & Wong, (2017) en el SA de níspero (*Manilkara zapota*) reportaron con el incremento de MD reducciones en  $a^*$  y  $b^*$  y ningún efecto significativo sobre  $L$ .

**Figura 3.7** Gráficos de superficie de respuesta de  $L^*$  como función de ADS-IAT, MD-AOR y AOT-MD



Elaboración propia

### 3.4.9 Tamaño de partícula $D_{[3;2]}$ .

Se identificó un intervalo amplio en los valores de los tamaños de partícula de las SEM obtenidos en el proceso SD (5,46 - 52,93  $\mu\text{m}$ ); no se evidenció efecto significativo de las variables de proceso evaluadas ( $p < 0,05$ ). El tamaño fino de partículas de las microcápsulas de frutas está íntimamente relacionado con la magnitud de fuerzas tipo Van der Waals que son las responsables de propiedades que afectan la fluidez del material, como son la cohesividad, adhesividad y las características reológicas de los polvos (Valverde *et al.*, 2001) como consecuencia de estos hallazgos las SEM presentaron una fluidez pobre debido a la alta cohesividad, con características de polvos tipo C con dificultades de fluidez, según la escala propuesta por (Geldart, 1973).

## 3.5 Optimización experimental del proceso

Se realizó una optimización experimental de múltiples respuestas, definiendo diversos criterios que favorecen los atributos de calidad de las SEM: 1) maximizar las variables  $Y$ ,  $S$ ,  $ABTS$ ,  $DPPH$ ,  $FT$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ,  $\rho_b$  y  $\rho_c$ ; 2) minimizar las variables,  $X_w$ ,  $a_w$ ,  $H_u$ ,  $H_y$ ,  $L^*$ ,  $AR$  y  $D_{[3;2]}$ ; y 3) fijar en el intervalo. Adicionalmente, a cada variable dependiente se otorgó un peso e importancia según los resultados del ANOVA. Bajo este contexto, la tabla 3-5 ilustra las restricciones y los resultados de la optimización experimental multiobjetivo, la cual presentó una deseabilidad del 73,7 %, definiendo las variables independientes así: IAT 154 °C, OAT 89 °C, ADS 16,850 rpm y MD 11,5 %. Adicionalmente, se realizó una validación experimental a partir de 3 réplicas a las condiciones óptimas, cuyos resultados fueron

confrontados con los valores teóricos reportados por los modelos matemáticos polinómicos de 2° orden y se determinó para cada variable dependiente el porcentaje del error absoluto (PEA) y para el modelo se determinó el porcentaje de error absoluto medio (PEAM).

**Tabla 3-3.** Criterios y resultados de la optimización multiobjetivo, validación experimental y PEA

Parámetro	Objetivo	Importancia	Valor Experimental	Valor predicho Modelo	PEA
Xw	Minimizar	4	4,80±0,17	3,48	27,50
a <sub>w</sub>	Minimizar	3	0,258±0,005	0,188	27,13
ρ <sub>b</sub>	Maximizar	3	0,66±0,02	0,63	4,55
ρ <sub>c</sub>	Maximizar	3	0,81±0,01	0,81	0,00
S	Maximizar	5	90,46± 1,25	93,68	3,56
H <sub>u</sub>	Minimizar	5	10,53±1,41	10,15	3,61
ABTS	Maximizar	4	739±15,03	659,82	10,71
DPPH	Maximizar	3	593,03±46,71	782,25	31,91
FT	Maximizar	3	2023±65,74	1406,38	30,48
AR	Minimizar	5	25,76±0,53	28,65	11,22
Y	Maximizar	5	38,57±4,46	61,88	60,44
H <sub>y</sub>	Minimizar	3	15,58±0,25	17,10	9,76
L*	En el intervalo	3	52,69±1,78	49,25	7,01
a*	Maximizar	3	23,20±0,97	21,73	6,34
b*	Maximizar	3	15,99±0,51	16,67	4,25
D <sub>[3;2]</sub>	Minimizar	5	14,93±0,10	14,22	4,76

La validación del modelo arrojó un PEAM para las 16 variables respuesta evaluadas del 15,2 %, valor similar al reportado en la optimización del SA de cereza agria con una deseabilidad del 87,5 (Moghaddam et al., 2017). Las variables ρ<sub>b</sub>, ρ<sub>c</sub>, S, H<sub>u</sub>, ABTS, AR, H<sub>y</sub>, L\*, a\*, b\*, D<sub>[3;2]</sub> presentaron PEA inferiores al 12 %, demostrando la bondad del ajuste del proceso de optimización; por otra parte, las variables de respuesta: Xw, a<sub>w</sub>, DPPH y FT presentaron PEA entre 27-32 %. La a<sub>w</sub> presentó un PEA de ajuste del 28 %, valor que, aunque es alto, no afecta las condiciones de conservación del producto, pues el valor experimental (0,258) sigue siendo un valor en donde la mayoría de las reacciones de deterioro no se presentan; por otro lado, si bien el valor experimental de Xw fue superior al valor teórico, el polvo de fresa no presenta riesgos de deterioro microbiológico a esas condiciones. La mayor desviación se presentó para Y, la optimización predijo un valor

(61,88%) superior al valor experimental y alejado de los rendimientos obtenidos a escala piloto debido a la formación de depósito sobre las paredes del equipo.

### 3.6 Conclusiones

La investigación permitió un desarrollo tecnológico innovador proceso-producto, confiriendo un valor agregado a la agro cadena de fresa y un elemento diferenciador debido a que, las SEM obtenidas proporcionan al consumidor o al sector industrial una relación de  $ST_S/ST_{MD} = 1,51$ , comparados con investigaciones similares o en otras matrices alimentarias, donde esta relación es  $< 1$ , dado el alto porcentaje de ayudantes de secado en la formulación.

En general, las variables independientes consideradas en el proceso y sus interacciones lineales y cuadráticas afectaron principalmente a S, Hu, Hy, Y, L\*, a\*, AR y ABTS; mientras que, fueron menos sensibles la  $x_w$ ,  $a_w$ ,  $\rho_b$  y  $\rho_c$ , TF, DPPH, b\* y  $D_{[3,2]}$ . Las SEM obtenidas por SD presentan valores de  $X_w$  y  $a_w$  que le confieren características favorables de conservación; además, con buenas propiedades de instantaneidad (S = 93 %); sin embargo, su afinidad polar es alta (Hy = 15,6%), por lo que, requiere de un empaque con una alta barrera al vapor de agua durante su almacenamiento, ya que esto podría afectar el estado amorfo vítreo ( $T_g = 38^\circ\text{C}$ ) y generar problemas de cohesividad y adhesividad. La optimización y la validación experimental usando la metodología de superficie de respuesta y la función de deseabilidad 73,7 % fueron implementadas efectivamente, presentando muy buenos ajustes para la mayoría de las variables evaluadas. Las condiciones óptimas del proceso (IAT 154 °C, OAT 89 °C, DSA 16,805 rpm y MD 11,5%) permitieron obtener unas SEM con buenos atributos antioxidantes (ABTS  $739 \pm 15,03$ , DPPH  $593,03 \pm 46,71$  y FT  $2023 \pm 65,74$ ) y valores de  $X_w$  ( $4,80 \pm 0,17\%$ ) y  $a_w$  ( $0,258 \pm 0,005$ ) que le confieren estabilidad fisicoquímica y microbiológica.

### 3.7 Bibliografía

AOAC. (2003) Official Methods of Analysis. Vol.I.17th ed. Association of Analytical  
Washington, DC, USA

Abadio, F. D. B., Domingues, A. M., Borges, S. V., & Oliveira, V. M. (2004). Physical  
properties of powdered pineapple (*Ananas comosus*) juice - Effect of malt dextrin

- concentration and atomization speed. *Journal of Food Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.10.010>
- Andrade, R. D. P., Roberto, L. M., & Pérez, C. E. C. (2011). Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations. *Vitae*, *18*(3), 325–334.
- Bahnasawy, A. H., Okasha, A. E., & Gonbeej, E. E. (2010). Performance evaluation of a laboratory scale spray dryer. *Journal of Agricultural Engineering*.
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Juliano, P. (2005). Physical and chemical properties of food powders. In *Food Powders: physical properties, processing, and functionality*.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124155>
- Basu, A., Nguyen, A., Betts, N. M., & Lyons, T. J. (2014). Strawberry As a Functional Food: An Evidence-Based Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2011.608174>
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2018). Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.007>
- Braga, V., Guidi, L. R., de Santana, R. C., & Zotarelli, M. F. (2020). Production and characterization of pineapple-mint juice by spray drying. *Powder Technology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.012>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. In *LWT - Food Science and Technology*.  
[https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Caliskan, G., & Nur Dirim, S. (2013). The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. *Food and Bioproducts Processing*, *91*(4), 539–548. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.06.004>
- Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., & Cal-Vidal, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.003>

- Carlos, L. A. J., Antonio, G. G. G., & Misael, C. R. (2018). Effect of the Spray Drying Process on the Quality of Coconut Powder Fortified with Calcium and Vitamins C, D<sub>3</sub> and E. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 16(SPL), 102–124. <https://doi.org/10.19026/ajfst.16.5943>
- Castaño-peláez, H. I., Cortes-rodríguez, M., & Gil-gonzález, J. (2021). *Influence of gum arabic and homogenization process on the physicochemical stability of strawberry suspensions*. 2061, 1–7.
- Chauhan, A. K., & Patil, V. (2013). Effect of packaging material on storage ability of mango milk powder and the quality of reconstituted mango milk drink. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.055>
- Chinwan, D., & Castell-Perez, M. E. (2019). Effect of conditioner and moisture content on flowability of yellow cornmeal. In *Food Science and Nutrition* (Vol. 7, Issue 10, pp. 3261–3272). <https://doi.org/10.1002/fsn3.1184>
- Chong, S. Y., & Wong, C. W. (2017). Effect of spray dryer inlet temperature and maltodextrin concentration on colour profile and total phenolic content of Sapodilla (Manilkara zapota) powder. *International Food Research Journal*, 24(6), 2543–2548.
- Cuq, B., Mandato, S., Jeantet, R., Saleh, K., & Ruiz, T. (2013). Agglomeration/granulation in food powder production. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties* (pp. 150–177). <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.150>
- Dickinson, E. (2014). Understanding Food Structures: The Colloid Science Approach. In *Food Structures, Digestion and Health*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404610-8.00001-3>
- Feguš, U., Žigon, U., Petermann, M., & Knez, Ž. (2015). Effect of drying parameters on physiochemical and sensory properties of fruit powders processed by PGSS-, vacuum- and spray-drying. *Acta Chimica Slovenica*. <https://doi.org/10.17344/acsi.2014.969>
- Forbes-Hernandez, T. Y., Gasparini, M., Afrin, S., Bompadre, S., Mezzetti, B., Quiles, J. L., Giampieri, F., & Battino, M. (2016). The Healthy Effects of Strawberry Polyphenols: Which Strategy behind Antioxidant Capacity? *Critical Reviews in Food*

*Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1051919>

Freixo, R., Brandão, T. M. R. S., Silva, J., Gomes, A., Pintado, M., Silva, C. L. M., Morais, A. M. M. B., & Teixeira, P. (2016). Prebiotics as drying aids for spray drying fruit juices. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*.

Geldart, D. (1973). Types of gas fluidization. *Powder Technology*.  
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3)

Gil-Giraldo, E. Y., Duque-Cifuentes, A. L., & Quintero-Castaño, V. D. (2019). Obtaining minimally processed strawberry (*Fragaria x ananassa*) products and their physicochemical, microbiological, and sensory characterization by using edible coatings. *DYNA*. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.72982>

Gong, Z., Yu, M., Wang, W., & Shi, X. (2018). Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. *International Journal of Food Properties*. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1506477>

Grabowski, J. A., Truong, V. D., & Daubert, C. R. (2006). Spray-drying of amylase hydrolyzed sweetpotato puree and physicochemical properties of powder. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00036.x>

Johnson, A. C., & Ali Al Mukhaini, E. M. (2016). Drying studies on peach and strawberry slices. *Cogent Food & Agriculture*. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1141654>

Kallio, H., Hakala, M., Pelkkikangas, A. M., & Lapveteläinen, A. (2000). Sugars and acids of strawberry varieties. *European Food Research and Technology*, 212(1), 81–85.  
<https://doi.org/10.1007/s002170000244>

Larrauri, J. A., Rupérez, P., Borroto, B., & Saura-Calixto, F. (1996). Mango peels as a new tropical fibre: Preparation and characterization. *LWT - Food Science and Technology*.  
<https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0113>

Lee, H., & Yoo, B. (2021). Agglomeration of galactomannan gum powders: Physical, rheological, and structural characterizations. *Carbohydrate Polymers*, 256(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117599>



- Leite Neta, M. T. S., de Jesus, M. S., da Silva, J. L. A., Araujo, H. C. S., Sandes, R. D. D., Shanmugam, S., & Narain, N. (2019). Effect of spray drying on bioactive and volatile compounds in soursop (*Annona muricata*) fruit pulp. *Food Research International*, 124(September 2018), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.039>
- Manickavasagan, A., Thangavel, K., Dev, S. R. S., Delfiya, D. S. A., Nambi, E., Orsat, V., & Raghavan, G. S. V. (2015). Physicochemical Characteristics of Date Powder Produced in a Pilot-Scale Spray Dryer. *Drying Technology*, 33(9), 1114–1123. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1014045>
- Marulanda, A., Ruiz-Ruiz, M., & Cortes-Rodríguez, M. (2018a). Influence of spray drying process on the quality of avocado powder: A functional food with great industrial potential. *Vitae*. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v25n1a05>
- Marulanda, A., Ruiz-Ruiz, M., & Cortes-Rodríguez, M. (2018b). Influence of spray drying process on the quality of avocado powder: A functional food with great industrial potential. *Vitae*, 25(1), 37–48. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v25n1a05>
- Maury, M., Murphy, K., Kumar, S., Shi, L., & Lee, G. (2005). Effects of process variables on the powder yield of spray-dried trehalose on a laboratory spray-dryer. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 59(3), 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2004.10.002>
- Mirhosseini, H., Tan, C. P., Hamid, N. S. A., & Yusof, S. (2008). Effect of Arabic gum, xanthan gum and orange oil contents on  $\zeta$ -potential, conductivity, stability, size index and pH of orange beverage emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.07.007>
- Mirhosseini, H., Tan, C. P., Hamid, N. S. A., Yusof, S., & Chern, B. H. (2009). Characterization of the influence of main emulsion components on the physicochemical properties of orange beverage emulsion using response surface methodology. *Food Hydrocolloids*. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.02.007>
- Moghaddam, A. D., Pero, M., & Askari, G. R. (2017). Optimizing spray drying conditions of sour cherry juice based on physicochemical properties, using response surface methodology (RSM). *Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 174–184. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2449-8>

- Mokrzycki, W.S. & Tatol M. (2012). *Color difference  $\Delta E$  -A survey*. Faculty of Mathematics and Informatics. University of Warmia and Mazury. Sloneczna 54, Olsztyn, Poland.  
Consultado en:  
[https://www.researchgate.net/publication/236023905\\_Color\\_difference\\_Delta\\_E\\_-\\_A\\_survey](https://www.researchgate.net/publication/236023905_Color_difference_Delta_E_-_A_survey)
- Mosquera, L. (2010). *INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y DE LA ADICIÓN DE SOLUTOS (MALTODEXTRINA O GOMA ARÁBIGA) EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE BOROJÓ Y FRESA EN POLVO*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Muzaffar, K. (2015). Stickiness Problem Associated with Spray Drying of Sugar and Acid Rich Foods: A Mini Review. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, s12(August), 10–13. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.s12-003>
- Nortuy, N., Suthapakti, K., & Utama-ang, N. (2018). Effects of Maltodextrin and Silicon Dioxide Added as Anticaking Agents on the Properties of Instant Date Palm (Phoenix dactylifera L.) Powder Using Spray Drying. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 5(2), 86–92. <https://doi.org/10.18178/joaat.5.2.86-92>
- Oliveira, -A-R-G-de, Borges, -S-V, Faria, -R-K, Endo, -E, & Gregorio, -S-R. (2007). Influence of the spray drying conditions on sensorial characteristics of the dehydrated passion fruit (*Passiflora edulis flavircarpa*) and pineapple (*Ananas comosus*) juice. *Revista-Ciencia-Agronomica*.
- Oliveira, M. I. S., Tonon, R. V., Nogueira, R. I., & Cabral, L. M. C. (2013a). Estabilidade da polpa de morango atomizada utilizando diferentes agentes carreadores. *Brazilian Journal of Food Technology*. <https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000037>
- Oliveira, M. I. S., Tonon, R. V., Nogueira, R. I., & Cabral, L. M. C. (2013b). Estabilidade da polpa de morango atomizada utilizando diferentes agentes carreadores. *Brazilian Journal of Food Technology*, 16(4), 310–318. <https://doi.org/10.1590/s1981-67232013005000037>
- Onipe, O. O., Beswa, D., & Jideani, A. I. O. (2017). Effect of size reduction on colour, hydration and rheological properties of wheat bran. *Food Science and Technology*, 37(3), 389–396. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.12216>

- Palencia, P., Martínez, F., Medina, J. J., & López-Medina, J. (2013). Strawberry yield efficiency and its correlation with temperature and solar radiation. *Horticultura Brasileira*, 31(1), 93–99. <https://doi.org/10.1590/s0102-05362013000100015>
- Phisut, N. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: Some factors influencing the properties of product. *International Food Research Journal*.
- Quek, S. Y., Chok, N. K., & Swedlund, P. (2007). The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.06.020>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Trolox ASSAY. *Free Radical Biology and Medicine*. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rezvani, E., Schleining, G., & Taherian, A. R. (2012). Assessment of physical and mechanical properties of orange oil-in-water beverage emulsions using response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.025>
- Ribeiro, L. C., da Costa, J. M. C., & Afonso, M. R. A. (2016). Hygroscopic behavior of lyophilized acerola pulp powder. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(3), 269–274. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p269-274>
- Ribeiro, L. de O., Dos Santos, J. G. C., Gomes, F. D. S., Cabral, L. M. C., Sá, D. de G. C. F., da MATTA, V. M., & Freitas, S. P. (2018). Sensory evaluation and antioxidant capacity as quality parameters in the development of a banana, strawberry and juçara smoothie. *Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.12017>
- Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H., & Gomes, P. S. (2018). Spray Drying: An Overview. *Biomaterials - Physics and Chemistry - New Edition*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72247>
- Shahidi, F., Janitha, P. K., & Wanasundara, P. D. (1992). Phenolic antioxidants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408399209527581>
- Shivashankara, K. S., Isobe, S., Al-Haq, M. I., Takenaka, M., & Shiina, T. (2004). Fruit

- Antioxidant Activity, Ascorbic Acid, Total Phenol, Quercetin, and Carotene of Irwin Mango Fruits Stored at Low Temperature after High Electric Field Pretreatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/jf030243l>
- Singh, C. S., Paswan, V. K., & Rai, D. C. (2019). Process optimization of spray dried Jamun (*Syzygium cumini* L.) pulp powder. *LWT*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.011>
- Singleton, V. L., & Jr., R. J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*. <https://doi.org/10.12691/ijebv-2-1-5>
- Sousa, S. L., de Moraes, B. A., Ribeiro, L. C., & da Costa, J. M. C. (2016). Stability of cashew apple juice in powder dehydrated in spouted bed. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(7), 678–682. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p678-682>
- Teunou, E., Fitzpatrick, J. J., & Synnott, E. C. (1999). Characterization of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00140-X)
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science and Technology*, 63, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Valverde, J. M., Castellanos, A., & Watson, P. K. (2001). The effect of particle size on interparticle adhesive forces for small loads. *Powder Technology*, 118(3), 236–241. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00382-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00382-X)
- Verma, A., & Singh, S. V. (2015). Spray Drying of Fruit and Vegetable Juices—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 701–719. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.672939>
- Zhang, J., Zhang, C., Chen, X., & Quek, S. Y. (2020). Effect of spray drying on phenolic compounds of cranberry juice and their stability during storage. *Journal of Food Engineering*, 269(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109744>



## Capítulo 4 Aglomeración en lecho fluidizado de mezclas de polvo de fresa obtenidas por secado por atomización

### 4.1 Resumen

La fresa presenta gran aceptación por el consumidor debido a su agradable sabor y funcionalidad; su composición química le confiere un alto poder antioxidante. El proceso de microencapsulación utilizando el secado por aspersión (SD) representa una alternativa tecnológica efectiva en la protección de sus componentes activos; sin embargo, las microcápsulas de mezclas de polvos de fresa presentan problemas de instantanización y fluidez; aspecto que se puede solucionar con la aglomeración de las partículas. El objetivo fue evaluar la influencia del proceso de aglomeración por lecho fluidizado sobre las propiedades de flujo, instantaneidad y antioxidantes del polvo de fresa (PF) obtenido por SD. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) con un diseño central compuesto centrado cara centrada ( $\alpha=1$ ), considerando los factores: temperatura de aire de fluidización (50-70 °C), tiempo (30-50min) y presión de aire de atomización del agente ligante (1-2 bar). Las variables de respuesta fueron: humedad ( $X_w$ ), actividad acuosa ( $a_w$ ), solubilidad (S), humectabilidad (Hu), higroscopicidad (Hy), densidad bulk ( $\rho_b$ ), densidad compactada ( $\rho_c$ ), índice de Carr (IC), índice de Hausner (IH), tamaño de partícula  $D_{[3,2]}$ , fenoles totales (porcentaje de retención de TF), retención de capacidad antioxidante en porcentaje (métodos DPPH y ABTS), ángulo de reposo (AR), color (CIE-LAB). Se observó en el proceso de aglomeración un incremento en el tamaño de partícula; las partículas aglomeradas mostraron una disminución importante en el tiempo de humectación, los aglomerados de mezclas de polvos de fresa presentaron una excelente instantanización y fluidez, solucionando los problemas identificados en las microcápsulas obtenidas por SD. Si bien se incrementaron los niveles de humedad y  $a_w$  en el proceso de aglomeración, los valores se encuentran en el intervalo de seguridad microbiológica y fisicoquímica de los alimentos; además, no se presentó afectación en los contenidos de fenoles y capacidad antioxidante. La optimización experimental alcanzó una deseabilidad del 68,4 % siendo las condiciones óptimas 70 °C, 30 min y 1 bar. El ajuste de la validación experimental arrojó un  $R^2$  de 0,92 con un porcentaje de error absoluto medio de 21,1 %, a estas condiciones se alcanzaron los siguientes valores de las propiedades de los polvos de fresa SD:  $X_w$  (5,50 ±

1,07 %),  $a_w$  ( $0,345 \pm 0,035$ ), S ( $81,11 \pm 1,70$  %), Hu ( $3,89 \pm 0,33$  min),  $\rho_b$  ( $0,431 \pm 0,007$  g/ml),  $\rho_c$  ( $0,52 \pm 0,03$  g/ml), AR ( $5,34 \pm 0,51$  °),  $D_{[3;2]}$  ( $81,8 \pm 5,0$   $\mu\text{m}$ ), ABTS ( $1112,17 \pm 51,66$  mg TE/100 g), DPPH ( $871,10 \pm 60,53$  mg TE/100 g), FT ( $1606,42 \pm 36,26$  mg GAE/100 g), IC (13,42 %) e IH (1,2).

**Keywords:** *Fragaria ananassa*, fluidez, instantaneidad, antioxidantes.

## 4.2 Introducción

La fresa (*Fragaria ananassa* Dutch.) es una planta perteneciente a la familia Rosaceae, considerada fruta de placer por excelencia. Se destaca por su contenido de vitamina C, taninos, flavonoides, antocianinas, catequina, quercetina y kaempferol, ácidos orgánicos (cítrico, málico, oxálico, salicílico y eláxico) y minerales (K, P, Ca, Na y Fe); además de pigmentos y aceite esencial. Estos compuestos presentes en la fresa tienen un potente poder antioxidante y ayudan a disminuir el riesgo de eventos cardiovasculares, mejoran la función endotelial vascular y disminuyen la trombosis (Forbes-Hernández *et al.*, 2016).

El secado por atomización (SD) es una técnica que permite incrementar la vida útil de frutas y verduras altamente perecederas; sin embargo, los polvos obtenidos por lo general presentan deficiencias de fluidez e instantaneidad. Estos polvos se caracterizan principalmente por ser finos y con tamaños de partícula inferiores a 100  $\mu\text{m}$ , donde se presentan fuerzas de cohesión o intra-partícula, especialmente debido a las fuerzas de van der Waals, las cuales predominan sobre las fuerzas gravitacionales en varios ordenes de magnitud (Rosa *et al.*, 2019).

El proceso de aglomeración permite la unión de partículas sólidas que son forzadas a adherirse debido a interacciones físicas y químicas de corta distancia que ocurren en forma aleatoria, generando una estructura agregada porosa de mayor tamaño que las partículas originales (Mehr *et al.*, 2012; Dhanalakshmi *et al.*, 2011). La aglomeración mejora la fluidez y las propiedades de instantaneidad de los polvos (humectabilidad, dispersabilidad y solubilidad); y produce mejores propiedades de flujo disminuyendo la compactación, cohesividad y adhesividad de estos materiales (Benković & Bauman, 2011; Dhanalakshmi *et al.*, 2011). La instantaneidad está relacionada con las propiedades de transporte del material (fluidez), con el mejoramiento de las características visuales y sensoriales del

producto, con la disminución de su densidad y con la prevención de la compactación durante el almacenamiento (Szulc & Lenart, 2016; Dacanal & Menegalli, 2008). Existen diversos tipos de aglomeración: a) por presión, b) Peletizado y granulación en húmedo y en seco, y c) aglomeración por lecho fluidizado. La selección de un proceso aglomeración depende de factores asociados a la materia prima (propiedades físicas, químicas, tamaños de partícula, entre otros) y de las características del producto aglomerado (densidad, porosidad, ángulo de reposo, fluidez, solubilidad, dispersabilidad, humectabilidad, sumergibilidad, entre otras) (Dhanalakshmi *et al.*, 2011; Tomas & Kleinschmidt, 2009). La aglomeración en lecho fluidizado consiste en la fluidización de partículas finas por un flujo de aire caliente y la humectación de su superficie con el líquido ligante suministrado en forma atomizada. La colisión entre las partículas en el lecho fluido forma puentes líquidos entre estas y la interacción con el aire caliente solidifica los puentes resultando en una consolidación del aglomerado (Iveson *et al.*, 2001). Diversos factores de proceso han sido evaluados durante la aglomeración de polvos alimentarios: carga; flujo y temperatura del aire de fluidización; flujo, tipo y composición de la solución ligante; presión y localización de la boquilla de atomización; tiempo de proceso; entre otros (Hirata *et al.*, 2013, *Andreola et al.*, 2018). Una de las principales características de este tipo de aglomeración es que produce aglomerados con alta porosidad y alta resistencia mecánica para la manipulación y almacenamiento de polvos (Dacanal & Menegalli, 2008; Barbosa-Cánovas & Juliano, 2005a; Barbosa, Ortega, Juliano & Yan, 2014); además, se generan altas velocidades de transferencia de masa y calor (Rosa *et al.*, 2020). Como agentes ligantes se ha utilizado agua o soluciones de carbohidratos e hidrocoloides afines física y químicamente a los compuestos de la superficie del polvo, permitiendo el desarrollo de los puentes líquidos y su posterior solidificación como consecuencia de la evaporación del agua. Entre los agentes ligantes se destaca el uso de maltodextrina (MD), goma arábiga (GA), galactomananos, goma guar, goma xantan, aislados de proteína de suero (WPI), pectina y glucosa, entre otros.

