

**OBTENCION DE ZAPOTE (*Calocarpum
sapota Merr*) EN POLVO MEDIANTE DOS
TIPOS DE ENCAPSULANTES A NIVEL
PILOTO**



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

OSCAR JAVIER MENDOZA PALENCIA

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
BERÁSTEGUI, 2020**

**OBTENCION DE ZAPOTE (*Calocarpum sapota* Merr) EN POLVO MEDIANTE
DOS TIPOS DE ENCAPSULANTES A NIVEL PILOTO**

OSCAR JAVIER MENDOZA PALENCIA

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
MAGÍSTER EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

Director:

OMAR ANDRES PEREZ SIERRA, PH.D

Codirector (a)

EVERALDO MONTES MONTES

Línea de Investigación:

INGENIERIA

Grupo de Investigación:

GIPPAL

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
MONTERÍA, 2020**



Universidad de Córdoba
Facultad de ingenierías
Departamento de Ingeniería de Alimentos
Maestría en Ciencias Agroalimentarias



Los derechos sobre los textos y las imágenes incluidas en este trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor y no necesariamente reflejan el pensamiento de la Universidad de Córdoba.

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto será del autor.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del Consejo Superior de la Universidad de Córdoba.



Universidad de Córdoba
Facultad de ingenierías
Departamento de Ingeniería de Alimentos
Maestría en Ciencias Agroalimentarias



NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Jurado

Firma del Jurado



Universidad de Córdoba
Facultad de ingenierías
Departamento de Ingeniería de Alimentos
Maestría en Ciencias Agroalimentarias



La culminación de este trabajo la dedico a mi incansable esposa Lina Marcela Oviedo, a mis padres, demás familiares y en general a todas aquellas personas que sabían que este momento llegaría.



Universidad de Córdoba
Facultad de ingenierías
Departamento de Ingeniería de Alimentos
Maestría en Ciencias Agroalimentarias
AGRADECIMIENTOS



Agradezco a Dios, a mis tutores y demás docentes, al Doctor Fabián Ortega y a mi esposa por su incondicional apoyo, a los Ingenieros Darío Martínez, Andrés Chávez y Francisco Castellanos y todos aquellos que de una u otra forma aportaron su grano de arena para este gran logro en mi vida.

A los Ingenieros Sindy, David y Teófilo.



TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE ANEXOS	12
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT	16
1. INTRODUCCIÓN	18
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1 El Zapote	20
2.2 El proceso de microencapsulación	22
2.2.1 Microencapsulado mediante secado por aspersión	23
2.2.2 La maltodextrina (MD)	24
2.2.3 La goma arábica (GA)	25
2.3 El secado por aspersión.....	25
2.3.1 Elementos básicos de un sistema de atomización	27
2.4 Caracterización de polvos	28
2.4.1 Ángulo de reposo	28
2.4.2 Densidad aparente	29
2.4.3 Porcentaje compresibilidad o índice de Carr	29
2.4.4 Eficiencia de la Microencapsulación	30
2.4.5 Isotermas de sorción.....	30
3. OBJETIVOS	33
3.1 General	33
3.2 Específicos	33



4. MATERIALES Y MÉTODOS	34
4.1 Evaluación de los parámetros reológicos del jugo de zapote puro y mezclado con maltodextrina y goma arábica.....	34
4.1.1 Preparación de la pulpa de zapote	34
4.1.2 Caracterización fisicoquímica de la pulpa integral de zapote	34
4.1.3 Determinación de los parámetros reológicos	34
4.1.4 Determinación de una dilución adecuada (mezcla pulpa-encapsulante:agua)	35
4.2 Obtención de las mejores condiciones de secado	35
4.2.1 Adecuación de la materia prima.....	35
4.2.2 Adecuación de la muestra	36
4.2.3 Proceso de secado	36
4.2.4 Cálculo del rendimiento	37
4.2.5 Retención en la cámara	37
4.2.6 Cálculo de la solubilidad.....	37
4.2.7 Determinación de la humedad de los polvos.....	37
4.2.8 Determinación de la actividad acuosa a_w	38
4.2.9 Ángulo de reposo (β_{rep})	38
4.2.10 Densidad aparente	38
4.2.11 Porcentaje de compresibilidad o índice Carr	38
4.2.12 Higroscopicidad	39
4.2.13 Eficiencia de la microencapsulación	39
4.2.14 Análisis colorimétrico de los polvos y pulpa de zapote fresco	39
4.2.15 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	39
4.3 Prueba sensorial	40
4.3.1 Preparación de la muestra de jugo zapote fresco en leche	40
4.3.2 Adecuación de las muestras de jugo de zapote deshidratado en polvo reconstituido.....	40
4.4 Isotermas de adsorción.....	40
4.4.1 Ajuste de modelos de las isotermas de sorción.....	41
4.4.2 Propiedades termodinámicas derivadas de las isotermas de adsorción	41



5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	43
5.1 Caracterización fisicoquímica de la pulpa de Zapote	43
5.2 Determinación de los parámetros reológicos	43
5.3 Obtención de las mejores condiciones de secado	45
5.3.1 Evaluación del rendimiento y retención en cámara	48
5.3.2 Actividad acuosa a_w y humedad de los polvos	54
5.3.3 Angulo de reposo	55
5.3.4 Análisis de Solubilidad	55
5.3.5 Densidad aparente	58
5.3.6 Porcentaje de Compresibilidad (Índice de Carr)	61
5.3.7 Higroscopicidad	63
5.3.8 Eficiencia de la Microencapsulación	65
5.3.9 Color	67
5.3.10 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	71
5.4 Selección de la muestra de zapote en polvo microencapsulado con MD y GA, de mayor similitud sensorial con respecto a la pulpa de zapote fresco.	72
5.5 Isotermas de adsorción	74
5.6 Determinación de las propiedades termodinámicas derivadas de las isotermas de adsorción	77
6. CONCLUSIONES	78
7. RECOMENDACIONES	80
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nombres comunes y vernaculares de Pouteria Sapota.....	20
Tabla 2. Especificaciones de propiedades de flujo según el índice de Carr	29
Tabla 3. Modelos de isotermas	31
Tabla 4. Condiciones de operación del secado por aspersión.	36
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de zapote	43
Tabla 6. Parámetros reológicos de la ley de potencia para la pulpa de zapote a distintas concentraciones de encapsulantes.	45
Tabla 7. Porcentaje de tixotropía de la pulpa de zapote para cada concentración de encapsulante	45
Tabla 8. Valores de las variables respuestas utilizando MD.	46
Tabla 9. Valores de las variables respuestas utilizando MD	46
Tabla 10. Valores de las variables respuestas utilizando GA	47
Tabla 11. Valores de las variables respuestas utilizando GA.....	48
Tabla 12. Concentración final de Vitamina C en polvos con MD y GA	65
Tabla 13. Valores de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE de polvos de zapote microencapsulados.....	68
Tabla 14. Valores de los parámetros de color de la muestra patrón.....	69
Tabla 15. Tratamientos sometidos a prueba triangular (MD y GA).....	73
Tabla 16. Resultados prueba triangular para polvos microencapsulados.....	73
Tabla 17. Valores de actividad acuosa y humedad de equilibrio para polvos con MD..	74
Tabla 18. Parámetros del modelo de GAB para polvos con MD	74
Tabla 19. Parámetros de los modelos de Henderson y Oswin para polvos con MD.....	75
Tabla 20. Parámetros del modelo Peleg para polvos con MD.....	75
Tabla 21. Correlación entre ΔH y humedad de polvos de zapote, en base seca.....	77



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de ciclo abierto.....	26
Figura 2. Esquema de ciclo cerrado.....	26
Figura 3. Cámaras de secado con flujo en paralelo.	27
Figura 4. Cámara de secado con flujo en contracorriente	28
Figura 5. Reograma de la pulpa de zapote a distintas concentraciones de encapsulantes Maltodextrina (MD). Goma Arábica (GA). (0-30%).....	44
Figura 6. Superficie de respuesta % Rendimiento con GA.....	50
Figura 7. Superficie de respuesta % Rendimiento con MD	51
Figura 8. Superficie de respuesta de % Retención en cámara con GA	53
Figura 9. Superficie de respuesta de % Retención en cámara con MD.....	54
Figura 10. Superficie de respuesta de ángulo de reposo con MD.	55
Figura 11. Superficie de respuesta de la solubilidad con GA.	57
Figura 12. Gráfico de efectos principales para solubilidad con MD	58
Figura 13. Superficie de respuesta de la variable densidad aparente con GA.	60
Figura 14. Superficie de respuesta de la variable densidad aparente con MD.	61
Figura 15. Superficie de respuesta Índice de Carr con GA.	62
Figura 16. Superficie de respuesta Índice de Carr con MD.	63
Figura 17. Superficie de respuesta de la variable % de higroscopicidad con MD.....	64
Figura 18. Grafica de efectos principales sobre % retención de Vitamina C (GA)	66
Figura 19. Superficie de respuesta de la variable % Retención Vitamina C con MD. ...	67
Figura 20. Grafico efectos principales sobre la variable ΔE	69
Figura 21. Superficie de respuesta de Luminosidad L^* con GA y MD.	70
Figura 22. Superficie de respuesta de los parámetros a^* y b^* para polvos con GA y MD	71
Figura 23. SEM partículas de polvo de zapote con MD.....	72
Figura 24. SEM partículas de polvo de zapote con GA.....	72
Figura 25. Isotermas de polvo de zapote a las tres temperaturas de estudio, ajustadas al modelo de Oswin.	77
Figura 26. Relación de la humedad del polvo de zapote vs Entalpia de adsorción	77



LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Formato de prueba triangular.....	87
Anexo 2. Tabla Roesler et all. (1948).....	87
Anexo 3. Resultados de ANOVA para la variable rendimiento, GA y MD respectivamente	88
Anexo 4. Resultados de ANOVA para la variable retención en cámara, GA y MD respectivamente	88
Anexo 5. Resultados de ANOVA para la variable humedad, GA y MD respectivamente	89
Anexo 6. Resultados de ANOVA para la variable a_w , GA y MD respectivamente.....	90
Anexo 7. Resultados de ANOVA para la variable ángulo de reposo, GA y MD respectivamente	90
Anexo 8. Resultados de ANOVA para solubilidad, GA y MD respectivamente.....	91
Anexo 9. Resultados de ANOVA para variable densidad Bulk, GA y MD respectivamente	92
Anexo 10. Resultados de ANOVA para variable Índice de Carr, GA y MD respectivamente	92
Anexo 11. Resultados de ANOVA para variable Higroscopicidad, GA y MD respectivamente	93
Anexo 12. Resultados de ANOVA para variable % retención Vitamina C, GA y MD respectivamente	94
Anexo 13. Resultados de ANOVA para variable variación de color, GA y MD respectivamente	94
Anexo 14. Interacciones de los factores por cada variable respuesta con MD.....	95
Anexo 15. Interacciones de los factores por cada variable respuesta con GA	95
Anexo 16. Gráfico de interacciones para % de rendimiento para polvos con GA.....	96
Anexo 17. Gráfico de interacciones para % de Solubilidad para polvos con GA	96
Anexo 18. Gráfico de interacciones para % Compresibilidad para polvos con GA.....	96
Anexo 19. Gráfico de interacciones para % Higroscopicidad para polvos con MD.....	97



LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolo	Significado	Unidades
τ	Esfuerzo cortante	Dina·cm ⁻²
μ	Viscosidad aparente	Pa·s
K	Índice de consistencia	Pa·s ⁿ
γ	Gradiente de deformación	s ⁻¹
n	Índice de comportamiento al flujo	adimensional
T.E	Temperatura de aire de entrada	°C
V.A	Velocidad disco atomizador	RPM
C	Concentración de encapsulante	% p/p
R	Rendimiento	% p/p
R.C	Retención en cámara	% p/p
H	Humedad	% p/p
V_0	Volumen de polvo antes de compactación	cm ³
V_f	Volumen de polvo antes de compactación	cm ³
C_d	Cantidad de Vitamina C después de secado	mg
C_a	Cantidad de Vitamina C antes de secado	mg
β_{rep}	Angulo de reposo	(°)
a_w	Actividad acuosa	adimensional
S	Solubilidad	% p/p
D.A	Densidad aparente	g·cm ⁻³
%Comp	Porcentaje de compresibilidad	% p/p
Hig	Higroscopicidad	% p/p
R.V.C	Retención de vitamina C	% p/p
L^*	Luminosidad	-
a^*	Coordenada cromática rojo/verde	-
b^*	Coordenada cromática amarillo/azul	-
ΔE	Variación total del color	-
X_{eq}	Humedad de equilibrio	Kg agua·Kg ss ⁻¹
ΔS	Diferencial de entropía	KJ·K ⁻¹
ΔH	Diferencial de entalpía	KJ·mol ⁻¹
q_{st}	Calor neto isostérico de adsorción	KJ·mol ⁻¹
R	Constante de los gases ideales (0,4615)	KJ·Kg agua ⁻¹ ·K ⁻¹
E	Error relativo porcentual	%
R^2	Coefficiente de determinación estadístico	adimensional
SEM	Microscopia electrónica de barrido	-
MD	Maltodextrina	-
GA	Goma arábica	-



RESUMEN

El zapote, es un fruto caracterizado porque sus producciones son de patio casero, sin tecnología alguna, con una inadecuada manipulación en postcosecha y manejo técnico para este fin, sumado a esto, su alto contenido de agua lo hace un fruto susceptible a la descomposición por microorganismos, químicos y las reacciones enzimáticas, afectando la comercialización y exportación del fruto. Teniendo en cuenta lo anterior y considerando la creciente actividad de transformación de los productos del sector frutícola tropical en los países pertenecientes a esta zona, se hace necesario brindar alternativas de aprovechamiento agroindustrial, para garantizar nuevos espacios en los mercados internacionales.

Pocos estudios se conocen sobre conservación y aprovechamiento de la pulpa de zapote, uno de ellos es el reportado por Simanca y Negrete (1999) en el cual evalúan distintos métodos de conservación (pasteurización, edulcoración, conservantes químicos y concentración) sobre propiedades fisicoquímicas de la pulpa de zapote (misma variedad a la del presente estudio) y recomiendan en su investigación estudiar otro tipo de métodos de conservación para este fruto.

El siguiente trabajo de investigación tuvo como objetivo obtener pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr) en polvo con dos tipos de encapsulantes, a través de secado por atomización (spray drying). Se utilizó un diseño central compuesto 2^3 , de 20 tratamientos con 6 puntos centrales, para establecer el efecto de tres factores con tres niveles cada uno: temperatura de aire de secado (T.E), 190°C, 200°C y 210°C, velocidad del disco atomizador (V.A), con 20.000 RPM, 25.000 RPM y 30.000 RPM y concentración de encapsulante (C.E) en %p/p, Goma Arábica (GA) y Maltodextrina (MD), con niveles de 15% 22,5% y 30% respecto a la cantidad de pulpa fresca.

Antes del secado se midió el efecto de los encapsulantes, sobre el comportamiento reológico de la pulpa de zapote. Se realizaron ensayos de flujo en rampa continua a la pulpa de zapote con concentraciones de 15, 20, 25 y 30% (p/p) de cada encapsulante. Los datos de viscosidad aparente (Pa.s) se ajustaron al modelo de ley de potencia con $R^2 > 0,99406$. El análisis mostró que la pulpa de zapote gana pseudoplasticidad y tiene un comportamiento más viscoso a medida que aumenta la concentración de Maltodextrina o de Goma Arábica.



Para el proceso de secado, los datos obtenidos de las respuestas fueron analizados con el software Statgraphics Centurión, obteniendo para cada respuesta la tabla ANOVA con ($p > 0,05$), determinando así el efecto de las tres variables independientes sobre el porcentaje de humedad (p/p), porcentaje de retención en cámara (p/p), ángulo de reposo ($^{\circ}$), actividad acuosa (a_w), porcentaje de rendimiento (p/p), densidad aparente (g cm^{-3}), porcentaje de compresibilidad o Índice de Carr, higroscopicidad (% p/p), solubilidad en % p/p y para medir la eficiencia de la microencapsulación se determinó el porcentaje de retención de Vitamina C.

El análisis mostró que el porcentaje de retención de Vitamina C, el rendimiento y la solubilidad, aumentan conforme se incrementa la concentración de los encapsulantes

También se midió la variación del color de las muestras obtenidas mediante la determinación de los parámetros L^* , a^* y b^* , lo cual evidenció que a mayor contenido de microencapsulante mayor será la luminosidad de los polvos.

Las muestras de polvos fueron sometidas a análisis sensorial, prueba discriminativa triangular para identificar el tratamiento con el cual se obtienen polvos con características sensoriales similares al producto original, elaborado con pulpa de zapote fresco en leche. Resultando con esta prueba que el mejor tratamiento es el que se realizó con 22,5% de MD a 25000 rpm y 200 $^{\circ}\text{C}$, obteniéndose un producto en polvo con 73,15% de retención de Vitamina C, una de solubilidad del 90,45% y 45% de rendimiento de sólidos recuperados.

Ninguna de las muestras de polvo de zapote microencapsulados con GA pasó la prueba sensorial.

Se realizaron los ajustes de los modelos de GAB, Henderson, Oswin y Peleg a los valores de humedad de equilibrio (X_{eq}) y Actividad acuosa (a_w), teniendo en cuenta como parámetros estadísticos el coeficiente de regresión R^2 y el porcentaje de error relativo E, con los cuales se determinó que solo el modelo de Oswin se ajusta de manera adecuada a los datos experimentales de X_{eq} y a_w .

Palabras clave: Zapote, isotermas de sorción, spray drying, reología, microencapsulación.



ABSTRACT

Sapodilla, a fruit characterized by its production in backyards, no technology used, It also lacks of proper post harvest manipulation and technical management to this purpose, in addition to this, its high wáter content makes it a fruit vulnerable to decomposition by microorganisms, chemicals and enzymatic reactions, causing harm in its merchandising and export. Taking into consideration what was previously exposed and considering the growing transformation activity of the products of the tropical fruit sector in the countries belonging to this area, it is paramount to provide alternatives for agro-industrial use, to ensure new spaces in international markets.

Few studies are known about preservation and exploitation of Sapodilla pulp, one of them is reported by Simanca and Negrete (1999), in which they evaluate different conservation methods (pasteurization, sweetening, chemical preservatives and concentration) about physicochemical properties of Sapodilla pulp and they recommend to study other types of conservation methods for this fruit.

The main objective of the following research work is to obtain Sapodilla pulp (*Calocarpum sapota* Merr) in poder by using two types of encapsulants, through spray drying. It was used a compound central design 2^3 , out of 20 treatments with 6 central points, to stablish the effect of three factors with three levels each: Drying air temperatura (T.E), 190°C, 200°C y 210°C, spray disc speed (V.A), with 20.000 RPM, 25.000 RPM and 30.000 RPM and encapsulant concentration (C.E) en %p/p, Arabic Gum (GA) and Maltodextrin (MD), with levels of 15%, 22.5% and 30% regarding the quantity of fresh pulp.

Before drying it was measured the effect of encapsulants, over the reologic behavior of sapodilla pulp. Continuous ramp essays were carried out on Sapodilla pulp with 15, 20, 25, 30% (p/p) concentrations of each encapsulant. Apparent viscosity data (Pa.S) was adjusted to the power law model with $R^2 > 0.99406$. The analysis showed that sapodilla pulp gets seudoplasticity and has a more sticky behavior as maltodextrin or arabic gum increases.

For the drying process, the data obtained from the answers was analized with a software called Statgraphics Centurion, containing the ANOVA chart for every answer with ($p > 0,05$), determining the effect of the three independant variables on the percentage of humidity (p/p), chamber retention (%p/p), repose angle, wáter activity (a_w), %performance, Bulk density ($g\ cm^{-3}$), Carr index, higroscopicity (%),% solubility



and to measure the microencapsulation efficiency it was determined the vitamin C retention percentage.

The analysis showed that the vitamin c retention percentage, the performance and solubility, rise as the content of microencapsulants increase.

It was also measured the color changes of the samples obtained through parameters determination L^* a^* y b^* , which showed the higher concentration of microencapsulant the bigger the luminosity of the powders.

The samples of powders were put onto sensorial analysis, triangular discriminative test to identify the treatment to obtain powders with sensorial characteristics similar to the original product, made of fresh sapodilla pulp with milk. This test revealed that the best treatment was the one that was carried out with 22.5% MD at 25.000 rpm and 200°C, getting a powder product with 73,15% vitamin c retention, 90,45% solubility and 45% recovered solids performance.

None of the samples of encapsuled sapodilla powder with GA passed the sensorial test.

Adjusts to GAB models, Henderson, Oswin and Peleg were done to humidity of balance values (X_{eq}) and water activity (a_w), taking into consideration as statistic parameters the regression coefficient R^2 and relative error percentage E, which were used to determine that only Oswin Model can adjust in an appropriate way to the experimental data from X_{eq} and a_w .

Keywords: Sapodilla, sorption isotherms, spray drying, rheology, microencapsulation.



1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de productos alimenticios de larga vida útil, con buenas características de calidad, no solo microbiológica y sensorial si no también nutricional y funcional, han encaminado al sector agroindustrial al desarrollo de nuevos productos que cumplan a cabalidad con estas condiciones y permitir satisfacer un mercado que día a día se acrecienta y globaliza de manera exponencial. Este es el caso particular de las pulpas de frutas en polvo, las cuales con el transcurrir del tiempo son utilizadas con mayor frecuencia en la elaboración de otros productos alimenticios para generar mayor valor agregado en este.

Actualmente las frutas tropicales cultivadas en centro América y parte del sur del mismo continente, están siendo apetecidas por los mercados de otros continentes, en especial el Europeo, así como también en los mercados estadounidenses, como es el caso del zapote en polvo y deshidratado producido en Santo Domingo, República Dominicana, que según el Instituto de Innovación en Biotecnología e Industria (IIBI) es exportado desde el año 2013, hasta los destinos anteriormente mencionados para producción de helados y alimentos en hojuelas.

La conservación de alimentos, mediante métodos físicos en especial de las pulpas de fruta, representa una alternativa viable, si se considera que los hábitos de consumo de la población actual evita el consumo de alimentos conservados por métodos químicos, teniendo en cuenta las consecuencias que estos generan a mediano y largo plazo en la salud humana.

Las pulpas de fruta son alimentos muy perecederos, ya que son productos con alto contenido de humedad, característica que los hace más vulnerable al ataque microbiano y al deterioro propio de la maduración, es por ello que actualmente se vienen presentando alternativas de conservación mediante métodos físicos, como lo es el secado, ya sea por liofilización, por bandejas o por atomización, con los cuales se busca disminuir al máximo el contenido acuoso del producto hasta un rango de entre el 2,5 y el 4 % (p/p). Cabe anotar que este método no solo garantiza el aumento de la vida útil del producto y la aceptación en los mercados, sino que también genera otras ventajas a nivel industrial y económico, como el aprovechamiento de la producción de frutas en épocas de cosecha (disminución de pérdidas en postcosecha), la disminución de volumen en el almacenamiento y transporte, estas dos últimas son ventajas muy importantes al momento de considerar exportar el producto a otros países y/o continentes.

Si bien es cierto las pulpas de fruta sometidas a procesos de secado contienen compuestos volátiles, entre los que se destacan algunos antioxidantes como las vitaminas A y C, sabores y aromas, que son eliminados en el proceso debido a la naturaleza del mismo al utilizar altas temperaturas, como es el caso del secado por aspersión, una estrategia para contrarrestar la pérdida de estos compuestos debido a la exposición a las altas temperaturas es la utilización de agentes microencapsulantes en el proceso, como la MD y la GA, los cuales aparte de esto, también son utilizados para mejorar otros parámetros de calidad de los polvos obtenidos, como el rendimiento, la solubilidad y disminuir la higroscopicidad y la retención en la cámara de secado, ya que los encapsulantes aumentan la temperatura de transición vítrea Hernández (2011), evitando el apelmazamiento por el alto contenido de azúcares de la pulpa.

Existen muchas técnicas de microencapsulación en alimentos, como lo son: secado por aspersión, extrusión, recubrimiento por aspersión, coacervación simple, coacervación compleja, y atrapamiento en liposomas, entre otros (Lopretti et al. 2007).

En este trabajo, se obtendrá un producto de zapote en polvo microencapsulado con MD y GA, mediante la técnica de secado por aspersión a nivel piloto. Con esta investigación se busca realizar un aporte significativo en la búsqueda de alternativas de aprovechamiento agroindustrial y de generación de valor agregado de un producto con características promisorias de agroindustrialización en el departamento de Córdoba, como lo es el zapote.