En general, las principales aplicaciones de la aglomeración incluyen la producción de sal, leche y sopas deshidratadas, mezclas de cocoa instantáneas y bebidas en polvo, manufactura de objetos cerámicos, alimentación animal, detergentes, fertilizantes, productos microbiológicos (enzimas y bacterias granulares) y productos farmacéuticos



(tabletas, pellets y micro gránulos) (Dhanalakshmi *et al.*, 2011). Las investigaciones en el área de los alimentos se han centrado en el mejoramiento de propiedades de instantanización en cocoa (Benković & Bauman, 2011), goma guar, goma Xantan (Park & Yoo, 2020) pectina (Hirata *et al.*, 2013), acacia (Rosa *et al.*, 2020), galactomananos (Lee & Yoo, 2021), entre otras. En particular, son pocas las investigaciones de aglomeración de polvos provenientes de vegetales: acerola (Dacanal & Menegalli, 2008), bayberry (Gong *et al.*, 2008), espinaca (Yuksel & Dirim, 2020), proteínas de arroz y alverja (Custodio *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2020; Andreola *et al.*, 2018), entre otros.

Las propiedades de fluidez e instantanización de los polvos de fresa obtenidos por SD se vieron afectadas por los muy finos tamaños de partícula alcanzados  $D_{[3;2]}$  ( $10,0 \pm 0,84 \mu\text{m}$ ), en donde predominan las fuerzas cohesivas que impactan negativamente la fluidez e instantanización del polvo de fresa, se alcanzó una fluidez buena según la evaluación del IC (18,5 %), una cohesividad intermedia según el valor del IH (1,2) y una fluidez deficiente según AR ( $29,7 \pm 1,9^\circ$ ), se identificaron problemas de instantanización según altos valores de Hu ( $14,5 \pm 0,7 \text{ min}$ ) y de Hy ( $16,08 \pm 0,5 \%$ ) que afectan la funcionalidad de los polvos en las etapas de proceso de empaque, almacenamiento, transporte y reconstitución. Bajo este contexto, el objetivo de la investigación fue evaluar la influencia del proceso de aglomeración por lecho fluidizado (temperatura de aire de fluidización, tiempo de proceso y presión de atomización del ligante) sobre las propiedades de la mezcla de polvo de fresa (MPF) y validar el efecto del proceso de aglomeración sobre la mejora en las propiedades de fluidez e instantanización.

## 4.3 Materiales y métodos

### 4.3.1 Materia prima.

La materia prima fue un polvo de fresa suministrado por la empresa Proexcar SAS y obtenido por SD en un equipo (Lemar, China) con capacidad de evaporación de agua de 200 L/h, operado con las siguientes condiciones: temperatura de entrada de aire:  $154^\circ\text{C}$ , temperatura de salida de aire:  $89^\circ\text{C}$ , velocidad del disco atomizador: 19000 rpm. El polvo de fresa obtenido fue caracterizado como un producto de cohesividad intermedia, grupo C según Geldart, (1973), y con las siguientes propiedades:  $X_w$  ( $2,2 \pm 0,3 \%$ ),  $a_w$  ( $0,108 \pm 0,005$ ), S ( $90,6 \pm 0,6\%$ ), Hu ( $14,5 \pm 0,7 \text{ min}$ ), Hy ( $16,8 \pm 0,5 \%$ ),  $\rho_b$  ( $0,451 \pm 0,007 \text{ g/mL}$ ),  $\rho_c$

( $0,586 \pm 0,009$  g/mL), AR ( $29,7 \pm 1,9$  °),  $D_{[3;2]}$  ( $10,0 \pm 0,8$   $\mu\text{m}$ ), FT ( $1105,1 \pm 54,9$  mg GAE/100g), ABTS ( $1080,7 \pm 34,7$  mg TE/100 g) y DPPH ( $997,5 \pm 36,9$  mg TE/100 g), IC (18,5 %), IH (1,2). Debido a dificultades de fluidización del polvo de fresa en el aglomerador, se adicionó dióxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) (Pirosil®) (0,5 % p/p) para reducir la cohesividad del material y esta mezcla se identificó como mezcla de polvo de fresa (MPF) sin aglomerar o como material de carga en el aglomerador.

### 4.3.2 Proceso de aglomeración.

Se utilizó un aglomerador por lecho fluidizado piloto (Changzhou Zhiyang Machinery Equipment CO., LTD., China), referencia DLP1.5 con capacidad entre 350 - 1500 g. El flujo de aire fue monitoreado con rotámetro y se fijó en  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ , flujo que permitió garantizar estado de fluidización del polvo. Las partículas de polvo elutriadas fueron colectadas en un sistema de filtración metalizado localizado en la zona superior de la sección cilíndrica del equipo. La carga de MPF para cada experimento fue de 400 g y el agente ligante fue agua pura a  $25$  °C con un flujo de  $1,6 \text{ mL}/\text{min}$ . La evaluación del proceso se realizó a partir de la metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto ( $\alpha=1,4$ ) (15 experimentos) y considerando 3 variables independientes: temperatura de entrada de aire de fluidización (T) ( $50 - 70$ °C), tiempo de proceso (30-50 min) y presión de aire de atomización de agente ligante (P) (1 - 2 bar) y las variables dependientes:  $X_w$ ,  $a_w$ , S,  $H_u$ ,  $H_y$ ,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , IC, IH, AR, tamaño de partícula  $D_{[3;2]}$ , antioxidantes (métodos ABTS y DPPH) y FT. Adicionalmente, se realizó una optimización experimental de múltiples respuestas a partir de la función “*optimal*” del software Design Expert 12, buscando maximizar la deseabilidad y considerando criterios de optimización que favorezcan la calidad del producto aglomerado.

### 4.3.3 Caracterización de los productos.

La materia prima y la MPF aglomerada (MPFA) se caracterizaron en función de las siguientes propiedades: La  $X_w$  según el método oficial AOAC 930.15/90. La  $a_w$  se determinó utilizando higrómetro de punto de rocío a  $25$ °C (Aqualab serie 3TE, Decagon). La  $\rho_b$  según la metodología descrita por Pereira *et al.*, (2020) modificado, en una probeta se registró el volumen ocupado por 5 g de muestra. La  $\rho_c$  según la metodología descrita por Haas *et al.*, (2020) modificado, 5 g de polvo se depositaron en un tubo falcón; luego, se centrifugó por

5 min a 8000 rpm, y se registró el volumen compactado. Los parámetros IC e IH se determinaron según las ecuaciones 1 y 2, respectivamente, cuya clasificación de fluidez y cohesividad se describe en la tabla 1 (Jinapong et al., 2008).

$$IC = 100 (\rho_c - \rho_b) / \rho_c \text{ (Ecuación 1)} \quad IH = \rho_c / \rho_b \text{ (Ecuación 2)}$$

**Tabla 4-1.** Clasificación de fluidez y cohesividad de los polvos de acuerdo con los IC e IH

Fluidez	IC (%)	Cohesividad	IH
Muy buena	<15	Baja	< 1,2
Buena	15-20	Intermedia	1,2-1,4
Aceptable	20-35	Alta	>1,4
Mala	35-45	-----	-----
Muy mala	>45	-----	-----

El AR se determinó según la metodología descrita por Barbosa-Cánovas & Juliano, (2005b), Larrauri *et al.*, (1996) y Teunou *et al.*, (1999). La S se determinó de acuerdo al método descrito por Chauhan & Patil, (2013) y modificado por Marulanda *et al.*, (2018). La Hu se determinó como el tiempo requerido para que 1 g de polvo desaparezca de la superficie de un volumen de 100 mL de agua a 20°C (Marulanda *et al.*, 2018). La Hy se determinó según el método gravimétrico para isotermas de sorción controlando la humedad relativa del ambiente al interior de un frasco hermético a 68 % (solución sobresaturada de KI) (Martínez Navarrete, 1999). El tamaño de partícula se determinó en el analizador de partículas Mastersizer 3000 (Malver Instrument), módulo Aero S y se reportó como diámetro de superficie equivalente ( $D_{[3,2]}$ ). El contenido de FT se determinó según el método descrito por (Singleton & Jr., 1965). La capacidad antioxidante se determinó por el método DPPH, descrito por Brand-Williams *et al.*, (1995); mientras que, el método ABTS descrito por Re *et al.*, (1999).

#### 4.3.4 Morfología de las partículas (SEM).

La morfología de la materia prima y de la MPFA (a condiciones óptimas) fueron examinadas por microscopía de barrido electrónico (SEM) (JSM-5910, JEAL) desarrollados a un voltaje de aceleración de 10 KV. Los polvos de fresa SD y los aglomerados fueron recubiertos en oro al vacío. Las imágenes del SEM se realizaron a alto vacío y se presentan con magnificaciones de 300X y 1000X para polvos de fresa SD, y 200X y 600 X para los MPF aglomerados.

### 4.3.5 Temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>).

Los valores de T<sub>g</sub> de la mezcla de polvo de fresa no aglomerada y aglomerada se determinaron en un equipo de calorimetría diferencial de barrido ( DSC Q20 TA Instruments) en modo modulado, equilibrio a -90 °C, isoterma 1 min, calentamiento hasta 100 °C con velocidad de 10 °C/min.

### 4.3.6 Análisis de datos.

Los resultados fueron analizados a partir del análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95 % y los modelos matemáticos que describen el comportamiento de las variables dependientes se modelaron a la ecuación polinómica de segundo orden y modelo lineal, aplicando la prueba de falta de ajuste y los coeficientes de correlación (R<sup>2</sup>) y precisión adecuada. Las condiciones del punto óptimo fueron validadas experimentalmente por triplicado y el porcentaje error absoluto y porcentaje de error relativo medio (PEA y PEAM) fue calculado.

## 4.4 Resultados y discusión

La tabla 4-2 presentan los valores medios y la desviación estándar de las variables dependientes de la MPFA por lecho fluidizado; mientras que, la tabla 4-3 presenta los valores p para los modelos de superficie de respuesta del proceso de aglomeración.

### 4.4.1 Humedad y actividad acuosa.

Los valores medios de la X<sub>w</sub> y la a<sub>w</sub> de las MPFA estuvieron entre 3,2 – 6,9 % y 0,224 – 0,301, respectivamente; valores que le confieren al producto una buena estabilidad a las reacciones de deterioro fisicoquímico y microbiológico (Quek et al., 2007). Como era de esperarse, estos valores fueron mayores que la MPF sin aglomerar (X<sub>w</sub>: 2,2 ± 0,3 % y a<sub>w</sub>: 0,108 ± 0,005), debido a la ganancia neta de agua en el proceso de aglomeración por lecho fluidizado.

El ANOVA mostró diferencias significativas de la X<sub>w</sub> (p < 0,05) con respecto a la T y P; mientras que la a<sub>w</sub> (p ≤ 0,05) con respecto a la P. El comportamiento de ambas variables fue similar y coherente, observándose que el incremento en la T reduce la X<sub>w</sub> y la a<sub>w</sub>, gracias a la mayor fuerza motriz a la transferencia de masa que produce una mayor tasa

evaporativa (figura 4-1). Por otro lado, el incremento de la  $P$  generó un aumento en  $X_w$  y  $a_w$ , atribuible a una mayor pulverización del agua ligante (menor tamaño de gota y mayor área superficial), que confiere igualmente una mayor interacción y distribución en la superficie de las partículas de la MPF en estado de fluidización. Finalmente, esto promueve una mayor aglomeración y mayor tamaño de partículas aglomeradas.

En productos hortofrutícolas aglomerados, las investigaciones identifican comportamientos diversos para la  $X_w$  y la  $a_w$ . Dacanal & Menegalli, (2008) reportaron valores similares de  $X_w$  en polvo aglomerado de acerola; sin embargo, se presentó una disminución de la  $X_w$  con el incremento en el flujo de aire de atomización, variable relacionada con la  $P$ . Yuksel & Dirim, (2020) reportaron en polvo aglomerado de espinaca, utilizando soluciones ligantes (agua, GA, MD y WPI), un incremento de  $X_w$  con el aumento del flujo de las soluciones, alcanzando valores superiores a la MPF aglomerada y principalmente con la solución de GA (9,4 - 11,7%). En cuanto a la  $a_w$ , igualmente los valores encontrados fueron superiores (0,270 - 0,410) a la MPF aglomerada, atribuido a la alta relación de masa ligante /masa de carga (0,1-0,3). Por otro lado, Custodio *et al.*, (2020) en la aglomeración de mezclas en polvo de proteína de arroz y arveja, utilizando una solución ligante de açai (*Euterpe oleracea*) reportaron un incremento de  $X_w$  y  $a_w$  con el aumento del flujo de solución ligante, asociado a la promoción de una mayor humedad relativa en la cámara del lecho fluidizado.

Tabla 4-2. Caracterización del MPFA según diseño experimental

Run	Variables independientes			Variables dependientes								
	T (°C)	Tiempo (min)	P (bar)	Xw (%)	$a_w$	$\rho_b$ (g/mL)	$\rho_c$ (g/mL)	IC	IH	AR (°)	S (%)	Hu (min)
1	50,0	30,00	1,00	3,5±0,1	0,272±0,005	0,455±0,000	0,501±0,000	9,09±0,00	1,10±0,00	8,0±0,0	80,2±2,3	5,0±0,0
2	60,0	40,00	1,50	3,4±0,1	0,224±0,011	0,538±0,020	0,682±0,025	21,07±0,03	1,27±0,00	6,2±0,0	87,6±0,4	12,2±0,5
3	60,0	54,14	1,50	3,3±0,1	0,228±0,008	0,525±0,000	0,644±0,021	18,54±2,56	1,23±0,03	9,9±0,7	86,4±2,2	8,8±0,2
4	70,0	50,00	1,00	3,4±0,1	0,243±0,007	0,502±0,043	0,587±0,018	10,53±0,00	1,12±0,00	10,9±0,7	83,8±0,9	10,1±0,2
5	45,9	40,00	1,50	3,9±0,2	0,274±0,002	0,460±0,013	0,568±0,010	18,99±1,88	1,16±0,01	9,1±0,0	85,9±0,9	6,7±0,4
6	60,0	40,00	0,79	3,5±0,1	0,229±0,010	0,528±0,003	0,625±0,00	15,49±0,52	1,18±0,01	9,7±0,6	86,9±1,2	9,1±0,2
7	60,0	40,00	1,50	4,7±0,1	0,301±0,003	0,547±0,004	0,666±0,000	17,28±0,53	1,21±0,01	8,5±0,3	87,2±0,7	8,2±0,5
8	60,0	25,85	1,50	3,6±0,1	0,260±0,003	0,526±0,009	0,630±0,009	16,49±0,31	1,20±0,00	8,0±0,0	83,2±1,1	10,4±0,6
9	60,0	40,00	1,50	4,1±0,2	0,301±0,003	0,468±0,001	0,501±0,001	6,54±0,00	1,07±0,00	4,9±0,3	71,9±1,1	1,6±0,1
10	60,0	40,00	1,50	3,7±0,3	0,275±0,009	0,565±0,008	0,613±0,010	7,90±0,10	1,09±0,10	9,0±0,07	82,4±0,6	3,4±0,1
11	74,1	40,00	1,50	3,5±0,3	0,250±0,007	0,549±0,001	0,588±0,001	6,59±0,00	1,07±0,00	8,3±0,0	81,9±1,8	4,6±0,1
12	60,0	40,00	2,21	4,4±0,1	0,298±0,003	0,540±0,009	0,672±0,006	19,70±1,29	1,25±0,02	9,2±0,1	83,7±1,1	7,3±0,2
13	50,0	50,00	2,00	6,9±0,1	0,398±0,007	0,475±0,003	0,523±0,003	13,42±0,65	1,16±0,001	6,8±0,0	74,5±2,6	1,6±0,2
14	70,0	30,00	2,00	3,5±0,1	0,279±0,016	0,527±0,001	0,557±0,001	5,26±0,00	1,06±0,00	5,2±0,0	77,3±1,4	5,0±0,0
15	60,0	40,00	1,50	3,2±0,1	0,268±0,016	0,552±0,005	0,623±0,006	11,40±0,60	1,13±0,01	5,2±0,0	83,7±0,4	9,2±0,5

Tabla 4-2. (Continuación)

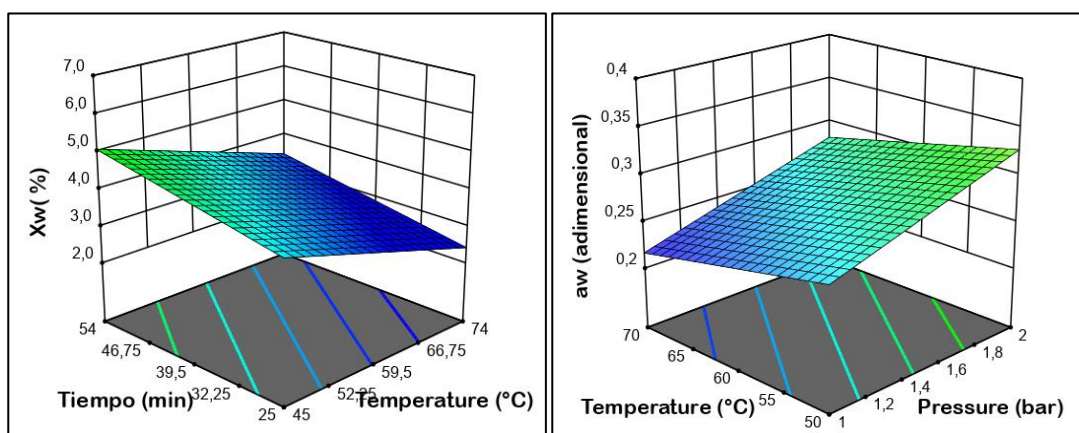
Run	Variables independientes			Variables dependientes				
	T (°C)	Tiempo (min)	P (bar)	Hy (%)	D <sub>[3,2]</sub>	% Retención FT	% Retención ABTS	% Retención DPPH
1	50,0	30,00	1,00	13,7±0,1	60,2±2,3	126,35±2,84	115,92±4,46	133,89±2,60
2	60,0	40,00	1,50	14,7±0,0	11,7±1,5	121,29±6,59	118,18±3,05	128,19±8,12
3	60,0	54,14	1,50	13,6±0,1	9,2±0,6	120,89±2,96	115,83±5,80	139,26±5,68
4	70,0	50,00	1,00	14,1±0,0	4,9±1,1	123,63±1,12	125,09±4,10	142,08±4,71
5	45,9	40,00	1,50	13,7±0,2	106,6±1,7	122,74±7,85	114,24±2,45	133,48±8,48
6	60,0	40,00	0,79	13,0±0,2	5,5±0,9	123,49±4,35	115,5±4,84	137,48±6,04
7	60,0	40,00	1,50	11,6±0,1	2,7±0,3	118,64±4,26	113,18±3,74	123,09±9,08
8	60,0	25,85	1,50	12,3±0,1	2,7±0,5	122,59±2,92	119,43±1,89	137,47±3,84
9	60,0	40,00	1,50	12,4±0,1	5,2±0,5	127,22±5,38	130,14±1,89	134,14±3,84
10	60,0	40,00	1,50	13,5±0,3	35,3±4,5	114,05±8,65	103,94±2,36	124,78±9,84
11	74,1	40,00	1,50	14,1±0,1	6,2±0,7	126,11±4,39	120,79±4,02	145,69±3,64
12	60,0	40,00	2,21	12,8±0,0	9,1±0,4	120,14±4,94	122,94±1,17	134,11±6,05
13	50,0	50,00	2,00	9,9±0,0	160,9±10,1	126,35±4,53	113,79±2,31	129,36±6,14
14	70,0	30,00	2,00	13,3±0,2	126,8±16,4	123,61±2,12	122,67±4,15	142,86±1,34
15	60,0	40,00	1,50	14,3±0,1	6,7±3,7	119,98±2,12	121,02±2,99	131,77±8,07

Tabla 4-3. Valores p para los modelos de superficie de respuesta de la MPFA

	T	t	P	T-t	T-P	t-P	T <sup>2</sup>	t <sup>2</sup>	P <sup>2</sup>
Xw	0,04578*	0,2178	0,0492*	----	----	----	----	----	----
aw	0,0485*	0,6548	0,0219*	----	----	----	----	----	----
pb	0,0264*	0,9269	0,4902	----	----	----	----	----	----
pc	0,4433	0,8341	0,7117	----	----	----	----	----	----
AR	0,5166	0,1088	0,0387*	----	----	----	----	----	----
S	0,9514	0,7112	0,2595	----	----	----	----	----	----
Hu	0,5860	0,6912	0,6320	0,4469	0,6221	0,1712	0,1299	0,7532	0,6893
Hy	0,8427	0,4587	0,9102	0,2522	0,1971	0,3699	0,7066	0,5433	0,4905
√D <sub>[3,2]</sub>	0,0386*	0,5918	0,8918	0,1584	0,0466*	0,5229	0,3854	0,0168*	0,0202*
FT	0,6037	0,7914	0,6064	0,7149	0,8501	0,4389	0,1846	0,5316	0,5180
ABTS	0,6163	0,7808	0,5708	0,5659	0,8347	0,7348	0,9204	0,9064	0,7210
DPPH	0,1546	0,8157	0,6629	0,9469	0,6139	0,7734	0,0762	0,1158	0,2810
L	0,8061	0,2706	0,0638	----	----	----	----	----	----
a*	0,1125	0,9385	0,0438*	----	----	----	----	----	----
b*	0,1788	0,8502	0,4069	0,2769	0,3703	0,4353	0,4722	0,3210	0,8055

\*Diferencia significativa (p&lt;0,05)

**Figura 4-1** Gráficos de superficie de respuesta de  $X_w$  y  $a_w$  (temperatura -presión) de la MPFA



Elaboración propia

#### 4.4.2 Propiedades de flujo de la MPFA.

Los valores de  $\rho_b$  y  $\rho_c$  de la MPFA presentaron niveles de fluctuación bajos, entre (0,455 – 0,565 g/mL) y (0,501 – 0,682 g/mL), respectivamente. Sin embargo, el ANOVA mostró diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) en la  $\rho_b$  con respecto a la T; mientras que, la  $\rho_c$  no presentó diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ). En comparación con la materia prima utilizada ( $\rho_b$ :  $0,451 \pm 0,07$  g/mL y  $\rho_c$ :  $0,586 \pm 0,009$  g/mL), se observa un incremento en la  $\rho_b$  en la MPF aglomerada, asociado a una posible densificación del material durante el proceso de aglomeración; por otro lado, para la  $\rho_c$  los valores se comportan estadísticamente como un solo grupo homogéneo. Yuksel y Nur Dirim (2020) reportaron valores similares de  $\rho_b$  y  $\rho_c$  para el polvo de espinaca aglomerado (0,38–0,51 y 0,49–0,62 g/mL, respectivamente). Se observa una tendencia a aumentar la  $\rho_b$  con el incremento de la T, indicando que la estructura no tiende a incrementar su porosidad, sino, que el material presenta una posible densificación durante el proceso de aglomeración. Sin embargo, esta situación es contrario a la fenomenología esperada donde una mayor evaporación se obtiene cuando mayor es la fuerza motriz en el sistema.

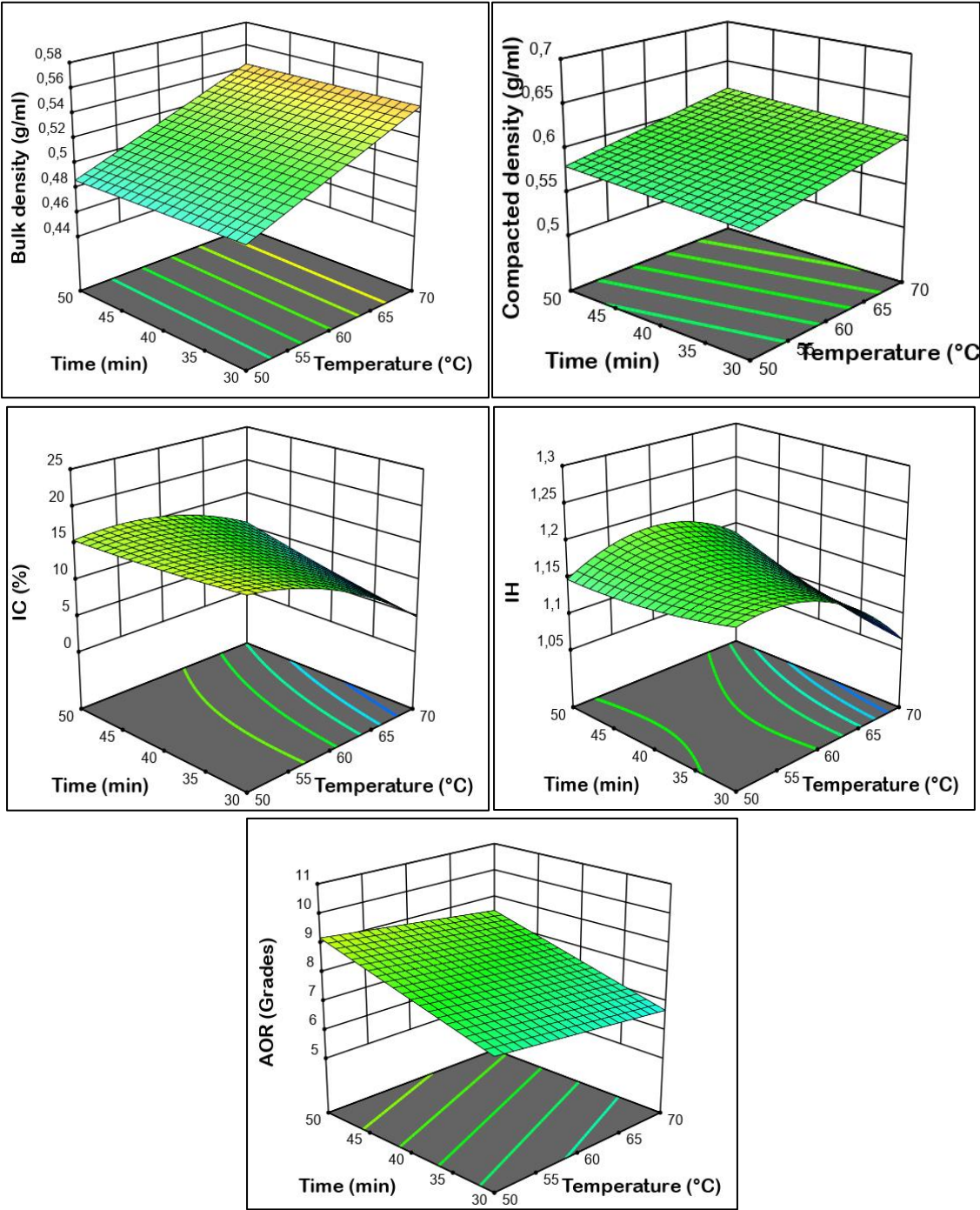
Con respecto al IC e IH, los resultados mostraron una mejora significativa en la fluidez y la disminución en la cohesividad de la MPFA (IC:  $9,5 \pm 2,0\%$  e IH:  $1,1 \pm 0,0$ ), respecto a la materia prima (IC:  $23,0 \pm 1,5\%$  e IH:  $1,3 \pm 0,0$ ). Sin embargo, el ANOVA no presentó diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ) en ambas propiedades con respecto a las variables independientes evaluadas; no obstante, el gráfico de superficie de respuesta muestra una



disminución de las variables IC e IH cuando el sistema opera a altas temperatura (70°C), lo cual es atribuible a que la matriz presenta un menor contenido de agua y una mayor Tg, revalidando con esto, la mejora en la fluidez y cohesividad del producto (Foster et al., 2006).

El análisis del AR mostró de igual forma una mejora en la fluidez de la MPFA frente a la materia prima, disminuyendo desde  $29,7 \pm 1,9^\circ$  hasta  $7,8 \pm 1,4^\circ$  (fluidez pobre → fluidez excelente). Otras investigaciones han reportado comportamientos similares en la fluidez de productos aglomerados: polvos de proteínas de arveja/arroz obtenido a 65°C y 1,5 mL/min de flujo de ligante (incremento en una relación de 1,4 el tamaño de partícula medio, reducción de IC (  $26,8 \pm 1,4$  % materia prima →  $13,4 \pm 1,9$  % para el aglomerado) y reducción Hu (  $206 \pm 5$  s →  $74 \pm 3$  s a) (Custodio et al., 2020) y polvos de espinaca obtenidos a 60 °C, una velocidad de aire de 1,6 m/s , una relación de 1:0,3 kg polvo: kg ligante y 20 min de proceso (reducción en IC hasta  $9,09 \pm 0,02$  %, e IH hasta  $1,10 \pm 0,01$ ) (Yuksel & Dirim, 2020). Estadísticamente, el AR sólo se vio afectado por la P, disminuyendo con incremento de la P (figura 4-2), lo cual favorece la fluidez del material. Esta situación se explica por una mayor interacción de las microgotas de agua más finas y las partículas de la MPF en estado de fluidización, promoviendo una mayor humedad relativa en la zona de atomización del equipo, favoreciendo la aglomeración del material.

Figura 4-2 Gráficos de superficie de respuesta de las propiedades de flujo de la MPFA



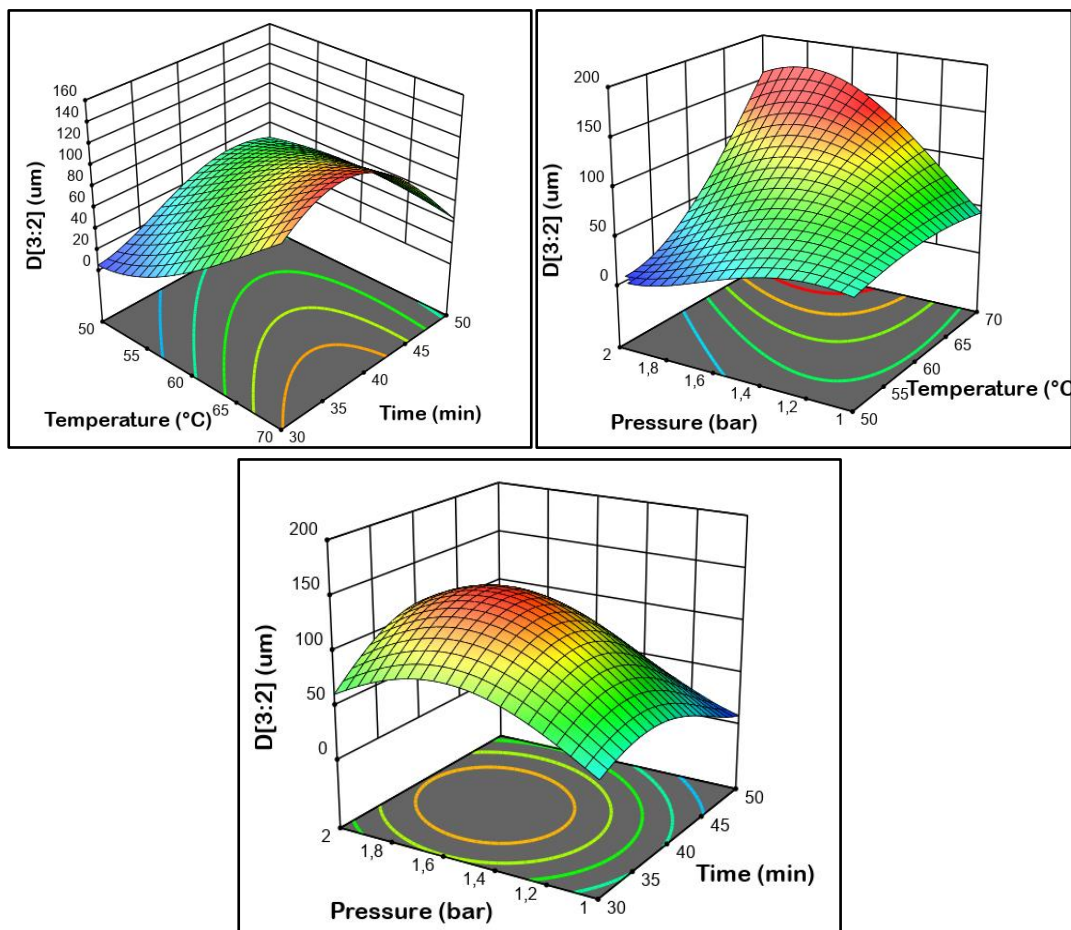
Elaboracion propia

#### 4.4.3 Tamaño de partícula de la MPFA.

Se presentó un rango amplio de tamaños de partícula ( $D_{[3;2]}$ ) en los experimentos evaluados ( $2,7\pm 0,5 \rightarrow 160,9\pm 10,1 \mu\text{m}$ ), lo que incidió de manera directa en la variabilidad de propiedades asociadas con el tamaño de partícula, como fue el caso de Hu ( $1,6\pm 0,2 \rightarrow 12,2\pm 0,50 \text{ min}$ ),  $\rho_b$  ( $0,455\pm 0,000 \rightarrow 0,565\pm 0,008 \text{ g/mL}$ ),  $\rho_c$  ( $0,501\pm 0,000 \rightarrow 0,682\pm 0,025 \text{ g/mL}$ ) e IC ( $6,54\pm 0,00 \rightarrow 21,07\pm 0,02$ ). Se resalta que, los resultados obtenidos del  $D_{[3;2]}$  en la MPFA fueron superiores a los de la materia prima utilizada ( $10,0\pm 0,8 \mu\text{m}$ ), lo que refleja el efecto del proceso de aglomeración y los cambios observados en otros parámetros. Este incremento de  $D_{[3;2]}$  contribuye en la reducción de las fuerzas de van der Waals, responsables de la cohesividad del material, mejorando así la fluidez de la MPF aglomerada.

Por otro lado, el modelo de  $\sqrt{D_{[3;2]}}$  ajustó mejor los resultados, identificando una influencia significativa debido a T, la interacción T-P y las interacciones cuadráticas del tiempo y P ( $p < 0,05$ ). El gráfico de superficie de respuesta (figura 4-3) presenta una tendencia creciente de la  $\sqrt{D_{[3;2]}}$  con el incremento de la T y principalmente cuando se ha corrido 30-45 min ( $M_{AL}/M_{MPF}$  entre 0,16-0,18 kg/kg), lo cual es atribuible a la mayor transferencia de calor que experimentan las partículas finas del MPF, confiriendo en estas una mayor plasticidad térmica debido principalmente a la presencia de las pectinas nativas, que potencian la movilidad del agua y la formación de los puentes líquidos de contacto (Iijima et al., 2000). La interacción T-P fue positiva, reflejándose principalmente en el aumento de la  $\sqrt{D_{[3;2]}}$ , cuando ambas variables independientes crecen. La acción sinérgica de la P con T, se debe a una mayor pulverización de las gotículas de agente ligante sobre la superficie de las partículas finas de la MPF en el lecho, que favorece los puntos de unión entre estas y el crecimiento de  $\sqrt{D_{[3;2]}}$ . Las interacciones cuadráticas del tiempo y de la P identificaron zonas curvilíneas donde los puntos máximos de  $\sqrt{D_{[3;2]}}$  fueron 42 min ( $M_{AL}/M_{MPF} = 0,170 \text{ kg/kg}$  y 1,44 bar, respectivamente. Se aclara que, relaciones de tiempo de proceso de 42 min,  $M_{AL}/M_{MPF} > 0,17$  con  $P > 1,44 \text{ bar}$  podrían haber generado gotas muy finas del agente ligante, susceptibles a ser evaporadas directamente en la corriente de aire de fluidización, sin llegar a adherirse a la superficie de las partículas y afectar la aglomeración.

**Figura 4-3** Gráficos de superficie de respuesta de la  $\sqrt{D_{[3,2]}}$  de la MPFA



Elaboración propia

#### 4.4.4 Instantanización de la MPFA.

El ANOVA no mostró un efecto significativo de las variables independientes, ni sus interacciones sobre la  $H_u$ ,  $H_y$  y  $S$ . El efecto del proceso de aglomeración mejoró significativamente la  $H_u$  de la MPFA, disminuyendo desde  $14,4 \pm 0,7$  min (materia prima) hasta valores en el rango de  $1,6 \pm 0,1$ - $12,2 \pm 0,5$  min. Este comportamiento, se correlacionó directamente con las MPFA que presentaron mayores  $D_{[3,2]}$ , probablemente debido a la mayor porosidad de la estructura que permite mayor difusión del agua (Custodio et al., 2020). Sin embargo, durante la humectación de la MPFA se observó la formación de una capa superficial viscosa, lo cual contribuye a una resistencia adicional a la difusión del agua al interior de la microestructura y afectando una mejor respuesta a la instantaneidad del aglomerado. Este fenómeno se atribuye principalmente a la presencia de pectina nativa

en la fresa, la cual alcanza aproximadamente una composición del 0,87% (Legentil et al., 1995; Drobek et al., 2020).

Un comportamiento similar presentó la  $H_y$  de la MPFA por efecto del proceso de aglomeración, al pasar desde  $16,8 \pm 0,5$  % (materia prima) hasta valores en el rango  $9,9 \pm 0,0$  % -  $14,3 \pm 0,1$  %. Esta situación confiere a las MPFA una menor capacidad de absorción de agua (menor fuerza de absorción), aspecto importante relacionado con posibles cambios del estado de la materia (principalmente transiciones de fases de 2° orden) y de sus propiedades durante el almacenamiento, lo cual está relacionado con la definición de la vida útil del producto (Andrade et al., 2011). Por otro lado, la diferencia de los valores de  $H_y$  de la MPFA con respecto a la materia prima, es igualmente atribuible a la presencia de  $SiO_2$  como agente fluidizante/anticompactante, ya que se disminuyen las fuerzas de absorción (Lipasek et al., 2012).

El proceso de aglomeración afectó negativamente la  $S$  de las MPFA, disminuyendo de  $90,5 \pm 0,57$  % (materia prima) hasta un rango de  $71,9 \pm 1,1$ -  $87,6 \pm 0,4$  %. Esta situación se atribuye principalmente por la presencia del material insoluble aportado por las semillas de la fresa, el cual queda más expuesto en la estructura porosa de la MPFA; además, por el contenido del  $SiO_2$  presente, el cual tiene una baja solubilidad en agua (Benelli et al., 2015).

Pocas investigaciones han sido reportadas en procesos de aglomeración de *berries*, se resaltan los resultados positivos reportados por Dacanal & Menegalli, (2008) en polvo aglomerado de acerola, donde la  $H_u$  se redujo principalmente a altas  $T$  y velocidad del aire de fluidización, reportándose valores en el intervalo 5,60 - 6,86 s. Por otro lado, en la aglomeración de mezclas de polvos de proteínas de arroz y arveja utilizando pulpa de açaí como solución ligante, se redujo la  $H_u$  en un 77 % (Custodio et al., 2020).

#### **4.4.5 Retención de capacidad antioxidante y fenoles totales de la MPFA.**

Las variables porcentaje de retención de capacidades antioxidantes (ABTS, DPPH) y FT de la MPFA evaluadas por las diferentes metodologías, no presentaron diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ) con respecto a las variables independiente del proceso, ni con sus interacciones lineales ni cuadráticas; sin embargo, sus valores fluctuaron entre 113,18 - 130,14, 123,09 - 145,69 y 118,64 - 126,35 por ciento respectivamente. Estos

valores corresponden a retenciones de 63,2% para ABTS, 65,8% para DPPH y 59,7% para FT respecto a los valores de las propiedades de la suspensión de fresa como corriente de alimentación al secado por atomización.

Se resalta que los valores obtenidos de ABTS, DPPH y FT de las MPFA fueron superiores a la materia prima utilizada: 1080,7±34,7 mg TEA/100g MPFA bs, 997,5±36,9 mg TEA/100g MPFA bs y 1105,1±55,0 mg GAE/100g MPFA bs, respectivamente. El incremento observado en la capacidad antioxidante durante el proceso de aglomeración podría explicarse por la generación de sustancias derivadas de reacciones de pardeamiento no enzimático, debido a la presencia de amino ácidos y azúcares reductores en la fresa (fructosa y glucosa)(Ornelas-Paz *et al.*, 2013), que interactúan con los radicales utilizados en las pruebas de actividad antioxidante (Guo *et al.*, 2020). Adicionalmente, la degradación térmica de antocianinas produce compuestos polifenólicos, tales como ácido protocatechuico, 4-hidroxibenzoico, entre otros, que también pueden contribuir a la capacidad antioxidante, y aún no es claro el verdadero efecto de los compuestos de degradación sobre este tipo de propiedades en una matriz alimenticia completa como el MPFA, donde los mecanismos de degradación de antocianinas pueden ser complejos y aun desconocidos (Patras *et al.*, 2010).

Las reacciones de oscurecimiento no enzimático podrían estar ocurriendo bajo las condiciones del proceso térmico en combinación tiempo-temperatura; por ejemplo, en el caso de la tostión media del café (180 °C y 5-6,5 min) se incrementó el contenido de fenoles totales y actividad antioxidante, fenómeno que está relacionado directamente con la síntesis de productos secundarios de la reacción de Maillard (Moreira *et al.*, 2017; Díaz *et al.*, 2018); también se ha incrementado el valor de la actividad antioxidante de las cáscaras de cacao secadas por microondas, aire caliente y liofilización (Valadez-Carmona *et al.*, 2017). Además, el procesamiento térmico a altas temperaturas puede liberar más ácidos fenólicos gracias al rompimiento de los constituyentes de la estructura celular, que pueden ser no detectadas en fresco o en tratamientos térmicos intermedios (Dewanto *et al.*, 2002).

## 4.5 Optimización y validación experimental

En la tabla 4-4 se presentan los coeficientes de los modelos matemáticos de mejor ajuste para cada una de las variables dependientes, y los coeficientes de regresión estimados de

los modelos. No obstante, los coeficientes de regresión de muchas variables no fueron altos, pero la prueba de falta de ajuste permitió la aceptación del modelo para predecir la variación.

La tabla 4-5- presenta los criterios (objetivo e importancia) y la optimización experimental multiobjetivo del proceso de aglomeración de la MPFA. Como resultado de la optimización se alcanzó una deseabilidad del 68,4 % y las siguientes condiciones de operación:  $T = 70^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 30 \text{ min}$  y  $P = 1 \text{ bar}$ . Adicionalmente, se presentan los valores teóricos obtenidos a las condiciones óptimas de proceso según los modelos matemáticos de mejor ajuste y los resultados de la validación experimental (media de tres réplicas y su desviación estándar). Se evaluó el porcentaje de error absoluto (PEA) y medio (PEAM) con el objetivo de valorar la bondad del ajuste del modelo de optimización multiobjetivo (14 variables respuesta), 10 de las variables presentaron PEA inferiores al 20%, los mayores PEA correspondieron a  $X_w$ ,  $\rho_b$ , AR, Hu y FT. El valor de  $X_w$  experimental fue superior al teórico; no obstante, es muy inferior respecto a valores críticos para su estabilidad ( $X_w < 10\%$ ); el AR experimental fue un 28% inferior al valor óptimo, aspecto positivo gracias a la mejora en la fluidez del material. El valor de PEAM fue de 21,01% para el modelo con una función de deseabilidad del 68,4%, afectado fuertemente por las desviaciones de  $X_w$ ,  $\rho_b$ , AR, Hu y retención de FT. La medición de la bondad del ajuste del modelo por análisis de regresión lineal arrojó un factor de correlación de 0,92.

**Tabla 4-4.** Coeficientes y  $R^2$  para los modelos de las variables dependientes de las MPFA

Variable	Intercepto	T	t	P	T t	T P	t P	T <sup>2</sup>	t <sup>2</sup>	P <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
$X_w$	3,892	-0,567583	0,350325	0,577457							92,3
aw	0,273333	0,0227426	0,00559315	0,0324476							91,1
$\rho_b$	0,5176	0,0287117	0,00105178	0,00799632							76,3
$\rho_c$	0,598667	0,0185355	0,005	0,00883883							67,4
AR	7,79733	-0,345493	0,899626	-0,962745							85,8
S	82,4333	0,109232	0,665256	-2,08142							77,9
Hu	8,09407	-0,742462	-0,537401	-0,650538	1,48946	-0,9471	-2,8824	-1,66463	0,30537	-0,3896	81,9
Hy	13,3634	0,124621	0,478361	-0,0706976	1,09097	1,25382	-0,8302	0,171116	-0,2797	-0,3192	68,9
$\sqrt{D}_{[3,2]}$	9,54296	3,06831	0,630547	-0,157632	-2,5808	3,31446	1,06947	-0,75404	-2,7972	-2,6598	90,3
%R FT	1326,79	13,1663	-6,6362	-13,0673	-13,009	-6,6937	28,2788	26,3448	11,5023	11,9048	87,6
% R DPPH	1288,42	43,0345	6,30739	-11,8865	-2,5439	19,5249	-11,038	41,2384	35,1434	22,3434	78,2

% R ABTS	1265,4	24,9962	-13,7497	28,3903	40,6778	14,5572	-23,723	3,54167	4,16917	12,7417	79,7
-------------	--------	---------	----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	------

**Tabla 4-5.** Criterios de optimización y optimización experimental multi-objetivo del proceso de aglomeración de la MPFA

Nombre	Objetivo	Importancia	Valor teórico	Valor Experimental	PEA
Xw (%)	Minimizar	3	4,25	5,50±1,07	29,41
a <sub>w</sub>	Minimizar	3	0,289	0,345±0,035	19,38
ρ <sub>b</sub> (g/mL)	Intervalo	3	0,55	0,43±0,01	21,82
ρ <sub>c</sub> (g/mL)	Intervalo	3	0,631	0,52±0,03	17,59
IC	Minimizar	3	13,33	13,42	0,68
IH	Minimizar	3	1,14	1,20	5,26
AR (°)	Minimizar	3	7,4	5,34±0,51	27,84
S (%)	Maximizar	5	81,126	81,11±1,70	0,02
Hu (min)	Minimizar	5	2,07	3,89±0,33	87,92
Hy (%)	Minimizar	3	12,91	12,36±1.12	4,26
D <sub>[3;2]</sub> (μm)	Ninguno	3	75,27	81,8±5,0	8,68
FT (mg GAE/100g bs)	Maximizar	5	129,44	78,82	39,11
ABTS (mg TEA/100g bs)	Maximizar	5	127,56	148,64	16,52
DPPH (mg TEA/100g bs)	Maximizar	5	132,17	111,50	15,64
PEAM					21,01
R <sup>2</sup> (factor correlación análisis de regresión lineal)					0,92

## 4.6 Morfología de las partículas (SEM).

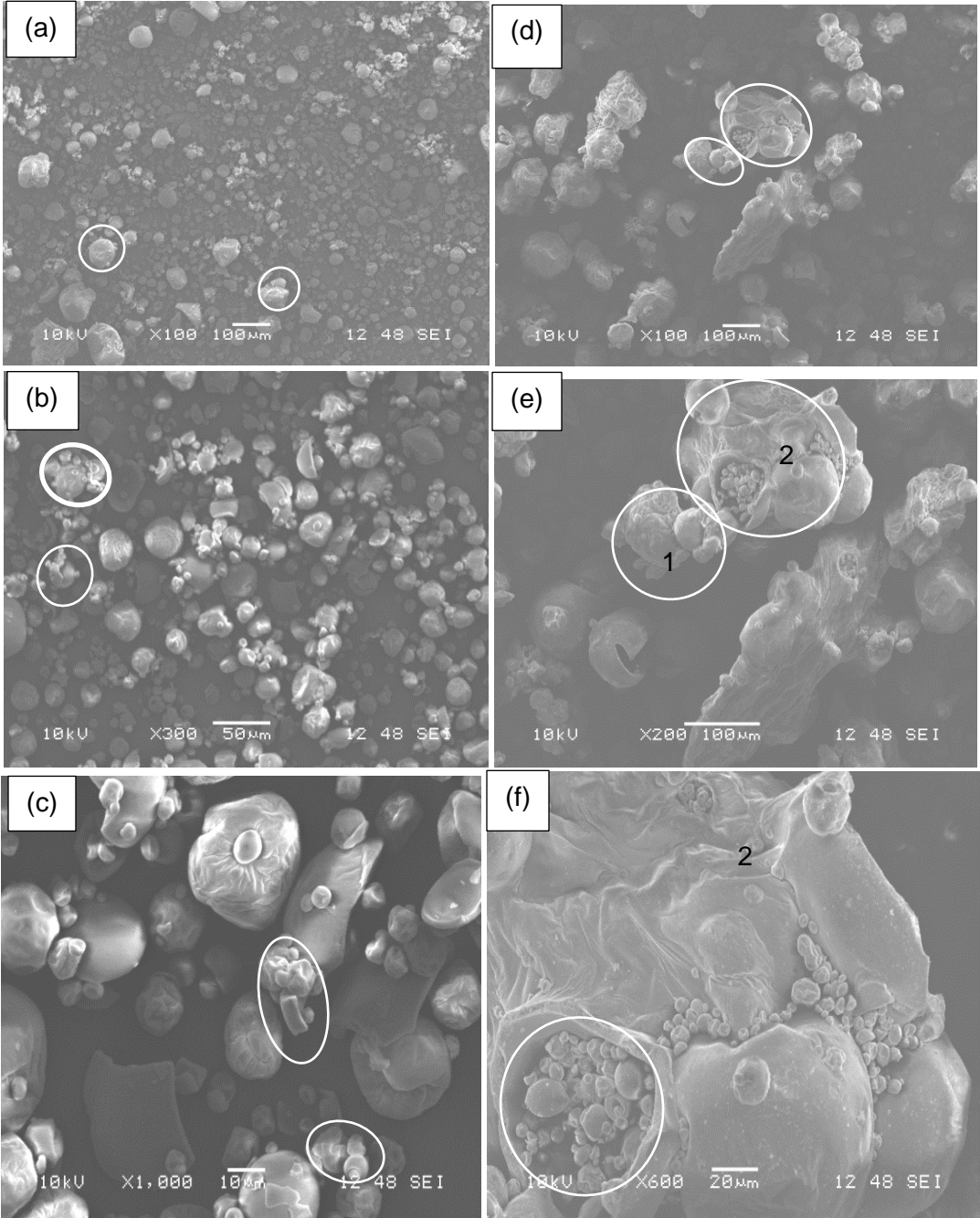
En la figura 4-4 se presentan micrográficas obtenidas por SEM de la materia prima: (a) 100X, (b) 300X y (c) 1000X) y de la MPF aglomerada obtenida a condición óptima de proceso: (d) 100X, (e) 200X y (f) 600X. Se observa (figura 5, a-c) que las partículas de la materia prima se comportan de dos formas: 1) como partículas individuales con una distribución de tamaños relativamente homogéneas con un predominio entre 30 – 40 μm, y 2) como pequeñas agrupaciones con tamaños de partículas aproximadamente entre 25 y 100 μm, lo que permite concluir, que la estructura desde la misma carga en el equipo presenta un nivel bajo de cohesión de las partículas finas como consecuencia de la posible adsorción de agua con el entorno antes de ser procesado, siendo coherente con el D<sub>[3,2]</sub> obtenido en la caracterización de la materia prima (10,0±0,8 μm).