2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Zapote

El zapote (*Calocarpum sapota*) Merr, es miembro de la familia de las Sapotaceae y es comúnmente conocido taxonómicamente como *Pouteria Sapota* (Jacquin) H.E. Moore & Stearn, aunque también posee una gran cantidad de sinónimos como: *Sideroxylum sapota* Jacquin, Enum. Pl. Carib. 15. 1760.

Achras zapota Linnaeus, Sp. pl. 2: 1190. 1753.

Achras zapota major Jacquin, Select. Stirp. amer. hist. 56, 1753.

Achras mammosa Linnaeus, Sp. pl. ed. 1: 469. 1762.

Calospermum mammosum (Linnaeus) Pierre, Not. Bot. 13. 1860.

Calocarpum mammosum (Linnaeus) Pierre in Pierre & Urban, Symb.

Antill. : 99. 1904.

Pouteria mammosa (Linnaeus) Cronquist. Lloydia 9: 287. 1946 (Azurdia 2006)

Tabla 1. Nombres comunes y vernaculares de *Pouteria Sapota*

País	Nombre comun/ vernacular
Alemania	Marmalenfrucht, Grosse Sapote
Belice	mamey apple
Colombia	mamey, zapote
Costa Rica	zapote, zapote rojo, zapote colorado, mamey, mamey zapote
Cuba	mamey colorado
Dinamarca	sapote, breiapfel, mammiapfel
Ecuador	mamey mata serrana
España	sapote, zapote, mamey colorado, mamey zapote
Estados Unidos	mamey sapote, sapote
Francia	sapote, abricot des antilles
Guatemala	zapote, tulul (todas las lenguas mayas), zapote de montaña
Haití	grand sapotillier
Holanda	brijappel, mameesapote, mammi-appel, <i>sapota</i> , sapote
Honduras	zapote, zapote rojo, curu (paya), zabuti (garifuna), mame apple

(inglés de las islas de la Bahía)	
R. U	sapote, chocolate pudding fruit, mamey-sapote, mammee, marmalade plum, mexican custard apple, naseberry
Jamaica	mammee <i>sapota</i>
Mexico	mamey, zapote mamey, mamey colorado, atzapotlcuahuitl (nahuatl), haaz, chacal-haaz (maya, yucatán), ca-ac, potkak (mixe, Oaxaca), cuyg'auac (popoluca, Veracruz), guela-gue, gundashuno, guendaxina, gueto-gue, guixron (zapoteco, Oaxaca), uacusiuruata, huacuz (tarasco, michoacán), lichucut-ja-ca (totonaco, Veracruz), bolom, bolom-itaht (huasteco, San Luis Potosí), taquisapane (zoque, Chiapas), tezonzapote (nahuatl), taspas sabani (zoque), cahog (mixe, Oaxaca), quahutzapotl (nahuatl, Veracruz).
Nicaragua	sapote, sapote rojo, sapote colorado, sapote real, sapote lechoso, sapote liso, sapote grande, sapote negro, sapote isleño, mammy tree, sepul, kuri
Panamá	mamey de tierra

Fuente: (Azurdia 2006)

El fruto es una baya, globosa o elipsoide, hasta 20 cm de largo, ápice agudo u obtuso, base aguda o truncada, epicarpio o cáscara rugosa y escamosa de color café claro, pulpa o mesocarpio carnoso de diferentes colores, desde café oscuro hasta ligeramente rosado, siendo lo más común rojizo, algunas veces de color amarillo intenso; pulpa suave y dulce, algunas veces lechosa, con suave y delicado aroma y sabor característico; el contenido de fibra varía de alto a bajo, según sea el material genético (Azurdia 2006). Respecto al peso del fruto, existen variedades desde los 250 g en adelante (Morera 1992).

La pulpa de zapote contiene niveles de vitamina A, similares a los de la zanahoria, los niveles de proteína son comparables a los del aguacate. El zapote supera a la zanahoria y al aguacate en niveles de carbohidratos, calcio, hierro y ácido ascórbico (Azurdia 2006).

Los análisis químicos muestran que por 100 g de pulpa de zapote se obtienen 65.6% de agua, 1.7 g de proteínas, 0.4 g de grasa, 31.1 g de carbohidratos, 2 g de fibras, 1.2 g de cenizas, 40 mg de calcio, 28 mg de fósforo, 1 mg de hierro, 115 mg de vitamina A, 0.01 mg de tiamina, 0.02 mg de riboflavina, 2 mg de niacina y 22 mg de ácido ascórbico (Morera 1992).

Azurdia (2006), cita a Donadio y Durigan (1995), los cuales manifiestan en su investigación, que este fruto se puede encontrar como especie introducida en Colombia, Venezuela, Ecuador, Cuba, República Dominicana, La Florida, Puerto Rico, Hawái, Filipinas, Malasia y más recientemente se han hecho ensayos exitosos en São Paulo, Brasil.

Gaona et al. (2007) señalan en su investigación, que los aspectos más estudiados en esta especie se han enfocado a su propagación vegetativa, crecimiento del fruto y evaluación de la maduración postcosecha de los frutos, tecnologías de postcosecha como: refrigeración, atmósferas modificadas y controladas aceleradores o inhibidores de su maduración, así como el control de plagas cuarentenarias que restringen la comercialización del fruto en fresco, pero muy poco se ha investigado sobre nuevas tecnologías de transformación o propuestas de aprovechamiento agroindustrial de este fruto, Morera (1992) reportó que su uso, solo se limitaba al consumo como fruta fresca y en algunos casos la pulpa solía ser usada para hacer jaleas o conservas, helados y jugos, así como también que la pulpa usualmente cocinada puede constituir un sustituto aceptable de la salsa de manzana o usarse en pastelería, aunque Azurdia (2006) reporta la obtención de pulpa deshidratada de zapote, mediante secado por bandejas de malla en secadores tipo túnel de aire forzado, en Guatemala.

Desde el punto de vista industrial la pulpa de zapote presenta un comportamiento pseudoplástico, lo cual es un comportamiento favorable, ya que facilita el flujo de la pulpa y el intercambio de calor durante el procesamiento térmico, debido a que una disminución de la viscosidad aparente ocasiona una menor pérdida de carga durante el flujo, dando como resultado una menor demanda de energía para su procesamiento (Andrade et al. 2009).

2.2 El proceso de microencapsulación

Los procesos de encapsulación fueron desarrollados entre los años 1930 y 1940 por la Nacional Cash Register para la aplicación comercial de un tinte a partir de gelatina como agente encapsulante mediante un proceso de coacervación (Yáñez et al. 2002).

La encapsulación es un proceso mediante el cual ciertas sustancias bioactivas (sabores, vitaminas o aceites esenciales) son introducidas en una matriz o sistema pared con el objetivo de impedir su pérdida, para protegerlos de la reacción con otros compuestos presentes en el alimento o para impedir que sufran reacciones de oxidación debido a la luz o al oxígeno Yáñez et al. (2002), esta protege a los materiales encapsulados de factores como el calor y la humedad, permitiendo mantener su estabilidad y viabilidad, también se ha utilizado para mejorar el sabor y la estabilidad de medicamentos y como barrera contra malos olores y sabores. Ayuda, además, a que los materiales frágiles resistan las condiciones de procesamiento y empaquete mejorando sabor, aroma, estabilidad, valor nutritivo y apariencia (Villena et al. 2009).

Existen distintos métodos de microencapsulación, los cuales se agrupan en tres grandes grupos según el proceso involucrado:

Procesos Físicos: Secado por aspersión, extrusión y recubrimiento por aspersión.

Procesos Químicos: Coacervación simple, coacervación compleja y atrapamiento en liposomas.

Procesos Físico – Químicos: Polimerización interfacial e Inclusión molecular (Lopretti et al. 2007).

La selección del método de encapsulación estará en función del tamaño medio de la partícula requerida, de las propiedades físicas del agente encapsulante, de la sustancia a encapsular, de las aplicaciones del material encapsulado propuesto, del mecanismo de liberación deseado y del coste (Villena et al. 2009).

Un hecho destacable del proceso de microencapsulación radica en que su aplicación no se limita únicamente al campo de las sustancias biológicas o medicamentos, sino que se extiende a campos tan diversos como la agricultura, la cosmética y la alimentación, así como a diversas áreas industriales (Lopretti et al. 2007).

Pedroza (2002) cita a Lumdubwong (2001) quien describe que cuando se usan polisacáridos como agentes encapsulantes, como en el secado por aspersión, también deben revisarse detalladamente sus propiedades funcionales. Por ejemplo, las maltodextrinas se usan en combinación con goma arábica para contribuir en la continuidad estructural durante la formación de la película encapsulante, al combinar dos compuestos de muy diferente peso molecular (aproximadamente 1800 y 1700000 respectivamente) mejorando con ello la eficiencia de encapsulación de aceites, aún de bajo peso molecular.

Los encapsulantes o materiales formadores de pared más utilizados para este método han sido: Carbohidratos (almidón y derivados, maltodextrinas, jarabes de maíz, ciclodextrinas, carboximetilcelulosa y derivados); gomas (arábica, mezquite, alginato de sodio); lípidos (ceras, parafinas, grasas) y proteínas (gelatina, proteína de soya, caseinatos, suero de leche, zeína). Desde luego que el tipo de material encapsulante tendrá influencia en la estabilidad de la emulsión antes de secar, en el tamaño de partícula, en las propiedades de flujo, en las mecánicas y en la vida útil del material deshidratado (Pedroza 2002).

2.2.1 Microencapsulado mediante secado por aspersión

Los sólidos obtenidos a partir de jugos concentrados de frutas representan un interés comercial, esta forma física puede suministrarse para impartir color y sabor a alimentos y productos farmacéuticos, sin embargo, la alta higroscopicidad y naturaleza termoplástica de los polvos dan lugar a problemas como adhesión a las paredes del secador, difícil manejo, apelmazamiento debido a que todos los jugos de fruta contienen azúcares y este contenido de azúcares hace extremadamente difícil secar jugos de frutas puro en una operación continua (Yanza 2003).

Lopretti et al. (2007) manifiesta que el secado por aspersión es un método ampliamente utilizado en la industria alimenticia, ya que es un método efectivo y económico para la protección de materiales. La técnica se basa en la utilización de acarreadores (ejemplo, maltodextrinas, goma, almidones modificados) y su homogenización con el material a encapsular. La mezcla luego se introduce en un secador por aspersión, dentro del cual circula aire caliente (150 a 200 °C) capaz de suministrar la temperatura de vaporización necesaria para eliminar el disolvente del material de cubierta, con lo que se obtiene el producto microencapsulado.

Por definición, el secado por aspersión corresponde a la transformación de un fluido en un material sólido, atomizándolo en forma de gotas minúsculas en un medio de secado en caliente. La distribución del tamaño de las partículas obtenidas por este método es en general menor a 100 μm , aunque hay que destacar que ello depende de las condiciones del proceso. La adecuada selección del atomizador y el agente encapsulante, son factores críticos. Una de las grandes ventajas de este proceso, además de su simplicidad, es que es apropiado para materiales sensibles al calor, ya que el tiempo de exposición a temperaturas elevadas es muy corto (5 a 30 s) (Pedroza 2002).

Actualmente muchos productos alimenticios se han sometido a esta técnica de deshidratación con resultados muy favorables, como por ejemplo, como producto alimenticio en polvo a base de lactosuero y pulpa de Mango (Mendoza, 2015), jugo probiótico fermentado no lácteo (Alves et al. 2016), Borojón (Rodríguez-Bernal et al. 2015), extractos bioactivos de piel de naranja (Sormoli y Langrish, 2016), pigmentos de Flexirrubina (Kulandaysami et al. 2016) y jugo de Jussara probiótico (Paim et al. 2016) entre otros

2.2.2 La maltodextrina (MD)

La Maltodextrina es un polímero obtenido de la hidrólisis parcial del almidón. Comercialmente presenta distintos grados de polimerización medidos mediante un nivel equivalente de dextrosa (ED) (normalmente entre 2 y 20), dicho nivel genera un efecto significativo sobre las características finales de los microencapsulados (Dokic et al., 2004; Chang et al., 2016).

Químicamente se compone de unidades de D-glucosa unidas con enlaces $\alpha(1-4)$ y con un bajo número de enlaces $\alpha(1,6)$ en posición aleatoria (Lopera Et al., 2009; Mendoza 2015).

Con frecuencia la Maltodextrina es utilizada como agente encapsulante en la obtención de polvos mediante secado por aspersión, esto se debe a su bajo costo, buena solubilidad, aroma y sabor neutros, baja viscosidad a altas concentraciones y baja capacidad emulsionante, (Madene et al., 2006; Chang et al., 2016).

La maltodextrina se utiliza en productos alimenticios difíciles de secar, como los jugos de frutas, aromas y edulcorante, para reducir los problemas de aglomeración durante el almacenamiento, con lo que mejora la estabilidad del producto (Gabas Et al.,2007; Mendoza 2105).

Múltiples trabajos han reportado la obtención de productos alimenticios en polvo, utilizando Maltodextrina como microencapsulante: Pulpa de Mango (Mendoza 2015), pulpa de Guayaba (Shishir et al. 2014), Mora negra (Fazaeli et al. 2012), extracto de Orujo de Cereza (Gadelha et al. 2009) entre otros.

2.2.3 La goma arábica (GA)

La goma arábica es un agente emulsionante extremadamente importante y comúnmente empleado que mantiene su función eficaz en diferentes condiciones, es una mezcla compleja de polisacáridos naturales compuesta por tres componentes que difieren en tamaño molecular y contenido de proteínas. Estos se conocen comúnmente como arabinogalactanos (AG), proteínas de arabinogalactanos (AGP) y glucoproteínas (GP) (Hosseini et al. 2015).

Actualmente es extraída y pulverizada con procesos limpios, a partir de diversas especies de acacia, predominando las especies Senegal y Seyal. Esta goma ha sido evaluada y reconocida como aditivo alimentario por el Equipo de Expertos del Comité Aditivos Alimentarios –JECFA- del Codex Alimentarius (Lopera et al. 2009)

Este polisacárido es una cadena ramificada, con un peso molecular que puede variar de 47.000 a 3.000.000 g mol⁻¹ Lopera et al. (2009) y al igual que la maltodextrina, también es muy utilizada como agente de pared para microencapsular materiales alimenticios en polvo obtenidos mediante secado por aspersión, que tienen un alto contenido de compuestos funcionales responsables de su gran valor nutricional

Muchos investigadores han reportado la obtención de pulpas de frutas y otros alimentos en polvo microencapsulados con GA, como por ejemplo pulpa de mango (Cano-Chauca et al. 2005), Tamarindo (Bhusary et al. 2014), Borojó (Rodríguez-Bernal et al. 2015) y en algunas casos mezclada con Maltodextrina, como es el caso del aceite de Linaza microencapsulado (Carneiro et al 2013) y Oleoresina de Nigella Sativa (Edris et al. 2016).

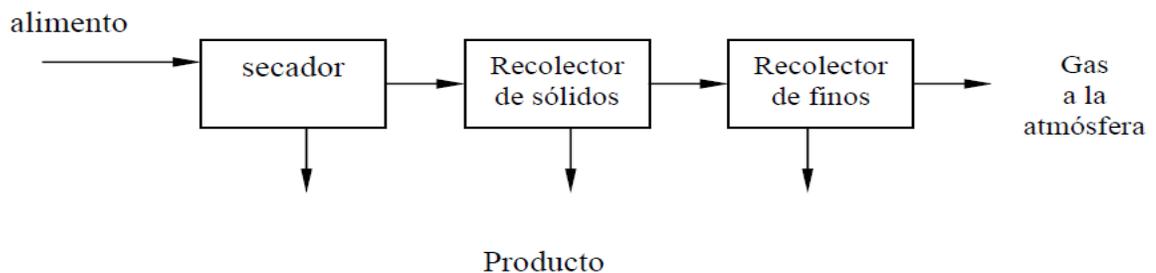
2.3 El secado por aspersión

López (2010) manifiesta en su trabajo que el principio del secado por aspersión es la producción polvos secos por medio de la atomización de una dispersión o emulsión en una corriente de aire caliente en una cámara de secado. Evaporándose el agua de manera instantánea, permitiendo que el material activo presente en la alimentación,

quede atrapado dentro de una película de material encapsulante, formándose partículas de geometría esférica, con aspecto de esferillas huecas con un diámetro que puede estar entre los 20 μm y hasta los 200 μm .

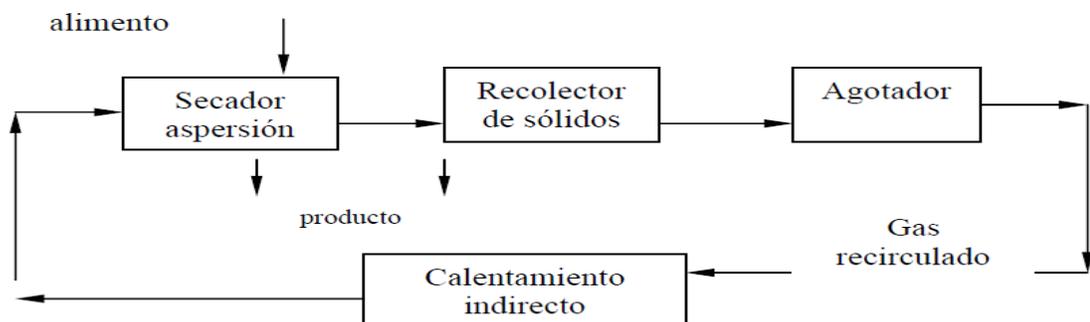
Específicamente esta técnica de secado se ha utilizado ampliamente para la producción comercial de frutos secos y verduras. Los frutos secos por pulverización tienen una buena característica reconstitucional, actividad de agua baja y son adecuados para el transporte y almacenamiento; además, es un proceso muy apropiado para componentes sensibles al calor tales como los carotenoides (Tuyen et al. 2010).

El secado es controlado por medio del producto y las condiciones del aire a la entrada (flujo y temperatura). Finalmente, el producto es recuperado del aire. El secador por aspersión más común es el de ciclo abierto (Fig. 1), este sistema tiene entrada continua de aire que es calentado y usado como medio secante, limpiado por medio de ciclones o agotadores y luego liberado al ambiente. Un segundo tipo es el de ciclo cerrado (Fig. 2), donde el aire es calentado, usado como agente secante, limpiado, secado y de nuevo usado. La eficiencia energética de este tipo de secador es más alta que el de ciclo abierto (Masters 1991).



Fuente: (Yanza 2003)

Figura 1. Esquema de ciclo abierto



Fuente: (Yanza 2003)

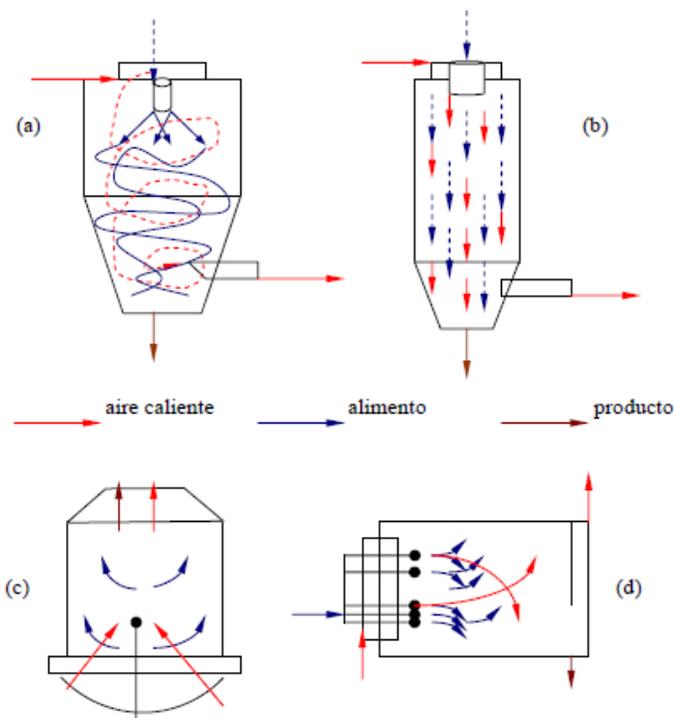
Figura 2. Esquema de ciclo cerrado

2.3.1 Elementos básicos de un sistema de atomización

Básicamente un sistema de atomización tiene cinco elementos esenciales: un calentador de aire, una cámara de secado, un dispositivo para dispersar el material que se va a secar (boquilla), una bomba para impulsar el líquido hacia la cámara de secado y un sistema de recolección de las partículas secas en el seno del aire (Ibarz 2000).

2.3.1.1 Cámaras de secado de flujo en paralelo

En las cámaras de secado de este tipo, tanto el atomizador como el flujo de aire están localizados en la cima o a un lado de la cámara. En la figura 3, los tipos (a) y (b) son los más comunes. El de tipo (a) tiene flujo de aire rotatorio e inclinado esto se logra por una entrada tangencial o por aspas inclinadas. El tipo (b) tiene línea de corriente inclinado, el aire no crea rotación por el uso de platos perforados o aspas rectas. El tipo (c) el aire debe prevenir que las partículas secas se asienten cuando el flujo está dirigido hacia arriba. El tipo (d) requiere flujo de aire opuesto que permite que las partículas secas caigan en la base de la cámara (Masters 1991).



Fuente: (Yanza 2003)

Figura 3. Cámaras de secado con flujo en paralelo.

2.3.1.2 Cámara de secado de flujo en contracorriente

En contracorriente el arreglo es inverso, por lo general el material se introduce por la cima y el gas caliente por la base de la cámara. El aire disperso crea varias rotaciones en la entrada a la cámara de secado pero debido a la altura de la cámara, el movimiento rotacional no puede sostenerse en regiones superiores de la cámara, como se muestra en la figura 4. Este diseño puede ser usado únicamente para materiales no sensibles al calor. Es menos común que el arreglo en paralelo, el uso del flujo en contracorriente puede ser necesario para impartir en el producto una calidad particular, por ejemplo para secar polvos de detergentes (Masters 1991).

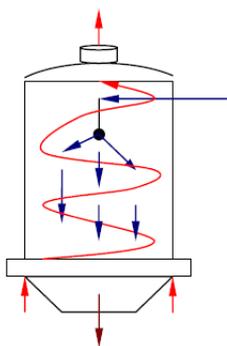


Figura 4. Cámara de secado con flujo en contracorriente

2.4 Caracterización de polvos

2.4.1 Ángulo de reposo

El ángulo de reposo se define como el ángulo formado entre la superficie inclinada de una pila de polvo con la horizontal y su determinación representa un parámetro muy importante a la hora de conocer las características de fluidez y grado de cohesión de las partículas, condiciones importantes para el almacenamiento de este tipo de productos, como lo confirma Graham (2002) el cual manifiesta que, una comprensión del comportamiento de las partículas comienza con una consideración de sus propiedades y algunas técnicas básicas para medirlas. Una de las medidas más simples es el ángulo de reposo, y se relaciona con frecuencia con el ángulo que la tolva necesita exceder para asegurar el flujo de polvo. Esto puede ser aceptable para polvos que fluyen libremente, y que el ángulo de reposo es típicamente 30° , pero en la mayoría de los casos se ignora la tendencia de las partículas a formar una estructura cohesiva dependiendo de cómo se han tratado. Verter el polvo en un embudo invertido y luego retirar con cuidado el embudo para dejar el montón en su lugar se puede utilizar para medir el ángulo. El ángulo de reposo es una propiedad de un polvo que no

existe en los líquidos y es una medida muy consistente para un polvo debido a que la mayoría presentan distintos grados de cohesividad.

Ortega (2012) cita a Carr (1976) quien define que polvos con ángulos de reposo inferiores a 35° indican fluidez libre, entre 35°- 45° poseen cierta cohesividad, entre 45°- 55° tienen alta cohesividad (pérdida de fluidez libre), y por encima de 55° una cohesividad muy elevada y por lo tanto, su fluidez muy limitada o nula.

2.4.2 Densidad aparente

La medición de la densidad aparente es de uso fundamental por la industria para ajustar el almacenamiento, procesamiento, Embalaje y distribución. Particularmente, la densidad aparente es una de las propiedades utilizadas como parte de las especificaciones de un determinado producto final derivado del molido o secado.