En la figura 4-5 (d-e) se observa que la MPF presenta un incremento del tamaño de las partículas por efecto del proceso de aglomeración, siendo muy superiores a lo observado



en la materia prima. Se considera que las MPF aglomeradas se comportan como conglomerados formados por dos diferentes mecanismos: un primer mecanismo, modelo de bola de nieve (figura 4-5, e1) donde las partículas finas son recubiertas en forma individual por las gotas del agente ligante, formando uniones de partículas de diferentes tamaños durante la formación del conglomerado (Cuq *et al.*, 2013); y un segundo mecanismo, integrando los modelos bola de nieve y layering (figura 4-5, e2 y f1) el cual genera estructuras conglomeradas de mayor tamaño. En este segundo mecanismo, se sugiere la unión escalonada y aleatoria de pre-aglomerados: 1) algunas partículas finas fluidizadas pueden quedar embebidas 100% en gotículas del agente ligante pulverizado, que, al adherirse al conglomerado resultante, y evaporar el agua, forma agrupaciones finas que conservan su individualidad; 2) algunas partículas grandes con agente ligante adherido se pegan y superponen al aglomerado anterior y viceversa. Esta forma integrada se observa con mayor claridad en la figura 4-5 (f2), donde la cavidad formada, a través de una posible ruptura de la estructura por fricción, ilustra la ubicación de las partículas finas que conservan su integridad; mientras que las partículas de mayor tamaño que se adhieren en forma de bola de nieve y se superponen a las partículas finas aglomeradas en la capa inferior.

**Figura 4-5** Micrográficas por SEM de las partículas: materia prima (a) 100X, (b) 300X y (c) 1000X, y MPF aglomerada: (d) 100X, (e) 200X y (f) 600X

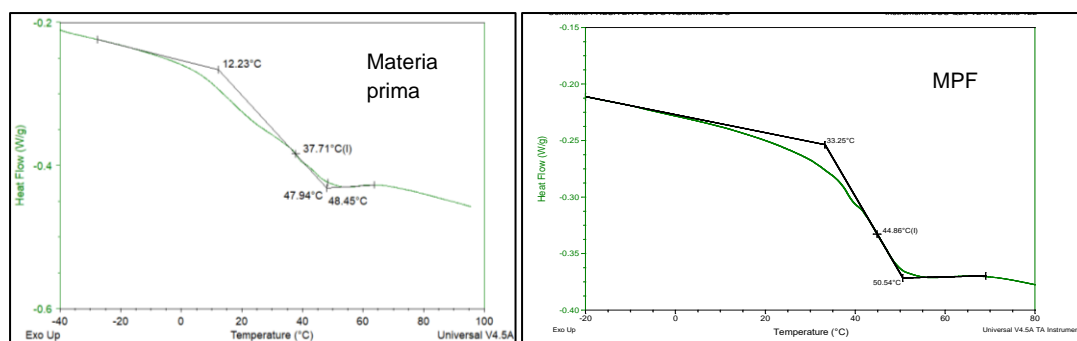


Elaboración propia

## 4.7 Temperatura de transición vítrea.

Los valores de  $T_g$  para la MPFA y la materia prima fueron de 44,9 y 37,7 °C, respectivamente (figura 4-6), los cuales se consideran adecuados para su conservación a una temperatura de almacenamiento ( $T_g = -20^\circ\text{C}$ ) de 24,9 y 17,7 °C, respectivamente. El mayor valor de la  $T_g$  de la MPFA frente a la materia prima ( $\cong 8^\circ\text{C}$ ), se considera un aspecto positivo para una mejor estabilidad de esta frente a cambios en el estado de la materia no termodinámica (riesgo de colapso por transición de estado vítreo a gomoso).

**Figura 4-6** Valores de  $T_g$  de la materia prima y MPFA



Elaboración propia

Esta situación es atribuible principalmente a la presencia del  $\text{SiO}_2$  como agente de fluidización y anticompactante, el cual presenta un valor alto de  $T_g$  ( $1237,8^\circ\text{C}$ ) (Ojovan, 2004). Además, se considera que existe un efecto tipo pantalla del  $\text{SiO}_2$  entre las partículas de la MPFA, reduciendo las fuerzas de van der Waals; y por lo tanto, la cohesividad del material. Por otro lado, se podría estar generando una discontinuidad en la estructura del aglomerado, lo que reduce la plasticidad de las partículas por efecto térmico o por el efecto preferencial de adsorción de humedad como agente anticompactante (Lipasek *et al.*, 2012)

Se resalta que algunas investigaciones en sistemas no alimentarios han reportado un incremento extraordinario de la  $T_g$  ( $50^\circ\text{C}$ ) en películas delgadas de polímeros de poly-4-hydroxiestireno (PHS) y hidroxipoliestireno (PS-OH) injertadas en sustratos de  $\text{SiO}_2$  (Tate *et al.*, 2001).

## 4.8 Conclusiones

La MPFA se presenta como producto seguro contra reacciones de deterioro fisicoquímico y microbiológico, alcanzando valores característicos de  $X_w$  y  $a_w$  de la monocapa de los productos deshidratados. El proceso de aglomeración por lecho fluidizado del polvo de fresa como materia prima, fue efectivo utilizando agua como agente ligante, resultando en un incremento en el tamaño de partícula (mayor porosidad) y en la mejora de las propiedades físicas relacionadas con las características funcionales de instantización (reducción de  $H_u$ ,  $H_y$  y  $AR$ ) y fluidez (reducción del  $IC$  e  $IH$ ). Esta situación permite subsanar estas problemáticas identificadas en la industria alimentaria; sin embargo, si se desea mejorar aún más la instantaneidad de las MPFA, se propone el uso de enzimas pectolíticas en la etapa de preparación de la suspensión de alimentación al SD, lo cual permitiría la hidrólisis de las pectinas y la formación de cadenas más pequeñas, que confieren una reducción en la viscosidad del sistema coloidal.

El proceso de aglomeración permitió el incremento de la capacidad antioxidante y de los FT de la MPFA frente a la materia prima; por lo que, la MPFA encaja en el contexto de los alimentos funcionales, presentándose como un producto con potencial para aplicaciones en el sector culinario y como materia prima en la industria de alimentos. Se sugiere en investigaciones futuras, identificar y cuantificar componentes generados durante el proceso y que confieren actividad antioxidante en el aglomerado.

La optimización del proceso utilizando la metodología de superficie de respuesta y su validación experimental fueron efectivas para la definición de las condiciones operativas del proceso de aglomeración; la mayoría de los modelos matemáticos de las variables dependientes presentaron buenos ajustes de regresión.

## 4.9 Bibliografía

- Andrade, R. D. P., Roberto, L. M., & Pérez, C. E. C. (2011). Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations. *Vitae*, *18*(3), 325–334.
- Andreola, K., Silva, C. A. M., & Taranto, O. P. (2018). Agglomeration process of rice protein concentrate using glucomannan as binder: In-line monitoring of particle size. *Chemical Engineering Research and Design*, *135*, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.05.019>
- Barbosa-Canovas, Gustavo V. Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2014). Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality. In *Igarss 2014*.

<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

- Barbosa-Cánovas, G. V., & Juliano, P. (2005a). Compression and Compaction Characteristics of Selected Food Powders. *Progress in Optics*.  
[https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(05\)49006-3](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(05)49006-3)
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Juliano, P. (2005b). Physical and chemical properties of food powders. In *Food Powders: physical properties, processing, and functionality*.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124155>
- Benelli, L., Cortés-Rojas, D. F., Souza, C. R. F., & Oliveira, W. P. (2015). Fluid bed drying and agglomeration of phytopharmaceutical compositions. *Powder Technology*, 273, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.022>
- Benković, M., & Bauman, I. (2011). Agglomeration Of Cocoa Powder Mixtures – Influence Of Process Conditions On Physical Properties Of The Agglomerates Aglomeracija Kakao Mješavina – Utjecaj Uvjeta Procesna Na Fizikalna Svojstva Aglomerata. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. In *LWT - Food Science and Technology*.  
[https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Chauhan, A. K., & Patil, V. (2013). Effect of packaging material on storage ability of mango milk powder and the quality of reconstituted mango milk drink. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.055>
- Cuq, B., Mandato, S., Jeantet, R., Saleh, K., & Ruiz, T. (2013). Agglomeration/granulation in food powder production. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties* (pp. 150–177). <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.150>
- Custodio, G. R., de Souza, L. F. G., Nitz, M., & Andreola, K. (2020). A protein powder agglomeration process using açai pulp as the binder: An analysis of the process parameters. *Advanced Powder Technology*, 31(8), 3551–3561.  
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.07.001>
- Dacanal, G. C., & Menegalli, F. C. (2008). Experimental study of fluidized bed agglomeration of acerola powder. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*.  
<https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000100007>
- Dewanto, V., Xianzhong, W., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010–3014.  
<https://doi.org/10.1021/jf0115589>
- Dhanalakshmi, K., Ghosal, S., & Bhattacharya, S. (2011). Agglomeration of food powder and applications. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.  
<https://doi.org/10.1080/10408391003646270>
- Díaz, F. O., Ormaza, A. M., & Rojano, B. A. (2018). Efecto de la Tostión del Café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) sobre el Perfil de Taza, Contenido de Compuestos Antioxidantes y la Actividad Antioxidante. In *Información tecnológica* (Vol. 29, Issue

- 4, pp. 31–42). <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000400031>
- Drobek, M., Fr, M., & Zdunek, A. (2020). The effect of cultivation method of strawberry cold storage. *Molecules*, *25*, 4325, 1–20.
- Foster, K. D., Bronlund, J. E., & Paterson, A. H. J. (Tony). (2006). Glass transition related cohesion of amorphous sugar powders. *Journal of Food Engineering*, *77*(4), 997–1006. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.028>
- Geldart, D. (1973). Types of gas fluidization. *Powder Technology*. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3)
- Gong, Z., Zhang, M., Mujumdar, A., & Sun, J. (2008). Spray drying and agglomeration of instant bayberry powder. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373930701781751>
- Haas, K., Dohnal, T., Andreu, P., Zehetner, E., Kiesslich, A., Volkert, M., Fryer, P., & Jaeger, H. (2020). Particle engineering for improved stability and handling properties of carrot concentrate powders using fluidized bed granulation and agglomeration. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.065>
- Hirata, T. A. M., Dacanal, G. C., & Menegalli, F. C. (2013). Effect of operational conditions on the properties of pectin powder agglomerated in pulsed fluid bed. *Powder Technology*, *245*, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.04.047>
- Iijima, M., Nakamura, K., Hatakeyama, T., & Hatakeyama, H. (2000). Phase transition of pectin with sorbed water. *Carbohydrate Polymers*, *41*(1), 101–106. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(99\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(99)00116-2)
- Iveson, S. M., Litster, J. D., Hapgood, K., & Ennis, B. J. (2001). Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review. In *Powder Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00313-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00313-8)
- Jinapong, N., Suphantharika, M., & Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, *84*(2), 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032>
- Larrauri, J. A., Rupérez, P., Borroto, B., & Saura-Calixto, F. (1996). Mango peels as a new tropical fibre: Preparation and characterization. *LWT - Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0113>
- Lee, H., & Yoo, B. (2021). Agglomeration of galactomannan gum powders: Physical, rheological, and structural characterizations. *Carbohydrate Polymers*, *256*(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117599>
- Legentil, A., Guichard, I., Piffaut, B., & Haluk, J. P. (1995). Characterization of strawberry pectin extracted by chemical means. *LWT - Food Science and Technology*, *28*(6), 569–576. [https://doi.org/10.1016/0023-6438\(95\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0023-6438(95)90003-9)
- Lipasek, R. A., Ortiz, J. C., Taylor, L. S., & Mauer, L. J. (2012). Effects of anticaking agents and storage conditions on the moisture sorption, caking, and flowability of deliquescent ingredients. *Food Research International*, *45*(1), 369–380.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.10.037>

- MartínezNavarrete, N. (1999). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno* (N. Martínez Navarrete (ed.)) [Book]. Instituto Politécnico Nacional.
- Marulanda, A., Ruiz-Ruiz, M., & Cortes-Rodríguez, M. (2018). Influence of spray drying process on the quality of avocado powder: A functional food with great industrial potential. *Vitae*. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v25n1a05>
- Mehr, H. M., Elahi, M., & Razavi, S. M. A. (2012). Experimental Study on Optimization of the Agglomeration Process for Producing Instant Sugar by Conical Fluidized Bed Agglomerator. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.647995>
- Moreira, A. S. P., Nunes, F. M., Simões, C., Maciel, E., Domingues, P., Domingues, M. R. M., & Coimbra, M. A. (2017). Transglycosylation reactions, a main mechanism of phenolics incorporation in coffee melanoidins: Inhibition by Maillard reaction. *Food Chemistry*, 227, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.107>
- Nascimento, R. F., Rosa, J. G., Andreola, K., & Taranto, O. P. (2020). Wettability improvement of pea protein isolate agglomerated in pulsed fluid bed. *Particulate Science and Technology*, 38(4), 511–521. <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1574940>
- Ojovan, M. I. (2004). Glass formation in amorphous SiO<sub>2</sub> as a percolation phase transition in a system of network defects. *JETP Letters*, 79(12), 632–634. <https://doi.org/10.1134/1.1790021>
- Ornelas-Paz, J. D. J., Yahia, E. M., Ramírez-Bustamante, N., Pérez-Martínez, J. D., Escalante-Minakata, M. D. P., Ibarra-Junquera, V., Acosta-Muñiz, C., Guerrero-Prieto, V., & Ochoa-Reyes, E. (2013). Physical attributes and chemical composition of organic strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch, Cv. Albion) at six stages of ripening. *Food Chemistry*, 138(1), 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.006>
- Park, J., & Yoo, B. (2020). Particle agglomeration of gum mixture thickeners used for dysphagia diets. *Journal of Food Engineering*, 279(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109958>
- Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C., & Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science and Technology*, 21(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
- Pereira, D. C. d. S., Beres, C., Gomes, F. dos S., Tonon, R. V., & Cabral, L. M. C. (2020). Spray drying of juçara pulp aiming to obtain a “pure” powdered pulp without using carrier agents. *Drying Technology*, 38(9), 1175–1185. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1625363>
- Quek, S. Y., Chok, N. K., & Swedlund, P. (2007). The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.06.020>

- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Trolox ASSAY. *Free Radical Biology and Medicine*. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rosa, J. G., Nascimento, R. F., Andreola, K., & Taranto, O. P. (2020). Acacia gum fluidized bed agglomeration: Use of inulin as a binder and process parameters analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13409>
- Singleton, V. L., & Jr., R. J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*. <https://doi.org/10.12691/ijebb-2-1-5>
- Szulc, K., & Lenart, A. (2016). Effect of composition on physical properties of food powders\*\*. *Int. Agrophys.* <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0084>
- Tate, R. S., Fryer, D. S., Paqualini, S., Montague, M. F., De Pablo, J. J., & Nealey, P. F. (2001). Extraordinary elevation of the glass transition temperature of thin polymer films grafted to silicon oxide substrates. *Journal of Chemical Physics*, 115(21), 9982–9990. <https://doi.org/10.1063/1.1415497>
- Teunou, E., Fitzpatrick, J. J., & Synnott, E. C. (1999). Characterization of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00140-X)
- Tomas, J., & Kleinschmidt, S. (2009). Improvement of flowability of fine cohesive powders by flow additives. *Chemical Engineering and Technology*, 32(10), 1470–1483. <https://doi.org/10.1002/ceat.200900173>
- Valadez-Carmona, L., Plazola-Jacinto, C. P., Hernández-Ortega, M., Hernández-Navarro, M. D., Villarreal, F., Necochea-Mondragón, H., Ortiz-Moreno, A., & Ceballos-Reyes, G. (2017). Effects of microwaves, hot air and freeze-drying on the phenolic compounds, antioxidant capacity, enzyme activity and microstructure of cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41(February), 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.012>
- Yuksel, H., & Dirim, S. N. (2020). Application of the agglomeration process on spinach juice powders obtained using spray drying method. *Drying Technology*, 39(1), 19–34. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1832515>



## Capítulo 5. Estabilidad durante el almacenamiento de una mezcla de polvo de fresa obtenida por secado por atomización y aglomerada en lecho fluidizado

### 5.1 Resumen

La fresa es una fruta con una alta capacidad antioxidantes debido a su riqueza en compuestos fenólicos que sufre un rápido deterioro en su postcosecha. El secado por atomización es una alternativa para reducir las pérdidas; sin embargo, estos polvos presentan problemas de instantanización, por lo que se hace necesario la implementación de procesos de aglomeración. Durante el almacenamiento los productos alimenticios en polvo pueden experimentar una serie de cambios en su estado amorfo, pasando de un producto inicialmente en estado vítreo a un estado gomoso; donde todas las propiedades son sustancialmente modificadas debido a la mayor movilidad del agua en la matriz. El objetivo de la investigación fue evaluar la estabilidad durante el almacenamiento (6 meses) de una mezcla en polvo de fresa aglomerada por lecho fluidizado a tres temperaturas (15 °C, 25 °C y 25 °C), ambiente controlado a humedad relativa del 65 % y utilizando como empaque bolsas de película laminada de PET con *foil* de aluminio. Se realizó seguimiento a la humedad, actividad acuosa, densidad *bulk* y compactada, índices de Carr y Hausner, solubilidad, higroscopicidad, humectabilidad, ángulo de reposo, capacidades antioxidantes, fenoles totales, antocianinas, vitamina C, color (CIELab) y tamaño de partícula. El ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) de todas las variables dependientes respecto al tiempo de almacenamiento; la temperatura de almacenamiento no presentó efecto significativo sobre la S, ABTS, DPPH y Hu. La interacción tiempo-temperatura durante el almacenamiento no presentó efecto significativo ( $p > 0,05$ ) sobre la S, ABTS, DPPH, Hu y L. El aglomerado presentó valores de humedad y  $a_w$  que les confieren muy buena estabilidad frente a reacciones de deterioro; conservó una fluidez buena, una cohesividad baja y retenciones superiores al 50 % para capacidad antioxidante, al 76 % para fenoles totales, al 39 % para antocianinas y del 40 % para

vitamina C; se conservó el tamaño de partícula durante la evaluación. El color sólo se vio afectado en el tratamiento a 35 °C a partir del quinto mes.

**Palabras clave:** *Fragaria ananassa* Dutch, estabilidad en el almacenamiento, aglomerado

## 5.2 Introducción

La fresa (*Fragaria ananassa* Dutch.) es una planta perteneciente a la familia Rosaceae, considerada fruta de placer por excelencia. El fruto se destaca por su contenido de vitamina C, taninos, flavonoides, antocianinas, catequina, quercetina y kaempferol, ácidos orgánicos (cítrico, málico, oxálico, salicílico y elágico) y minerales (K, P, Ca, Na y Fe, entre otros). Estos compuestos presentes en la fresa tienen un potente poder antioxidante, contribuyendo a disminuir el riesgo de eventos cardiovasculares, mejoran la función endotelial vascular y disminuyen la trombosis (Forbes-Hernandez et al., 2016). La fresa no obstante ser no climatérica es altamente perecedera, alcanzado altas pérdidas en la producción agrícola y su comercialización.

El secado por atomización (SA) es una de las tecnologías más utilizadas en la producción de alimentos en polvo, permitiendo incrementar su vida útil; sin embargo, la mayoría de estos productos presentan deficiencias de fluidez e instantanización. Estos polvos se caracterizan principalmente por ser muy finos y con tamaños de partícula inferiores a 100 µm, donde se presentan altas fuerzas de cohesión interparticular, especialmente debido a las fuerzas de Van der Waals, las cuales predominan sobre las fuerzas gravitacionales en varios ordenes de magnitud (Rosa et al., 2020). El proceso de aglomeración permite la unión de partículas sólidas, contribuyendo a subsanar estas dificultades (inconsistencias de calidad) mejorando propiedades relacionadas, tales como humectabilidad (Hu), dispersabilidad y solubilidad (S); además, produce mejores propiedades de flujo, disminuyendo la compactación, cohesividad y adhesividad de polvos de frutas (Benković & Bauman, 2011, Dhanalakshmi et al., 2011). La aglomeración por lecho fluidizado tiene el potencial de alcanzar una calidad superior en el producto en términos de estabilidad a la oxidación como resultados de la encapsulación de los compuestos sensibles al deterioro (Barkouti et al., 2013; Haas et al., 2020). La retención de los componentes bioactivos durante el almacenamiento es de suma importancia para la vida útil y la calidad final de estos productos (Haas et al., 2020).

Estudios sobre cambios de la calidad de un producto como función del tiempo son importantes para asegurar el cumplimiento de estándares alimenticios. Existen varios factores que afectan la vida útil de los alimentos, tales como las condiciones ambientales a las que el alimento es expuesto (temperatura, humedad relativa (HR) y presencia de luz); además de, las propiedades de los empaques utilizados (permeabilidad al oxígeno, vapor de agua y luz) (Wong & Lim, 2016). Otro resultado importante lo representa el modelamiento cinético del cambio en la calidad del alimento durante en almacenamiento, lo cual describe la velocidad de reacción como una función del tiempo; y por lo tanto, permite predecir los cambios después que el producto inicia su proceso logístico de distribución (Chang et al., 2018; Wong & Lim, 2016).

Durante el almacenamiento, los productos en polvo pueden experimentar cambios en la naturaleza del estado de la materia amorfa, pasando desde un estado vítreo a un estado gomoso; donde las propiedades físicas, químicas, sensoriales, microbiológicas y nutricionales son sustancialmente modificadas debido a la mayor movilidad molecular del agua en la matriz (Dolinsky et al., 2000). Estos cambios de la naturaleza del material son causados por la adsorción de humedad del medio y por temperaturas de almacenamiento superiores a la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) (Rahman, 2017; Le Meste et al., 2002), lo que produce una progresiva compactación y un estado irreversible de apelmazamiento (Chang et al., 2018). Según Aguilera et al., (1995), las partículas de polvo pueden atravesar cuatro etapas de deterioro durante el almacenamiento debido a la interacción con el agua, a saber, formación de puentes, aglomeración, compactación y licuefacción, que eventualmente conducen al apelmazamiento.

Aunque la integración de los procesos de SA y aglomeración permiten una alta conservación de las propiedades funcionales de la fresa y mejora de las propiedades de fluidez e instantaneidad de la mezcla de polvo de fresa, las propiedades fisicoquímicas de los polvos de frutas durante su almacenamiento cambian debido a las características de higroscopicidad (H) y pegajosidad de las partículas, como respuesta a la interacción alimento-entorno. Hay evidencia de muchos estudios de evaluación de la estabilidad durante el almacenamiento de mezclas de polvos de frutas: bael (*Aegle marmelos*) (Sornsomboonsuk et al., 2019), papaya (Gomes et al., 2018), coco (Carlos et al., 2018), guanábana (Chang et al., 2018) y mora (Ferrari et al., 2013) sin embargo, no se reportan

estudios de evaluación de la estabilidad de mezclas en polvo de frutas y en especial de fresa. Bajo este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar la estabilidad durante el almacenamiento de una mezcla en polvo de fresa aglomerada por lecho fluidizado.

## **5.2 Materiales y métodos**

### **5.2.1 Materias primas.**

Se utilizaron fresas frescas (*Fragaria ananassa* Duch, var. Monterrey) adquiridas en el mercado mayorista de la ciudad de Medellín y refrigeradas a 4 °C hasta su uso. El grado de madurez de las fresas correspondió a la escala 5 - 6 según la Norma Técnica Colombiana NTC 4103. Adicionalmente, se utilizaron goma arábica (GA) (Tic Pretested gum arabic FT Powder, Tic Gums, USA) y maltodextrina (MD) con dextrosa equivalente 19-20 (Ingredion) como aditivos de secado.

### **5.2.2 Preparación de la suspensión de alimentación al secador por atomización.**

Las fresas sin pedúnculos y sépalos fueron lavadas y desinfectadas con Citrosan® (0,25 % v/v). Posteriormente fueron procesadas en un molino coloidal IKA, modelo MK 2000/5, acoplado a un sistema de refrigeración con agua ambiente ( $\cong$  5°C) (3660 rpm, holgura en mínimo, flujo: 240 mL/minuto), hasta obtener una pulpa de fresa homogenizada (PFH) con un contenido de sólidos totales (ST) de 8,9 %; esta pulpa fue almacenada en congelación (-18°C) hasta su uso. Se preparó un lote industrial de 100 kg de suspensión de alimentación al SA ( $S_{SA}$ ) con un contenido total de ST equivalente a 19,6 %, y bajo el siguiente procedimiento: 1) descongelación de PFH, 2) pesaje de ingredientes: PFH con un aporte del 8,9 % de los ST de la  $S_{SA}$ , GA (0,22% p/p) y MD (11,5 % p/p), y 3) adición en forma lenta de la GA y MD bajo homogenización en un Ultra Turrax, IKA - UTL 50 (10000 rpm y tiempo = 5 minutos).

### **5.2.3 Proceso de secado por aspersión.**

El proceso de SA se realizó en una torre industrial (Lemar, china con capacidad de evaporación de agua de 200 Kg/h), modelo LPG320, flujo en co-corriente y operando en condiciones subatmosféricas. Las condiciones de proceso fueron: temperatura de entrada

del aire (154 °C), temperatura de salida del aire (89 °C) y la velocidad del disco atomizador (15000 rpm).

#### **5.2.4 Proceso de aglomeración.**

Se utilizó un aglomerador por lecho fluidizado Lemar (China), modelo FL5, con una carga de 3000 g y operando a una temperatura de aire de fluidización de 70 °C, presión de atomización de solución ligante de 1 bar, flujo de solución ligante de 10-15 mL/min a 25 °C y con una concentración de vitamina C (Vit.C) de 3,33 g/L y con una frecuencia en el soplador de 30-34 Hz. Se utilizó SiO<sub>2</sub> (Pirosil®) al 0,5 p/p para mejorar la fluidización de la carga en el proceso de aglomeración.

#### **5.2.5 Almacenamiento.**

El estudio de almacenamiento de la mezcla en polvo aglomerada de fresa (MPAF) se realizó a partir de un diseño factorial completamente aleatorizado, considerando dos variables independientes: temperaturas (T) (15, 25 y 35 °C) y tiempo (t): 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 días, y las variables dependientes: humedad (X<sub>w</sub>), actividad acuosa (a<sub>w</sub>), solubilidad (S), humectabilidad (Hu), higroscopicidad (Hy), densidad bulk (ρ<sub>b</sub>), densidad compactada (ρ<sub>c</sub>), índice de Carr (IC), índice de Hausner (IH), ángulo de reposo (AR), tamaño de partícula en término del diámetro superficial equivalente (D<sub>[3;2]</sub>), actividad antioxidante (métodos ABTS y DPPH), fenoles totales (FT), Vit.C, antocianinas totales (AT) y color en el espacio CIE-L\*a\*b\*. Las muestras se empacaron en bolsas de película laminada de PET, *foil* de aluminio con permeabilidad O<sub>2</sub> <1 mL/ (m<sup>2</sup>\*24h\*atm), permeabilidad al vapor de agua < 1 g/(m<sup>2</sup>\*24h\*atm), marca ALICO®, y se almacenaron en cámaras climáticas acondicionadas con una humedad relativa (HR) controlada del 65 %. Las variables dependientes fueron evaluadas a partir de 3 tres repeticiones por condición de almacenamiento.

#### **5.2.6 Caracterización de propiedades de la MPAF.**

La X<sub>w</sub> se determinó según el método oficial AOAC (2003). La a<sub>w</sub> se determinó utilizando higrómetro de punto de rocío a 25 °C (Aqualab serie 3TE, Decagon). La ρ<sub>b</sub> se determinó según la metodología descrita por Pereira et al., (2020) modificado, pesando 5 g de muestra y registrando el volumen ocupado en probeta. La ρ<sub>c</sub> se determinó según la

metodología descrita por Haas et al., (2020) modificado, pesando 5 g de polvo en un tubo falcón, luego centrifugando por 5 min a 8000 rpm y finalmente se registró el volumen compactado. Los parámetros IC e IH se determinaron según las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, cuya clasificación de fluidez y cohesividad ha sido descrito por (Jinapong et al., 2008).

$$IC = 100 (\rho_c - \rho_b) / \rho_c \text{ (Ecuación 1)} \quad IH = \rho_c / \rho_b \text{ (Ecuación 2)}$$

El AR se determinó según la metodología descrita por (Barbosa-Cánovas & Juliano, 2005; Larrauri et al., 1996; Teunou et al., 1999). La S se determinó de acuerdo al método descrito por Chauhan & Patil, (2013) y modificado por Marulanda et al., (2018). La Hu se determinó como el tiempo requerido para que 1 g de polvo desaparezca de la superficie de un volumen de 100 mL de agua a 20 °C (Marulanda et al, 2018). La Hy se determinó según el método gravimétrico para isoterma de sorción controlando la HR del ambiente al interior de un frasco hermético a 68 % (solución sobresaturada de KI) (Martínez-Navarrete, 1999). El tamaño de partícula se determinó en el analizador de partículas Mastersizer 3000 (Malver Instrument), módulo Aero S y se reportó como diámetro de superficie equivalente ( $D_{[3,2]}$ ). El contenido de FT se determinó según el método descrito por Singleton & Jr., (1965). La capacidad antioxidante se determinó por el método DPPH, descrito por Brand-Williams et al., (1995); mientras que, el método ABTS por el método descrito por Re et al., (1999).

La Vit.C se determinó por HPLC (Shimatzu Prominence 20A), columna: Luna® 5  $\mu$ m C18(2) 100A – 250\*4.6 mm, fase móvil:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.02M – pH: 3,06, flujo: 1 mL/min, presión: 1172 psi, tiempos de retención: 4.317 - 4.456 min, volumen de inyección: 5  $\mu$ L y longitud de onda: 244 nm. Se utilizó un estándar analítico L-Ascorbic acid (Sigma Aldrich 47863, Lot LRAC1812). El proceso de extracción se realizó pesando 0,25 g de MPAF en un tubo de ensayo graduado y se adicionó una solución buffer de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.02M ajustada a pH 3.0 con ácido ortofosfórico al 85 %, hasta completar 20 mL. La mezcla se agitó 2 min en vortex, se centrifugó a 5000 rpm, 4 °C y 15 min, y el sobrenadante se pasó por filtro membrana de acetato-celulosa de 0.45  $\mu$ m, se aforo en balón de 25 mL. Los resultados se expresaron en mg /100g bs.

El extracto para la cuantificación de las AT se obtuvo pesando 0.25 g de muestra en tubos falcón de 50 mL, se adicionó 25 mL del disolvente (1 % HCl en metanol), se llevó a baño ultrasonido durante 15 min, se centrifugó a 8000 rpm (Universal 320) por 15 min a 25 °C, se filtró en membranas de 0.45 mm en balón volumétrico de 50 mL, se lavó tres veces con 10 mL del disolvente, repitiendo las operaciones del baño ultrasonido, la centrifugación, la filtración, y finalizando con el aforo con la mezcla HCl/metanol. La muestra fue filtrada mediante jeringa y filtro de 0,25 uL en vial ámbar y la cuantificación de los AT en forma de Cyanidin-3-glucoside (C<sub>3</sub>G) se realizó por HPLC (Shimadzu), detector DAD–Uv-vis (200-700 nm), columna C18 y fase móvil acetonitrilo/agua/ácido fórmico (80:18:2), en un modo gradiente a un flujo constante (0.5 mL/min). Los resultados fueron procesados con el software Chromeleon 7.2. (Dionex, Thermo Scientific, United States), mediante los cromatogramas a 517 nm, siendo expresados como mg C<sub>3</sub>G/100g bs.

### **5.2.7 Análisis de datos.**

Los datos fueron analizados a partir a partir de ANOVAS, utilizando el método LSD (mínimas diferencias significativas) como método de comparaciones múltiples, con un nivel de confianza del 95 % y empleando el Software STATGRAPHICS XVI (Statpoint Inc, USA).

## **5.3 Resultados y discusión**

La figura 5-1 y la tabla 5-1 presentan los comportamientos durante el almacenamiento de los atributos de calidad de la MPAF y los valores del estadístico valor-p derivado del ANOVA, respectivamente. El ANOVA mostró diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) de las variables  $X_w$ ,  $a_w$ , Hy,  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , IC, IH, AR,  $D_{[3;2]}$ , FT, DPPH, Vit.C, AT, L\*, a\* y b\* con respecto a la T; mientras que, todas las variables dependientes presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto al t. Por otro lado, las variables  $X_w$ ,  $a_w$ , Hy, S, Hu.  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , IC, IH, AR,  $D_{[3;2]}$ , Vit.C, L\*, a\*, b\* presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto a la interacción T-t.

### **5.3.1 Humedad y actividad acuosa.**

Los valores medios de  $X_w$  y  $a_w$  durante el almacenamiento a 180 días alcanzaron valores máximos de  $4,79 \pm 0,06$ ,  $4,48 \pm 0,20$ ,  $6,23 \pm 0,11$  % y  $0,350 \pm 0,009$ ,  $0,287 \pm 0,018$ ,  $0,361 \pm 0,006$  a las temperaturas de 15 °C, 25 °C y 35 °C, respectivamente (figura 5-1 a y b);

valores que le confieren muy buena estabilidad frente a reacciones de deterioro fisicoquímico y microbiológico (Varastegani et al., 2019). La  $X_w$  presentó un comportamiento creciente en el tiempo, siendo en general mayor con el incremento de la  $T$ . El comportamiento de la  $a_w$  fue correspondiente al de la  $X_w$ ; sin embargo, estos comportamientos no fueron coherentes con respecto a la  $T$ , lo cual podría atribuirse a la heterogeneidad microestructural de los aglomerados, donde los puntos activos de las superficies de las MPAF no llegan a ser impregnados por la solución ligante de forma homogénea, unos aglomerados con respecto a otros, lo cual afecta los niveles de adsorción de agua durante el almacenamiento. En general, la  $X_w$  y  $a_w$  son variables críticas, afectadas por  $T$ ,  $t$  y  $T-t$ , cuyo comportamiento se considera como la resultante de dos fenómenos principalmente: 1) La interacción ambiente-empaque-MPAF a las condiciones del estudio, generó una fuerza motriz a favor de la adsorción de  $X_w$  en la MPAF, debido a la diferencia de potencial químico entre el interior de la cámara ( $a_w$ : 0,650) y la superficie de la MPAF ( $a_w < 0,361$ ) (Lucas et al., 2018; Marulanda et al., 2018; Chang et al., 2018), y 2) Una mayor temperatura de almacenamiento genera una mayor presión parcial del agua en la superficie de la MPAF, lo cual contribuye a disminuir el contenido de  $X_w$  (Badui, 2006; Troller, 2012).

El almacenamiento de las MPAF a 25 °C resultó la temperatura más favorable para el sexto mes de control ( $X_w$  y  $a_w$ ), con valores de 4,45 % y 0,297, respectivamente. Este valor de  $X_w$  es similar a la humedad de la monocapa en productos secos (Gil et al., 2013), (Isosteric et al., 2011), muy adecuado para la conservación de los alimentos (Varastegani et al., 2019). Se resalta que los resultados en el presente estudio fueron inferiores a los reportados para polvos de guanábana obtenidos por SD (Chang et al., 2018), y similares a los reportados por Varastegani et al., (2019) en polvo de comino negro obtenido por SD, por Ferrari et al., (2013) en polvo de mora obtenido por SD y por Wong & Lim, (2016) en polvo de papaya obtenido por SD.



**Figura 5-1** Evolución en el tiempo (días) de los atributos de calidad de los MPAF durante el almacenamiento (azul-15°C, rojo- 25°C y verde-35° C)

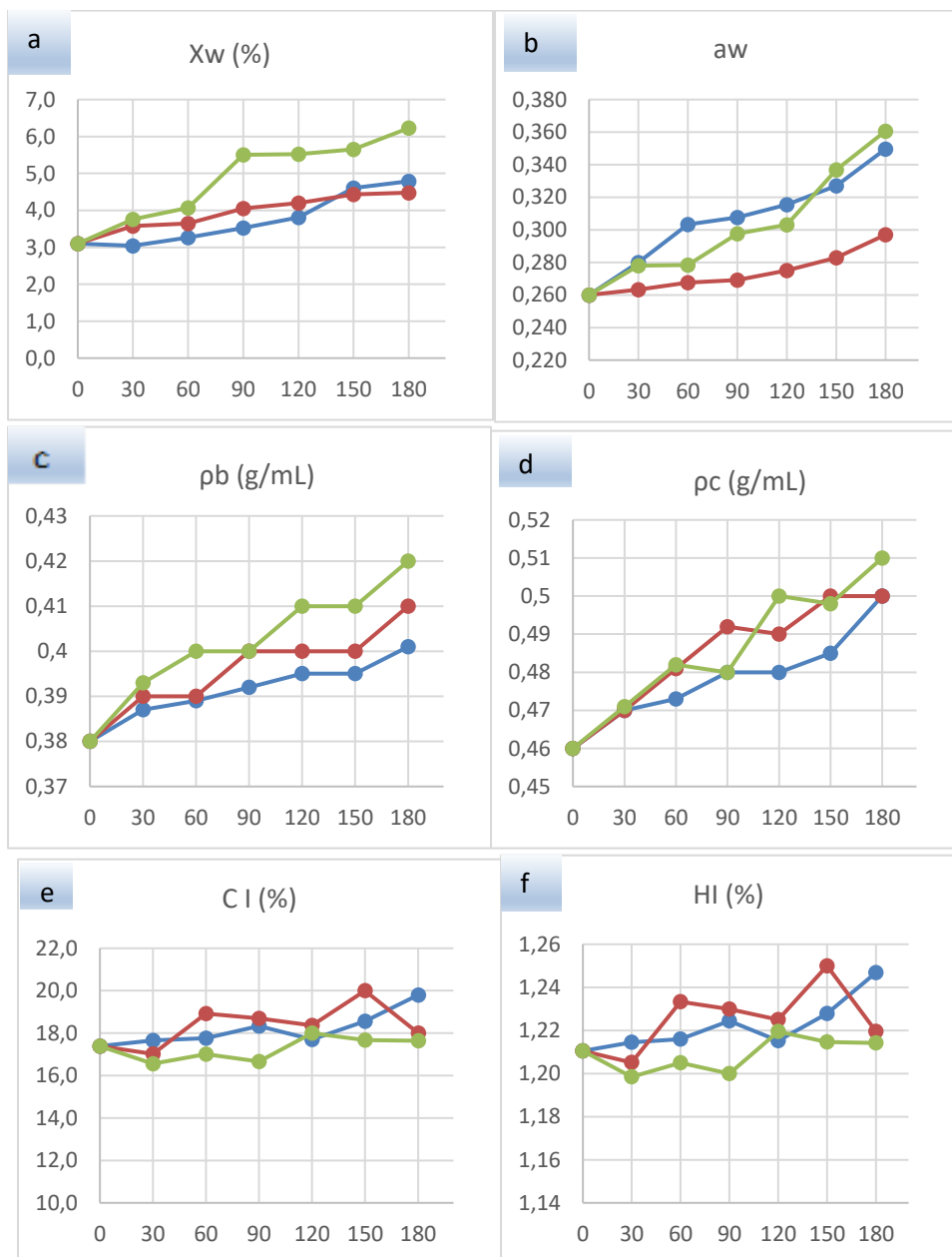


Figura 5-1 (Continuación)

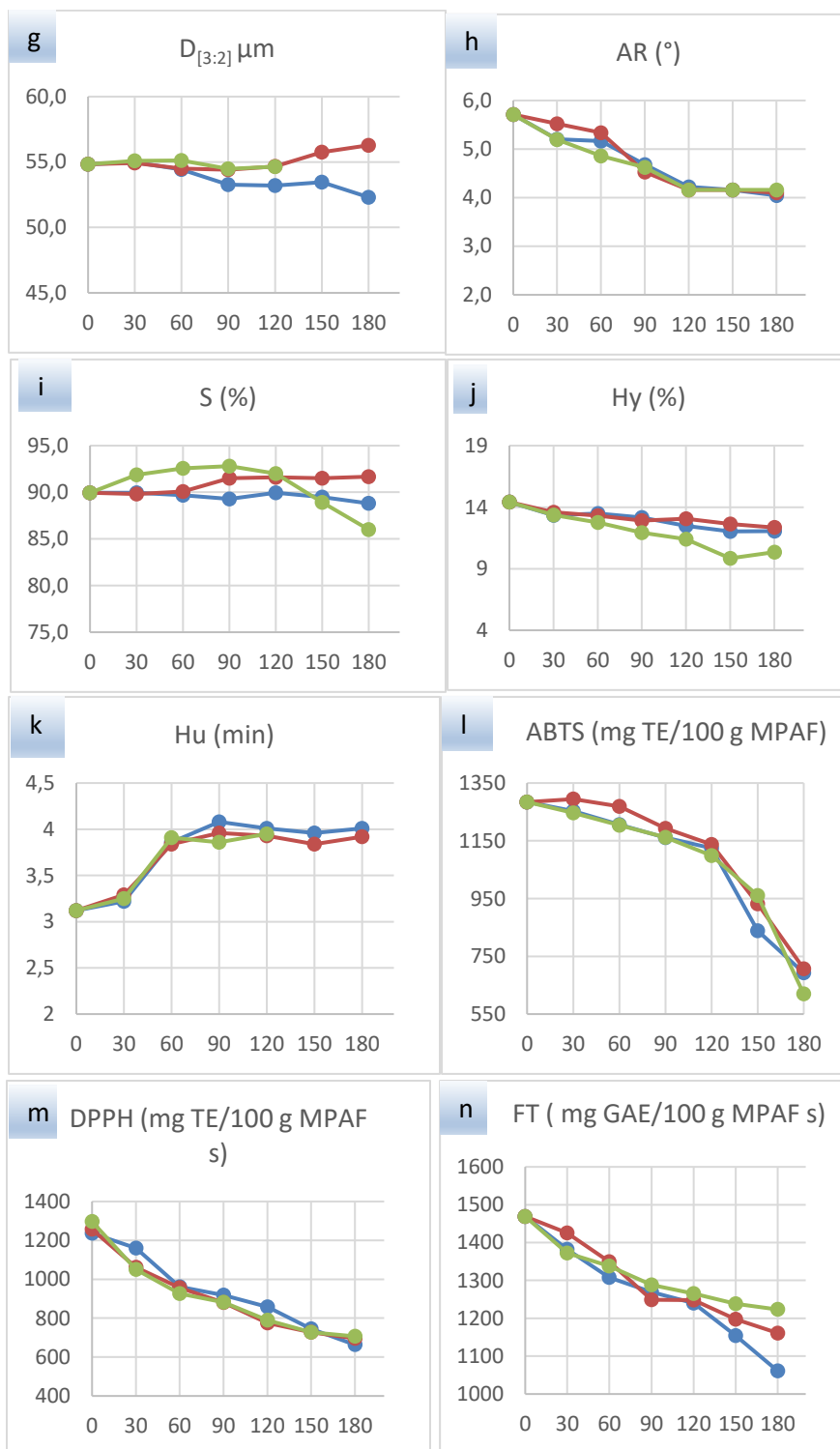
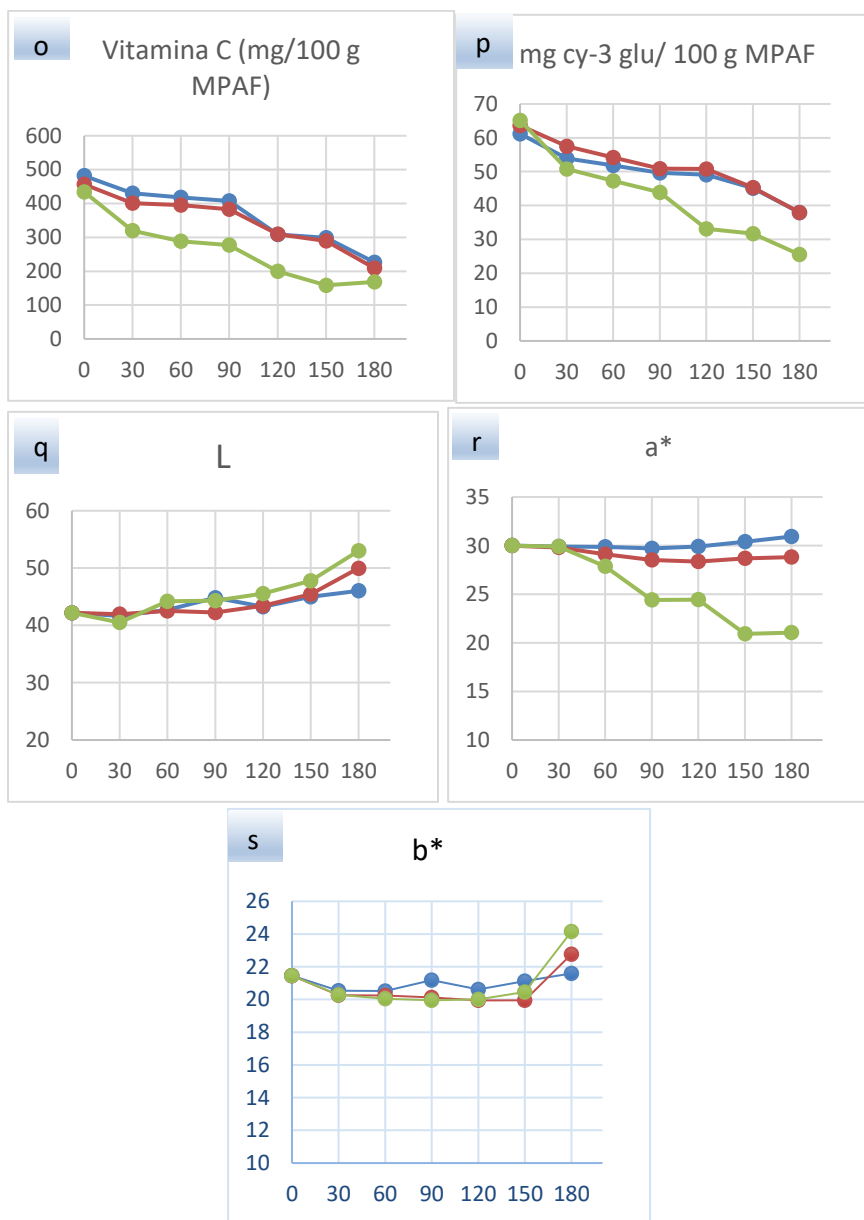


Figura 5-1 (Continuación)



Elaboración propia

Tabla 5-1. Resultados del ANOVA del almacenamiento de la MPFA (valores-p)

Fuente	Xw	aw	pb	Pc	IC	IH	S	Hy	Hu
--------	----	----	----	----	----	----	---	----	----

T	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0713*	0,0000	0,0598*
t	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0048
T-t	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0248	0,0000	0,0051

**Tabla 5-1** (Continuación)

Fuente	ABTS	DPPH	FT	AR	D <sub>[3:2]</sub>	L*	a*	b*	Vit.C	AT
T	0,8485*	0,0214	0,0383	0,0000	0,0781	0,0257	0,0000	0,0132	0,0000	0,0000
t	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,8345*	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
T-t	0,7479*	0,1813*	0,1205*	0,0000	0,7634*	0,0262	0,0000	0,0003	0,0000	0,4990*

\*No significativo

### 5.3.2 Propiedades de Flujo.

Los valores de  $p_b$  y  $p_c$  variaron entre  $0,3753 \pm 0,003$  -  $0,420 \pm 0,000$  y  $0,463 \pm 0,001$  -  $0,509 \pm 0,015$  g/mL, respectivamente. Si bien, estas variables presentaron diferencias significativas con respecto a T, t e interacción T-t, en general sus variaciones fueron pequeñas ( $\cong 5\%$ ) (figura 5-1 c y d), comportamiento que ha sido igualmente reportado durante el almacenamiento para polvos de comino negro obtenidos por SD (Varastegani et al., 2019). Por otro lado, se resalta que los valores del presente estudio fueron similares a los reportados por Oliveira et al., (2013) durante el almacenamiento de polvo de fresa obtenido por SD. Se observaron menores variaciones de las densidades a bajas T (15 °C y 25°C), lo cual se explica debido a los pequeños cambios de  $X_w$  durante el almacenamiento; mientras que, a 35 °C esta variación se hace mayor y coherente con el incremento del contenido de  $X_w$  (mayor movilidad molecular del agua en la estructura del aglomerado) (Chauhan & Patil, 2013), que podría generar cambios del estado no termodinámico (amorfo gomoso) y mayor plasticidad del material (Liu et al., 2017).

De acuerdo con las variaciones de los valores de CI (%) encontrados ( $16,606 \pm 0,005$  –  $20,001 \pm 0,888$ ), la fluidez del material durante el almacenamiento se vio poco afectada, conservando buenas características de fluidez. La cohesividad del aglomerado durante el almacenamiento a través del seguimiento a HI, permitió identificar que el material conserva una cohesividad baja - intermedia ( $1,198 \pm 0,136$  -  $1,250 \pm 0,018$ ), aspecto importante que impacta positivamente la instantaneidad del material. Las variables CI y HI presentaron una tendencia creciente, pero igualmente fluctuante con respecto al t. Al aplicar la prueba

de Fischer, el almacenamiento a 35 °C presentó una mayor significancia con respecto al almacenamiento a 15 y 25°C, presentando a 35°C una mejor fluidez y cohesividad del aglomerado, y al mismo tiempo un incremento en las densidades (Figura 5-1 e y f).

El seguimiento al comportamiento del AR durante el almacenamiento permitió identificar la conservación de la fluidez del aglomerado gracias a su disminución con el incremento del t; sin embargo, esta variación fue baja ( $5,7^\circ \rightarrow 4,1^\circ$ ), lo cual corresponde a una tasa de cambio del 28,1 %. Estos bajos valores de AR se ven favorecidos por la presencia del SiO<sub>2</sub> en el MPAF, el cual tiene propiedades fluidizantes y anticompactante, reduciendo la probabilidad que las partículas se adhieran al reducir las fuerzas de cohesión, y así, contribuye a reducir el posible apelmazamiento (Chang et al., 2018). Adicionalmente, se observó a partir del mes 4 y en todas las T, que los valores de AR tienden a ser asintóticos (Figura 5-1 h); sin embargo, este comportamiento se contrapone con lo reportado por Chauhan & Patil, (2013) en polvo de mango obtenido por SD, y por Wong & Lim, (2016) en polvo papaya obtenido por SD. Una situación similar se observó en el  $D_{[3:2]}$ , cuya variación máxima fue entre 56,3 y 52,3  $\mu\text{m}$ ; sin embargo, esta variable dependiente no mostró una tendencia bien definida con respecto a las variables independientes consideradas (figura 5-1 g).

Se resalta que, a partir del mes 5 la MPAF almacenada a 35 °C presentó un apelmazamiento del material en forma de grumo ( $D_{[3:2]} \gg \gg$ ) o posible inicio de la cristalización de la fructosa y glucosa presentes en la MPAF (Wong & Lim, 2016), con la respectiva pérdida de estructura del aglomerado, lo cual podría favorecer el incremento del tamaño de las partículas debido a: 1) cambió del estado no termodinámico de amorfo vítreo a amorfo gomoso (Saavedra–Leos et al., 2018); aspecto relacionado con los altos contenidos de Xw (> 5.5%) comentados anteriormente a esta T y t, y 2) la interacción Xw-contenido pectico de la matriz alimentaria que favorece las fuerzas Inter partícula (Einhornstoll, 2017), razón por lo cual sólo se graficó hasta el día 120.