Cuando un polvo sólo llena un recipiente de volumen conocido V y la masa del polvo es m , entonces la densidad aparente del polvo es m/V . La porosidad a granel está directamente relacionada a la densidad aparente. La densidad a granel es la masa de partículas que ocupa un volumen unitario de una cama, mientras que la porosidad se define como el volumen de los huecos dentro del lecho dividido por el volumen total del lecho (Barbosa-Cánovas et al. 2005)

2.4.3 Porcentaje compresibilidad o índice de Carr

Los polvos alimenticios se pueden compactar mediante compresión mecánica. Estos procesos pueden ocurrir involuntariamente como resultado de la manipulación o el transporte, o intencionalmente cuando se busca la formación de comprimidos aglomerados. En la industria alimentaria, la compresión no intencional es normalmente indeseable Barbosa-Cánovas *et al.* (2005), debido a que en procesos como transporte y almacenamiento, donde las vibraciones constantes compactan el producto evitan una adecuada fluidización del mismo.

El índice de Carr es un parámetro de calidad importante, para conocer las características de flujo de productos granulares. Shishir et al. (2014) utiliza en su trabajo la tabla 2, que muestra la clasificación de grado de fluidez de polvos con respecto al índice de Carr.

Tabla 2. Especificaciones de propiedades de flujo según el índice de Carr

Índice de Carr (%)	Propiedades de flujo
[0 -10]	excelentes
[11 -15]	buenas

[16 - 20]	aceptables
[21 - 25]	regular
[26 - 31]	malas
[32 - 37]	muy malas
> 38	extremadamente malas

2.4.4 Eficiencia de la Microencapsulación

Por lo regular las pulpa de frutas tienen un alto contenido de agentes volátiles, muy susceptibles a las altas temperaturas, dichos compuestos son los responsables en la mayoría de los casos, de la riqueza funcional del alimento, característica que se pretende alterar lo menos posible con la ayuda de agentes encapsulantes en alimentos sometidos a procesos de secado, es por ello que muchos autores, han evaluado la retención de algún compuesto volátil, de gran importancia nutricional o funcional presente en los alimentos a microencapsular, como indicador para medir la eficiencia de la microencapsulación, dado el uso de las altas temperaturas en el proceso, en nuestro caso se tomará como referencia el porcentaje de retención de vitamina C, debido a que la pulpa de zapote tiene un alto contenido de esta vitamina. Según Azurdia (2006) el zapote supera a la zanahoria y al aguacate en contenido de ácido ascórbico y Morera (1992) manifiesta que el zapote cultivado en el República Dominicana presenta un promedio de 22 mg de vitamina C por cada 100 g de pulpa.

2.4.5 Isotermas de sorción

Eim. V (2012) manifiesta en su trabajo, citando a García-Pérez et al. (2008) que para cada alimento existe una relación característica a una temperatura determinada, entre el contenido de humedad del producto y su actividad de agua cuando se alcanza el equilibrio termodinámico en el sistema. La representación gráfica de esa relación en un determinado intervalo de actividad de agua y humedad se denomina isoterma de equilibrio o de sorción.

Las isotermas de adsorción son una herramienta útil para seleccionar sistemas apropiados de envasado y condiciones de estabilidad de almacenamiento que optimizan o maximizan la retención de aroma, sabor, color, textura y nutrientes y minimizan las reacciones microbiológicas de empaquetamiento (Rodríguez-Bernal *et al.* 2015) citando a (Viganó et al. 2012, Navia et al. 2013).

Según sea la metodología que se utilice para determinar la isoterma, se clasifican en isoterma de adsorción o isoterma de desorción.

2.4.5.1 Isotermas de adsorción

Se obtienen colocando materiales secos en atmósferas de humedad relativa superior a su actividad de agua, de forma que el sólido adsorberá agua hasta alcanzar el equilibrio.

2.4.5.2 Isotermas de desorción

En este caso, se parte de sólidos húmedos que pierden agua al ponerlos en contacto con atmósferas de humedad relativa inferior a su actividad de agua. El producto desorberá agua hasta llegar al equilibrio (Eim. V 2012)

2.4.5.3 Modelos para obtener isotermas de adsorción

Numerosos investigadores han utilizado diversos modelos matemáticos para representar isotermas de adsorción. El primer modelo fue el propuesto por Brunauer-Emmett-Teller (BET) utilizado en pulpa de Borojó con GA Rodríguez-Bernal *et al.* (2015), tomate en polvo (Durigon 2016).

Otros modelos como GAB, Henderson, Oswin y Peleg (tabla 3), que serán utilizados en este trabajo, fueron ajustados a datos experimentales de actividad acuosa y humedad de equilibrio de polvos de frutas. Ceballos (2008) ajustó estos modelos a datos experimentales en polvos de Guanábana, obtenidos por diferentes métodos de secado.

Tabla 3. Modelos de isotermas

Nombre modelo	Modelo
GAB Modelo cinético basado en la multicapa y en una película condensada (monocapa)	$X_{eq} = \frac{X_m CK a_w}{(1-K a_w)(1-K a_w + CK a_w)}$ $C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) = C_0 \exp\left(\frac{H_l - H_m}{RT}\right)$ $K = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) = K_0 \exp\left(\frac{H_l - H_q}{RT}\right)$ Ecuaciones: (1), (1.a) y (1.b) Donde: H_l es el calor de condensación del vapor de agua pura H_m es el calor total de adsorción de la capa mono molecular sobre los primeros sitios de adsorción. H_q es el calor total de de sorción de las moléculas de agua de las primeras capas. H_m es la humedad de la monocapa en kg agua*kg s.s ⁻¹
Henderson (1985). Modelo semiempírico.	$X_{eq} = \left[\frac{-\ln(1-a_w)}{A} \right]^{\frac{1}{B}}$ (Ecuación 2)

Oswin (1946). Modelo empírico.	$X_{eq} = A \left[\frac{a_w}{1-a_w} \right]^B$	(Ecuación 3)
--------------------------------	-------------------------------------------------	--------------

Peleg (1993). Modelo con 4 parámetros, apropiado para isothermas sigmosoidales y no sigmosoidales	$X_{eq} = K_1 a_w^{n1} + K_2 a_w^{n2}$	(Ecuación 4)
---------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------	--------------

Fuente: (Ceballos 2008)



3. OBJETIVOS

3.1 General

Obtener pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr) en polvo con dos tipos de encapsulantes mediante secado por atomización (spray drying).

3.2 Específicos

- Evaluar los parámetros reológicos del jugo de zapote puro y mezclado con maltodextrina y goma arábica.
- Obtener las mejores condiciones del proceso de secado por atomización teniendo en cuenta 3 variables independientes (porcentaje de encapsulante, temperatura de aire de secado y velocidad del disco atomizador).
- Realizar pruebas discriminativas al producto final reconstituido y jugo de zapote fresco.
- Obtener las isothermas de adsorción para tres temperaturas y los parámetros termodinámicos derivados de ellas.



4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Evaluación de los parámetros reológicos del jugo de zapote puro y mezclado con maltodextrina y goma arábiga

4.1.1 Preparación de la pulpa de zapote

El zapote utilizado fue proveniente de los municipios de Valencia y Tierralta, en Colombia. Los frutos se sometieron a un proceso de lavado, escaldado a 75°C por 5 minutos en agua con contenido de ácido cítrico al 1% p/p con el fin de evitar algunas reacciones de pardeamiento, enfriamiento a temperatura ambiente de 25 °C, despulpado y refinado. La pulpa obtenida se empacó y almacenó a temperatura de congelación de -10 ± 1 °C.

4.1.2 Caracterización fisicoquímica de la pulpa integral de zapote

- Determinación del pH

A la pulpa de zapote se le realizaron análisis de pH, mediante lectura directa con el potenciómetro modelo Seven Easy S20, marca Mettler Toledo.

- Cuantificación del contenido de Vitamina C

La concentración de vitamina C (mg/100g), se determinó mediante espectrofotómetro modelo uv vis 1800, marca Shimatsu.

- Sólidos solubles

Esta determinación de sólidos solubles (°Brix) se realizó por medición directa en refractómetro modelo Quick brix 60, marca Mettler Toledo.

Las tres determinaciones anteriores se realizaron por triplicado y se reportaron las medias de cada una.

4.1.3 Determinación de los parámetros reológicos

La experimentación se realizó a 25 °C bajo un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 4x2 para los factores concentración de encapsulante (15, 20, 25 y 30%

p/p) y tipo de encapsulante (GA y MD). Cada tratamiento se realizó con tres repeticiones, las variables de respuesta fueron índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo. Para determinar la influencia de los factores sobre las variables de respuesta se realizó un análisis de varianza ($p \leq 0,05$) para efectos principales.

Para determinar los parámetros reológicos se prepararon muestras de zapote con MD o GA a las concentraciones de estudio. Se realizaron pruebas de rampa de flujo continua en forma ascendente y descendente en un reómetro AR 1500ex, variando las velocidades de cizalla entre 0,5 a 100 s^{-1} , con un tiempo de espera de 10 s cuando alcanzó la velocidad máxima.

El modelo de la ley de potencia (ecuación 5) fue ajustado a los datos experimentales utilizando la herramienta Solver de Excel® teniendo como criterio estadístico para la evaluación el coeficiente de determinación (R^2). El porcentaje de tixotropía se determinó con la medida del área de la región entre la curvas de ascenso y descenso de esfuerzo cortante contra gradiente de velocidad.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, K el índice de consistencia, $\dot{\gamma}$ el gradiente de deformación y n el índice de comportamiento al flujo.

4.1.4 Determinación de una dilución adecuada (mezcla pulpa-encapsulante:agua)

Finalmente se tomaron como referencia los datos de viscosidad aparente más altos para las distintas concentraciones de ambos encapsulantes y se realizaron ensayos de medición de viscosidad aparente con distintas diluciones de la mezcla de pulpa-encapsulante en agua, hasta obtener una relación adecuada, que disminuyera la viscosidad aparente a valores inferiores a 600 cp con el fin de que la mezcla fluya por el equipo de secado, debido que esta es una restricción del equipo.

4.2 Obtención de las mejores condiciones de secado

4.2.1 Adecuación de la materia prima

Los frutos de zapote fresco obtenidos fueron sometidos a un tratamiento previo de escaldado, para luego ser despulpado, refinado y posteriormente homogenizado, garantizando con este último que todas las muestras tengan el mismo porcentaje de sólidos solubles ($18,7 \pm 0,31$ Brix), finalmente la pulpa obtenida se empacó en bolsas de 1 Kg y se sometió a congelación ($-10^\circ\text{C} \pm 2$) para su conservación.

4.2.2 Adecuación de la muestra

La pulpa congelada de zapote se descongeló en baño maría, hasta aumentar su temperatura hasta $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$. Luego se pesó la cantidad de encapsulante (GA o MD) y de pulpa requerida, teniendo en cuenta las concentraciones de experimentación establecidas del encapsulante con respecto al peso de la pulpa, simultáneamente a la mezcla final se le realizó una dilución en agua manejando una relación 1:2 (mezcla pulpa-encapsulante:agua), con el fin de disminuir la viscosidad de la misma y llevarla hasta una viscosidad aparente inferior a los 600 cp, de tal modo que se garantice el flujo de esta por el secador por aspersión. Se preparó en cada corrida 1.050 g de mezcla, tomando como tiempo de mezclado 1 minuto en el ultraturrax a 3000 rpm, para todos los ensayos.

4.2.3 Proceso de secado

Para el proceso de secado se utilizó el equipo de secado por aspersión, modelo VIBRASEC S. A. S, de la planta de bioprocesos y agroindustria, ubicada en la granja tesorito Universidad de Caldas. Se tomaron aproximadamente 1 Kg de alimentación para cada ensayo, modificando las variables de temperatura del aire de secado (T. E) (190, 200 y 210 $^{\circ}\text{C}$), concentración de GA o MD (15, 22,5 y 30%) y velocidad del disco atomizador (20.000, 25.000 y 30.000 RPM) manteniendo fijos el flujo de alimentación en 10 g/min, potencia de funcionamiento del ventilador (80%) y velocidad del aire de calentamiento (4,5 m/s). En la Tabla 4 se observa las condiciones de secado para cada tratamiento.

Tabla 4. Condiciones de operación del secado por aspersión.

TTO	T. E ($^{\circ}\text{C}$)	V. A (RPM)	C. E (% p/p)
1	190	20000	15
2	210	20000	15
3	190	30000	15
4	210	30000	15
5	190	20000	30
6	210	20000	30
7	190	30000	30
8	210	30000	30
9	183,2	25000	22,5
10	216,8	25000	22,5
11	200	16591	22,5
12	200	33409	22,5
13	200	25000	9,9
14	200	25000	35,1

15	200	25000	22,5
16	200	25000	22,5
17	200	25000	22,5
18	200	25000	22,5
19	200	25000	22,5
20	200	25000	22,5

T. E: Temperatura del aire de entrada

V. A: Velocidad de disco atomizador

C.E: Concentración de encapsulante

Los datos obtenidos de las variables respuestas fueron analizados con el software Statgraphics Centurion, mediante un delineamiento central compuesto rotatorio 2³. Con lo cual se estimó el modelo cuadrático para cada respuesta, la tabla ANOVA con ($p > 0,05$), las distintas interacciones y los valores óptimos para cada respuesta.

4.2.4 Cálculo del rendimiento

Esta respuesta se calculó pesando inicialmente los tomamuestras (frascos de vidrio), luego por diferencia de peso se calculó la cantidad real de polvo recuperado al final del proceso y basados en los sólidos totales iniciales en la solución de alimentación se calculó el porcentaje de rendimiento de sólidos recuperados.

4.2.5 Retención en la cámara

El cálculo de retención en la cámara se realizó recolectando y pesando el producto adherido apelmazado en la parte interior de la cámara después de cada corrida. Luego se calculó por balance la cantidad de sólidos recuperables que se perdieron en la corrida.

4.2.6 Cálculo de la solubilidad

El método utilizado para esta variable dependiente, fue el de Eastman y Moore (1984) reportado por (Cano-Chauca et al. 2005; Shittu y Lawal 2007), el cual se basó en tomar 1 g de muestra en polvo, se adicionó a 100 ml de agua a 30 °C y se agitó por 5 min, luego se centrifugó por 5 min, tomando al final una alícuota de 25 ml y se adicionaron en una caja de Petri previamente pesada, se llevó luego a estufa de secado a 105°C por 5 h. Finalmente con los sólidos recuperados después del secado se calculó el porcentaje de solubilidad por diferencia de peso.

4.2.7 Determinación de la humedad de los polvos

La humedad de los polvos se calculó según el método oficial 20.013 (AOAC. 1980).

4.2.8 Determinación de la actividad acuosa a_w

Esta se cuantificó por medición directa a una temperatura de 25 °C, con el equipo para determinación de actividad acuosa, LabMaster-aw marca NOVASINA, del laboratorio de Ingeniería aplicada de la Universidad de Córdoba sede Berastegui.

4.2.9 Ángulo de reposo (β_{rep})

Para la determinación de esta variable se hizo utilizó la metodología de la ASTM (Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders), utilizada por Mendoza (2015), con una leve modificación. Por tal motivo se hicieron pasar las muestras en polvo por un embudo de diámetro interno (d) de 0,7 cm, valor que se encuentra entre las medidas mínima y máxima sugeridas por la norma, las cuales son 0,64 cm y 0.97 cm, respectivamente, el embudo se fijó a un soporte universal y se ubicó a una altura H de 3,81 cm sobre una superficie plana de papel milimetrado, y se realizaron cuatro mediciones del diámetro de la base de la pila formada registrando un diámetro medio (D_a). El valor del ángulo de reposo se calculó con la ecuación 6.

$$\beta_{rep} = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{2H}{D_a - d} \right] \quad (\text{Ecuación 6})$$

4.2.10 Densidad aparente

Se pesaron 30 g de muestra de polvo de zapote y se vertieron en una probeta de 100 ml sin tapón, se midió el volumen (V_0) ocupado por el polvo sin compactar y se calculó la densidad aparente. Los datos se expresan en g cm^{-3}

4.2.11 Porcentaje de compresibilidad o índice Carr

Para la compactación de los muestras de polvo se hizo uso de la norma técnica Nicaraguense, NTON 02- 008 98, del 7 de octubre de 1999 reportada por Ceballos-Adela (2008), con una leve modificación. Se pesaron 30 g de muestra de polvo de zapote y se vertieron en una probeta de 100 ml sin tapón, midiéndose de manera inmediata el volumen ocupado (V_0), luego se golpeó 50 veces la probeta dejándola caer de una altura de entre 2 a 3 cm, sobre una superficie plana. Finalmente se midió el volumen final (V_f) obtenido después de la compactación. Luego se tomaron los datos de V_0 y V_f para calcular el porcentaje de compresibilidad con la ecuación 7, reportada por (Barbosa-Cánovas *et all.*, 2005)

$$\text{Porcentaje de compresibilidad} = \frac{(V_0 - V_f) * 100}{V_0} \quad (\text{Ecuación 7})$$

4.2.12 Higroscopicidad

Se expusieron 0,2 g de polvo de zapote encapsulado a la SALT 90 ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en el equipo medidor de actividad acuosa LabMaster-aw marca NOVASINA. a 25 °C hasta alcanzar el equilibrio. Posteriormente se midió la diferencia de masa en balanza electrónica de precisión 0,0001 g, marca OHAUS modelo Pioneer PA 214.

4.2.13 Eficiencia de la microencapsulación

La eficiencia de la microencapsulación fue calculada con base en el porcentaje de retención de vitamina C (*R.V.C*) en el proceso haciendo uso de la ecuación 8, donde C_a es la cantidad total de vitamina C (mg) contenida en la muestra de alimentación al secador y C_d es la cantidad de vitamina C (mg) en el polvo obtenido, ambos valores fueron calculados teniendo en cuenta la concentración de vitamina C (mg vitamina C 100g de muestra⁻¹) en la masa de muestra a la entrada y a la salida del proceso.

$$R.V.C(\%) = \frac{C_d}{C_a} * 100 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Para la cuantificación de la vitamina C en las muestras de polvos obtenidos, se hizo uso de la determinación de la concentración de ácido ascórbico (mg vitamina C 100g de muestra⁻¹), por el método AOAC 967.21/90. Titulando 10ml de ácido oxálico al 2% previamente preparado y adicionado con 0,2 g de cada una de las muestras con una solución de 2,6- diclorofenolindofenol a 400 ppm. Se tituló además 0,2 ml de una solución patrón de ácido ascórbico 0,2 % (p/v) y 0,2 ml de agua destilada empleada como blanco. Cada ensayo se realizó por triplicado, reportándose la media de estos.

4.2.14 Análisis colorimétrico de los polvos y pulpa de zapote fresco

Los análisis se llevaron a cabo utilizando el espectrofotómetro ColorFlex EZ (Hunterlab). A partir del espectro de reflexión de las muestras se determinaron las coordenadas de color CIE- $L^*a^*b^*$. Se realizaron tres lecturas de cada muestra en polvo y pulpa de zapote fresco (patrón), para los tres parámetros antes mencionados y los datos que se reportan corresponden a la media de cada uno. Los datos fueron analizados estadísticamente mediante el software Statgraphics Centurion XV, con el fin de determinar la influencia de los factores sobre la variación del color de los polvos obtenidos.

4.2.15 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La forma y el tamaño de las partículas de Zapote en polvo microencapsulado, fueron analizados por SEM, con una metodología similar a la utilizada por Chávez-Salazar et

al. (2017) en gránulos de almidón de plátano, donde las muestras de polvo de zapote se unieron a un conductor de cobre, de cinta de doble pegamento cubierto con carbón. La cinta cubierta con una capa de oro es observada con un microscopio electrónico de exploración (JEOL JSM 7600F, Akishima, Japón) operando a condiciones de ultra vacío. Tomandose microfotografías a 500X y 1000X.

4.3 Prueba sensorial

Se aplicó una prueba discriminativa triangular con el objetivo de evidenciar si existe diferencia significativa entre el jugo de pulpa de zapote fresco y el de polvo de zapote microencapsulado, ambos elaborados con leche, la prueba se realizó con 24 catadores no entrenados, haciendo uso del formato mostrado en el anexo 1. Los resultados obtenidos fueron tabulados y analizados con un nivel de significancia del 1%, mediante comparación con la tabla de Roessler (Roessler *et al.*, 1948), anexo 2 de interpretación estadística para prueba sensorial triangular. Cabe aclarar que solo se utilizaron para esta prueba los productos en polvo exentos de apariencia a quemado. La muestra de jugo de zapote de polvos microencapsulados con MD y también con GA, que mostraron menos diferencias significativas con respecto al jugo de pulpa de zapote fresco, fueron las utilizadas para la elaboración de curvas de adsorción para tres temperaturas. Cabe resaltar que esta prueba se tomó como parámetro para elegir el mejor tratamiento

4.3.1 Preparación de la muestra de jugo zapote fresco en leche

La preparación de la muestra de jugo de zapote fresco en leche se llevó a cabo teniendo en cuenta la formulación promedio comercializada por distintos puntos de venta de jugo de zapote en la ciudad de Montería. Por medio de la cual se estableció adicionar 150 g de pulpa de zapote fresco por cada 500 ml de leche entera, 40 g de sacarosa y aproximadamente 185 ml de agua (hielo) , obteniendo en promedio $14^{\circ}\text{Brix} \pm 1$

4.3.2 Adecuación de las muestras de jugo de zapote deshidratado en polvo reconstituido

Las muestras de zapote reconstituido en leche fueron preparadas teniendo en cuenta los grados Brix de la muestra de jugo de zapote fresco, se adicionaron 29 g de polvo por cada 500 ml de leche entera, 40 de azúcar y 305 ml de agua (hielo) garantizando de este modo la homogeneidad entre las muestras ofrecidas para la prueba sensorial

4.4 Isotermas de adsorción

Para determinar las isotermas de adsorción, se tomó la muestra de polvo microencapsulado con MD que resultó con mayor similitud sensorial con el producto original, debido a que ninguna de las muestras seleccionadas con G.A, resultó con características sensoriales similares a la muestra patrón, según la prueba triangular aplicada. Las isotermas se determinaron mediante el método de soluciones salinas saturadas reportada en varios trabajos (Simal *et al.* 2007; Ceballos 2008) con algunas modificaciones, donde las inicialmente las muestras se secaron en estufa a 40 °C hasta peso constante, con el fin de retirarles la humedad y se garantice la adsorción. Luego las muestras fueron introducidas en el equipo LabMaster- a_w marca NOVASINA y expuestas a las diferentes sales estandarizadas: LiCl, MgCl₂, Mg(NO₃)₂, NaCl, BaCl₂ y K₂Cr₂O₇, hasta alcanzar equilibrio con cada una. Las isotermas se determinaron a 30°C, 40°C y 45°C. Los ensayos se realizaron por triplicado, reportándose al final la media aritmética de las repeticiones.

4.4.1 Ajuste de modelos de las isotermas de sorción

Los datos experimentales de humedad de equilibrio de polvo de zapote obtenidos para diferentes a_w y para 3 temperaturas evaluadas. Se ajustaron a los modelos de GAB, Henderson, Oswin y Peleg.

Mediante un análisis de regresión no lineal se determinaron los parámetros de cada modelo y por análisis estadístico se definió el modelo que más se ajusta a los datos experimentales.

Para el ajuste de los modelos se utilizó la herramienta Solver de Excel, se estimó el coeficiente de regresión (R^2) y el error relativo promedio porcentual (E), mediante la ecuación 9, para evaluar el grado de ajuste de cada modelo con los datos (Al-Muhtaseb, McMinn & Magee, 2004, Simal *et al.*, 2007 y Ceballos, 2008).

$$E = \frac{100}{n} \sum_{n=1}^n \frac{|m_{pi} - m_i|}{m_i} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Dónde: m_i es el valor experimental, m_{pi} el valor predicho, n el número de datos experimentales.

4.4.2 Propiedades termodinámicas derivadas de las isotermas de adsorción

Haciendo uso de las ecuaciones 10 y 11 se calculó el calor neto isostérico de adsorción (q_{st}).

El diferencial de entropía se calculó con las ecuaciones 12, 13 y 14. Con la ecuación de la isoterma de mejor ajuste para el polvo deshidratado de zapote, se trazaron las curvas isotérmicas Ln(a_w) vs. 1/T a diferentes condiciones de humedad y se determinaron los valores de ΔH y ΔS .