### 5.3.3 Propiedades de Instantanización.

La instantaneidad de polvos alimenticios es una propiedad altamente valorada por el consumidor y por la industria, cuando es usada como materia prima en la elaboración de otros productos alimenticios. La instantanización se hace explícita a través de la valoración de las propiedades S, Hy y Hu (Dhanalakshmi et al., 2011). La S de los aglomerados está

directamente relacionada con propiedades que afectan la microestructura del material, donde a mayor grado de conservación del estado vítreo, se presentan unas condiciones adecuadas para su humectación, hundimiento y dispersión; una estructura colapsada en estado gomoso restringe los procesos difusionales del agua en el agregado (Bhandari et al., 2013).

En general, la S de la MPFA presentó una buena capacidad de disolución en agua durante el almacenamiento (86,0 – 92,8 %), siendo muy estable durante los 6 meses a 15 y 25°C (figura 5-1 i)(correlacionado con el comportamiento estable observado en propiedades como  $\rho$ , AR y Hy) (Hogekamp & Schubert, 2003). Valores similares de S han sido reportados por Varastegani et al., (2019) en polvo de comino negro (92,6 y 91,9 %), almacenado a 4 °C durante 12 meses y usando goma arábica y Maltodextrina como agentes de secado.

Por otro lado, la MPAF almacenada a 35 °C después del mes 4 presenta una disminución acelerada, asociada al incremento de Xw y al apelmazamiento mencionado anteriormente. De acuerdo a los resultados encontrados de las densidades a estas T y t, sus valores fueron mayores, siendo un indicador de la compactación experimentada por material, aspecto negativo para una buena interacción de este con el agua en el proceso de solubilización (Chang et al., 2018). Estos autores han identificado reducciones del 35 % de la S en el almacenamiento de polvos de guanábana SD utilizando empaques de película laminada de PET *foil* de aluminio a 35 °C. Por otro lado, en el estudio de estabilidad durante almacenamiento del polvo de papaya obtenido por SD a  $38 \pm 2$  °C y humedad relativa de 90 %, utilizando empaques con película laminada de PET *foil* de aluminio, la S disminuyó en la semana 7 de 97,1 → 85,1% (Wong & Lim, 2016), lo cual representa una mayor reducción respecto a los hallazgos del presente estudio.

El material de empaque juega un papel importante como barrera al vapor de agua, al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, razón por la cual la selección del material es una decisión fundamental para garantizar la estabilidad del producto durante su almacenamiento. En términos generales se observó un descenso en la Hy de la MPFA durante el almacenamiento, describiendo el análisis estadístico dos grupos homogéneos: 1) 15 y 25°C y 2) 35°C, donde la tasa de cambio fue (14,4 → 12,1 %), (14,4 → 12,3 %) y (14,4 → 10,3 %), respectivamente (figura 5-1 j) . La

disminución de la  $H_y$  del MPFA es un aspecto favorable para la estabilidad del material y su vida útil, este fenómeno se puede explicar por la formación de una capa superficial sobre la estructura del aglomerado como respuesta a la interacción del agua adsorbida con la pectina, goma arábiga y maltodextrina de la MPFA, que genera una barrera para la adsorción y posterior difusión del agua al interior de la matriz. El comportamiento de estos resultados fueron contrarios a lo reportado por Wong & Lim (2016) en polvo de papaya obtenido por SD y almacenado durante 7 semanas, 38,2°C y HR 90 %, en empaques de película laminada de PET foil de aluminio (incremento de 8 %) y PET (incremento del 13 %).

La  $H_u$  presentó una tendencia creciente con el  $t$ , independiente de la  $T$ ; sin embargo, a 35 °C a partir de 5 mes no se pudo determinar debido a problemas de apelmazamiento del de la MPFA, comentado anteriormente (figura 5-1 k). El comportamiento de  $H_u$  durante el almacenamiento no fue favorable, debido a su incremento ( $3,12 \pm 0,01 \rightarrow 4,01 \pm 0,05$  min), lo cual contribuye a disminuir la capacidad de reconstitución del material en agua en un 28,5 %. Esta situación, es coherente con los incrementos de  $\rho_b$  y  $\rho_c$  observados, causados por la adsorción de humedad en el empaque, lo que reduce la porosidad del material y afecta su capilaridad e incrementa el tiempo de humectación (Cuq et al., 2013). No se reportan en la bibliografía evaluaciones del estudio de la estabilidad de  $H_u$  de polvos SD o aglomerados durante el almacenamiento que permitan contrastar los hallazgos.

En términos generales, estos valores se podrían considerar favorables cuando al menos se realiza una mínima agitación en el sistema de reconstitución. Por otro lado, estos valores de  $H_u$  del MPFA comparados con los de la mezcla en polvo de fresa secada por SD y utilizada en la carga del aglomerador ( $H_u$ : 11-19 min), muestran una reducción significativa y conservación durante el almacenamiento, lo cual se traduce en una mejora en la instantaneidad del producto.

### **5.3.4 Capacidad antioxidante y fenoles totales.**

En general, el comportamiento de ABTS, DPPH y FT fue decreciente con el  $t$ , siendo esta fue la variable más crítica durante el almacenamiento (figura 5-1 l, m y n); además, el ANOVA mostró que la  $T$  ejerce una mayor afectación principalmente sobre el DPPH y FT.

Para el ABTS, se observa que durante los primeros 4 meses existe una tasa de cambio baja, debido al buen nivel de protección de la MD y la GA sobre estos componentes; posteriormente, se observó una mayor tasa de degradación, principalmente a T de 35°C, lo cual es correspondiente al apelmazamiento comentado anteriormente debido al posible cambio del estado de la materia (vitreo → gomoso), que incrementa la movilidad molecular del agua y los fenómenos de degradación. Oliveira et al., (2013) reportaron la conservación de capacidad antioxidante del polvo de fresa obtenido por SD durante los primeros 90 días de almacenamiento a 25 °C, utilizando bolsas de película laminada de PET, *foil* de aluminio.

Con respecto al DPPH, se observa un comportamiento similar para 15 °C, 25 °C y 35 °C, mostrando una tendencia lineal con pendientes de 3.155, 3.013 y 3.039 (mg TE/día) (tasa de degradación media = 3.069 mg TE/día); sin embargo, se considera que el nivel alcanzado a los 180 días representa un importante aporte nutricional. La bibliografía no reporta valores comparativos en el DPPH para productos aglomerados, se ha reportado la no afectación de la T sobre la estabilidad del DPPH durante el almacenamiento del polvo de Bael obtenido por SD (Sornsomboonsuk et al., 2019).

Los resultados al final del almacenamiento mostraron un nivel de conservación similar para el ABTS y DPPH con respecto a las T de estudio (15, 25 y 35 °C), siendo del orden de (53.9, 55.1 y 48.2%) y (53,6, 55,3 y 54,4%), y con coeficientes de correlación de 0.70, 0.62, y 0.63, respectivamente. Esta conservación se favorece adicionalmente por las condiciones de  $X_w$  y  $a_w$  que alcanzaron los productos, que ralentizan de las reacciones de deterioro (Hedegaard & Skibsted, 2013). Por otro lado, la presencia de  $\text{SiO}_2$  contribuye a incrementar la  $T_g$  de la MPAF (45,0 °C), lo que garantiza una adecuada estabilidad de la matriz, principalmente a 15 y 25°C, donde  $(T_g - T_{\text{almacenamiento}}) \geq 20^\circ\text{C}$  (Tate et al., 2001; Chang et al., 2018; Barbosa-Canovas, Gustavo V. Ortega-Rivas et al., 2014). Los niveles de conservación del ABTS y DPPH en el presente estudio son superiores a los reportados por Varastegani et al., (2019) en polvos de comino negro obtenidos por SD, almacenado 12 meses a 4°C y HR de 40 y 60% (33 y 29 % respectivamente).

La fresa se caracteriza por ser una fuente rica en compuestos fenólicos, específicamente en flavonoides; siendo los más representativos la catequina, la quercetina, las



antocianinas, entre otros, los cuales son responsables de la quelación de metales y de poseer capacidad antioxidante (Aaby et al., 2007). La estabilidad de los FT durante el almacenamiento es un aspecto importante de garantía de la calidad de productos alimenticios, muy apreciado por el consumidor moderno. En términos generales, se presentaron altos porcentajes de retención a 15, 25 y 35°C durante los 180 días de almacenamiento: 76,8, 79,9 y 83,2%, respectivamente. La degradación fue consecuencia del efecto estadístico de la T y t, que favorece los procesos de oxidación (Varastegani et al., 2019); además, la mayor retención de los FT con el incremento de la T podría atribuirse a una posible mayor extracción de estos compuestos o a la hidrólisis de compuestos fenólicos condensados al someter el MPFA a estas condiciones (Tonon et al., 2010).

### 5.3.5 Vitamina C.

Los resultados obtenidos de la vitamina C durante el almacenamiento a 15, 25 y 35°C presentaron un buen ajuste de regresión para una cinética de orden cero ( $R^2$ : 0.941, 0,910 y 0.940 respectivamente), observándose 2 grupos homogéneos, uno con 15 y 25°C, y el otro a 35°C, siendo en todos los tiempos de control los niveles de vitamina C menores a mayor T y t; es decir, con cinéticas de degradación para 15-25°C de 1,28 mg Vit.C/100 g bs x día y para 35°C de 1,44 mg Vit.C/100 g bs x día (figura 5-1 o). Esta situación revalida una mayor sensibilidad a la temperatura y a reacciones de oxidación de la vitamina C a altos t y T, tal como lo ha reportado Lucas-Aguirre et al., (2020).

Los niveles de retención de la vitamina C en la MPFA al t = 0 correspondieron a una media de 110,8 mg Vit.C/25g porción, correspondiente a 123,1 % dosis recomendada según La Organización Mundial de la Salud (OMS); mientras que, en el mes 6 para los grupos homogéneos 15-25°C y 35°C, los niveles alcanzaron 51,9 y 39,6 mg Vit.C/25g porción (58 y 44% de la dosis recomendada), respectivamente. Se resalta que 25 g de MPAF disueltos en agua hasta completar 250 g, corresponde a una bebida con un contenido de sólidos solubles  $\cong 10\%$ .

La degradación de la Vitamina se debe a la alta reactividad de la estructura del enediol; como ruta principal de degradación se produce la oxidación a ácido dehidroáscorbico y la posterior oxidación éste último compuesto en ácido 2,3-dicetogulónico que no tiene actividad biológica. Según sean las condiciones del sistema, a través de la degradación de Strecker, el ácido 2,3-dicetogulónico se cicla y produce anhídrido carbónico y furfural;

este último se polimeriza y forma las melanoidinas, compuestos responsables del pardeamiento no enzimático. Este mecanismo se complica considerablemente si hay presencia de azúcares reductores y aminoácidos que favorecen diversas rutas de degradación (Badui, 2006)

En el almacenamiento de polvos de acerola y camucamu obtenidos por SD a 30°C, 75% HR y 30 días; se presentaron reducciones de vitamina C del 78% y 39,5% respectivamente (dos Santos Garcia et al., 2020). En otro estudio se reportó el incremento de la sensibilidad de la vitamina C contenida en microcápsulas en almidón de Taro a 50°C con el incremento de la HR (13, 22, 46, 57 y 72%) (Hoyos-Leiva et al., 2018).

### 5.3.6 Antocianinas.

Las antocianinas son las sustancias del grupo de compuestos fenólicos responsables por la coloración característica de la fresa; sobresaliendo la cy-3- glucósido (cy-3-glu), pg-3- glucosido y Pg-3-rutinosido (da Silva et al., 2007). Los cambios de color en productos alimenticios durante el almacenamiento, dependen de variables independientes tales como: T, t, HR, atmosfera de envasado, empaque, entre otras, los cuales contribuyen en mayor o menor medida en las reacciones de deterioro de la matriz (Ramachandra & Rao, 2013).

El comportamiento de las AT a 15, 25 y 35 °C fue similar al de la vitamina C, observándose una disminución con el incremento del t y la T de almacenamiento, presentando un buen ajuste de regresión para cinéticas de orden cero ( $R^2$ : 0.9922, 0,949 y 0.9953 para 15, 25 y 35°C respectivamente); adicionalmente, presentaron 2 grupos homogéneos: 15-25 °C y 35°C, y velocidades de degradación de 0,116 y 0,204 mg AT/100g bs x día respectivamente. Comportamiento similar de las AT en *bayberry* en polvo obtenido por SD, ha sido reportado por Akhavan Mahdavi et al., (2016); sin embargo, algunas investigaciones han reportado cinéticas de primer orden para las AT: Ferrari et al., (2013) en estudios de estabilidad de polvo de mora obtenido por SD; Akhavan Mahdavi et al., (2016) en polvo de mora obtenida por SD y almacenada durante 5 meses en ambientes a 25 y 35°C y una HR de 32,8%; y Tonon et al., (2010) en polvo de açai obtenido por SD almacenado durante 120 días, HR de 52,3% y 35°C.

Los niveles de retención de las AT en la MPFA al  $t = 0$  correspondieron a una media de  $63.3 \pm 2.0$  mg cy-3-glu /100g bs (15,3 mg cy-3-glu /25 g porción); mientras que, en el mes 6 para los grupos homogéneos 15-25°C y 35°C, los niveles alcanzaron 38.0 y 25.5 mg cy-3-glu /100g bs (9.1 y 6.0 mg cy-3-glu /25 g porción). La degradación térmica de las antocianinas está asociada con la formación de productos de las reacciones de Maillard (furfural e hidroximetil furfural), que se condensan con las antocianinas, formando compuestos de coloración café (Cai et al., 2016). Se considera que esta situación ocurrió en la MPFA a 35 °C principalmente y con mayor intensidad a partir del día 150, donde se hizo notorio el cambio de color, desde un rosa suave ( $t=0$ ) hasta un camel ( $t > 150$  días). Esta situación es paralela a otros cambios observados a estas condiciones: mayor contenido de Xw y desarrollo de una estructura apelmazada. Este mismo comportamiento se reportó en microcápsulas de corozo (*Acrocomia aculeata*) obtenidas por SD y almacenadas a  $T > 50$  °C (tono rojo→ café) durante 40 días (Osorio et al., 2010); sin embargo, otras investigaciones, no encontraron cambios importantes de las AT en polvos de fresa SD durante el almacenamiento a 25 °C, 90 días, utilizando empaques de película laminada de PET foil de aluminio y ubicados en un desecador con silica gel (Oliveira et al., 2013)

### 5.3.7 Color.

El color es la sensación producida en la retina (observador) de los rayos de luz reflejados y absorbidos por un cuerpo (objeto), y según la longitud de onda de estos rayos (Badui, 2006). El objeto presenta diversos factores que afectan la respuesta del color: composición del producto (agua, pigmentos, entre otros), textura de la superficie (lisa o irregular), estructura de la matriz (porosa o compacta), características del objeto (transparente, translucido, mate, brillante), tamaño de partícula, entre otros (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014). La energía relativa de la luz a cada longitud de onda crea la curva de distribución de energía que cuantifica las características espectrales de la fuente de luz (Fennema & Tannenbaum, 2010). Finalmente, la percepción del color comienza por el observador. Cuando el ojo humano mira un objeto expuesto a la luz incidente, la intensidad energética de la luz que percibe no es la reflejada por el objeto, sino la que resulta de multiplicar, para cada longitud de onda, la energía del espectro de reflexión del objeto por el valor de la visibilidad relativa a la misma longitud de onda (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014).

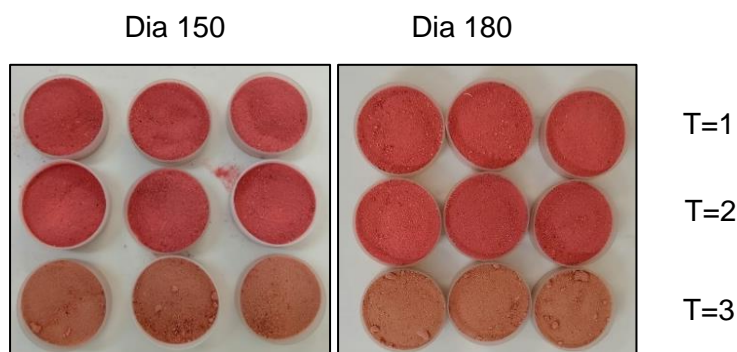
La estabilidad del color en el alimento durante el almacenamiento depende de diversos factores: temperatura, tiempo, humedad relativa, luz, humedad y composición del producto del producto, atmósfera ( $O_2$ ,  $N_2$ , atmósfera modificada), entre otras. El color es el primer parámetro de calidad que observa el consumidor; por lo que, es importante su valoración (Pua et al., 2008).

Los cambios de los parámetros de color observados para 15 °C y 25°C durante el almacenamiento (0 →180 días) fueron bajos:  $\Delta L^*$  (0,81 y 4,76),  $\Delta a^*$  (-0,06 y 1,81) y  $\Delta b^*$  (0,14 y 1,32), respectivamente. Esta situación a estas condiciones define estos parámetros como no críticos para el MPAF, dado que la razón de cambio es menor a 5, llegando a no ser perceptible por el ojo humano, tal como ha sido reportado por diversos autores: en extractos de uva (De Souza et al., 2015) y aguacate (Marulanda et al., 2018a).

Con respecto al almacenamiento a 35°C, se alcanzaron  $\Delta L^*$  (7,8),  $\Delta a^*$  (-10,0) y  $\Delta b^*$  (2,7), lo que refleja las siguientes fenomenologías: 1) una mayor claridad de las muestras con el t de almacenamiento, siendo mayor su tasa de cambio a partir de los 150 días; situación que se explica por la disminución de los pigmentos rojizos debido a su degradación, que hace que, los contenidos de los otros componentes de la MPAF: MD,  $SiO_2$  y GA (polvos blancos) resalten su mayor claridad.(Zanoni et al., 2020) 2) una degradación los pigmentos responsables de la cromaticidad rojiza de las MPFA (antocianinas, flavonoles, flavonoles, entre otros) (Weber et al., 2017), y posibles reacciones de condensación de estas con los productos de las reacciones de Maillard (Patras et al., 2010), lo que finalmente produce un tono camel (Figura 5-2). 3) un ligero incremento en la cromaticidad amarilla; sin embargo, este cambio no llega a ser importante ( $\Delta b^* < 5$ ).

El incremento de la temperatura de almacenamiento es un factor crítico en la estabilidad del color, se han reportado cambios notables de coloración en polvos de frutas obtenidos por SD y almacenados a 35°C: corozo (Osorio et al., 2010), mora (Weber et al., 2017) y repollo morado (Zanoni et al., 2020).

**Figura 5-2.** Color de los aglomerados en el almacenamiento a tiempos de 150 y 180 días a las temperaturas de 15, 25 y 35 °C.



## 5.4 Conclusiones

La MPAF presentó buena estabilidad fisicoquímica frente a reacciones de deterioro debido a sus bajos valores de  $X_w$  y  $a_w$  alcanzados, lo cual igualmente le confiere una estabilidad microbiológica ( $a_w < 0,361$  y  $X_w < 6,2\%$ ). La estabilidad alcanzada en las propiedades:  $\rho_b$ ,  $\rho_c$ , S, Hy, Hu, AR, CI, HI y  $D_{[3,2]}$ , confiere al producto alimenticio un tamaño de partícula homogéneo, con buena de fluidez e instantaneidad, y baja cohesividad, principalmente a 15 y 25°C. A 35°C se observó un apelmazamiento a partir del mes 5, causado principalmente por los niveles de  $X_w$  alcanzados y por el posible cambio del estado amorfo vitreo a gomoso. En general, el color fue correspondiente con las propiedades anteriores, siendo su comportamiento similar a 15-25°C durante los 180 días de almacenamiento; mientras que, a 35°C se observó a los 150 días un cambio de tonalidad de la MPAF: rosa → camel. Se alcanzaron buenas retenciones de compuestos bioactivos durante el almacenamiento: capacidades antioxidantes > 50%, FT > 76%, AT > 39% y Vit.C > 40% (58 y 44% DR según OMS para 15-25°C y 35°C, durante 180 días). Finalmente, la investigación definió un t de almacenamiento de la MPAF de 180 días a 15 y 25°C, y de 120 días a 35°C, utilizando como empaque una bolsa con película laminada de PET foil de aluminio. El estudio servirá de herramienta para la determinación de la vida útil del aglomerado, una vez sean definidos los valores críticos de los atributos que sean seleccionados como predictores de la vida útil.

## 5.5 Referencias bibliográficas

AOAC. (2003) Official Methods of Analysis. Vol.I.17th ed. Association of Analytical  
Washington, DC, USA

- Aaby, K., Ekeberg, D., & Skrede, G. (2007). Characterization of phenolic compounds in strawberry (*Fragaria x ananassa*) fruits by different HPLC detectors and contribution of individual compounds to total antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(11), 4395–4406. <https://doi.org/10.1021/jf0702592>
- Aguilera, J. M., del Valle, J. M., & Karel, M. (1995). Caking phenomena in amorphous food powders. *Trends in Food Science and Technology*, 6(5), 149–155. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)89023-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)89023-8)
- Akhavan Mahdavi, S., Jafari, S. M., Assadpour, E., & Ghorbani, M. (2016). Storage stability of encapsulated barberry's anthocyanin and its application in jelly formulation. *Journal of Food Engineering*, 181, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.003>
- Badui, S. (2006). Salvador Badui Dergal. In *Química de los alimentos*.
- Barbosa-Canovas, Gustavo V. Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2014). Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality. In *Igarss 2014*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Juliano, P. (2005). Compression and Compaction Characteristics of Selected Food Powders. *Progress in Optics*. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(05\)49006-3](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(05)49006-3)
- Barkouti, A., Turchiuli, C., Carcel, J. A., & Dumoulin, E. (2013). Milk powder agglomerate growth and properties in fluidized bed agglomeration. *Dairy Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13594-013-0132-7>
- Benković, M., & Bauman, I. (2011). Agglomeration Of Cocoa Powder Mixtures – Influence Of Process Conditions On Physical Properties Of The Agglomerates Aglomeracija Kakao Mješavina – Utjecaj Uvjeta Procesna Na Fizikalna Svojstva Aglomerata. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*.
- Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (2013). Handbook of Food Powders: Processes and Properties. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. <https://doi.org/10.1533/9780857098672>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. In *LWT - Food Science and Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Cai, X., Du, X., Cui, D., Wang, X., Yang, Z., Zhu, G., Delia, S. C., Chávez, G. M., León-Martínez Frank, M., Araceli, S. G. P., Irais, A. L., Franco, A. A., Janiszewska-turak,

- E., Bazaria, B., Kumar, P., Jantathai, S., Danner, L., Joechl, M., Dürschmid, K., ... Zuber, M. (2016). Spray drying microencapsulation of betalain rich extracts from *Escontria chiotilla* and *Stenocereus queretaroensis* fruits using cactus mucilage. *Food Chemistry*.
- Carlos, L. A. J., Antonio, G. G. G., & Misael, C. R. (2018). Effect of the Spray Drying Process on the Quality of Coconut Powder Fortified with Calcium and Vitamins C, D3 and E. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 16(SPL), 102–124. <https://doi.org/10.19026/ajfst.16.5943>
- Chang, L. S., Karim, R., Abdulkarim, S. M., Yusof, Y. A., & Ghazali, H. M. (2018). Storage stability, color kinetics and morphology of spray-dried soursop (*Annona muricata* L.) powder: Effect of anticaking agents. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1937–1954. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1510836>
- Chauhan, A. K., & Patil, V. (2013). Effect of packaging material on storage ability of mango milk powder and the quality of reconstituted mango milk drink. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.055>
- Cuq, B., Mandato, S., Jeantet, R., Saleh, K., & Ruiz, T. (2013). Agglomeration/granulation in food powder production. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties* (pp. 150–177). <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.150>
- da Silva, F. L., Escribano-Bailón, M. T., Pérez Alonso, J. J., Rivas-Gonzalo, J. C., & Santos-Buelga, C. (2007). Anthocyanin pigments in strawberry. *LWT - Food Science and Technology*, 40(2), 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.09.018>
- De Souza, V. B., Thomazini, M., Balieiro, J. C. D. C., & Fávaro-Trindade, C. S. (2015). Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification byproducts of the Bordo grape (*Vitis labrusca*). *Food and Bioproducts Processing*, 93(June), 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.11.001>
- Dhanalakshmi, K., Ghosal, S., & Bhattacharya, S. (2011). Agglomeration of food powder and applications. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408391003646270>
- Dolinsky, A., Maletskaya, K., & Snezhkin, Y. (2000). Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods. *Drying Technology*, 18(3), 747–758. <https://doi.org/10.1080/07373930008917735>
- dos Santos Garcia, V. A., Borges, J. G., Vanin, F. M., & de Carvalho, R. A. (2020).

- Vitamin C stability in acerola and camu-camu powder obtained by spray drying. *Brazilian Journal of Food Technology*, 23, 1–13. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.23719>
- Einhorn-stoll, U. (2017). Accepted Manuscript.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.029>.This
- Fennema, O., & Tannenbaum, S. (2010). Introducción a la química de los alimentos. *Química de Los Alimentos*, 3–27
- Ferrari, C. C., Marconi Germer, S. P., Alvim, I. D., & de Aguirre, J. M. (2013). Storage Stability of Spray-Dried Blackberry Powder Produced with Maltodextrin or Gum Arabic. *Drying Technology*, 31(4), 470–478.  
<https://doi.org/10.1080/07373937.2012.742103>
- Forbes-Hernandez, T. Y., Gasparini, M., Afrin, S., Bompadre, S., Mezzetti, B., Quiles, J. L., Giampieri, F., & Battino, M. (2016). The Healthy Effects of Strawberry Polyphenols: Which Strategy behind Antioxidant Capacity? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1051919>
- Gil, J., Murotona, S., Yacanto, P., Soteras, E., Abaca, C., & Sustersic, M. (2013). Descremada En Polvo Water Adsorption and Desorption Isotherms on Non Fat. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 4(1), 51–59.
- Gomes, W. F., França, F. R. M., Denadai, M., Andrade, J. K. S., da Silva Oliveira, E. M., de Brito, E. S., Rodrigues, S., & Narain, N. (2018). Effect of freeze- and spray-drying on physico-chemical characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of papaya pulp. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 55, Issue 6, pp. 2095–2102). <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3124-z>
- Haas, K., Dohnal, T., Andreu, P., Zehetner, E., Kiesslich, A., Volkert, M., Fryer, P., & Jaeger, H. (2020a). Particle engineering for improved stability and handling properties of carrot concentrate powders using fluidized bed granulation and agglomeration. *Powder Technology*, 370, 104–115.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.065>
- Hedegaard, R. V., & Skibsted, L. H. (2013). Shelf-life of food powders. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*, 409–434.  
<https://doi.org/10.1533/9780857098672.2.409>
- Hogekamp, S., & Schubert, H. (2003). Rehydration of food powders. *Food Science and Technology International*. <https://doi.org/10.1177/1082013203034938>



- Isosteric, K. T., Catelam, K. T., Sílvia, C., Trindade, F., & Romero, J. T. (2011). WATER ADSORPTION ISOTHERMS SORPTION HEAT OF SPRAY-DRIED AND FREEZE-DRIED DEHYDRATED PASSION FRUIT PULP WITH ADDITIVES AND SKIMMED MILK Isotermas de adsorção e calor isotérico de sorção de polpa de maracujá desidratada por spray dryer e liofilizador com a. 1196–1203.
- Jinapong, N., Suphantharika, M., & Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032>
- Larrauri, J. A., Rupérez, P., Borroto, B., & Saura-Calixto, F. (1996). Mango peels as a new tropical fibre: Preparation and characterization. *LWT - Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0113>
- Le Meste, M., Champion, D., Roudaut, G., Blond, G., & Simatos, D. (2002). Glass transition and food technology: A critical appraisal. *Journal of Food Science*, 67(7), 2444–2458. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08758.x>
- Liu, Y., Chen, F., & Guo, H. (2017). Optimization of bayberry juice spray drying process using response surface methodology. In *Food Science and Biotechnology* (Vol. 26, Issue 5, pp. 1235–1244). <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0169-0>
- Lucas-Aguirre, J. C., Giraldo-Giraldo, G. A., & Cortes-Rodriguez, M. (2020). Degradation kinetics during storage of vitamins and antioxidants in coconut powder. *DYNA (Colombia)*, 87(213), 61–68. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.80681>
- MartínezNavarrete, N. (1999). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno* (N. Martínez Navarrete (ed.)) [Book]. Instituto Politécnico Nacional.
- Marulanda, A., Ruiz-Ruiz, M., & Cortes-Rodríguez, M. (2018a). Influence of spray drying process on the quality of avocado powder: A functional food with great industrial potential. *Vitae*. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v25n1a05>
- Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 42(2), 57–66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n2-07>
- Oliveira, M. I. S., Tonon, R. V., Nogueira, R. I., & Cabral, L. M. C. (2013a). Estabilidade da polpa de morango atomizada utilizando diferentes agentes carreadores. *Brazilian Journal of Food Technology*, 16(4), 310–318. <https://doi.org/10.1590/s1981-67232013005000037>
- Osorio, C., Acevedo, B., Hillebrand, S., Carriazo, J., Winterhalter, P., & Morales, A. L. (2010). Microencapsulation by spray-drying of anthocyanin pigments from corozo

- (*Bactris guineensis*) fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(11), 6977–6985. <https://doi.org/10.1021/jf100536g>
- Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C., & Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science and Technology*, 21(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
- Pereira, D. C. d. S., Beres, C., Gomes, F. dos S., Tonon, R. V., & Cabral, L. M. C. (2020). Spray drying of juçara pulp aiming to obtain a “pure” powdered pulp without using carrier agents. *Drying Technology*, 38(9), 1175–1185. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1625363>
- Pua, C. K., Sheikh, N., Tan, C. P., Mirhosseini, H., Abdul Rahman, R., & Rusul, G. (2008). Storage stability of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder packaged in aluminium laminated polyethylene and metallized co-extruded biaxially oriented polypropylene during storage. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.023>
- Rahman, M. S. (2017). State Diagram of Foods and Its Importance to Food Stability During Storage and Processing. *Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials*, 1986, 251–260. <https://doi.org/10.1002/9781118935682.ch11>
- Ramachandra, C. T., & Rao, P. S. (2013). Shelf-life and colour change kinetics of Aloe vera gel powder under accelerated storage in three different packaging materials. *Journal of Food Science and Technology*, 50(4), 747–754. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0398-9>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Trolox ASSAY. *Free Radical Biology and Medicine*. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rosa, J. G., Nascimento, R. F., Andreola, K., & Taranto, O. P. (2020). Acacia gum fluidized bed agglomeration: Use of inulin as a binder and process parameters analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13409>
- Saavedra–Leos, M. Z., Leyva-Porras, C., Alvarez-Salas, C., Longoria-Rodríguez, F., López-Pablos, A. L., González-García, R., & Pérez-Urizar, J. T. (2018). Obtención de polvos de jugo de naranja-maltodextrina sin colapso estructural basado en la temperatura de transición vítrea y grado de polimerización. *CYTA - Journal of Food*,

- 16(1), 61–69. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1337048>
- Singleton, V. L., & Jr., R. J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*. <https://doi.org/10.12691/ijebb-2-1-5>
- Sornsomboonsuk, S., Junyusen, T., Chatchavanthatri, N., Moolkaew, P., & Pamkhuntod, N. (2019). Evaluation of Physicochemical Properties of Spray Dried Bael Fruit Powder During Storage. *ETP International Journal of Food Engineering*, 5(3), 209–213. <https://doi.org/10.18178/ijfe.5.3.209-213>
- Tate, R. S., Fryer, D. S., Paqualini, S., Montague, M. F., De Pablo, J. J., & Nealey, P. F. (2001). Extraordinary elevation of the glass transition temperature of thin polymer films grafted to silicon oxide substrates. *Journal of Chemical Physics*, 115(21), 9982–9990. <https://doi.org/10.1063/1.1415497>
- Teunou, E., Fitzpatrick, J. J., & Synnott, E. C. (1999). Characterization of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00140-X)
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2010). Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food Research International*, 43(3), 907–914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.013>
- Varastegani, B., Lubowa, M., Teixeira, J. A., & Easa, A. M. (2019). Storage stability of spray dried nigella sativa (*Ranunculaceae* family) instant beverage powder: Effect of carrier agents on the physicochemical, phenolic compounds and antioxidant properties. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 7(3), 648–661. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.7.3.05>
- Weber, F., Boch, K., & Schieber, A. (2017). Influence of copigmentation on the stability of spray dried anthocyanins from blackberry. *LWT - Food Science and Technology*, 75, 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.042>
- Wong, C. W., & Lim, W. T. (2016). Storage stability of spray-dried papaya (*Carica papaya* L.) powder packaged in aluminium laminated polyethylene (ALP) and polyethylene terephthalate (PET). *International Food Research Journal*, 23(5), 1887–1894.
- Zanoni, F., Primiterra, M., Angeli, N., & Zoccatelli, G. (2020). Microencapsulation by spray-drying of polyphenols extracted from red chicory and red cabbage: Effects on stability and color properties. *Food Chemistry*, 307(September 2019).

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125535>

## 5.7 Referencias bibliográficas de la introducción

- Bahnasawy, A. H., Okasha, A. E., & Gonbeej, E. E. (2010). Performance evaluation of a laboratory scale spray dryer. *Journal of Agricultural Engineering*.
- Barbosa-Canovas, Gustavo V. Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2014). Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality. In Igarss 2014. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Barkouti, A., Turchiuli, C., Carcel, J. A., & Dumoulin, E. (2013). Milk powder agglomerate growth and properties in fluidized bed agglomeration. *Dairy Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13594-013-0132-7>
- Basu, A., Fu, D. X., Wilkinson, M., Simmons, B., Wu, M., Betts, N. M., Du, M., & Lyons, T. J. (2010). Strawberries decrease atherosclerotic markers in subjects with metabolic syndrome. *Nutrition Research*. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2010.06.016>
- Basu, A., Nguyen, A., Betts, N. M., & Lyons, T. J. (2014). Strawberry as a Functional Food: An Evidence-Based Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.608174>
- Benković, M., & Bauman, I. (2011). Agglomeration of Cocoa Powder Mixtures – Influence of Process Conditions On Physical Properties of the Agglomerates Aglomeracija Kakao Mješavina – Utjecaj Uvjeta Procesna Na Fizikalna Svojstva Aglomerata. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*.
- Bhandari, B. R., Senoussi, A., Dumoulin, E. D., & Lebert, A. (1993). Spray Drying of Concentrated Fruit Juices. In *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373939308916884>
- Bhusari, S. N., Muzaffar, K., & Kumar, P. (2014). Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.038>
- Carocho, M., & Ferreira, I. C. F. R. (2013). A review on antioxidants, prooxidants and related controversy: Natural and synthetic compounds, screening and analysis methodologies and future perspectives. In *Food and Chemical Toxicology*. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.09.021>
- Carvajal, L., Turbay, S., Rojano, B., Álvarez, L., Restrepo, S., Álvarez, J., Bonilla, K., Ochoa, C., & Sánchez, N. (2011). Algunas especies de Passiflora y su capacidad

- antioxidante. Somme Passiflora species and their antioxidant capacity. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*.
- Choe, E., & Min, D. B. (2009). Mechanisms of Antioxidants in the Oxidation of Foods. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*.  
<https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00085.x>
- Dacanal, G. C., & Menegalli, F. C. (2008). Experimental study of fluidized bed agglomeration of acerola powder. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*.  
<https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000100007>
- Dhanalakshmi, K., Ghosal, S., & Bhattacharya, S. (2011). Agglomeration of food powder and applications. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.  
<https://doi.org/10.1080/10408391003646270>
- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi Ashtari, A., & Omid, M. (2012). Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioproducts Processing*.  
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.04.006>
- Feguš, U., Žigon, U., Petermann, M., & Knez, Ž. (2015). Effect of drying parameters on physiochemical and sensory properties of fruit powders processed by PGSS-, vacuum- and spray-drying. *Acta Chimica Slovenica*.  
<https://doi.org/10.17344/acsi.2014.969>
- Forbes-Hernandez, T. Y., Gasparrini, M., Afrin, S., Bompadre, S., Mezzetti, B., Quiles, J. L., Giampieri, F., & Battino, M. (2016). The Healthy Effects of Strawberry Polyphenols: Which Strategy behind Antioxidant Capacity? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1051919>
- Freixo, R., Brandão, T. M. R. S., Silva, J., Gomes, A., Pintado, M., Silva, C. L. M., Morais, A. M. M. B., & Teixeira, P. (2016). Prebiotics as drying aids for spray drying fruit juices. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Application of Spray drying in micro-encapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*.
- Gong, Z., Zhang, M., Mujumdar, A., & Sun, J. (2008). Spray drying and agglomeration of instant bayberry powder. *Drying Technology*.  
<https://doi.org/10.1080/07373930701781751>

- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2008). Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. powder properties. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373930802046377>
- Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., & Kazakis, N. A. (2004). Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1081/DRT-120038584>
- Hakkinen, S., Mykkanen, H., Karenlampi, S., Heinonen, M., & Torronen, R. (1996). HPLC method for screening of flavonoids and phenolic acids in berries: phenolic profiles of strawberry and black currant. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199808\)77](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199808)77)
- Islam Shishir, M. R., Taip, F. S., Aziz, N. A., Talib, R. A., & Hossain Sarker, M. S. (2016). Optimization of spray drying parameters for pink guava powder using RSM. *Food Science and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0064-0>
- Iveson, S. M., Litster, J. D., Hapgood, K., & Ennis, B. J. (2001). Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review. In *Powder Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00313-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00313-8)
- Jittanit, W., Niti-Att, D., & Techanuntachaikul, O. (2010). Study of spray drying of pineapple juice using maltodextrin as an adjunct. *Chiang Mai Journal of Science*.
- Johansen Crosby, E. (1989). *SPRAY DRYING HANDBOOK*. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373938908916598>
- Largo Ávila, E., Cortés Rodríguez, M., & Ciro Velásquez, H. J. (2014). Influence of Maltodextrin and Spray Drying Process Conditions on Sugarcane Juice Powder Quality. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47839>
- Lobo, V., Patil, A., Phatak, A., & Chandra, N. (2010). Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy Reviews*. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>
- Lyons, T. J., & Basu, A. (2012). Biomarkers in diabetes: Hemoglobin A1c, vascular and tissue markers. In *Translational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.trsl.2012.01.009>
- Mehr, H. M., Elahi, M., & Razavi, S. M. A. (2012). Experimental Study on Optimization of the Agglomeration Process for Producing Instant Sugar by Conical Fluidized Bed Agglomerator. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.647995>
- Muzaffar, K., & Kumar, P. (2015). Parameter optimization for spray drying of tamarind

- pulp using response surface methodology. *Powder Technology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.010>
- Nijdam, J. J., & Langrish, T. A. G. (2006). The effect of surface composition on the functional properties of milk powders. *Journal of Food Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.020>
- Oliveira, M. I. S., Tonon, R. V., Nogueira, R. I., & Cabral, L. M. C. (2013). Estabilidade da polpa de morango atomizada utilizando diferentes agentes carreadores. *Brazilian Journal of Food Technology*. <https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000037>
- Palzer, S. (2011). Agglomeration of pharmaceutical, detergent, chemical and food powders - Similarities and differences of materials and processes. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.05.006>
- Phisut, N. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: Some factors influencing the properties of product. *International Food Research Journal*.
- Serrano, C., Sousa, M. B., Trigo, M. J., & Bronze, R. (2012). Phenolic phytochemical antioxidants in berries. *Acta Horticulturae*.  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.926.98>
- Shahidi, F. (2000). Antioxidants in food and food antioxidants. *Nahrung - Food*.  
[https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20000501\)44:3<158:AID-FOOD158>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20000501)44:3<158:AID-FOOD158>3.0.CO;2-L)
- Shahidi, Fereidoon, Janitha, P. K., & Wanasundara, P. D. (1992). Phenolic antioxidants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.  
<https://doi.org/10.1080/10408399209527581>
- Shishir, M. R. I., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. In *Trends in Food Science and Technology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>
- Szulc, K., & Lenart, A. (2016). Effect of composition on physical properties of food powders\*\*. *Int. Agrophys*. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0084>
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029>
- Tonon, R. V., Brabet, C., Pallet, D., Brat, P., & Hubinger, M. D. (2009). Physicochemical and morphological characterisation of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced with different carrier agents. *International Journal of Food Science and*

- Technology. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02012.x>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. In Trends in Food Science and Technology. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Zapata, S., Piedrahita, A. M., & Rojano, B. (2014). Capacidad atrapadora de radicales de oxígeno (ORAC) y fenoles totales de frutas y hortalizas de Colombia. *Perspectivas En Nutrición Humana*.



## Anexos

### Anexo 1 Revista Biotecnología del Sector Agropecuario y Agroindustrial

#### Directrices para autores/as

**Artículos de investigación científica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación que han sido culminados. Está compuesto por las siguientes secciones: 1. INTRODUCCIÓN, 2. MÉTODO, 3. RESULTADOS, 4. CONCLUSIONES y 5. REFERENCIAS. Los agradecimientos son opcionales y se incluyen luego de las conclusiones.

**Artículo de reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos. Sus partes son: 1. INTRODUCCIÓN, 2. MÉTODO, 3. RESULTADOS, 4. CONCLUSIONES y 5. REFERENCIAS. Los agradecimientos son opcionales y se incluyen luego de las conclusiones.

**Artículos de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación sobre un tema específico bajo una óptica analítica, interpretativa y crítica del(los) autor(es) con base en fuentes originales (por lo menos 30 referencias). La estructura es: 1. RESUMEN, 2. INTRODUCCIÓN, 3. DESARROLLO DEL TEMA, 4. CONCLUSIONES y 5. REFERENCIAS.

**Artículo de revisión (Review).** Documento resultado de una revisión analítica y crítica de literatura (mínimo 50 referencias) sobre un campo en ciencia o tecnología en el que se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas para mostrar los avances y las tendencias de desarrollo más los aportes de los proponentes. Está compuesto por: 1. RESUMEN, 2. INTRODUCCIÓN, 3. DESARROLLO DEL TEMA, 4. CONCLUSIONES y 5. REFERENCIAS.

**Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión. La extensión es de 5 a 8 páginas y está compuesto por: 1. INTRODUCCIÓN, 2. MÉTODO, 3. RESULTADOS, 4. CONCLUSIONES y 5. REFERENCIAS.

**Cartas al editor.** Posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista, que a juicio del Comité editorial constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

**Editorial.** Documento escrito por el editor, un miembro del comité editorial o un investigador invitado sobre orientaciones en el dominio temático de la revista, sobre

aportes a los investigadores en cuestiones de presentación y estructura de sus artículos, sobre reflexiones sobre la presentación de documentos escritos, su normatividad, su importancia y otros.

La **INTRODUCCIÓN** debe resaltar la importancia de la investigación, presentar la literatura relacionada y entregar antecedentes necesarios para comprender la hipótesis de los autores, terminando con un párrafo que indique claramente los objetivos de la investigación. El **MÉTODO** debe tener suficiente información que permita a otro investigador replicar el ensayo y lograr los mismos resultados, así como la inclusión del diseño experimental, el análisis estadístico y las referencias de los métodos ya publicados. Los **RESULTADOS** se deben presentar en forma clara, apoyados con cuadros y figuras, con el análisis estadístico y de los alcances de otros investigadores. Las **CONCLUSIONES** deben redactarse de acuerdo con los objetivos de la investigación explicando claramente los principales resultados de la investigación. Las **REFERENCIAS** deben contener todos los documentos consultados

### **Forma y Preparación de Manuscritos**

Todo documento remitido a BIOTECNOLOGÍA EN EL SECTOR AGROPECUARIO Y AGROINDUSTRIAL debe cumplir con:

#### **Los elementos normativos para seguir en todos los manuscritos son:**

Extensión y formato. Formato tamaño carta (21,59 cm de ancho y 27,94 cm de alto) con interlineado sencillo y contenido a doble columna (7,5 cm de ancho de columna) a partir de la INTRODUCCIÓN, escrito en Arial recta (excepto los nombres científicos que van en cursiva) de 11 puntos, márgenes de 3 cm en el borde superior, 2 cm en el inferior y 2,5 cm en las márgenes laterales; las cifras decimales se separan con coma y los nombres científicos se escriben en cursiva.

**Título del manuscrito.** Debe hacer referencia al contenido de una forma clara y concisa, escrito en Arial recta (excepto los nombres científicos) 11 puntos, mayúscula, negrilla y centrado; no debe exceder 15 palabras: si ello no es posible, deberá incluir un subtítulo luego de dos puntos. Inmediatamente después deben ir las dos traducciones del idioma original.

**Información del autor (es).** Los autores se nombran de acuerdo con la importancia de su contribución en la investigación o en la preparación del manuscrito, separados entre sí por comas y enumerados con superíndice. Posterior a los títulos, a dos interlíneas, centrado, en mayúscula y sin negrilla, incluir primer y segundo nombre si lo tiene, primer y segundo apellido separados por un guión medio. En nota al pie de página (Arial 8 puntos, justificada a ambos márgenes y en la parte inferior de la página) se indicará la filiación de cada autor: institución a la cual pertenece, dependencia, grupo de investigación, último título académico, ciudad y país.

En otra línea, luego de la palabra **Correspondencia** (en negrilla) y dos puntos, debe aparecer el correo institucional del autor elegido para el envío de correspondencia.

Ejemplo filiación institucional:

1Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial (CYTBIA). Ph.D. Ciencia de los Alimentos. Popayán, Colombia. **Correspondencia:** gfvssp@unicauca.edu.co

**Resumen.** Debe ser conciso, escrito en español, Inglés (**ABSTRACT**) y Portugués (**RESUMO**), en un solo párrafo justificado sin exceder de 200 palabras. Incluirá la justificación, objetivos, metodología, resultados precisos y conclusiones de la investigación haciendo énfasis en los logros alcanzados, así como los límites de la validez y las implicaciones de los resultados. Los títulos deben justificarse al margen izquierdo, en mayúscula y negrilla, iniciando la escritura luego de dos interlíneas.

**Palabras clave.** Sirven para identificar el manuscrito en bases de datos internacionales de manera que un potencial usuario pueda acceder en forma efectiva. Van luego de cada resumen, mínimo tres (3) y máximo cinco (5) palabras clave que no deben hacer parte del título del artículo, incluyendo en ellas los nombres científicos en cursiva. El título en mayúscula, negrilla, en español (**PALABRAS CLAVE**), Inglés (**KEYWORDS**) y Portugués (**PALAVRAS-CHAVE**) seguido de dos puntos. La primera letra de cada palabra en mayúscula, separadas por coma y con punto al final.

**Ejemplo palabras clave:**

**PALABRAS CLAVE:** Reología, Pos cosecha, Maduración, *Bactris gasipaes*.

**Cuadros y figuras.**

Deberán aparecer dentro del texto y procesarse en el formato original, con buen contraste y resolución para evitar policromías y facilitar la diagramación, en blanco y negro, escala de grises o tono maté. El título va en la parte superior y no debe superar dos líneas, en Arial recta normal 9, separado por una interlinea y con punto final; debe incluir la palabra Cuadro o Figura seguido del número arábigo consecutivo (en negrilla), un punto y una breve descripción (Ejemplo: **Cuadro 1.** Título descriptivo). Se deben usar líneas horizontales y verticales para separar las entradas del cuadro y cada columna debe tener encabezado (en negrilla, con mayúscula inicial). El tamaño de fuente al interior de un cuadro es arial 9 puntos normal y, en el caso de necesitarse algún pie de cuadro/figura o fuente de consulta, debe estar escrito en Arial 8 puntos normal.

**Títulos** (Todos en arial recta 11 puntos). Los de primer nivel (partes principales del manuscrito) se escriben con mayúscula sostenida y negrilla; los de segundo nivel con mayúscula inicial, negrilla y sin punto final, separados del texto por dos interlineas. Los de tercer nivel con mayúscula inicial, negrilla y un punto seguido, continuando el texto en el mismo renglón luego de un espacio.

Ejemplo:

**MÉTODO**

**Materiales Material vegetal.** El material vegetal usado.....

**Expresiones matemáticas.** Las expresiones matemáticas deben ser escritas dejando dos espacios sobre, debajo y entre cada una de ellas y se debe utilizar el editor de ecuaciones de MS Word. Deben seguir un formato uniforme, justificarse al margen izquierdo y usar la expresión (Ec.1) con números arábigos consecutivos justificada al margen derecho (para mayor facilidad, insertarlas en un cuadro de dos columnas, sin bordes), citándolas en el sitio oportuno. El significado de las variables y sus respectivas unidades deben aparecer luego de que se utilicen por primera vez, usando el Sistema Internacional de Unidades (SI).

**Conclusiones.** Se describen de forma clara y precisa las principales **CONCLUSIONES** del estudio presentado, derivado del análisis de los resultados y con base en los objetivos planteados.

**Agradecimientos.** Si el autor(es) lo desea (n), se podrá incluir una sección de **AGRADECIMIENTOS**, redactada en forma sobria y que no supere 4 líneas, justo después de las Conclusiones.

**Referencias.** Evitar el uso de tesis, de informes locales y de poco alcance, y de trabajos de congresos (denominada literatura gris), a menos que sea necesario. Dentro del manuscrito se deben indicar según el orden de aparición y encerradas entre corchetes [1,2], notación que se mantendrá en la sección de **REFERENCIAS**. Se deben considerar que mínimo el 70% de ellas deben ser recientes (de los últimos tres años) y corresponder a publicaciones científicas de corriente principal que puedan respaldar lo escrito. Si la referencia cuenta con 4 o más autores, usar et al.

#### **Estructura para las referencias:**

**Artículo de revista:** SMITH, J.S., SORIA-WHITE, R. and WEBBER, A. Chaos in a model of forced quasi-geostrophic flow over topography: an application of Melnikov's method. *Food Control*, 2(3), 1991, p. 511-547.

**Libro:** BILLAS, G.L. y GOSPS, J. Física cuántica. 4 ed. Madrid (España): Acribia, 1990, 450 p.

**Capítulo de libro:** LEWIS, P. and STEVENS, J.G. En: Time Series Prediction. Modeling time series by using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). 1 ed. Madrid (España): Iberoamericana, 1994, p. 297-318.

**Memoria de evento:** ÁLZATE, N., BOTERO, T. y CORREA, D. El arte de la escritura de artículos. Memorias XIX Congreso Latinoamericano de Ponencias Científicas. Córdoba (Argentina): Instituto Argentino de Investigaciones, Tomo II, 2000, p. 219-228.

**Normas técnicas:** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (AOAC). ASTM D1434-82: Standard test method for determining gas permeability characteristics of plastic film and sheeting. Pennsylvania (USA): 2009, 13 p.

**Reporte de un organismo o Gobierno:** COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. La situación de la provisión de alimentos en un mundo moderno. Bogotá (Colombia): 1997, 57 p.

**Tesis:** JACOBS J. Regulación of life history strategies within individuáis in predictable and unpredictable environments [Ph.D. Thesis Social Communication]. Seattle (United States): University of Washington, Faculty of Humanities, 1996, 345 p.

**Patentes:** MOREIRA, G. e MATOS, T. Embalagem biodegradável de amido de inhame. US 6.444.567, Clases 343, 356. Sao Paulo (Brasil): 2001.

**Monografías electrónicas:** MACIAS, J.C., SANTOS, J.M. and WILD, E. Handbook of Nanomaterials [online]. 1996. Disponible: <http://nano.hb/handbook/kewat.com/>[citado 4 de abril de 2004].

Otras referencias electrónicas: NOAA-CIRES. Climate Diagnostics Center. Advancing Understanding and Predictions of Climate Variability [online]. 2010. Disponible: <http://www.cdc.noaa.gov> [citado 8 de agosto de 1998]. ASHWELL, M. ILSI Europe Concise Series. Concepts of functional foods [online]. 2002. Disponible:[http://www.ilsi.org/Europe/Publications/C2002Con\\_Food.pdf](http://www.ilsi.org/Europe/Publications/C2002Con_Food.pdf) citado 13 mayo de 2009?.

#### **Aviso de derechos de autor/a**

#### **Política propuesta para revistas que ofrecen acceso abierto**

Política sobre Derechos de autor: Los autores que publican en la revista se acogen al código de licencia creative commons 4.0 de atribución, no comercial, sin derivados

Es decir, que aun siendo la Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial (BSAA) de acceso libre, los usuarios pueden descargar la información contenida en ella, pero deben darle atribución o reconocimiento de propiedad intelectual, deben usarlo tal como está, sin derivación alguna y no debe ser usado con fines comerciales.