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{Q_s - L_w}{R} = \frac{-q_{st}}{R} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$Q_{st} = q_{st} + L_w \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\Delta G = RT \ln a_w \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$\ln a_w = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (\text{Ecuación 14})$$

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Caracterización fisicoquímica de la pulpa de Zapote

En la Tabla 5 se muestran los valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica de la pulpa integral de zapote.

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de zapote

Parámetros fisicoquímicos	Valor
pH	5,8± 0,1
Vitamina C (mg/100g)	20,8± 0,13
°Brix	18,70± 0,31

De acuerdo a esta caracterización fisicoquímica se encontró que el zapote tiene un alto contenido de sólidos solubles. Simanca y Negrete (1999) y Villalva et al. (2005) reportan valores similares aunque por encima al de la presente investigación, esto puede obedecer a diferentes zonas de procedencia, distintos grados de maduración del fruto para el estudio o a la época de recolección del mismo.

En cuanto al contenido de vitamina C obtenido (20,8 mg/100g de pulpa), se muestra que es un fruto rico en ella y es similar al reportado por el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) (2015), lo cual lo convierte en un alimento con propiedades antioxidantes.

El valor de pH muestra valores cercanos a la neutralidad e indicando una baja acidez lo cual se asemeja al reportado por Simanca y Negrete (1999) y Andrade *et al.* (2010).

5.2 Determinación de los parámetros reológicos

La pulpa de zapote con MD y GA presentó un comportamiento no newtoniano de naturaleza pseudoplástica, como muestra la figura 5. El modelo de Ostwald de Waele o Ley de potencia ($R^2 \geq 0.9914$) se ajusta a los datos experimentales. Estos resultados

coinciden con lo reportado por Andrade et al. (2010) para pulpa de zapote de la misma variedad a la del presente estudio. Muchas pulpas de fruta presentan el mismo comportamiento como la Guayaba y el Níspero Andrade et al. (2009a, 2009b) y Mango Vidal et al. (2004) y Dak et al. (2007), entre otras. Teniendo en cuenta los valores de n ,

como muestra la tabla 6 la pulpa de zapote gana pseudoplasticidad a medida que aumenta la concentración de Maltodextrina y Goma Arábica.

Industrialmente este comportamiento pseudoplástico garantiza un menor consumo de energía en procesos de flujo, debido a que una disminución de la viscosidad aparente ocasiona una menor pérdida de carga (Andrade et al.2010).

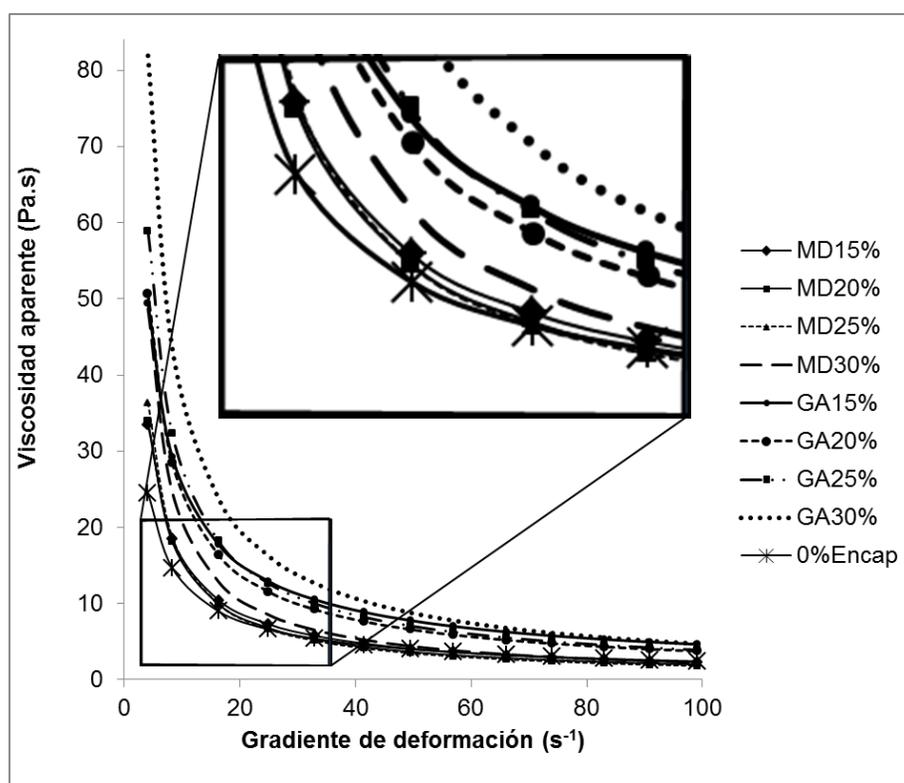


Figura 5. Reograma de la pulpa de zapote a distintas concentraciones de encapsulantes Maltodextrina (MD). Goma Arábica (GA). (0-30%)

En el reograma se observa que la pulpa de zapote sin encapsulante (0%Encap) muestra menor viscosidad aparente que con adición de encapsulante, la mayor viscosidad se muestra con el 30% de GA, esto se debe que la presencia de partículas sólidas y el tamaño de las mismas alteran algunas características reológicas de la mezcla Fischer et al. (2009), en este caso la viscosidad aparente. A medida que aumenta la concentración de cada uno de los encapsulantes se registra una mayor

viscosidad aparente, mostrándose mayores valores para pulpa con GA que con MD a valores iguales de gradiente de deformación.

El análisis de varianza de los parámetros del modelo de ley de potencia (n y K) mostró que existen diferencias significativas entre el tipo de encapsulante y sus concentraciones.

Las curvas de ascenso y descenso, para cada concentración de maltodextrina y goma arábica, presentaron histéresis lo cual indica tixotropía, cuyo porcentaje se muestra en la tabla 7. Este comportamiento coincide con el de algunas variedades de pulpa de guayaba (híbrido de klom sali, puerto rico, d14 y red) que reporta Andrade et al. (2009).

Tabla 6. Parámetros reológicos de la ley de potencia para la pulpa de zapote a distintas concentraciones de encapsulantes.

Parámetros	Concentración de encapsulante										
	0%		15%		20%		25%		30%		
	Asc	Des	Asc	Des	Asc	Des	Asc	Des	Asc	Des	
MD	K										
	(Pa.s ⁿ)	68,09	51,07	110,21	91,55	119,12	100,08	136,92	118,27	189,8	166,17
	n	0,2747	0,2798	0,1563	0,1672	0,1097	0,1195	0,0602	0,0705	0,036	0,0429
	R ²	0,9868	0,9678	0,9994	0,9894	0,9941	0,9709	0,9956	0,9802	0,994	0,9698
GA	K										
	(Pa.s ⁿ)	68,09	51,07	140,64	108,52	160,87	120,95	195,69	166,42	289,8	238,29
	n	0,2747	0,2798	0,2582	0,2653	0,1817	0,1995	0,149	0,153	0,105	0,1176
	R ²	0,9868	0,9678	0,9942	0,9698	0,9969	0,9769	0,9987	0,9887	0,999	0,9791

Asc: Ascendente

Des: Descendente

Tabla 7. Porcentaje de tixotropía de la pulpa de zapote para cada concentración de encapsulante

Concentración	% Tixotropía	
	Maltodextrina	Goma arábica
0%	23,5	23,5
15%	13,4	20,7
20%	12,8	19,5
25%	10,2	14,2
30%	10,1	13,6

5.3 Obtención de las mejores condiciones de secado

Las tablas 8 y 9 muestran los resultados de las variables respuestas en función de los factores utilizando MD, y las tablas 10 y 11 los valores de las respuestas para GA. Las

interacciones de los factores (Temperatura del aire de entrada (factor A), velocidad del disco atomizador (factor B) y concentración de encapsulante (factor C)) se especifican en los anexos 14 y 15 para MD y GA, respectivamente.

Tabla 8. Valores de las variables respuestas utilizando MD.

TTO	T. E (°C)	V. A (RPM)	MD (%p/p)	R (% p/p)	R. C (% p/p)	H (% p/p)	a_w	β_{rep} (°)
1	190	20000	15	42,0	55,87	3,14	0,184	42,7
2	210	20000	15	43,8	54,9	2,80	0,158	43,2
3	190	30000	15	68,8	28,1	2,33	0,188	45
4	210	30000	15	65,8	30,7	1,94	0,187	43,5
5	190	20000	30	47,5	51	2,56	0,192	46,5
6	210	20000	30	51,4	46,7	2,88	0,204	45
7	190	30000	30	65,5	32,3	1,21	0,204	45
8	210	30000	30	73,8	24,8	1,30	0,195	45,8
9	183,1	25000	22,5	62,4	35,4	1,87	0,22	44,2
10	216,8	25000	22,5	52,7	45,8	1,40	0,25	44,2
11	200	16591	22,5	39,3	68,5	1,10	0,226	48,2
12	200	33409	22,5	47,1	51	1,61	0,22	48
13	200	25000	9,8	34,8	63,8	2,90	0,207	47,2
14	200	25000	35,1	73,8	24,87	1,95	0,214	47,8
15	200	25000	22,5	45,8	51,9	1,05	0,232	46,8
16	200	25000	22,5	45,5	50	2,31	0,226	44,5
17	200	25000	22,5	43,7	54	2,70	0,22	46,7
18	200	25000	22,5	44,9	52,8	2,38	0,22	46,5
19	200	25000	22,5	44,9	54,8	2,54	0,223	49,2
20	200	25000	22,5	45,3	52,1	2,37	0,227	49,7

R: Rendimiento

R. C: Retención en cámara

H: Humedad

β_{rep} : Angulo de reposo

Tabla 9. Valores de las variables respuestas utilizando MD

TTO	T. E (°C)	V. A (RPM)	MD (% p/p)	S (%p/p)	D. A (g cm ⁻³)	% Comp	Hig (%p/p)	R.V.C (% p/p)
1	190	20000	15	85,8	0,73	24,2	10,2	65,2
2	210	20000	15	76,5	0,70	29,8	9,4	61,7
3	190	30000	15	84,2	0,73	18,5	7,47	63
4	210	30000	15	82,7	0,50	23,9	7,3	60,2

5	190	20000	30	93,4	0,44	28,5	7,8	79,6
6	210	20000	30	89,1	0,32	20,6	7,45	77,1
7	190	30000	30	90,9	0,50	23,5	7,86	80,3
8	210	30000	30	88,7	0,41	26,5	7,3	81,6
9	183,2	25000	22,5	89	0,55	21	8,03	77,3
10	216,8	25000	22,5	85,4	0,43	25,8	8,06	50,1
11	200	16591	22,5	90,4	0,52	24,8	7,71	57,4
12	200	33409	22,5	88,1	0,50	28,4	8,09	75,8
13	200	25000	9,9	86	0,50	22,6	11,6	45,7
14	200	25000	35,1	90,2	0,48	26,7	8,1	76,8
15	200	25000	22,5	91,1	0,53	18,5	8,48	73
16	200	25000	22,5	90,2	0,54	17,9	8,5	71,7
17	200	25000	22,5	89,2	0,50	18,1	7,9	72,5
18	200	25000	22,5	92,5	0,51	19	8,3	73,9
19	200	25000	22,5	92,4	0,50	17,7	8,45	73,7
20	200	25000	22,5	87,2	0,49	18,6	8,53	74,1

S: Solubilidad

D. A: Densidad aparente

%Comp: porcentaje de comprensibilidad

Hig: Higrscopicidad

R.V.C: Retención de vitamina C

Tabla 10. Valores de las variables respuestas utilizando GA

TTO	T. E (°C)	V. A (RPM)	GA (%p/p)	R (% p/p)	R.C (% p/p)	H (% p/p)	a_w	β_{rep} (°)
1	190	20000	15	39,0	64,5	2,58	0,188	41,8
2	210	20000	15	58,4	40,56	2,49	0,189	43,4
3	190	30000	15	43,4	55,8	3,66	0,135	47,5
4	210	30000	15	49,0	47,45	2,61	0,132	47,4
5	190	20000	30	35,4	63,2	2,12	0,152	48,6
6	210	20000	30	41,2	56,8	2,06	0,17	45,8
7	190	30000	30	70,2	27,54	1,89	0,145	45,0
8	210	30000	30	65,7	33,8	2,65	0,176	48,4
9	183,182	25000	22,5	43,2	55,89	2,62	0,179	45,0
10	216,818	25000	22,5	46,6	52,13	2,26	0,174	42,7
11	200	16591	22,5	38,5	60,45	3,66	0,239	45,0
12	200	33409	22,5	56,3	42,76	1,91	0,213	45,9
13	200	25000	9,88655	38,9	60,73	3,82	0,154	48,2
14	200	25000	35,1134	53,4	45,86	3,41	0,252	43,3
15	200	25000	22,5	50,7	48,71	2,49	0,212	43,4
16	200	25000	22,5	41,6	57,56	1,55	0,188	40,6
17	200	25000	22,5	43,3	55,78	2,47	0,225	43,0

18	200	25000	22,5	45,1	53,89	2,80	0,171	43,4
19	200	25000	22,5	47,3	51,95	3,30	0,124	44,2
20	200	25000	22,5	43,9	56,23	3,85	0,153	43,4

Tabla 11. Valores de las variables respuestas utilizando GA

TTO	T. E (°C)	V. A (RPM)	GA (%p/p)	S (%p/p)	D. A (g cm ⁻³)	% Comp	Hig (%p/p)	R.V.C (%p/p)
1	190	20000	15	81,1	0,56	25,7	11,6	64,6
2	210	20000	15	88,8	0,54	21,2	14	60,5
3	190	30000	15	83,02	0,52	20,9	12,3	63,7
4	210	30000	15	87,7	0,41	25,6	13	59,4
5	190	20000	30	86,22	0,27	30,6	13,8	78,3
6	210	20000	30	84,24	0,13	21,2	11,8	76,2
7	190	30000	30	96,65	0,33	25,3	10,9	80,3
8	210	30000	30	91,25	0,22	28,3	12,5	79,5
9	183,2	25000	22,5	87,45	0,37	22,1	14,3	76,1
10	216,8	25000	22,5	88,1	0,25	26,9	11,5	50,4
11	200	16591	22,5	87,5	0,36	25,3	13,4	63,6
12	200	33409	22,5	88,44	0,30	30,3	12	75,8
13	200	25000	9,9	87,06	0,32	24,1	13,5	38,9
14	200	25000	35,1	94,3	0,30	28,6	12,4	77,5
15	200	25000	22,5	90,18	0,33	25,3	11,4	72,5
16	200	25000	22,5	86,4	0,34	25,6	10,9	70,9
17	200	25000	22,5	86,5	0,34	18,9	11,7	71,9
18	200	25000	22,5	87,3	0,32	21,4	11,2	73,4
19	200	25000	22,5	87,07	0,33	21,2	11,5	72,1
20	200	25000	22,5	88,5	0,32	21,1	11,7	72,9

5.3.1 Evaluación del rendimiento y retención en cámara

Los datos experimentales obtenidos para esta respuesta fueron analizados con un nivel de confianza del 95%. El análisis de varianza (anexo 3) mostró, para polvos de zapote con GA, que los factores A, B y C afectaron significativamente el rendimiento, así como también las interacciones AB, AC y BC (anexo 15), mientras que para los polvos de zapote con MD, el análisis de varianza (anexo 2) mostró que solo los factores B y C y la interacción A² (anexo 14) afectaron significativamente el rendimiento.

A continuación se analiza la influencia de los distintos factores significativos sobre la variable rendimiento.

El rendimiento de los polvos aumentó con la concentración de GA y MD (figuras 6 y 7), los datos obtenidos registran el máximo rendimiento experimental de 70,2% con una concentración de 30% de GA y 70,83% para la misma concentración de MD, esto se debe a que a mayor contenido de encapsulantes se evitan las reacciones de caramelización de los azúcares como consecuencia a la exposición a altas temperaturas, disminuyendo la posibilidad de apelmazamiento del producto dentro de la cámara, comportamiento similar reportan Bhusary et al. (2014) para tamarindo en polvo microencapsulado con GA, estos obtuvieron un rendimiento máximo (70%) pero con una concentración de encapsulante mucho mayor (60%). Mendoza (2015) reporta resultados similares de rendimiento (65,41%) en Mango, microencapsulado con MD, mientras que Shishir et al. (2014) reportan para guayaba en polvo un rendimiento máximo del 55% para una concentración de 20% de MD.

El aumento de la temperatura de aire de secado incrementó el rendimiento de los polvos microencapsulados con GA (figura 6) al igual que los polvos con MD (figura 7), reportando con este último encapsulante un aumento en el rendimiento de 35,38 a 65,71% cuando la temperatura aumenta de 190 a 210 °C. Esto se debe a que a temperaturas más altas se logra una velocidad de transferencia de energía mayor y como consecuencia una alta tasa de transferencia de masa, lo que indica que la gota se seca más rápido evitando que menos número de estas se adhieran a las paredes de la cámara. Fazaeli et al. (2012) reportan comportamientos similares para mora negra en polvo y Mendoza (2015) reporta el mismo comportamiento para mango con MD.

De igual manera, el incremento en la velocidad de atomización aumentó el rendimiento con ambos encapsulantes (figuras 6 y 7). Los datos experimentales muestran un rendimiento mayor (70,2%) para GA con 30.000 RPM y 73% para MD con las mismas RPM. Un comportamiento similar reportaron Chávez-Salazar et al. (2019) en su trabajo de obtención de Almidón de plátano esterilizado y secado por aspersión, donde manifiestan que el rendimiento es mayor cuando aumenta la velocidad del disco, debido a que el diámetro de la gota en la aspersión disminuye, lo cual aumenta la velocidad de transferencia de energía y masa, reduciendo el tiempo de secado y evitando que la mayoría de las partículas lleguen a la pared de la cámara.

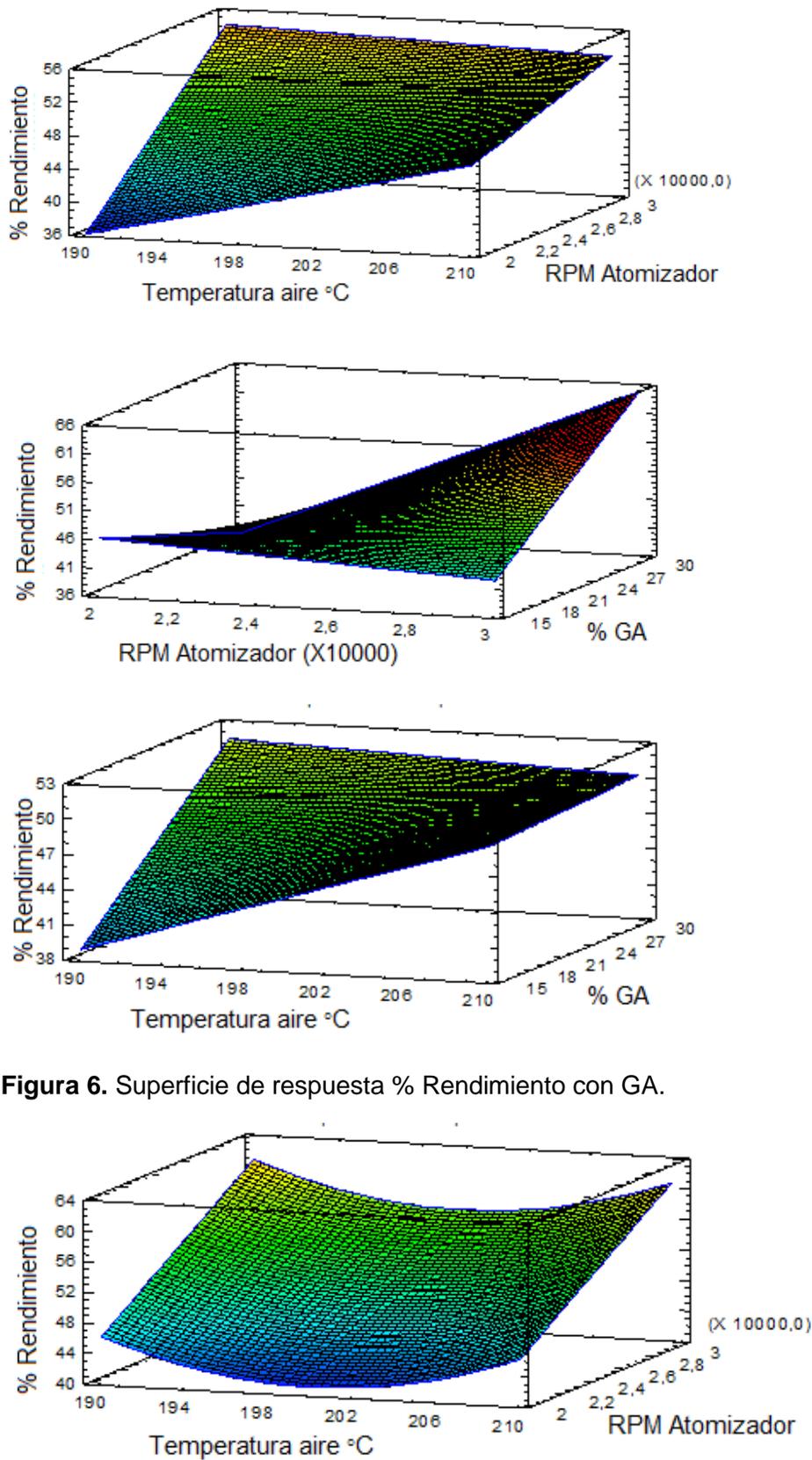


Figura 6. Superficie de respuesta % Rendimiento con GA.

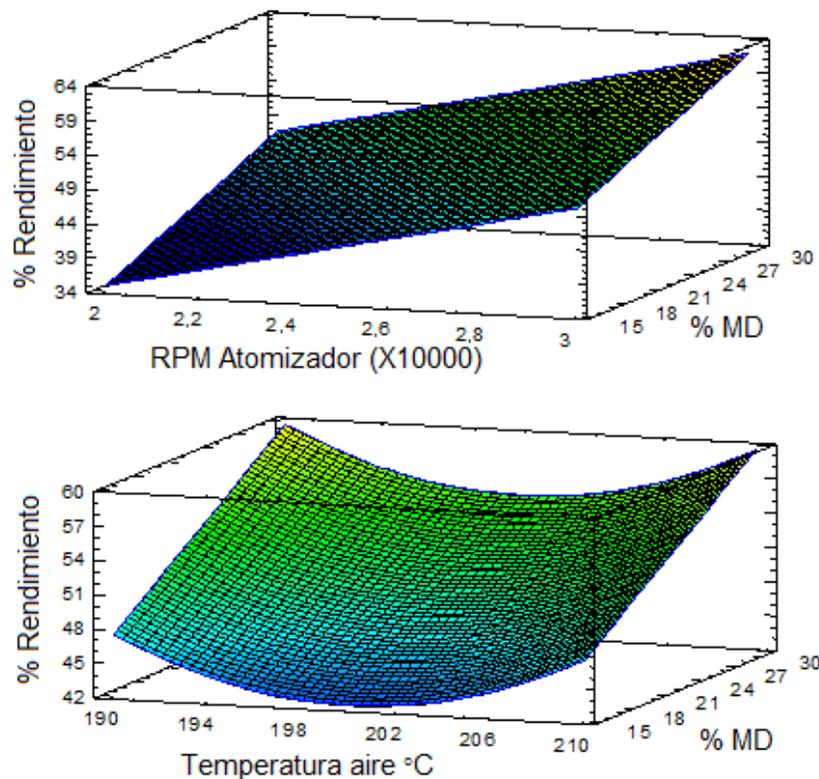


Figura 7. Superficie de respuesta % Rendimiento con MD

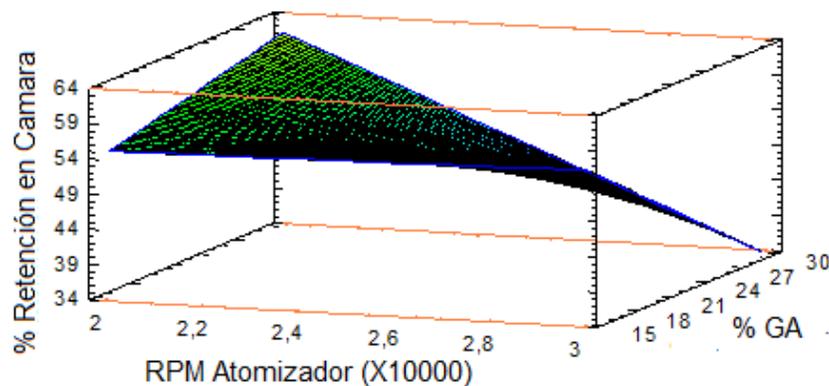
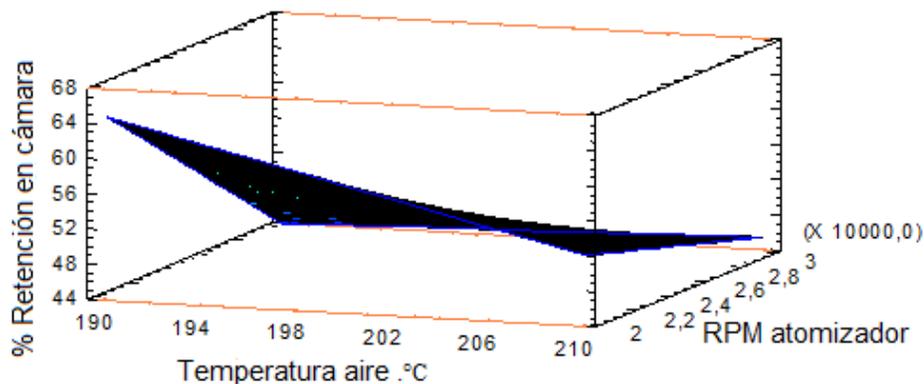
Para los polvos con GA la interacción AB (anexo 16) mostró que para los valores menores de la temperatura y velocidad de atomización se obtienen menor porcentaje de rendimiento, presentando un incremento cuando se utiliza una mayor temperatura pero con bajas revoluciones de atomización, no obstante se obtiene un mayor rendimiento cuando la temperatura y la velocidad de atomización se encuentran en sus mayores niveles.