#### **Declaración de privacidad**

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros o para su uso con otros fines.

Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial Ph.D. Héctor Samuel Villada Castillo- Editor Revista - Universidad del Cauca - Facultad de Ciencias Agrarias - Kilómetro

4 Vía a las Guacas- Teléfono (+57) 3117681572- Correo  
Electrónico: biotecnofaca@unicauca.edu.co - biotecnofaca2009@gmail.com  
doi:10.18684/BSAA

ISSN En Línea: 1909-9959

ISSN Impreso: 1692-3561

## Anexo 2

### Instructions to authors Food Science and Technology



#### INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Food Science and Technology (Campinas) publishes scientific articles in the field of food science. Works should be written in English and follow the editorial standards below.

#### Editorial Policy

Food Science and Technology (Campinas) accepts articles which present results from the original research and adopts a double-blind peer review process. The rejection of the manuscript can be decided by the Editor in Chief, Adjunct Associate Editor, and Associated Editors. The acceptance of the manuscript depends on the review of at least two anonymous referees designated by the Editorial Board. The referees' reviews will be sent to the authors to guide them in all needed changes related to their manuscripts. In the case of disagreement between their reviews, the final decision will be made by the Editor responsible for the manuscript or if he/she finds it necessary, another referee will be heard, and the three reviews will be analyzed by the sbCTA's Editorial Board, which will finally decide on the acceptance of the manuscript.

The accepted works will be published in the online version of this journal and in the SciELO library within twelve months.

## **Authorship**

Authorship credit should be based only on substantial contributions and participation to the development of the work.

The corresponding author will serve on behalf of all coauthors as the primary correspondent with the editorial office during the submission and review process.

## **Terms of agreement and submitting rights of graphic reproduction**

The corresponding author must sign and submit the Terms of Agreement and Submitting Rights of Graphic Reproduction to the sbCTA's Editorial Board on behalf of all coauthors. By signing the "Terms of Agreement and Submitting Rights of Graphic Reproduction", the authors agree:

That neither this work nor one with substantially similar content has ever been previously published or is being considered for publication elsewhere;

To submit the work and agree to name the corresponding author indicated;

To grant the Brazilian Society of Science and Food Technology (sbCTA) the rights of graphic reproduction if the work is accepted for publication.

## **Contents**

### **Original Research**

The manuscript must present clear and concise results of a research based on scientific methods.

### **Review Articles**

Manuscripts should present an overview pertinent to the theme of the Journal with focus on literature published in the past five years.

### **Research involving humans**

When presenting results of research involving humans, the approval process number granted by the Research Ethics Committee (resolution # 196/96, October 10th, 1996, Brazilian National Health Council) should be provided.

### **Paper Structure**

Reviewing the manuscript structure and information provided is the author responsibility. Original manuscripts should not exceed 16 pages (excluding the references).

The text should be spaced with double spacing between lines in a one-column format. All lines should be flush with left margin of column leaving a 2.5-cm margin at right and left. Text lines must be sequentially numbered throughout the text. All pages should be sequentially numbered (see the item "Files Format" at the end of this guide).

### **Cover Letter**

The manuscript cover letter must include the following:

Statement of work relevance and importance: a brief text with no more than 100 words describing the relevance of the work concisely;

**Titles:**

- a) Title in English;
- b) Page header (no longer than 6 words).

**Title Page**

The manuscript title page must include the following:

Authors' full name and e-mail address;

Authors' abbreviated names for citation (Ex.: full name: José Antonio da Silva; abbreviated name: Silva, J. A.);

Authors' Affiliations: name of the institution to which each author belongs (full name and acronyms, full postal address, postal code, city, state, and country). Please correlate each author to their corresponding institution;

Authors mailing information (full name, full postal address, telephone and FAX numbers, and corresponding author's e-mail address).

**Abstract and keywords page**

Abstract

The abstract must:

Be only in english;

Be a single paragraph containing fewer than 200 words; Clearly state the main objective and rationale of the article; State briefly the major conclusions; If applicable, describe materials methods and results; Summarize the conclusions; Be sparing with abbreviations and acronyms.

The abstract should not include: Footnotes; Significant data and statistical values; References.

Practical Application

Short text with a maximum of 85 characters, indicating innovations and important features of the study. The "Practical Application" will be published.

**Keywords**

The manuscript should have at least three (3) and a maximum of six (6) Keywords. Keywords should be only in english. Avoid using terms included in the main text of the manuscript in the Keywords.



## **Text pages**

The manuscript should be arranged as follows:

Introduction;

Materials and Methods; should include experimental design and statistical data analysis;

Results and Discussion (may also be separated);

Conclusions;

References;

Acknowledgements (optional).

In the main text:

Abbreviations, acronyms, and symbols must be clearly defined on first usage;

Footnotes are not permitted;

The use of headings and subheadings is encouraged when necessary, but make use of them without compromising the text clarity. They should be numbered in the order in which they appear in the text;

Equations should be computer generated and numbered sequentially with Arabic numerals in parentheses in the order in which they are referred to in the text. Equations should be referenced within the text and in the location indicated by the author. Please do not submit images of equations . Equations supplied separately will not be accepted; only those inserted in the text will be accepted.

### **Tables, Figures, and Charts**

Provide a maximum of seven (7) Tables, Figures, and Charts. They should be numbered in Arabic numerals in the order they are called out in the text. In the Manuscripto.pdf - version for reviewer's evaluation and in the Manuscripto.doc - version for production, tables, equations, figures, charts and their respective captions should be included within the main text in the place indicated by the authors. Please see below the instructions for the version for production.

#### **Figures and charts (version for production)**

Figures and charts should be provided in the main text and numbered consecutively using Arabic numerals and their respective captions should be included within the main text in the place indicated by the authors. When supplying figures containing photographs or micrographs, ensure that they are scanned at a high resolution so that each photo is at least 1,000 pixels wide. All photographs should contain the author's name. Charts should be used to present files, schemes, and flowcharts.

#### **Tables (version for production)**

Tables should be provided in the main text and numbered using Arabic numerals. They should be embedded in the text in the place indicated by the author. Tables should be

prepared using Microsoft Word® 2007 or after; they should not be imported from Excel® or Powerpoint®, and should:

Have a caption and a title;

Be self-explainable;

Have the significant digits defined according to statistical criterion considering the significant digits in the standard deviation;

Be used sparingly to ensure visual consistency and that the text is easy to read;

Show data that are not shown in the graphs;

Have the simplest format possible; the use of shadows, color, or vertical and diagonal rows is not permitted;

Have only superscript lowercase letters indicating footnotes (abbreviations, units, etc). The columns should be indicated first and then the rows, and this same order should be followed for the footnotes.

Proprietary names

Raw materials, special purpose equipment and computer software used in the research should be specified (trademark- manufacturer, model, city, and country of origin).

Units of measure

Use SI units; (International System of Units);

Temperatures should be expressed in degrees Celsius (°C).

## **References**

In-text citation

Bibliographic references inserted in the text should be made according to the "Author/Date" system. For example, citation containing one author: Sayers (1970) or (Sayers, 1970); with two authors: Moraes & Furuie (2010) or (Moraes & Furuie, 2010); citations with more than two authors should show the name of the first author followed by the expression "et al.". When the citation refers to an institution, its name should be presented in full.

Reference list

Food Science and Technology (CTA) Journal adopts the style of citations and bibliographic references by the American Psychological Association - APA. The complete policy and tutorials can be verified at <http://www.apastyle.org>.

The reference list should be prepared first alphabetically and, if necessary, chronologically. Multiple references by the same author in the same year should be identified by letters 'a', 'b', 'c', etc. placed after the year of publication.

Articles under preparation or submitted for review should not be included in the references. The names of all authors should be listed in the references; therefore, the use of the expression 'et al.' is not allowed.

According to the determination by the sbCTA, accepted articles whose bibliographic references are not in compliance with the Journal's standards WILL NOT BE PUBLISHED until norms are met.

Examples of style for references:

#### Books

Baccan, N., Aleixo, L. M., Stein, E., & Godinho, O. E. S. (1995). *Introdução à semimicroanálise qualitativa* (6. ed.). Campinas: EduCamp. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. (2006). *Tabela brasileira de composição de alimentos - TACO* (versão 2, 2. ed.). Campinas: UNICAMP/NEPA.

#### Book Chapter

Sgarbieri, V. C. (1987). *Composição e valor nutritivo do feijão Phaseolus vulgaris L.* In E. A. Bulisani (Ed.), *Feijão: fatores de produção e qualidade* (cap. 5; pp. 257-326). Campinas: Fundação Cargill.

#### Journal Articles

Versantvoort, C. H., Oomen, A. G., Van de Kamp, E., Rompelberg, C. J., & Sips, A. J. (2005). Applicability of an in vitro digestion model in assessing the bioaccessibility of mycotoxins from food. *Food and Chemical Toxicology*, 43(1), 31-40. Sillick, T. J., & Schutte, N. S. (2006). Emotional intelligence and self-esteem mediate between perceived early parental love and adult happiness. *E-Journal of Applied Psychology*, 2(2), 38-48. Retrieved from <http://ojs.lib.swin.edu.au/index.php/ejap>

#### Electronic work (e-work)

Richardson, M. L. (2000). *Approaches to differential diagnosis in musculoskeletal imaging* (version 2.0). Seattle: University of Washington School of Medicine. Retrieved from <http://www.rad.washington.edu/mskbook/index.html>

#### Legislation

Brasil, Ministério da Educação e Cultura. (2010). *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências* (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010). *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*.

#### Theses and Dissertations

Fazio, M. L. S. (2006). *Qualidade microbiológica e ocorrência de leveduras em polpas congeladas de frutas* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto.

Articles previously presented at scientific conferences

Sutopo, W., Nur Bahagia, S., Cakravastia, A., & Arisamadhi, T. M. A. (2008). A Buffer stock Model to Stabilizing Price of Commodity under Limited Time of Supply and Continuous Consumption. In Proceedings of The 9th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS), Bali, Indonesia.

Files format

The main manuscript text should be submitted as follows:

Microsoft Word® 2007 or later format;

Font: Times New Roman, Arial or Tahoma in size 12;

Double spacing between lines;

Figures, tables, tables, equations and respective legends must be incorporated in the text in the position preferred by the author; The file cannot exceed 16 pages, in addition to the list of bibliographic references Lines and pages must be numbered sequentially; The cover page with the name of the authors and institutions must be presented in a separate file Manuscript must be nominated.

After checking the format style and creating the files according to the guidelines, proceed to the online submission using the On-line (Please, see below).

Link: <http://mc04.manuscriptcentral.com/cta-scielo>

Publication fees:

The Food Science and Technology Journal (Campinas) will publish an article accepted for publication according to rates below:

USD 300.00 - non-members of SBCTA

USD 200.00 - at least one author should be an SBCTA member and should have paid his/her annual membership fee to be eligible for the discount;

USD 180.00 - at least two authors should be SBCTA members and should have paid their annual membership fee to be eligible for the discount;

USD 160.00 - three authors should be SBCTA members and should have paid their annual membership fee to be eligible for the discount;

USD 140.00 - at least four authors should be SBCTA members and should have paid their annual membership fee to be eligible for the discount;

Contributing authors should convert commercial dollar rate of the date of deposit into Brazilian real.

The publication process will not begin until the fee for the accepted paper has been received. Fees may be paid as follows:

Payment within Brazil: the invoice will be sent to the Editor by e-mail.

International payment: PayPal invoice sent to the Editor by e-mail.

There is option of payment by creditcard

#### English Language review

Papers must be submitted in English, together with a letter attesting their editing, signed by a specialist in English language (native or non-native speaker). All editing of English should be accompanied by a letter detailing the adjustments made in the original document.

Before submitting online, the corresponding author should fill out and sign the Terms of Agreement and Submitting Rights of Graphic Reproduction form.

Submit this form via e-mail or fax to the sbCTA's Editorial Board to [publicacoes@sbcta.org.br](mailto:publicacoes@sbcta.org.br) or +55 19 32410527. The evaluation process will not begin until the Terms of Agreement and Submitting Rights of Graphic Reproduction is sent and received.

#### Contact

Brazilian Society of Science and Technology / SBCTA

Av. Brasil 2880 - 13001-970 Campinas - SP, Brasil - Caixa Postal: 271

Fone/Fax: +55 (19) 3241-0527 - Fone: +55 (19) 3241-5793

e-mail: [publicacoes@sbcta.org.br](mailto:publicacoes@sbcta.org.br)

### ANEXO 3.

## Isotermas de sorción del aglomerado en lecho fluidizado de mezcla de polvo de fresa secado por atomización

Isoterma de sorción 15°C

Sal	Repetición	Peso capsula	Peso muestra	Peso equilibrio	Humedad equilibrio	$a_w$
MgCl <sub>2</sub>	1	9,8003	1,0035	10,8944	0,1348	0,333
MgCl <sub>2</sub>	2	9,7721	1,035	10,8972	0,1314	
MgCl <sub>2</sub>	3	9,0800	1,0058	10,1799	0,1382	
CH <sub>3</sub> COOH	1	9,5623	1,005	10,6254	0,1010	0,234
CH <sub>3</sub> COOH	2	9,6830	1,0127	10,7542	0,1009	
CH <sub>3</sub> COOH	3	9,7783	1,0228	10,8537	0,0943	
LiCl	1	9,8384	1,0133	10,8522	0,0413	0,113
LiCl	2	9,8152	1,0096	10,8239	0,0399	
LiCl	3	9,4874	1,0221	10,511	0,0423	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1	9,4597	1,0177	10,5246	0,0891	0,432
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2	9,6902	1,0026	10,7345	0,0841	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	3	9,6333	1,0032	10,6813	0,0873	
KCl	1	9,6390	1,1347	11,1457	0,3820	0,859
KCl	2	9,4670	1,1868	11,0317	0,3722	
KCl	3	9,4341	1,0028	10,752	0,3678	
NaCl	1	9,7444	1,0156	10,939	0,2242	0,756
NaCl	2	9,7122	1,0219	10,9262	0,2365	
NaCl	3	9,5507	1,0019	10,7314	0,2265	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1	9,4198	1,0023	10,5192	0,1416	0,559
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2	9,1207	1,0286	10,2505	0,1432	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3	9,0064	1,0032	10,1086	0,1435	
CuCl <sub>2</sub>	1	9,6459	1,0133	10,8251	0,2112	0,649
CuCl <sub>2</sub>	2	9,7339	1,002	10,9088	0,2204	
CuCl <sub>2</sub>	3	9,8356	1,0019	11,0058	0,2156	

$a_w$	Xe (media)
0,113	0,1160
0,234	0,0987
0,333	0,1348
0,432	0,0868
0,559	0,1428
0,649	0,2157
0,756	0,2291
0,859	0,3740

Isoterma de sorción a 25°C

Sal	Repetición	Peso capsula	Peso muestra	Peso equilibrio	Humedad equilibrio	$a_w$
MgCl <sub>2</sub>	1	8,4015	1,0116	9,4249	0,0529	0,328
MgCl <sub>2</sub>	2	9,7748	0,9873	10,7643	0,0431	
MgCl <sub>2</sub>	3	10,5812	1,01004	11,5723	0,0480	
CH <sub>3</sub> COOH	1	9,6334	1,0186	10,6483	0,0370	0,234
CH <sub>3</sub> COOH	2	8,6334	1,0186	9,8169	0,0380	
CH <sub>3</sub> COOH	3	10,226	1,0017	11,2257	0,0387	
LiCl	1	7,9195	1,0041	8,9038	0,0203	0,113
LiCl	2	8,0044	0,9917	8,9768	0,0205	
LiCl	3	8,4242	0,9991	9,4028	0,0194	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1	10,5936	0,996	11,6294	0,0623	0,432
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2	7,6954	1,0014	8,7169	0,0617	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	3	8,1225	0,9912	9,1367	0,0650	
KCl	1	7,7323	1,0023	9,0123	0,3292	0,843
KCl	2	8,0549	1,0224	9,3715	0,3403	
KCl	3	8,4522	1,0081	9,7448	0,3345	
NaCl	1	7,876	0,9818	8,9979	0,1893	0,756
NaCl	2	7,6867	0,9926	8,8273	0,1960	
NaCl	3	8,0061	1,0163	9,167	0,1889	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1	8,4221	0,9977	9,4657	0,0887	0,529
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2	7,7232	0,997	8,7646	0,0871	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3	9,6826	0,9922	10,7274	0,0960	
CuCl <sub>2</sub>	1	9,1262	1,0109	10,2216	0,1430	0,649
CuCl <sub>2</sub>	2	7,9646	1,0044	9,067	0,1424	
CuCl <sub>2</sub>	3	8,2567	1,0185	9,3779	0,1457	

$a_w$	Xe (media)
0,113	0,0201
0,234	0,0379
0,328	0,0480
0,432	0,0630
0,529	0,0906
0,649	0,1437
0,756	0,1914
0,843	0,3347

. Isoterma de sorción a 35°C

Sal	Repetición	Peso capsula	Peso muestra	Peso equilibrio	Humedad equilibrio	$a_w$
MgCl <sub>2</sub>	1	9,5659	1,0080	10,5890	0,0564	0,321
MgCl <sub>2</sub>	2	9,0691	1,0458	10,1336	0,0594	
MgCl <sub>2</sub>	3	9,8255	1,0059	10,8485	0,0585	
CH <sub>3</sub> COOH	1	9,5119	1,0243	10,5660	0,0711	0,234
CH <sub>3</sub> COOH	2	9,6864	1,0409	10,7602	0,0737	
CH <sub>3</sub> COOH	3	9,5895	1,0007	10,6211	0,0729	
LiCl	1	9,7840	1,0552	10,8570	0,0584	0,113
LiCl	2	9,6672	1,0099	10,6977	0,0620	
LiCl	3	9,8053	1,0031	10,8272	0,0603	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1	8,3090	1,0479	9,3966	0,0802	0,436
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2	9,5895	1,0007	10,6308	0,0830	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	3	9,6846	1,0150	10,7390	0,0812	
KCl	1	8,3240	1,0214	9,6171	0,3177	0,83
KCl	2	8,0931	1,0081	9,3716	0,3200	
KCl	3	8,1918	1,0902	9,5756	0,3211	
NaCl	1	10,0881	1,0092	11,2581	0,2066	0,756
NaCl	2	8,0513	1,0088	9,2259	0,2119	
NaCl	3	9,6411	1,0047	10,8128	0,2138	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1	8,3506	1,0155	9,4444	0,1211	0,499
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2	7,9769	1,0263	9,0825	0,1212	
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3	8,3566	1,0021	9,4373	0,1224	
CuCl <sub>2</sub>	1	8,3737	0,9962	9,4999	0,1766	0,618



CuCl <sub>2</sub>	2	10,3690	1,0039	11,5050	0,1778	
CuCl <sub>2</sub>	3	8,2095	1,0067	9,3458	0,1748	

$a_w$	Xe (media)
0,113	0,0681
0,234	0,0726
0,321	0,0581
0,436	0,0815
0,499	0,1216
0,559	0,1428
0,618	0,1764
0,756	0,2108

Ajuste de los datos a los modelos de isotermas de sorción de GAB y BET

<b>GAB</b>			
<b>Temperatura °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>35 °C</b>
Xm	0,076	0,0384	0,0635
C	6,72x10 <sup>42</sup>	1,75x10 <sup>45</sup>	31591
K	0,92209	1,051	0,946
R <sup>2</sup>	0,928	0,982	0,895
<b>BET</b>			
Xm	0,058	0,055	0,056
C	-1,52x10 <sup>45</sup>	-7,65x10 <sup>42</sup>	31128
R <sup>2</sup>	0,848	0,996	0,886

Los valores de humedad de la monocapa (Xm) por el modelo de GAB fueron 0,076, 0,0384 y 0,0635 g H<sub>2</sub>O/g SS a las temperaturas de 15, 25 y 35 °C, respectivamente; los valores de Xm obtenidos a través del modelo de BET fueron 0,058, 0,055 y 0,056 g H<sub>2</sub>O/g SS a las temperaturas de 15, 25 y 35 °C. Se presentó mayor homogeneidad de Xm a través del modelo de BET. Como era de esperarse se presentó un mayor ajuste de los datos por el modelo de GAB, se conoce que el modelo de GAB presenta buenos ajustes en un intervalo mayor de  $a_w$  ( $0 < a_w < 0,95$ ) y que el modelo de BET presenta buenos ajustes entre  $0 < a_w < 0,55$ .

Los valores de  $X_w$  de los aglomerados de mezclas de polvos de fresa SD en los almacenamientos a 15 y 25°C al sexto mes presentaron valores inferiores al valor de  $X_m$ , lo que representa una alta estabilidad del producto ya que esta humedad se encuentra ligada y no participa en reacciones de deterioro. El almacenamiento a 35°C presentó una  $X_w$  inferior a la  $X_m$  hasta el quinto mes, ya para el sexto mes los valores son muy similares y puede iniciar procesos de deterioro debido a la presencia de agua no ligada. Esta observación concuerda con el inicio de procesos de transición de fase de segundo orden a partir de quinto mes donde se evidenció el fenómeno de apelmazamiento y deterioro en el color del material.

## ANEXO 4

### Datos de estabilidad durante el almacenamiento

$X_w$

15°C	25°C	35°C
3,10	3,10	3,10
3,04	3,57	3,75
3,26	3,64	4,07
3,52	4,05	5,50
3,81	4,20	5,52
4,60	4,44	5,65
4,79	4,48	6,23

$a_w$

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	0,260	0,260	0,260
30	0,280	0,263	0,278
60	0,303	0,268	0,278
90	0,308	0,269	0,298
120	0,315	0,275	0,303
150	0,327	0,283	0,337
180	0,350	0,297	0,361

$\rho_b$

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	0,38	0,38	0,38
30	0,387	0,39	0,393
60	0,389	0,39	0,4
90	0,392	0,4	0,4
120	0,395	0,4	0,41
150	0,395	0,4	0,41
180	0,401	0,41	0,42

$\rho_c$

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	0,46	0,46	0,46
30	0,47	0,47	0,471
60	0,473	0,481	0,482
90	0,48	0,492	0,48
120	0,48	0,49	0,5

150	0,485	0,5	0,498
180	0,5	0,5	0,51

**CI(%)**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	17,39	17,39	17,39
30	17,66	17,02	16,56
60	17,76	18,92	17,01
90	18,33	18,70	16,67
120	17,71	18,37	18,00
150	18,56	20,00	17,67
180	19,80	18,00	17,65

**HI**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	1,211	1,211	1,211
30	1,214	1,205	1,198
60	1,216	1,233	1,205
90	1,224	1,230	1,200
120	1,215	1,225	1,220
150	1,228	1,250	1,215
180	1,247	1,220	1,214

**S**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	89,95	89,95	89,95
30	89,94	89,81	91,87
60	89,67	90,07	92,56
90	89,29	91,51	92,80
120	89,93	91,62	92,01
150	89,48	91,52	88,93
180	88,81	91,67	86,00

**Hu**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	3,12	3,12	3,12
30	3,52	3,39	3,35
60	3,86	3,84	3,91
90	4,08	3,96	3,86
120	4,01	3,93	3,95
150	3,96	3,84	
180	4,01	3,92	

**ABTS**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	1284,49	1284,49	1284,49
30	1253,30	1294,52	1246,40
60	1206,38	1269,46	1204,31
90	1160,49	1193,21	1162,00
120	1124,02	1137,03	1098,39
150	838,03	931,64	960,61
180	692,77	707,26	619,64

**DPPH**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	1236,49	1256,56	1296,37
30	1159,50	1060,82	1050,82
60	960,82	956,57	926,41
90	917,77	880,19	882,04
120	858,53	775,27	789,77
150	745,19	727,26	727,58
180	663,28	695,72	706,45

**FT**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	1469,02	1469,02	1469,02
30	1382,46	1425,24	1372,47
60	1307,54	1349,05	1337,70
90	1269,46	1249,05	1287,75

120	1239,67	1248,43	1265,35
150	1153,95	1197,51	1238,56
180	1061,00	1161,09	1223,29

**AR**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	5,71	5,71	5,71
30	5,20	5,52	5,19
60	5,17	5,34	4,86
90	4,68	4,53	4,63
120	4,23	4,16	4,16
150	4,16	4,16	4,16
180	4,04	4,10	4,16

**Hy**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	14,42	14,42	14,42
30	13,34	13,58	13,36
60	13,49	13,32	12,75
90	13,17	12,92	11,94
120	12,49	13,05	11,41
150	12,03	12,63	9,84
180	12,06	12,35	10,34

**L**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	42,22	42,22	42,22
30	41,66	41,95	40,50
60	42,70	42,56	44,23
90	44,82	42,26	44,30
120	43,23	43,42	45,54
150	44,98	45,45	47,79
180	46,03	49,98	53,01

**a\***

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	29,99	29,99	29,99
30	29,89	29,79	29,89
60	29,86	29,11	27,85
90	29,71	28,53	24,41
120	29,90	28,36	24,45
150	30,38	28,68	20,92
180	30,93	28,80	21,04

**b\***

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	21,45	21,45	21,45
30	20,53	20,26	20,28
60	20,52	20,23	20,04
90	21,19	20,13	19,95
120	20,61	19,94	20,01
150	21,13	19,96	20,46
180	21,59	22,77	24,15

**Vit C**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	481,70	456,59	434,29
30	430,16	401,00	319,16
60	418,15	395,66	288,34
90	407,07	383,17	277,49
120	308,56	308,83	200,00
150	298,45	289,63	158,50
180	226,45	209,38	168,74

**Antocianinas**

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	61,2	63,63	65,19
30	53,93	57,53	50,82
60	51,8	54,205	47,345
90	49,67	50,88	43,87

120	49,12	50,84	33,11
150	45,15	45,36	31,7
180	37,96	37,96	25,52

**D** [3;2]

Tiempo	15°C	25°C	35°C
0	54,8	54,8	54,8
30	55,0	54,9	55,1
60	54,4	54,5	55,1
90	53,3	54,4	54,5
120	53,2	54,7	54,7
150	53,5	55,8	
180	52,3	56,3	