De igual manera la interacción AC para polvos con GA (anexo 16), evidencia que para los más bajos niveles de Temperatura y concentración de encapsulante se obtiene menor valor del rendimiento, aumentándose cuando se incrementa la temperatura pero con bajos niveles de encapsulante, aun así el rendimiento muestra un mayor valor cuando se utiliza el nivel más alto de Temperatura con mayores valores de concentración de encapsulante.

Mientras que para la interacción BC (anexo 16), se muestra que al utilizar el menor valor de velocidad de atomización y mayor concentración de GA el rendimiento es mínimo, pero este será mayor al utilizar valores máximos de velocidad de atomización y de concentración de GA

La variable retención en cámara está muy relacionada con el rendimiento, dado que a mayor producto retenido en cámara se disminuye la recuperación de los sólidos en el producto final, aunque también el rendimiento es afectado por las pequeñas cantidades de partículas finas presentes en el escape del ciclón hacia el exterior.

El análisis de varianza muestra (anexo 4) con un nivel de confianza del 95% que para los polvos obtenidos con GA los factores A, B y C y las interacciones AC y BC (anexo 15), tuvieron un efecto significativo sobre el porcentaje de retención en cámara. Los valores obtenidos muestran que al aumentar los factores A, B y C disminuye la cantidad de producto adherido a la cámara, como se muestra en la figura 8, esto se debe a que al aumentar la temperatura del aire aumenta la transferencia de energía y masa, obteniéndose partículas más secas, lo que evita la adherencia en las paredes de la cámara, de igual manera si la velocidad del atomizador aumenta se obtienen partículas con un diámetro menor, lo que garantiza una mayor velocidad de transferencia de masa generando un menor tiempo de secado y así la partícula tiene menos posibilidad de llegar a la pared de la cámara. De igual manera, el aumento de la concentración de GA evita la caramelización de los azúcares y disminuye el apelmazamiento en la pared de la cámara.



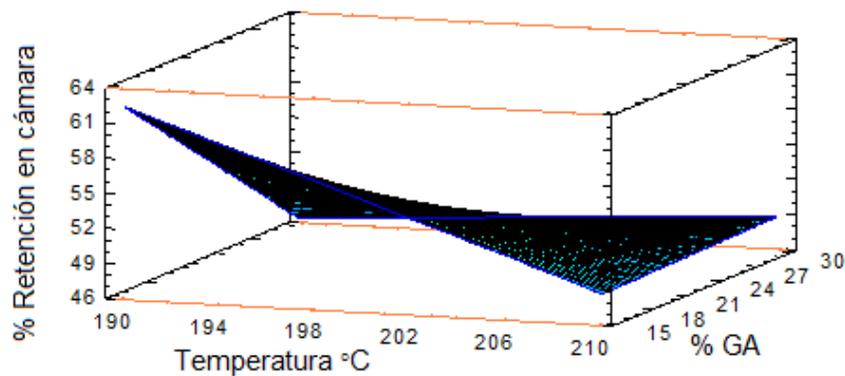


Figura 8. Superficie de respuesta de % Retención en cámara con GA

Por otro lado, para los polvos microencapsulados con MD, el ANOVA (anexo 4) arrojó que los factores B, C y la interacción A^2 (anexo 14) tuvieron un efecto significativo sobre el porcentaje de retención en cámara, similar al obtenido para la variable porcentaje de rendimiento con el mismo encapsulante, esto se observa en la figura 9, donde la retención en la cámara disminuye conforme aumentan la velocidad del atomizador y la concentración de MD. Como se mencionó al inicio de este apartado, esta variable está muy relacionada con el rendimiento, por ello el efecto de las variables independientes sobre esta variable respuesta, es contrario al efecto sobre el rendimiento, dado que a menor rendimiento la cantidad retenida de producto dentro de la cámara será mayor. En el presente trabajo la retención en cámara disminuyó de 53,5 a 36% cuando la velocidad de rotación del disco atomizador aumentó de 20000 a 30000 RPM (figura 9), resultados aceptables, si se considera que a mayor velocidad circular, las partículas que se generan en forma de aspersión tienen un diámetro menor, aumentando la transferencia de energía y masa como consecuencia de la exposición de mayor área de contacto.

La concentración de MD también tiene el mismo efecto sobre la retención en la cámara, observándose una relación inversa entre estas dos variables (figura 9), comportamiento similar reporta Mendoza (2015) para pulpa mango en polvo.

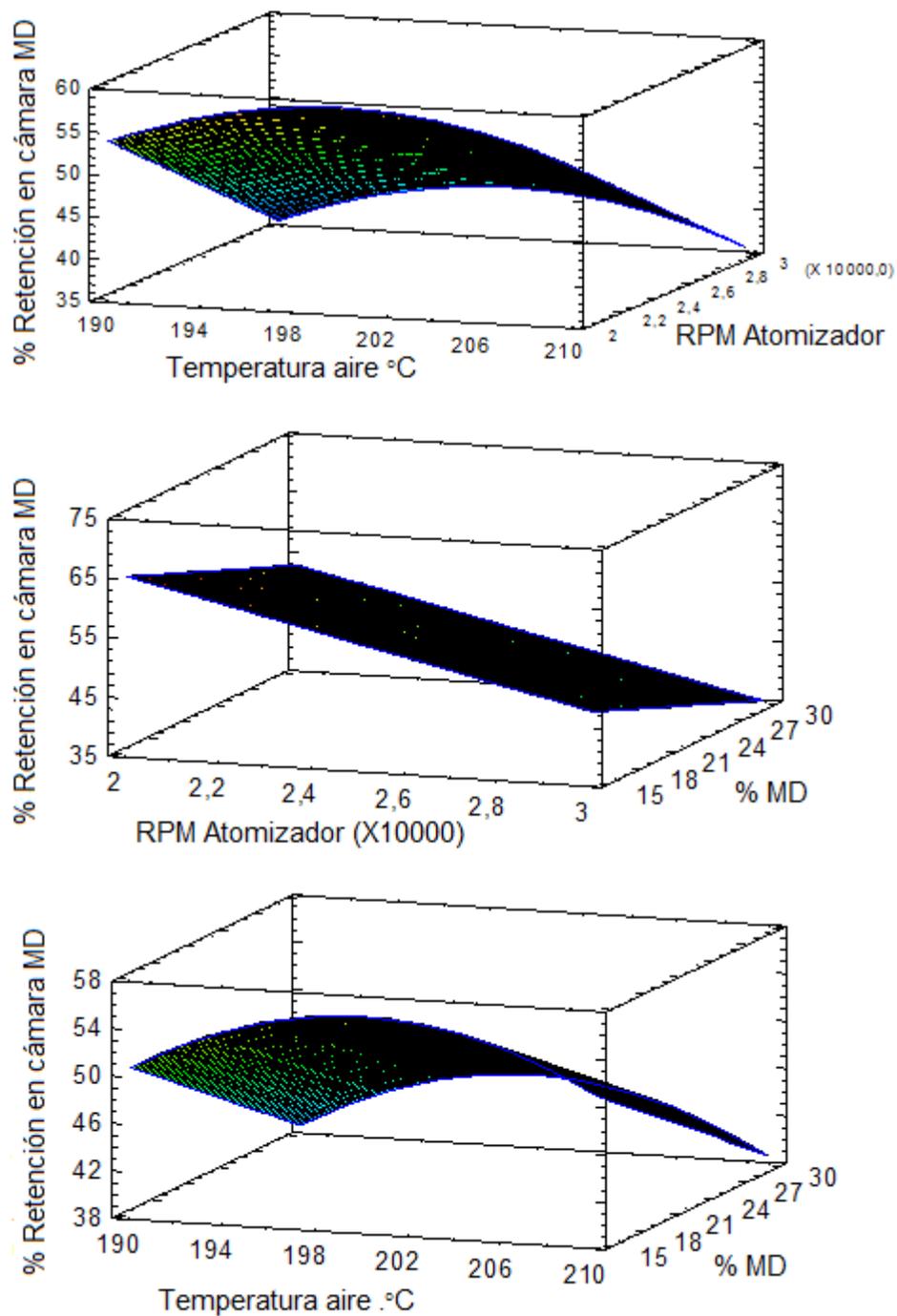


Figura 9. Superficie de respuesta de % Retención en cámara con MD

5.3.2 Actividad acuosa a_w y humedad de los polvos

Los anexos 14 y 15 muestran, con un nivel de confianza del 95%, que ninguno de los tres factores de proceso, ni las interacciones tuvieron efecto significativo sobre la

actividad acuosa y humedad de los polvos, en los rangos de valores utilizados para este estudio.

5.3.3 Angulo de reposo

Para esta variable los datos experimentales mostraron que en los polvos de zapote obtenidos con GA, ninguna de las variables independientes ni sus interacciones mostraron un efecto significativo (anexo 15).

Por otro lado, en los polvos microencapsulados con MD solo la interacción A^2 (anexo 14) tuvo efecto significativo sobre el ángulo de reposo, mostrando un valor máximo de 47° a una temperatura de 200°C (figura 10), lo que quiere decir que al incrementar la temperatura de 190°C a 200°C el ángulo de reposo aumenta alcanzando un máximo valor, en este rango de temperatura el calor suministrado no es suficiente para generar un encogimiento produciendo partículas de mayor diámetro, esto genera mayor área de contacto entre partículas aumentando la cohesión entre las mismas, pero al pasar de 200°C a 210°C los valores de ángulo de reposo disminuyen, dado que a temperaturas más altas se elimina toda humedad de la gota y esto evita cualquier tipo de cohesión entre partículas dada la ausencia de humedad, aparte que también se generan partículas de menor diámetro por el encogimiento natural del secado. Mendoza (2015) y Gadelha et al. (2009) reportan para pulpa de mango y extracto de Orujo de Cereza, respectivamente que el ángulo de reposo disminuye con el incremento de la temperatura del aire de entrada. Los valores de ángulos de reposo de los polvos de zapote obtenidos con MD lo clasifican como altamente cohesivo, según la clasificación hecha por Car (1976).

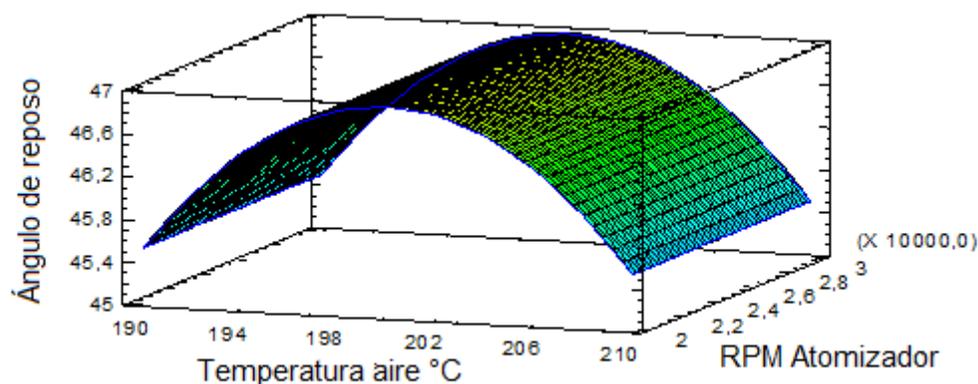


Figura 10. Superficie de respuesta de ángulo de reposo con MD.

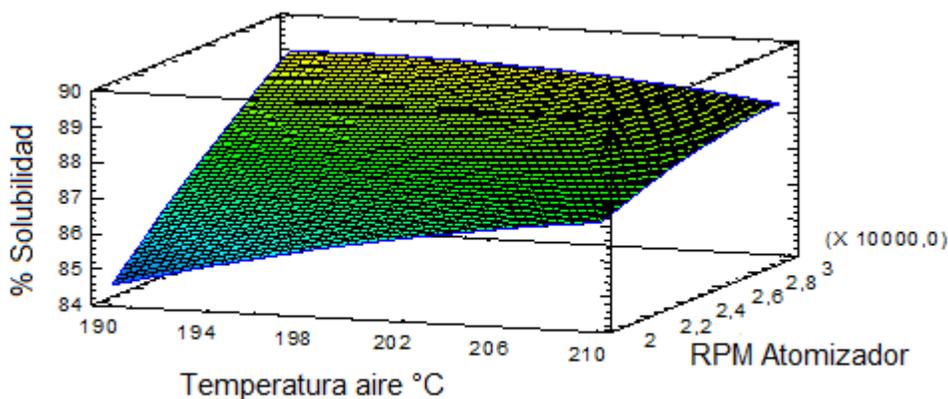
5.3.4 Análisis de Solubilidad

El análisis de varianza (anexo 8) mostró, con un nivel de confianza del 95%, que los factores B, C y las interacciones AC y BC tuvieron efecto significativo sobre la solubilidad de los polvos de zapote con GA (anexo 15).

Los datos mostraron que la solubilidad se incrementó conforme aumentó la velocidad del disco atomizador (figura 11). Este comportamiento es debido a que se obtienen partículas de menor diámetro, lo cual aumenta el área superficial del polvo obtenido, generando mayor área de contacto con el solvente. El aumento de la velocidad rotacional del disco disminuye el diámetro de gota aspersada, resultando una partícula de menor tamaño. Con el incremento de la concentración de GA de 15% (p/p) a 30% la solubilidad aumentó de 81,1% a 96,65% (tabla 11), dado que la presencia de encapsulante protege la matriz de pulpa de cualquier acción lesiva proveniente de la alta temperatura del proceso, liberando gradualmente en la reconstitución, el encapsulado y facilitando la dilución de este en agua. Barros et al. (2016) reportan que la solubilidad de aceite esencial de Jengibre en polvo, aumentó con la concentración de GA.

En el anexo 17 se observa que, al utilizar el nivel más bajo de temperatura y a la vez la menor concentración de encapsulante GA se obtienen los menores valores de solubilidad, mientras que al utilizar la menor temperatura y el mayor porcentaje de encapsulante, la solubilidad obtenida en los polvos arroja su mayor valor.

Por otro lado la interacción BC (anexo 17) muestra que al utilizar, la concentración más baja de GA con la máxima velocidad de atomización, los polvos obtenidos presentan la mínima solubilidad, comportamiento contrario se obtiene al utilizar la máxima concentración de GA y el nivel alto de velocidad de atomización, con lo cual el porcentaje de solubilidad de los polvos exhibe su máximo valor.



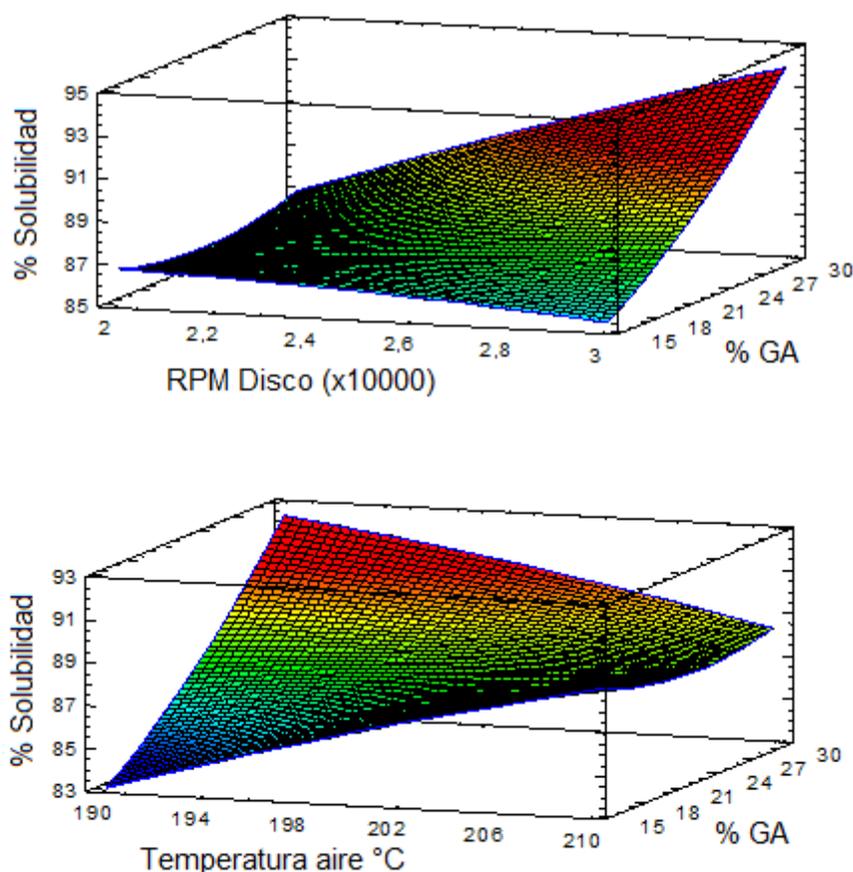


Figura 11. Superficie de respuesta de la solubilidad con GA.

El análisis de varianza (anexo 8) mostró, con un nivel de confianza del 95%, que los factores A y C tuvieron efecto significativo sobre la solubilidad de los polvos de zapote con MD (anexo 14).

La solubilidad de los polvos obtenidos con MD disminuyó con el incremento de la temperatura del aire de secado en el rango de 190 a 210°C (figura 12), debido a que las altas temperaturas alteran su estructura y caramelizan algunos azúcares, lo cual afecta las propiedades de solubilización de las partículas secas. Resultados similares obtuvieron Quek et al. (2007) los cuales reportan en su estudio que la disolución de los polvos de patilla microencapsulados con MD, obtenidos mediante secado por aspersión disminuyó conforme la temperatura del aire de secado aumentó de 145°C a 175°C.

Nótese que en los polvos con MD la solubilidad aumentó con el incremento de la concentración como se muestra en la figura 12, dado que este es un oligosacárido de alta solubilidad como consecuencia de su gran número de grupos OH presentes, los cuales le permiten formar puentes de hidrógeno con las moléculas de agua, hidratándose y formando moléculas esféricas al mezclarse, como lo explica López Et

al. (2009). Ahmed et al. (2010) reportaron también en su trabajo que la solubilidad aumentó con la concentración de MD y Ácido ascórbico en el microencapsulamiento de componentes bioactivos de pulpa de papa dulce. De igual manera, Durigon (2016) encontró que la solubilidad de polvo de tomate mejoró al utilizar MD. Así mismo, Ceballos (2008) también atribuye el aumento de la solubilidad del polvo de guanábana, obtenido por aspersión, a la presencia de MD.

En los puntos centrales la solubilidad media con MD es de 90,45%, valor superior a la de los polvos con GA (87,66%), indicando que la MD minimiza más los efectos de la temperatura y mejora más la solubilidad de los polvos con GA.

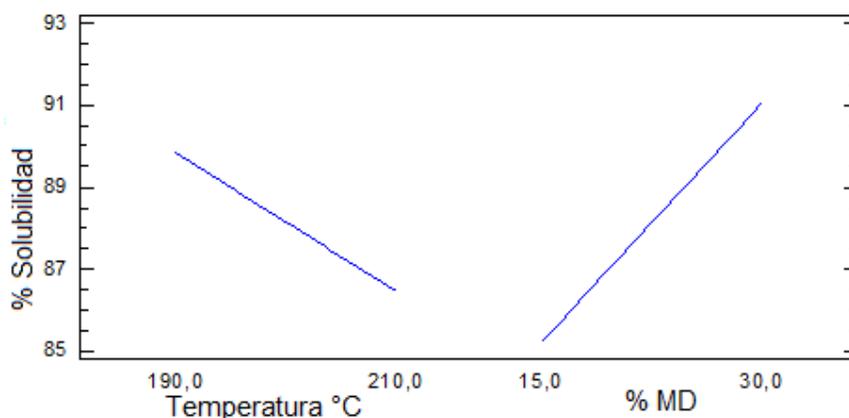


Figura 12. Gráfico de efectos principales para solubilidad con MD

5.3.5 Densidad aparente

Teniendo en cuenta el análisis de varianza (anexo 9) de los datos experimentales, se observa que esta variable fue afectada significativamente por la concentración de MD y GA (anexos 14 y 15). Las figuras 13 y 14 muestran que la densidad disminuye al aumentar el contenido de sólidos de los encapsulantes GA y MD respectivamente, pasando de $0,134 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,557 \text{ g cm}^{-3}$ cuando la concentración de GA varía de 30% a 15% respectivamente, y en el polvos con MD, cuando la concentración aumenta de 15% a 30% la densidad aparente varía de $0,731 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,321 \text{ g cm}^{-3}$. Este comportamiento podría atribuirse al hecho que a mayor contenido de sólidos de encapsulantes, el grosor de la capa protectora del agente acarreador es mayor, formándose partículas amorfas y de mayor diámetro equivalente, lo que significaría que para igual cantidad de masa de polvos, queden más espacios libres entre partículas, incrementándose el volumen total y por ende menor densidad antes de la compactación mecánica. Un comportamiento similar encontraron Bhusari et al. (2014), en polvo de tamarindo microencapsulado con GA y MD, obtenido por secado por aspersión. Este comportamiento podría traer algunos beneficios, uno de ellos es que el proceso exige menor cantidad de encapsulante para obtener una mayor densidad

aparente, lo que significa que habrá menor cantidad de aire entre las partículas, garantizando reducir los efectos del deterioro por la oxidación, otro beneficio se ve representado en que se necesitan recipientes más pequeños para almacenar grandes cantidades de masa de material en polvo.

En los puntos centrales la media de las densidades son $0,343 \text{ g cm}^{-3}$ y $0,52 \text{ g cm}^{-3}$ para GA y MD respectivamente, valores que confirman que las partículas de polvo con MD presentan una mayor esfericidad y diámetro promedio menor que las partículas de polvo con GA (figuras 23 y 24), comportamiento que es consecuente con lo observado en el estudio reológico de la pulpa de zapote con la adición de los encapsulantes, donde la GA imprime mayor viscosidad aparente a la pulpa que la MD (figura 5), produciéndose en el disco atomizador gotas más grandes con GA a la misma velocidad de atomización, resultados similares reportan Carneiro et al (2013), en su estudio de microencapsulación de aceite de Linaza donde utilizaron distintos materiales de pared entre ellos GA y MD y citan a Master (1991) para justificar sus resultados. Todo lo anterior significa que las partículas de los polvos obtenidos con mayor tamaño y mayor número de partículas amorfas resultan con densidades aparentes menores, lo que se demuestra con las medias de las densidades para cada encapsulante y los resultados de las imágenes del SEM (figuras 23 y 24).

El análisis de varianza (anexo 9) muestra también que la temperatura del aire de entrada afectó la densidad de los polvos solo con MD, mostrándose una relación inversa entre estas dos variables (figura 14). El aumento de la temperatura del aire de secado disminuye el tiempo de secado, lo que reduce la contracción considerable de las gotas aspersadas que entran en contacto con el aire caliente, este comportamiento coincide con los resultados obtenidos por Shishir et al, 2014, donde reportan que la densidad aparente de la pulpa de guayaba en polvo microencapsulado con MD, disminuyó con el aumento de la temperatura de secado (150°C a 170°C), afirmando que la mayor temperatura de aire de entrada, causa un secado más rápido, con menos contracción de gotitas, dando una menor densidad en el polvo. Comportamiento similar obtiene Kulandaisamy et al. (2016), quienes explican que la densidad aparente de los polvos de pigmento tipo flexirrubina microencapsulados con GA y Carragenina (tipo Kappa), utilizando temperaturas (140°C a 220°C) cercanas a las del presente estudio, disminuyó con el aumento de la temperatura del aire de secado, debido a la formación de películas impermeables en la superficie de la gota, seguida de la formación de burbujas de vapor y expansión de las pequeñas gotas, obteniendo algunas partículas huecas y como resultado más aire ocluido dentro del polvo.

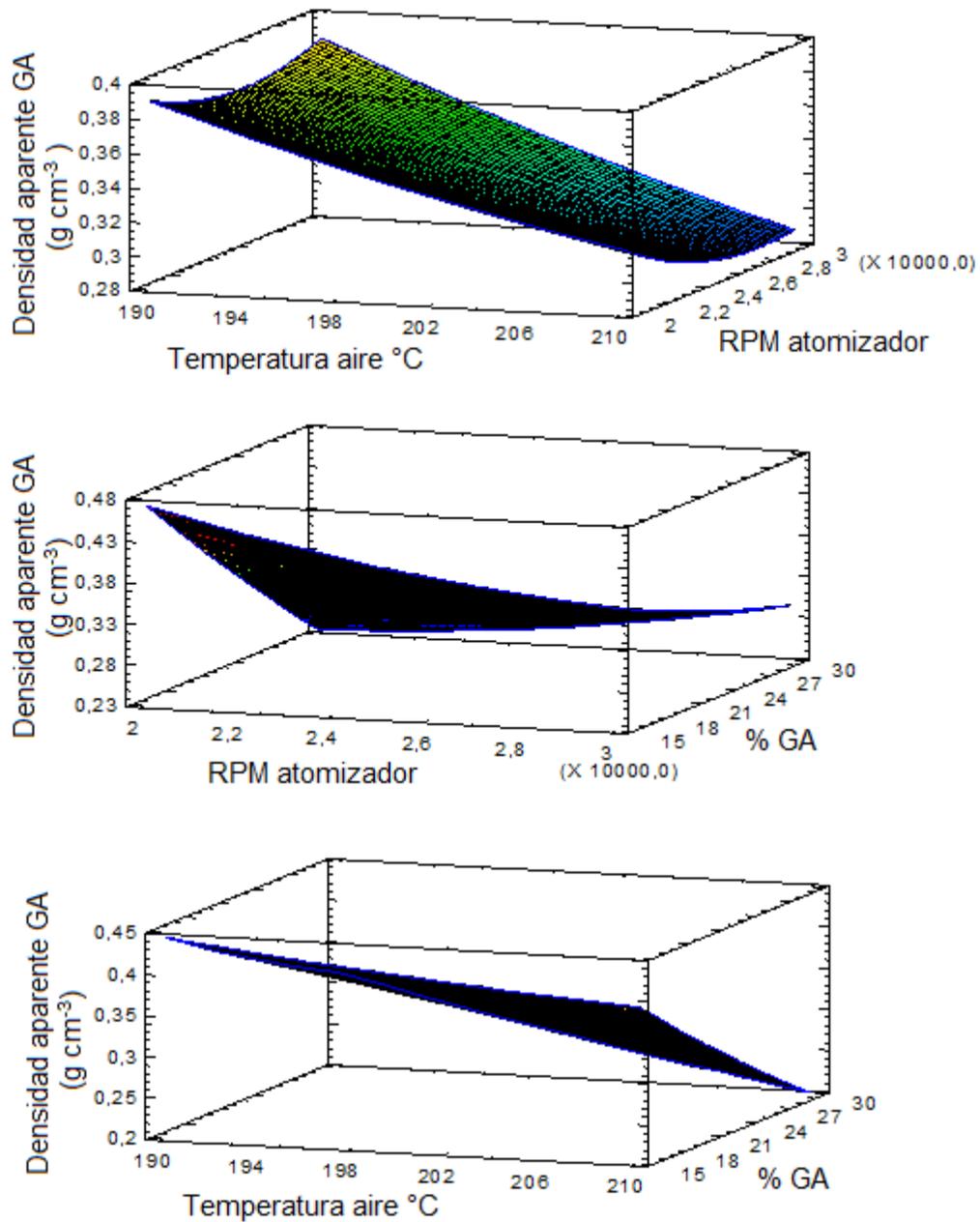


Figura 13. Superficie de respuesta de la variable densidad aparente con GA.

5. Resultados y discusiones

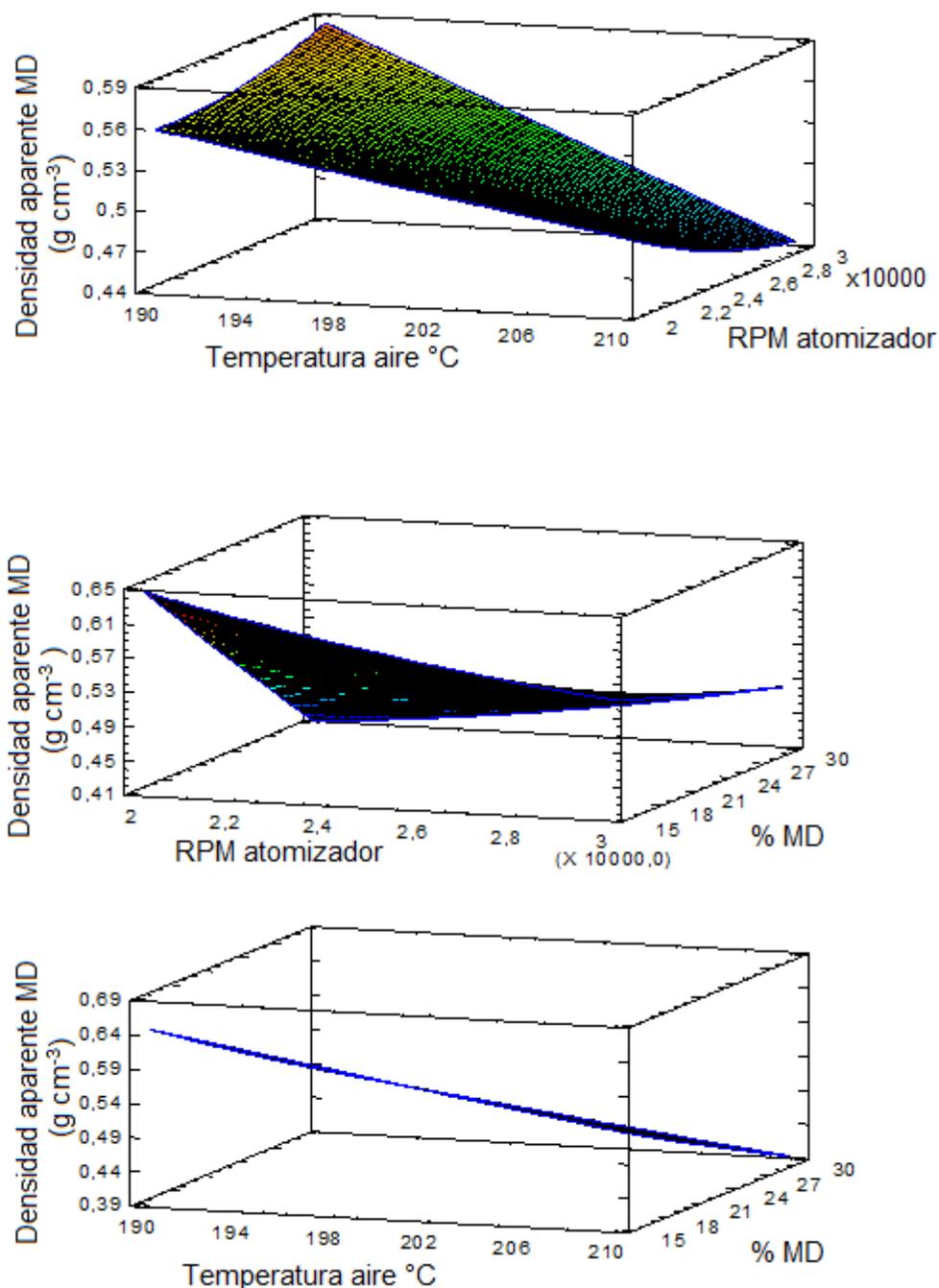


Figura 14. Superficie de respuesta de la variable densidad aparente con MD.

5.3.6 Porcentaje de Compresibilidad (Índice de Carr)

El índice de Carr o porcentaje de compresibilidad es una variable que muestra una idea de la fluidez de un producto en polvo. En la presente investigación el ANOVA (anexo 10) para polvos con GA, mostró con un nivel de confianza del 95%, que ninguno de los

5. Resultados y discusiones

factores principales del proceso afectó significativamente esta variable, pero las interacciones AB y B², si afectaron significativamente el índice de compresibilidad (anexo 15). Mostrando para 25.000 rpm el valor mínimo de porcentaje de compresibilidad (22,27%) (figura 15), lo que quiere decir que a velocidades de atomización, inferiores y superiores al anterior valor, se registra un aumento en el índice de Carr.

Por otro lado la interacción AB (anexo 18) muestra que el porcentaje de compresibilidad disminuye a su menor valor (21,2%) al utilizar los niveles de temperatura de aire y velocidad de atomización más bajos, mientras que toma su mayor valor (28%) al utilizar la temperatura y velocidad de atomización más altas. Pues a mayor velocidad de atomización se generan gotas de menor diámetro y estas sometidas a mayor temperatura producen una reducción mayor de la partícula obtenida en el secado, por ello al momento de compactar mecánicamente los polvos las partículas se aglomeran dejando menos espacio entre ellas generando esto un alto índice de compresibilidad.

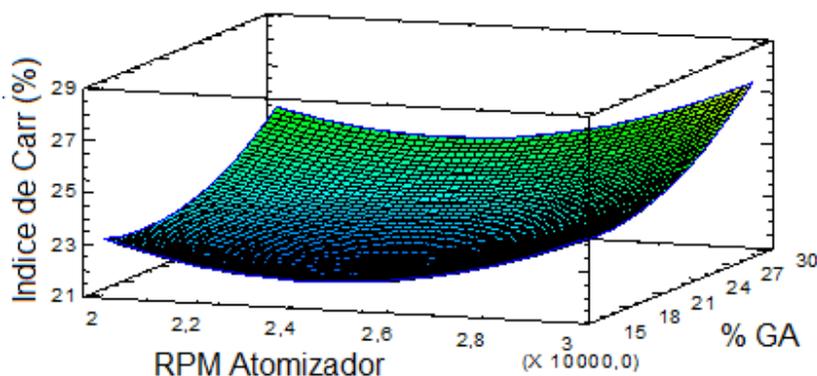


Figura 15. Superficie de respuesta Índice de Carr con GA.

Para los polvos con MD el análisis de varianza (anexo 10) ($p > 0,05$), mostró que solo los efectos cuadráticos B² y C² tuvieron influencia significativa sobre el índice de Carr (anexo 14), el comportamiento de los datos de esta variable, muestra un valor mínimo de 13,5% para valores de 25000 RPM y 22,5% de MD. Valores inferiores y superiores de RPM y % MD mostrados anteriormente registran índices de Carr mayores.

Nótese que el valor mínimo obtenido de esta variable es menor para polvos con MD que con GA, debido a que las partículas de polvo con MD presentan una geometría más regular que con GA donde se observan partículas más amorfas (figuras 23 y 24), esta diferencia de esfericidades hace que los polvos de MD tengan un mínimo cambio en el volumen cuando se compactan por acción mecánica, mostrando valores más reducidos de Índice de Carr.

5. Resultados y discusiones

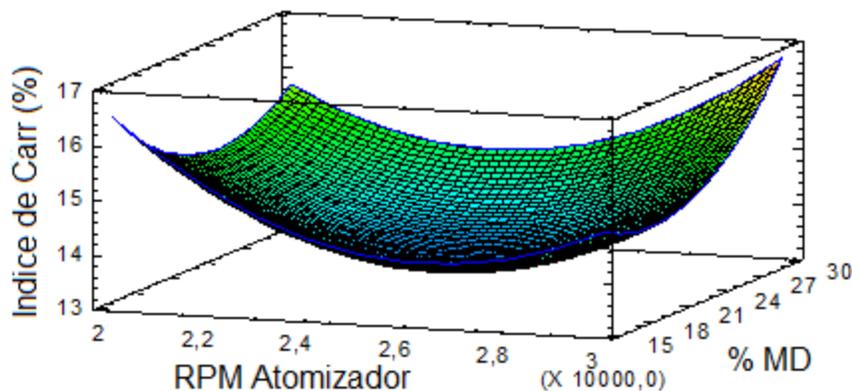


Figura 16. Superficie de respuesta Índice de Carr con MD.

5.3.7 Higroscopicidad

Dentro del rango de valores estudiados de cada variable independiente, la higroscopicidad de los polvos de zapote no fue afectada significativamente ($p > 0,05$) por ninguno de los factores del proceso, ni tampoco por las interacciones cuando se utilizó GA como encapsulante (anexo 15).

Mientras que con el uso de MD, el análisis de varianza (anexo 11) indica que el factor C y las interacciones BC y C^2 afectaron significativamente la higroscopicidad de los polvos (anexo 14), observándose un comportamiento inverso entre el contenido de sólidos de MD y la higroscopicidad (figura 17), debido a que al aumentar el contenido de los sólidos de MD, se protege mucho más la matriz encapsulada, evitando que la partícula absorba humedad del medio, disminuyéndose la higroscopicidad. Consecuentemente Mendoza (2015), reporta un comportamiento similar para mango en polvo, pero con valores de higroscopicidad más altos a los de la presente investigación. De igual manera Mishra et al. (2014) encontraron el mismo comportamiento en polvo de Amla (*Emblica officinalis*) utilizando MD como encapsulante.

Por otro lado la interacción BC (anexo 19) muestra que la higroscopicidad más alta (10,2%) se registra cuando se utiliza la menor concentración de MD con la menor velocidad de atomización, mientras que los valores de higroscopicidad exhiben su menor valor (7,5%) al utilizar la mayor concentración de MD con la menor velocidad de atomización, dado que menores velocidades de atomización generan gotas con mayor diámetro disminuyendo el área superficial de contacto de las partículas secas obtenidas y esto sumado al aumento de concentración de MD que protege la partícula del efecto de la humedad de medio, ayuda a disminuir la higroscopicidad de los polvos obtenidos.

5. Resultados y discusiones

La higroscopicidad media en los puntos centrales fue de 11,4% y 8,36% para GA y MD respectivamente, mostrando que la MD protege más la partícula de polvo de la ganancia de humedad proveniente del medio a 25 °C.

Para los polvos de zapote con MD, la temperatura de aire y la velocidad de atomización, no afectaron significativa la higroscopicidad en el rango de valores de estudio.

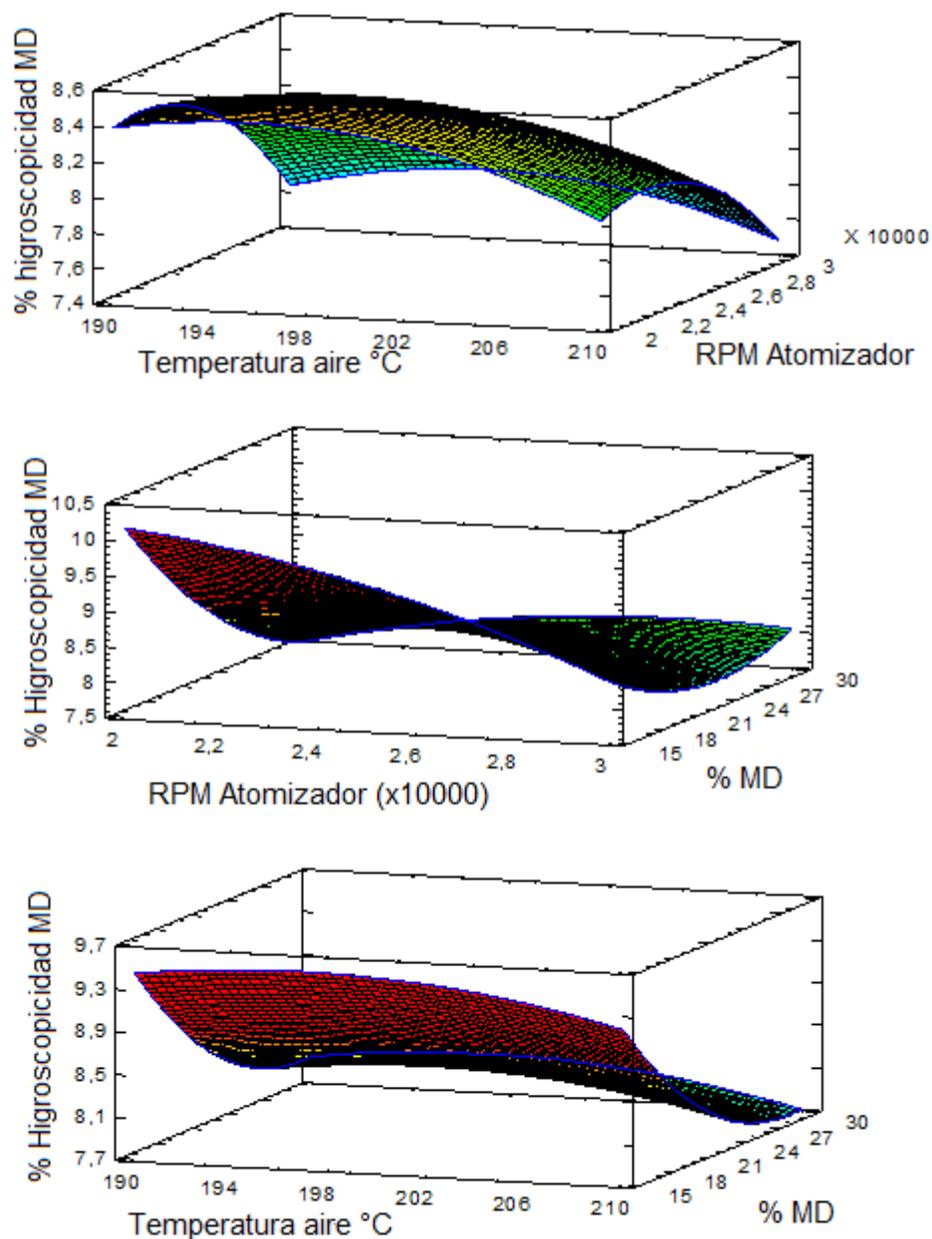


Figura 17. Superficie de respuesta de la variable % de higroscopicidad con MD.

5. Resultados y discusiones

5.3.8 Eficiencia de la Microencapsulación

Como se mencionó en el apartado 2.4.4, la eficiencia de la microencapsulación en el presente trabajo fue medida de acuerdo al porcentaje de retención de ácido ascórbico durante el proceso, calculado mediante las concentraciones de vitamina C antes y después del proceso de secado. La tabla 12 muestra la concentración de vitamina C (mg vitamina C 100g de polvo⁻¹) en los polvos de zapote obtenidos por cada tratamiento.

Tabla 12. Concentración final de Vitamina C en polvos con MD y GA

TTO	Polvo de zapote con MD		Polvo de zapote con GA	
	Valor*	α	Valor*	α
1	35,60	0,90	34,82	1,20
2	31,71	1,10	32,36	1,50
3	32,58	0,75	34,70	1,46
4	31,54	1,00	32,01	1,05
5	25,23	1,30	26,93	0,78
6	24,50	0,72	25,33	0,93
7	25,66	1,50	26,70	1,24
8	26,12	1,10	26,93	1,56
9	32,44	1,00	31,95	1,27
10	21,38	1,60	20,88	1,35
11	23,68	0,96	26,47	1,45
12	30,98	0,60	31,53	0,96
13	28,92	1,10	25,15	1,07
14	21,52	1,15	22,07	1,31
15	30,83	0,90	30,06	1,27
16	29,54	1,50	29,47	0,91
17	29,67	1,32	29,56	1,35
18	30,31	1,05	30,02	1,17
19	30,48	1,40	30,23	1,28
20	30,43	1,20	30,45	1,39

*: Promedio

α : desviación estándar

El análisis de varianza (anexo 12) de los datos experimentales, mostró que sólo la temperatura del aire de secado y el contenido de sólidos de encapsulante, tuvo un efecto significativo sobre el porcentaje de retención de vitamina C, cuando se utilizó GA. Los polvos de pulpa de zapote pierden mayor cantidad de vitamina C cuando la temperatura aumenta, y retienen mayor cantidad cuando aumentan los niveles de GA

5. Resultados y discusiones

(figura 18) pasando de 59,4% a 80,3% cuando la concentración de GA pasó de 15% a 30% respectivamente. Teniendo en cuenta la alta termosensibilidad del ácido ascórbico, este se evapora con mayor facilidad al aumentar la temperatura de entrada, pero esta pérdida se puede contrarrestar con el aumento de la concentración de sólidos de GA, mostrando este encapsulante su capacidad protectora. El mismo comportamiento registran Mendoza (2015) y Frascareli et al (2012), para mango en polvo encapsulado con MD (con valores inferiores a los de la presente investigación) y aceite de café microencapsulado con GA respectivamente. Consecuentemente Mishra et al. (2014) también encontró que el contenido de componentes fenólicos totales en polvo de jugo de Amla (*Emblica officinalis*) se conservó mejor cuando los niveles de MD aumentaron y disminuyó con el incremento de la temperatura de entrada.

En el presente trabajo el aumento de la velocidad de atomización aumentó levemente el porcentaje de retención de ácido ascórbico en los polvos con GA aunque estadísticamente no tiene efecto significativo alguno sobre esta respuesta, al igual que las distintas interacciones.

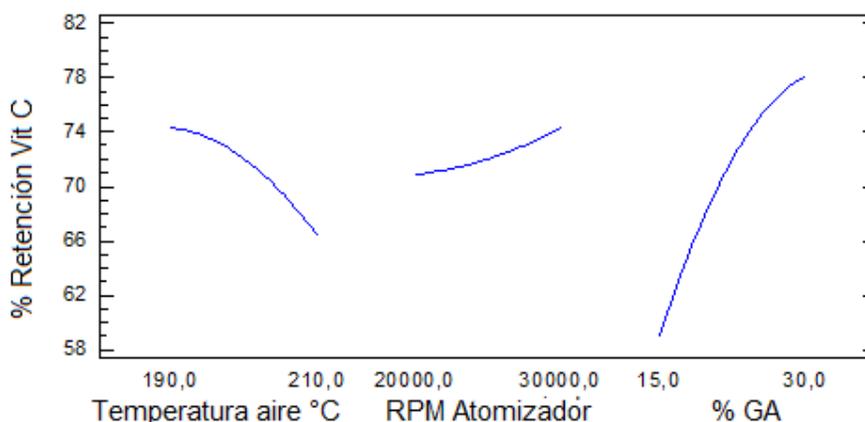


Figura 18. Grafica de efectos principales sobre % retención de Vitamina C (GA)

Para los polvos con MD, el análisis de varianza (anexo 12) evidenció que solo el contenido de sólidos del encapsulante tuvo efecto significativo ($p > 0,05$) sobre la retención de vitamina C. Según los resultados, a diferencia de la GA, la MD eliminó el efecto de la temperatura sobre la pérdida de vitamina C en el rango de temperatura utilizado, mostrando sus excelentes características de agente protector.

La figura 19 muestra la relación directa de estas dos variables, registrando un valor mínimo de retención de ácido ascórbico de 60,2% cuando el contenido de MD es del 15% y un valor máximo de 80,2% con 30% de MD.

En los puntos centrales la media del % retención de vitamina C fue de 73,15% y 72,3% para MD y GA respectivamente, aunque es muy leve la diferencia, se muestran mejores resultados de retención para polvos con MD.

5. Resultados y discusiones

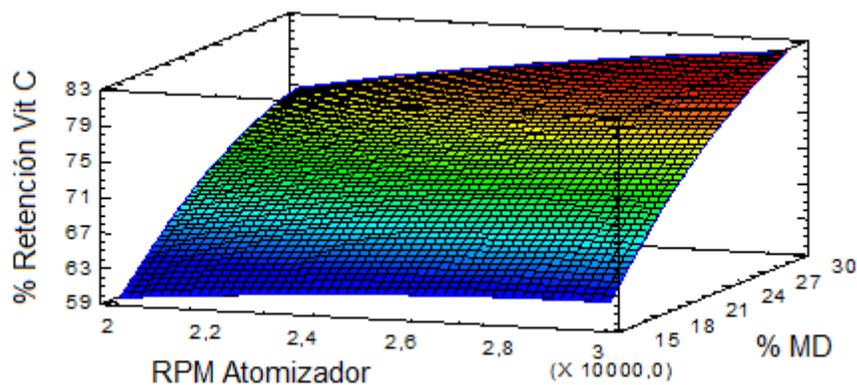


Figura 19. Superficie de respuesta de la variable % Retención Vitamina C con MD.

5.3.9 Color

La tabla 13 muestra los valores obtenidos de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE , para los polvos de los distintos tratamientos con GA y MD. Los datos de los parámetros para la pulpa de zapote fresco se registran en la tabla 14.

5. Resultados y discusiones

Tabla 13. Valores de los parámetros L*, a*, b* y ΔE de polvos de zapote microencapsulados

TTO	GA							MD						
	Parámetros			α				Parámetros			α			
L*	a*	b*	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	L*	a*	b*	ΔE	
1	60,9	13	30,56	0	0,01	0,01	37,94	66,49	13,66	33,64	0,04	0,02	0,02	43,15
2	57,74	12,2	29,67	0	0,01	0,03	35,5	64,01	13,68	33,02	0,04	0,04	0,03	40,81
3	69,49	11,6	29,25	0	0,01	0,01	45,98	72,18	12,32	29,81	0,07	0,05	0,17	48,19
4	59,33	12,4	29,17	0	0,01	0,01	36,66	61,65	13,72	32	0,07	0,03	0,04	38,51
5	78,19	9,13	26,17	0	0,01	0,01	54,68	79	9,46	26,8	0,13	0,07	0,11	55,32
6	74,48	10,1	28,98	0	0	0,01	51,07	74,9	10,38	29,27	0,18	0,14	0,22	51,38
7	75,92	8,1	23,5	0	0	0,01	53,02	78,4	8,53	24,93	0,09	0,04	0,06	55,09
8	75,41	8,87	25,44	0	0,01	0	52,24	77,26	8,92	25,8	0,17	0,12	0,2	53,91
9	63,55	10,8	28,32	0	0,01	0,01	41,02	66,2	12,64	32,09	0,16	0,1	0,24	43
10	71,83	9,47	26,93	0	0,01	0	48,81	76,72	9,9	26,64	0,12	0,14	0,39	53,05
11	65,22	11,7	35,52	0	0,01	0,01	43,34	68,22	12,47	33,6	0,01	0,04	0,11	45,16
12	64,72	9,08	25,01	0,01	0,01	0,02	42,67	65,5	9,4	25,7	0	0,01	0,02	43,2
13	36,92	12,1	21,98	0,05	0,01	0,02	20,94	37,2	12,4	22,3	0,01	0,25	0,06	20,77
14	79,05	6,98	23,3	0	0,01	0	56,33	79,76	7,1	24	0,02	0,02	0	56,91
15	53,82	7,87	24,68	0	0,01	0,02	34,58	54,5	8,1	25,3	0,03	0,1	0,03	34,95
16	64,49	10,5	30,86	0	0,01	0,01	42,28	68,57	11,49	31,67	0,03	0,04	0,06	45,52
17	67,39	9,35	29,2	0	0,01	0,01	45,12	65,13	9,2	29,5	0	0,02	0,2	43,28
18	57,49	12	33,39	0	0,01	0,03	36,16	68,14	11,13	32,94	0,6	0,06	0,11	45,52
19	50,93	12,1	30,66	0,01	0,01	0,01	30,3	58,44	11,99	31,36	0	0,02	0,02	36,49
20	66,59	8,77	28,76	0,01	0,01	0,02	44,66	76,81	8,34	27,11	0,43	0,2	0,32	53,79

α: desviación estándar

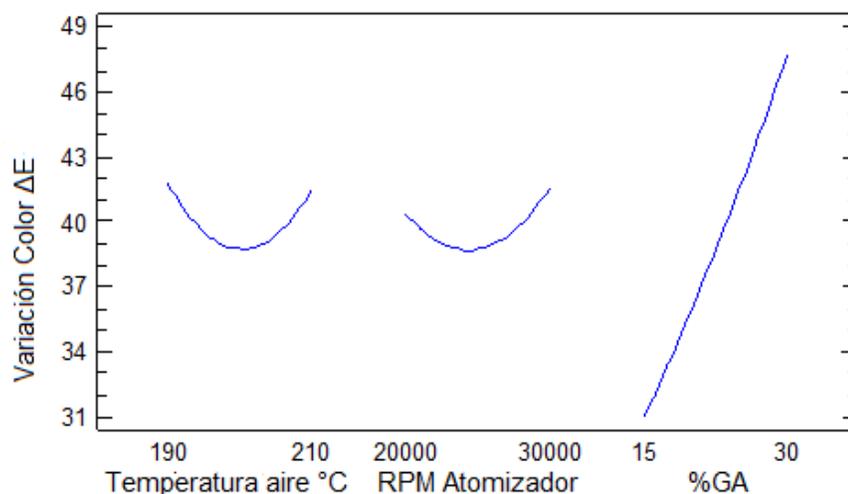
5. Resultados y discusiones

Tabla 14. Valores de los parámetros de color de la muestra patrón

Parámetros			α		
L*	a*	b*	L*	a*	b*
28,09	30,97	24,27	0,02	0,10	0,25

Para los polvos obtenidos con ambos encapsulantes, el análisis de varianza (anexo 13) muestra con un nivel de confianza del 95%, que solo la concentración del encapsulante influencia significativamente la variación del color (ΔE) en las muestras, con respecto a la pulpa original, evidenciando que al aumentar los niveles de encapsulante, aumenta la variación en el color (figura 20), pasando el rojo ladrillo de la pulpa original a un rosado ladrillo en los polvos, los factores Temperatura de aire y velocidad del atomizador no mostraron una influencia significativa sobre la variación del color, al igual que las distintas interacciones.

El parámetro L*, indica la luminosidad de la muestra, para todos los polvos con MD y GA este valor fue mucho mayor que la del patrón (28,09), el análisis de varianza (anexo 13) evidenció un efecto significativo de la concentración de agente de pared sobre la luminosidad, los factores temperatura de entrada y velocidad de atomización no mostraron efecto significativo ($p > 0,05$), al igual que ninguna de sus interacciones. La luminosidad de los polvos se incrementó con la adición de sólidos de encapsulantes (figura 21), pues al adicionar mayor contenido de MD o GA se obtienen polvos menos oscuros, dado el color (blanco) inherente de ambos encapsulantes. Polvos de tomate obtenidos mediante secado por el método de cinta fundida, también presentaron valores altos de luminosidad cuando aumentó el nivel de contenido de MD, según reporta Durigon et al. (2016) igual comportamiento reportan Zohurul et al. (2016) en polvo de jugo de naranja con MD.

**Figura 20.** Grafico efectos principales sobre la variable ΔE

5. Resultados y discusiones

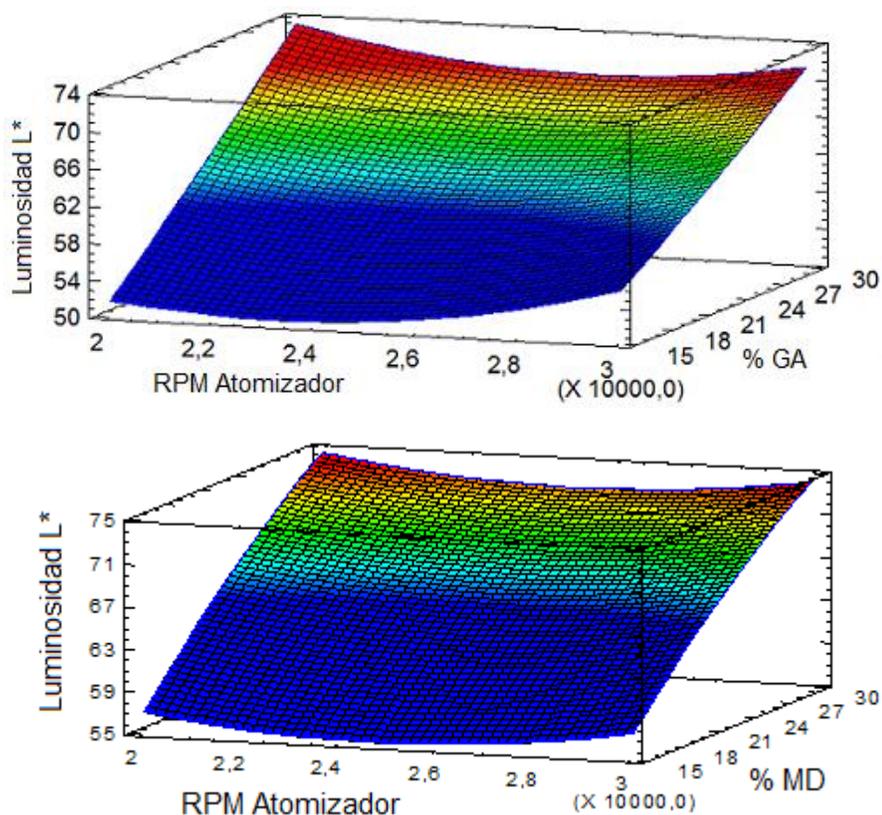
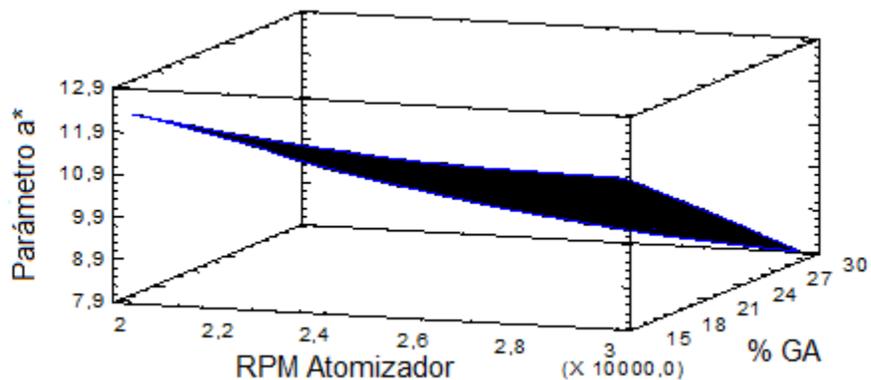


Figura 21. Superficie de respuesta de Luminosidad L* con GA y MD.

El parámetro a^* mostró ser influenciado por la concentración de ambos encapsulantes, disminuyendo con el aumento de los sólidos de GA y MD, este comportamiento coincide con el reportado por Zohurul et al. (2016) en polvo de jugo de naranja con MD, los factores temperatura de aire y velocidad de atomización no mostraron influencia significativa sobre este parámetro, mientras que para el parámetro b^* , la velocidad de atomización y el efecto cuadrático C^2 mostraron efecto significativo cuando se usó GA, disminuyendo su valor al aumentar la velocidad de atomización (figura 22), para polvos con MD ninguno de los factores de proceso tuvo influencia significativa sobre el parámetro b^*



5. Resultados y discusiones

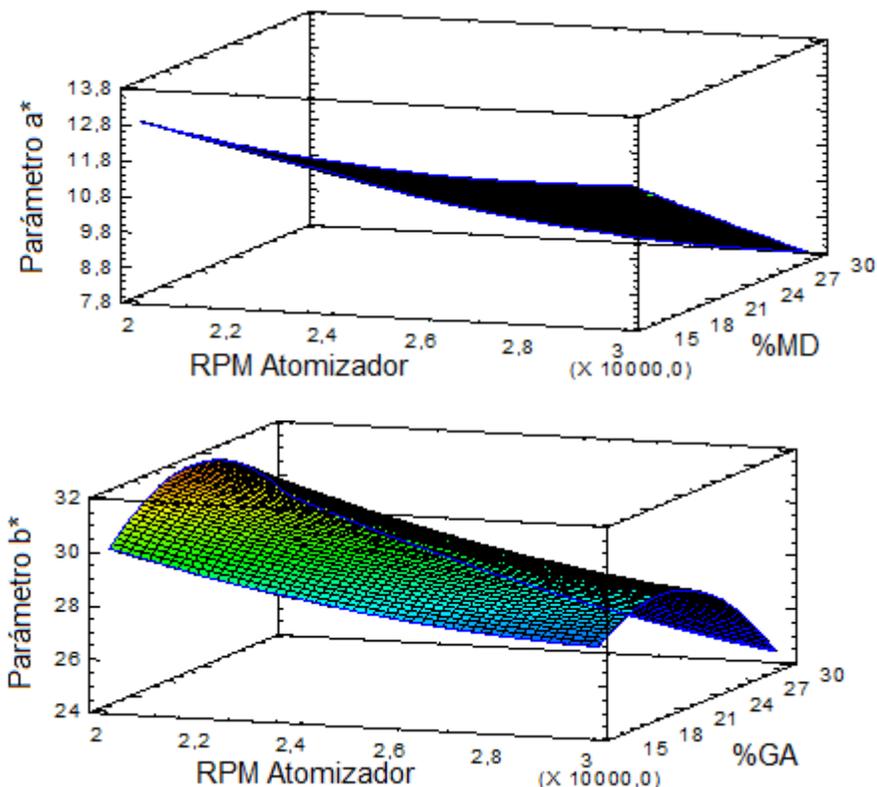


Figura 22. Superficie de respuesta de los parámetros a^* y b^* para polvos con GA y MD

5.3.10 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Las imágenes obtenidas mediante SEM (figuras 23 y 24) con aumentos de 500x y 1000x, muestran en micrómetros, las esferas típicas de microencapsulados, dada la atomización característica del proceso en pequeñas gotas, las partículas de polvo de zapote con MD presentan una esfericidad más definida y a su vez poca adherencia entre ellas, mientras que las partículas de polvo con GA, evidencian una geometría más amorfa y grupos de partículas formando aglomerados unas con otras.

5. Resultados y discusiones

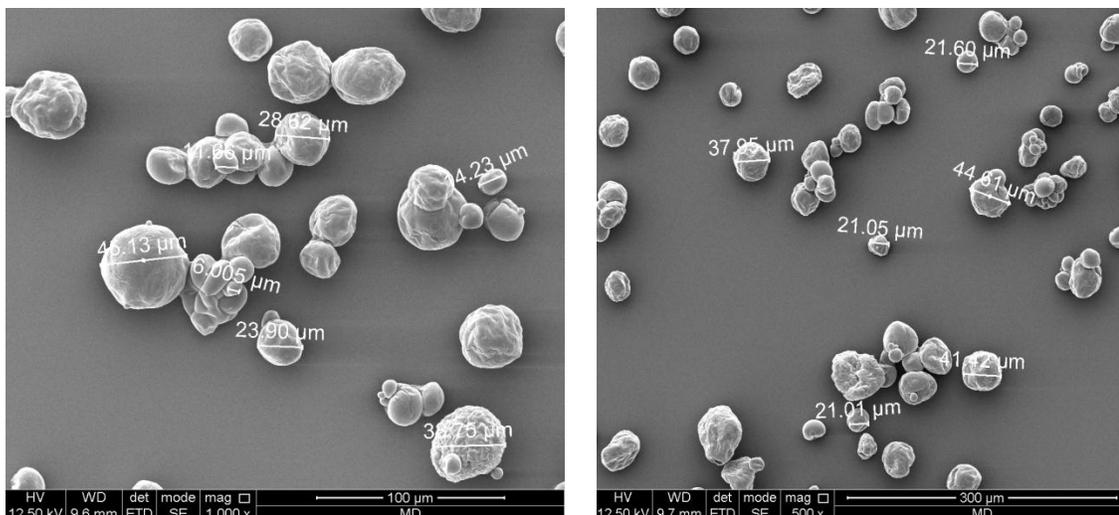


Figura 23. SEM partículas de polvo de zapote con MD

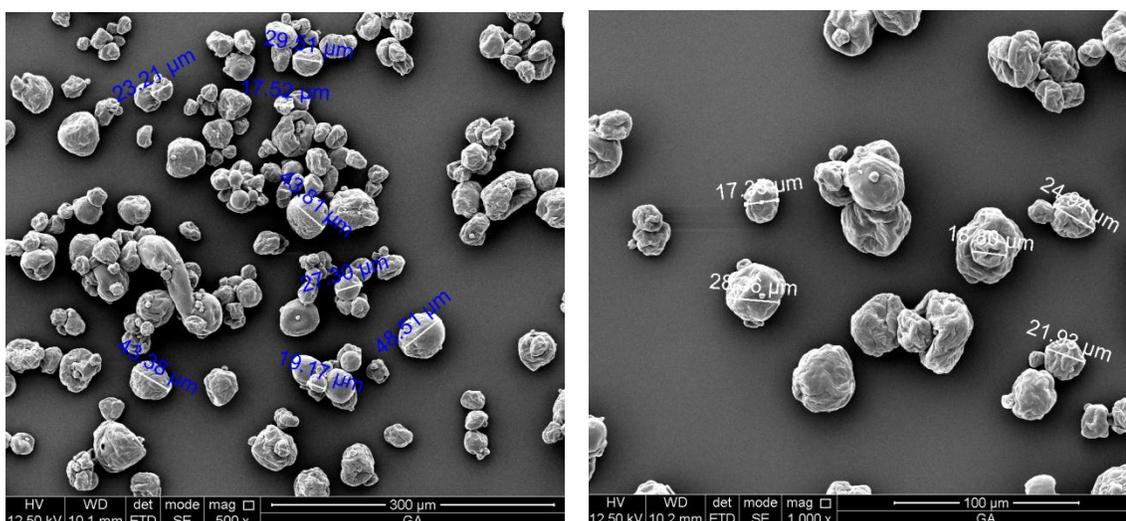


Figura 24. SEM partículas de polvo de zapote con GA

5.4 Selección de la muestra de zapote en polvo microencapsulado con MD y GA, de mayor similitud sensorial con respecto a la pulpa de zapote fresco.

La tabla 15 muestra las unidades de zapote en polvo microencapsulado que fueron sometidas a la prueba discriminativa triangular, dado que se realizó una selección previa para eliminar las muestras en polvo que presentaban apariencia a producto quemado u otra característica inadecuada, de acuerdo a inspección visual y de sabor. Para ambos encapsulantes resultaron escogidos los mismos tratamientos en la selección.

5. Resultados y discusiones

Tabla 15. Tratamientos sometidos a prueba triangular (MD y GA)

TTO	T. E (°C)	V.A (RPM)	C.E (%p/p)
1	190	20000	15
3	190	30000	15
5	190	20000	30
7	190	30000	30
9	183,182	25000	22,5
12	200	33409	22,5
14	200	25000	35,1134
15	200	25000	22,5

En la tabla 16 se muestran los resultados de la prueba triangular para polvos de zapote con GA y MD, en donde se observa el número de respuestas correctas por corrida y el respectivo análisis estadístico según anexo 2, la cual indica que para que exista diferencias significativas al 1%, deben dar respuestas correctas entre la muestra de jugo de zapote original y la muestra de jugo de zapote con polvo reconstituido en leche, al menos 15 catadores de los 24 utilizados.

Tabla 16. Resultados prueba triangular para polvos microencapsulados

TTO	N° de respuestas correctas	
	GA	MD
1	21 ^S	16 ^S
3	22 ^S	17 ^S
5	19 ^S	19 ^S
7	20 ^S	18 ^S
9	23 ^S	19 ^S
12	18 ^S	15 ^S
14	23 ^S	21 ^S
15	16 ^S	8 ^{NS}

NS: no existe diferencia significativa

S: existe diferencia significativa

La prueba muestra con un nivel de confianza del 99%, que para todas las muestras de polvo de zapote microencapsulado con GA, existen diferencias significativas con respecto al jugo de zapote con pulpa fresca, lo cual quiere decir que no poseen características sensoriales similares, mientras que para los polvos microencapsulados con MD, solo el tratamiento 15 si evidencia características sensoriales similares con el

5. Resultados y discusiones

jugo de zapote fresco. Se concluye que los polvo con 22,5 % de adición de MD, 25000 rpm y una temperatura de aire de secado de 200 °C, se obtienen características sensoriales similares al jugo de zapote con pulpa fresca en leche.

5.5 Isotermas de adsorción

La muestra utilizada para la obtención de las isotermas a tres temperaturas fue la de polvo microencapsulado con 22,5 % de MD, 25000rpm y secado a 200 °C, la cual pertenece al tratamiento que mostró similitud sensorial con el producto patrón. Los datos de humedad de equilibrio (X_{eq}) en (Kg agua Kg ss⁻¹) y actividad acuosa (a_w) se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Valores de actividad acuosa y humedad de equilibrio para polvos con MD

Temperatura					
30 °C		40 °C		45 °C	
a_w	X_{eq}	a_w	X_{eq}	a_w	X_{eq}
0,021	0,005	0,023	0,031	0,010	0,031
0,034	0,008	0,080	0,0729	0,031	0,061
0,129	0,040	0,156	0,121	0,108	0,127
0,213	0,084	0,278	0,2069	0,195	0,217
0,388	0,177	0,439	0,3456	0,366	0,340
0,464	0,246	0,500	0,3999	0,510	0,428
0,592	0,402	0,580	0,4943	0,589	0,530
0,642	0,515	0,680	0,663	0,670	0,669

Los datos experimentales de a_w no presentaron un comportamiento definido con el cambio de temperatura.

Los valores de los parámetros de GAB, HENDERSON, OSWIN y PELEG obtenidos por regresión, se reportan en las tablas 18, 19 y 20, así como también los valores de R^2 y el error relativo porcentual (E) calculado con la ecuación 9.

Tabla 18. Parámetros del modelo de GAB para polvos con MD

Temperatura (°C)	X_m	C	K	R^2	E
30	1,70018E-05	9,28191	4,06972	-0,83359	87,744
40	0	2,01555	2,46508	-0,21753	100
45	0	2,01112	4,05194	-1,93176	100

Tabla 19. Parámetros de los modelos de Henderson y Oswin para polvos con MD

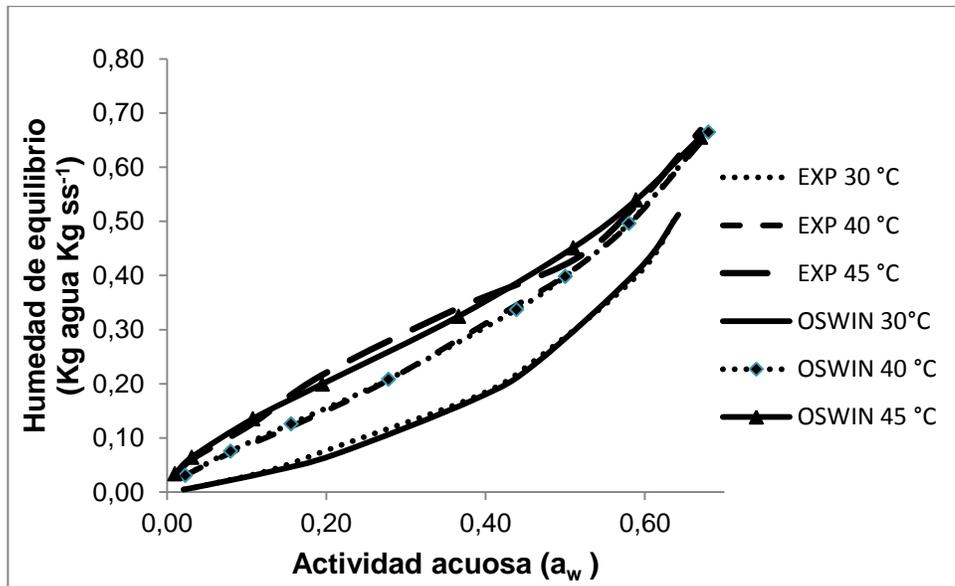
Henderson				
Temperatura (°C)	A	B	R²	E
30	1,6958	0,7264	0,99688	18,05
40	1,8312	1,0946	0,99747	9,14
45	2,0864	1,4027	0,99178	8,79
Oswin				
30	0,2780	1,0474	0,99874	4,62
40	0,3984	0,6797	0,99965	1,63
45	0,4412	0,5590	0,99623	5,50

Tabla 20. Parámetros del modelo Peleg para polvos con MD

Temperatura (°C)	K₁	n₁	K₂	n₂	R²	E
30	0,6071	1,3016	4,0297	7,1007	0,99973	4,85
40	28,8666	101,5977	1,0214	1,2621	0,98691	19,40
45	0,6780	0,7117	3,6834	7,8314	0,99892	5,00

Según los datos observados para el ajuste de cada modelo de estudio, el de GAB (tabla 18) resulta ser el modelo menos ajustado a los datos experimentales, los modelos de Henderson, Oswin y Peleg (tablas 19 y 20) mostraron buenos ajustes según el coeficiente de determinación (R^2), pero según el error relativo porcentual solo el modelo de Oswin presentó valores menores de 10, considerando con esto, que el modelo de Oswin fue el que mejor se ajustó a los valores experimentales de X_{eq} y a_w para las tres temperaturas seleccionadas.

La figura 25 muestra las isotermas de adsorción de los polvos de zapote a 30 °C, 40 °C y 45 °C con los datos experimentales (EXP) y las del modelo de Oswin, donde se observa el incremento de la humedad de equilibrio, conforme aumenta la temperatura.



5. Resultados y discusiones

Figura 25. Isotermas de polvo de zapote a las tres temperaturas de estudio, ajustadas al modelo de Oswin.

5.6 Determinación de las propiedades termodinámicas derivadas de las isotermas de adsorción

Los valores de la entalpia o calor neto isostérico (KJ mol^{-1}) fueron calculados con la pendiente ($\Delta H/R$) de cada recta de la familia de curvas esotéricas $\ln(a_w)$ vs T^{-1} a distintas humedades de equilibrio, y con el intercepto al eje vertical ($\Delta S/R$) se determinó la entropía. R es la constante de los gases ideales ($0,4615 \text{ KJ Kg agua}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

La figura 26 muestra la gráfica de calor neto isostérico contra el contenido de humedad, donde se observa que el contenido de humedad y la entalpia de adsorción presentan una correlación exponencial (tabla 21) ajustada a los datos, McMinn y Magee (2003) reportan una correlación de potencia en papa, mientras que Ceballos (2008) reportó una correlación lineal para polvos de guanábana. La correlación obtenida en la presente investigación muestra que para menores contenidos de humedad la energía aplicada aumenta, lo cual indica que se necesita mucha más energía para evaporar las ultimas trazas de agua contenidas en los polvos.

Tabla 21. Correlación entre ΔH y humedad de polvos de zapote, en base seca

Correlación	R^2
$\Delta H = 156,92e^{-6,503X_{bs}}$	0,9926

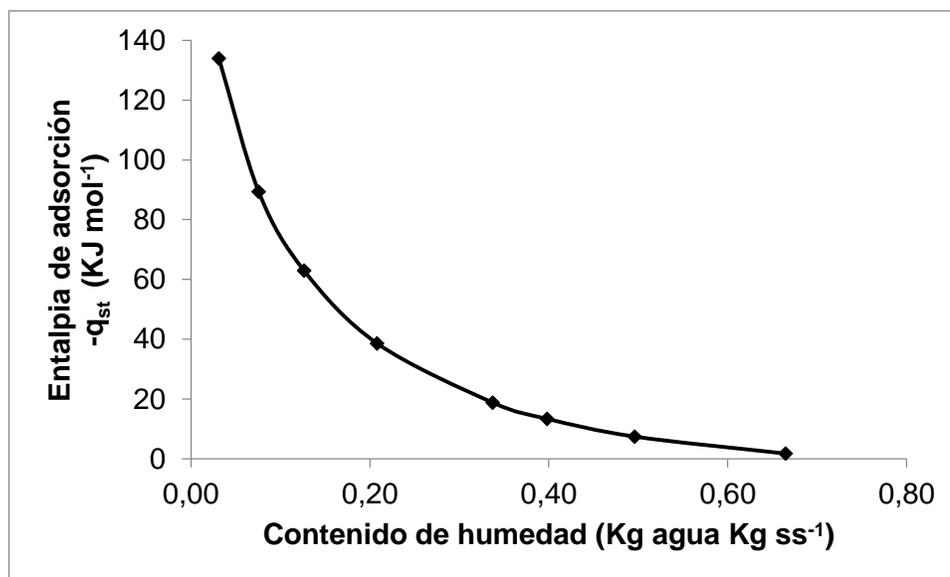


Figura 26. Relación de la humedad del polvo de zapote vs Entalpia de adsorción

6. CONCLUSIONES

La pulpa de zapote con adición de maltodextrina o goma arábica, a diferentes concentraciones, presentó un comportamiento reológico no newtoniano de naturaleza pseudoplástica y dependiente del tiempo. La pulpa es más pseudoplástica a medida que aumenta la concentración de maltodextrina o goma arábica.

La viscosidad aparente de la pulpa registra mayores valores con adición de goma arábica que con maltodextrina a iguales valores de velocidades de cizalla.

La pulpa sin encapsulante registra mayor porcentaje de tixotropía, disminuyendo con el aumento de la concentración de los encapsulantes, aunque con goma arábica presenta mayor comportamiento tixotrópico que con maltodextrina a las mismas concentraciones.

El modelo de Ostwald de Waele o Ley de Potencia se ajustó adecuadamente a los datos experimentales de gradiente de velocidad y esfuerzo de corte de la pulpa de zapote con MD y GA.

La MD minimiza los efectos negativos de la temperatura sobre la pulpa de zapote, mejorando más la solubilidad, rendimiento y retención de vitamina C de los polvos, que con GA.

Las partículas de polvo obtenidas con MD tienen mejor esfericidad que las partículas de polvo de zapote con GA las cuales muestran formación de un mayor número de partículas amorfas y agregadas unas con otras.

Los polvos de zapote obtenidos con MD presentan mejores características de fluidez que los polvos con GA, basado en los valores de obtenidos del ángulo de reposo a iguales concentraciones de encapsulantes, los cuales fueron mayores para GA.

El mejor tratamiento, teniendo en cuenta la prueba sensorial, es el de los polvos microencapsulados con 22.5% de MD, temperatura de aire de secado 200 °C y 25.000 rpm del disco atomizador, dado que resultó ser el único tratamiento con similitud sensorial a la pulpa de zapote fresco. Tratamiento que posee un alto porcentaje de retención de Vitamina C (73,15%), una de solubilidad del 90,45% y 45% de rendimiento de sólidos recuperados.



Basados en la retención de vitamina C, el porcentaje de rendimiento y la solubilidad, las mejores condiciones de operación se obtienen con una temperatura de aire de secado de 190 °C, una velocidad de disco atomizador de 30000 rpm y 30% de MD, con los que se obtiene 73,8% de rendimiento, 88,73% de solubilidad y 81,6% de retención de Vitamina C.

El modelo de Oswin fue el modelo de isothermas que mejor se ajustó a los datos experimentales de humedad de equilibrio y actividad acuosa.



7. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar investigaciones de obtención de pulpa de zapote en polvo mediante liofilización y realizar un comparativo con los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Estudiar el comportamiento de otros tipos de agentes encapsulantes para la obtención de polvo de zapote utilizando el mismo método de secado.

Realizar estudios para optimizar las variables en la obtención de zapote en polvo con los agentes utilizados.

Desarrollar nuevos estudios de obtención de pulpa de zapote microencapsulado mediante secado por aspersion, variando otras variables del proceso como el flujo de alimentación y la velocidad de flujo del aire de calentamiento.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, N., Messaoud, G., Desobry, S., Correia, J y Rodrigues, S. 2016. Effect of drying technique and feed flow rate on bacterial survival and physicochemical properties of a non-dairy fermented probiotic juice poder. *Journal of Food Engineering* 189: 45-54

Ahmed, M., Akter, S., Lee, J. y Eun, J. 2010. Encapsulation by spray drying of bioactive components, physicochemical and morphological properties from purple sweet potato. *LWT - Food Science and Technology* 43: 1307-1312.

Andrade, R., Montes, E., Torrez, R., Perez, O., Bustamante, C y Mora, B. 2010. Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr), *Rev. Téc. Ing. Universidad. Zulia*. Vol. 33(2): 138 – 144.

Andrade, R., Ortega, F., Montes, E., Torrez, R., Perez, O., Castro, M y Gutierrez, L. 2009. Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) variedades H híbrido de Klom Sali, Puerto Rico, D14 y Red. *Revista de la facultad de Química farmacéutica Universidad de Antioquia-Medellín- Colombia*. vol.16(1):13-18

Andrade, R., Torres, R., Montes, E., Pérez, O., Restan, L y Peña, R. 2009. Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero (*Achras sapota* L.), *Revista de la Facultad de Agronomía*. 26(4): 591-604.

Azurdia, C. 2006. Tres Especies de Zapote en América Tropical (*Pouteria campechiana*, *P. sapota* y *P. viridis*). Ed impresión y diseño RPM, Southampton, UK, p: 4-6.

Barbosa-Canovas, G., Ortega, E., Juliano, P y Yan., H. 2005. *Food Powders*. Washinton State University. Ed, Kluwer Academic/ Plenum Publisher. Washinton, Estados Unidos. Pag 71.

Barros, R., Vilela, S., Keven, E., Silva, Y., Barboza, H., Carmo, E., Rodriguez, C., Yoshida, M., y Albarenga, D. 2016. Study of ultrasound-assisted emulsions on microencapsulation of ginger essential oil by spray drying. *Journal Industrial Crops and Products*. 94: 413-423.

Bhusari, S., Muzaffar, K y Kumar, P. 2014. Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder. *Journal Powder Technology*. 266: 354-364

Cano-Chauca, M., Stringheta, P., Ramos, A y 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*. 6: 420 – 428

Carneiro, H., Tonon, R., Grosso, C., Hubinger, M. 2013. Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*. 115: 443-451

Carr, L. 1976. Powder and granule properties and mechanics. In *Gas-Solids Handling in the Processing Industries*. Marchello, J.M. and Gomezplata, A. Ed. Marcel Dekker, Inc. New York.

Ceballos, A. 2008. Estudio comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Caldas.

Chang, C., Varankovich, N y Nickerson, M.T. 2016. Microencapsulation of canola oil by lentil protein isolate-based wall materials. *Food Chemistry* 212: 264–273

Chávez-Salazar, A., Bello-Pérez, L., Agama-Acevedo, E., Castellanos-Galeano, F., Álvarez-Barreto, C y Pacheco-Vargas, G. 2017. Isolation and partial characterization of starch from banana grown in Colombia. *International Journal of Biological Macromolecules* 98: 240-246.

Chávez-Salazar, A., Castellanos-Galeano, F., Álvarez-Barreto, C., Bello-Pérez, L., Cortes-Rodríguez, M y Hoyos-Leiva, J. 2019. Optimization of the Spray Drying Process of the Esterified Plantain Starch by Response Surface Methodology. *Starch Journal*. 71

Dak, M., Verma, R y Jaaffrey, S. 2007. Effect of temperature and concentration on Rheological properties of “Kesar” mango juice. *Journal of Food Engineering*, 80(4): 1011.-1015.

Dokic, P., Dokic, L., Sovilj, V y Katona, J. 2004. Influence of maltodextrin dextrose equivalent value on rheological and dispersion properties of sunflower oil in water emulsions. *Acta Periodica Technologica*, 35:17–24.

Durigon, A., De Souza, P., Carciofi, B. y Laurindo, J. 2016. Cast-tape drying of tomato juice for the production of powdered tomato, *Food and Bioproducts Processing*. 100(1): 145-155

Edris, A.E., Kalemba, D., Adamiec, J y Piątkowski, M. 2016. Microencapsulation of *Nigella sativa* oleoresin by spray drying for food and nutraceutical applications. *Journal Food Chemistry*, 204: 326-333

Eim, V. 2012. Optimización del proceso de secado en base a criterios de calidad. aplicación al diseño de un alimento cárnico enriquecido en fibra alimentaria. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears. España.

Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi, A y Omid, M. 2012. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *food and bioproducts processing* 90:667–675

Fischer, P., Pollard, M., Erni, P., Marti, I y Padar F. 2009. Rheological approaches to food systems. *Journal Comptes Rendus Physique*, 10(8): 740-750

Frascareli, E., silva, V., Tonon, R y Hubinger, M. 2012. Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. *Food and Bioproducts Processing*. 90: 413-424.

Gabas, A., Telis, V., Sobral, P., Telis, J. 2007. Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *Journal food engineering* 82:246-252.

Gadelha, G., Maia, M., Rodrigues, A., Sousa, E., Dantas, M y De Azeredo, H. 2009. Physical properties of spray dried acerola pomace extract as affected by temperature and drying aids. *LWT - Food Science and Technology* 42(2): 641-645.

Gaona, A., Alía, I., López, V., Andrade, M., Colinas, M y Villegas, O. 2007. Caracterización de frutos de zapote mamey (*Pouteria sapota*) en el suroeste del estado de Morelos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(1):41 – 47

Graham, R. 2002. Fundamentals of particles technology. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Loughborough. Ed, Midland Information Technology and Publishing. Shepshed, Leicestershire, Reino Unido: P99.

Hernández, G. 2011. Desarrollo de un producto de uchuva (physis peruviana l.) en polvo secado por atomización adicionado con vitamina C, ácido fólico, hierro y fibra soluble”. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia.

Hosseini, A., Jafari, S., Mirzaei, H., Asghari, A y Akhavan, S. 2015. Application of image processing to assess emulsion stability and emulsification properties of Arabic gum. *J Carbohydrate Polymers* 126:1–8

Ibarz, A. 2000. Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria. Ed, Acribia., Zaragoza- España, p89-104

ICBF., 2005. Tabla de composición de alimentos Colombianos. 2da Edición., Instituto Colombiano de Bienestar familiar. Colombia. <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/tabla-alimentos>, p211

Kulandaisamy, C., Reza, A., Arul, C y Azlina, W. 2016. Microencapsulation of flexirubin-type pigment by spray drying: Characterization and antioxidant activity. *J. International Biodeterioration & Biodegradation.* 113: 350-356

Lopretti, M., Barreiro, F., Fernández, I., Damboriarena, A., Ottati, C y Olivera, A. 2007. Microencapsulación de compuestos de actividad biológica. *Revista INN TEC.* 2: 19 – 23.

Lopera, S., Guzmán, C., Cataño, C y Gallardo, C. 2009. Desarrollo y caracterización de micropartículas de ácido fólico formadas por secado por aspersión, utilizando goma arábiga y maltodextrina como materiales de pared. *Revista de la facultad de química farmacéutica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.* 16(1): 55-65

López, M., B.E., Carvajal, L.M., Millan C., L.J. 2009. Establecimiento de condiciones de la mezcla de pulpa de banano (*Musa paradisiaca* L.) para someter a secado por aspersión. *Revista de la facultad de química farmacéutica de la Universidad de Antioquia,* 16(3):287-296.

López, O. 2010. Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersión. *Rev Cubana Farm.* 44(3):381-389.

Lumdubwong, N. 2001. Low and medium-DE maltodextrins from waxy wheat starch: preparation and properties. *Starch/Staerke* 53(12): 605-615.

Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. 2006. Flavor encapsulation and controlled release – A review. *International Journal of Food Science and Technology,* 4:1–21.

Masters, K. 1991. *Spray Drying Handbook*, 5th ed. Burnt Mill, Harlow, Essex, England: Longman Scientific & Technical, New York. 740 pag

Mendoza, F. 2015. Evaluación de las condiciones de secado por aspersión de un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad Magdalena River (mangífera

indica) adicionado con bifidobacterium bifidum". Tesis de Maestría. Universidad de Córdoba. Montería. Sede Berastegui.

Mishra, P., Mishra, S y Mahanta, C. 2014. Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embllica officinalis*) juice powder. *Journal Food and Bioproducts Processing*. 92(3): 252-258.

Morera, J. 1992. El Zapote. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Programa de capacitación. Costa Rica. P:20

Navia, D., Ayala, A. y Villada, H. 2013. Determinación de Isotermas de Adsorción de agua en biocompuestos de harina termoplástica y fique. *Biotechnol. Sect. Agropecu. Agroind.* 11(1), 144–153.

Ortega, E. 2012. Unit Operations of Particulates Solids, theory and practice. Taylor y Francis Group Ed., New York, p26.

Paim, D., Costa, S., Walter, E y Tonon, R. 2016. Microencapsulation of probiotic jussara (*Euterpe edulis M.*) juice by spray drying. *LWT - Food Science and Technology* 74:21-25

Pedroza, R. 2002. Alimentos Microencapsulados: Particularidades de los Procesos para la microencapsulación de alimentos para larvas de Especies Acuícolas. Universidad Iberoamericana. Departamento de Ingenierías (Tecnología de Alimentos), México D.F. p: 438-447

Quek, S., Chok, N y Swedlund, P. 2007. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing* 46: 386–392

Rodríguez-Bernal, J., Flores-Andrade, E., Lizarazo-Morales, C., Bonilla, E., Pascual-Pineda, L., Gutiérrez-López, G y Quintanilla-Carvajal, M. 2015. Moisture adsorption isotherms of the borjón fruit (*Borojoa patinoi*. Cuatrecasas) and gumarabic powders. *Food and Bioproducts Processing*. 94: 187-198

Roessler, E., Warren, J y Guymon, J. F. 1948. Significance in triangular test. *Journal of Food Science*, 13(6):503-505

Shishir, M., Taip, F, Aziz, N y Talib, R. 2014. Physical Properties of Spray-dried Pink Guava (*Psidium guajava*) Powder. *Journal Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2: 74– 81

Simal, S., Femenia, A., Castell, A y Roselló, A. 2007. Water desorption thermodynamic properties of pineapple *Journal of food Engineering*, 80(4): 1293-1301

- Simanca, M.; Negrete, E. 1999.** Evaluación de la pasterización, edulcoración, adición de conservante químico y concentración en la conservación de pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr), tesis Ingeniero de Alimentos. Universidad de Córdoba, Montería, sede Berástegui
- Sormoli, M y Langrish, T. 2016.** Spray drying bioactive orange-peel extracts produced by Soxhlet extraction: Use of WPI, antioxidant activity and moisture sorption isotherms. *Food Science and Technology*. 72:1- 8
- Tuyen, C., Minh, H y Roach, P. 2010.** Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of Food Engineering* 98(3):385-392
- Vidal, J., Pelegrine, D y Gasparetto, C. 2004.** Effect of the rheological behavior of mango pulp (*Magífera indica* L-Keitt), *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol. 24(1): 39-42.
- Viganó, J., Azuara, E., Telis, V., Beristain, C., Jiménez, M. y Telis- Romero, J. 2012.** Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. *Journal Thermochemical acta*. 528, 63–71.
- Villalva, M., Yepes, I y Arrazola, G. 2005.** Caracterización fisicoquímica de frutas de la zona del Sinú para su agroindustrialización, *Revista temas Agrarios*. 11(1): 15-23
- Villena, M., Morales, M., Gallardo, V y Ruiz, M. 2009.** Técnicas de Microencapsulación: Una propuesta para microencapsular probióticos. *Ars Pharm*, 50(1):43 – 50.
- Yanza, E. 2003** Diseño de un secador por atomización a nivel piloto para jugo concentrado de tomate de árbol. Tesis de grado. Universidad nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Manizales, Colombia
- Yáñez, J., Salazar, J., Chaires, L., Jiménez, J., Márquez, M y Ramos, G. 2002** Aplicaciones Biotecnológicas de la Microencapsulación. *Revista Avance y Perspectiva*, 21:313 – 319.
- Zohurul, M., Kitamura, Y., Yamano, Y y Kitamura, M. 2016.** Effect of Vacuum Spray Drying on the Physicochemical Properties, Water Sorption and Glass Transition Phenomenon of Orange Juice Powder. *Journal of Food Engineering*. 169: 131-140



9. ANEXOS

Anexo 1. Formato de prueba triangular

CUESTIONARIO DE PRUEBA TRIANGULAR			
Ficha de evaluación			
Nombre: _____		Fecha: ___/___/___	
Usted está recibiendo tres muestras codificadas de jugo de zapote en leche. Dos muestras son iguales y una es diferente. Por favor pruebe las muestras de izquierda a derecha e identifique con un círculo, la muestra diferente			
876		357	286
Comentarios: _____			

Anexo 2. Tabla Roesler et all. (1948)

Número de jueces	Cantidad de respuestas correctas para que la prueba sea significativa para tres niveles de significancia		
	5%	1%	0,1%
15	9	11	12
16	9	11	12
17	10	11	13
18	10	12	13
19	11	12	14
20	11	13	14
21	12	13	15
22	12	14	15
23	12	14	16
24	13	15	16
25	13	15	17
26	14	15	17
27	14	16	18
28	15	16	18
29	15	17	19
30	15	17	19

40	19	21	24
50	23	26	28

Anexo 3. Resultados de ANOVA para la variable rendimiento, GA y MD respectivamente

Anova para rendimiento con GA

Análisis de Varianza para Rend

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temp	75,2829	1	75,2829	5,42	0,0421*
B:Atomizador	522,051	1	522,051	37,61	0,0001*
C:Conc	161,214	1	161,214	11,62	0,0067*
AA	7,58971	1	7,58971	0,55	0,4766
AB	72,6013	1	72,6013	5,23	0,0452*
AC	70,5672	1	70,5672	5,08	0,0478*
BB	37,0091	1	37,0091	2,67	0,1335
BC	516,811	1	516,811	37,24	0,0001*
CC	18,9999	1	18,9999	1,37	0,2691
Error total	138,791	10	13,8791		
Total (corr.)	1611,91	19			

Análisis de varianza para el rendimiento MD

A:Taire	2,1146	1	2,1146	0,03	0,8664
B:Vel atomizador	766,925	1	766,925	10,80	0,0082*
C:Conc maltodextrina	508,86	1	508,86	7,17	0,0232*
AA	442,393	1	442,393	6,23	0,0317*
AB	0,0231125	1	0,0231125	0,00	0,9860
AC	23,154	1	23,154	0,33	0,5806
BB	3,21567	1	3,21567	0,05	0,8358
BC	9,05251	1	9,05251	0,13	0,7285
CC	277,928	1	277,928	3,91	0,0761
Error total	710,098	10	71,0098		
Total (corr.)	2680,04	19			

Anexo 4. Resultados de ANOVA para la variable retención en cámara, GA y MD respectivamente

Anava para retención en cámara GA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Taire	2173,92	1	2173,92	17,61	0,0018*
B:vel atomizador	1214,24	1	1214,24	9,84	0,0106*
C:Conc goma arabiga	2034,27	1	2034,27	16,48	0,0023*
AA	0,283092	1	0,283092	0,00	0,9627
AB	287,64	1	287,64	2,33	0,1579
AC	768,516	1	768,516	6,23	0,0317*
BB	258,816	1	258,816	2,10	0,1782
BC	3341,12	1	3341,12	27,07	0,0004*
CC	370,617	1	370,617	3,00	0,1138
Error total	1234,26	10	123,426		
Total (corr.)	11752,5	19			

Análisis de Varianza para Retencion en Camara MD

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura Entrada	3,92424	1	3,92424	0,06	0,8185
B:Velocidad Atomizador	1089,88	1	1089,88	15,42	0,0028*
C:Concentracion MD	471,473	1	471,473	6,67	0,0273*
AA	486,094	1	486,094	6,88	0,0255*
AB	0,0171125	1	0,0171125	0,00	0,9879
AC	22,5456	1	22,5456	0,32	0,5847
BB	13,3583	1	13,3583	0,19	0,6730
BC	16,1596	1	16,1596	0,23	0,6428
CC	290,179	1	290,179	4,11	0,0703
Error total	706,813	10	70,6813		
Total (corr.)	3072,05	19			

Anexo 5. Resultados de ANOVA para la variable humedad, GA y MD respectivamente**Análisis de Varianza para % Humedad GA**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	0,08003	1	0,08003	0,13	0,7224
B:RPM Disco atomizador	0,140083	1	0,140083	0,23	0,6392
C:% Encapsulante	0,802014	1	0,802014	1,34	0,2742
AA	0,591078	1	0,591078	0,99	0,3440
AB	0,00245	1	0,00245	0,00	0,9503
AC	0,4232	1	0,4232	0,71	0,4203
BB	0,0934949	1	0,0934949	0,16	0,7011
BC	0,0882	1	0,0882	0,15	0,7093
CC	0,653223	1	0,653223	1,09	0,3210
Error total	5,99227	10	0,599227		
Total (corr.)	9,007	19			

Análisis de Varianza para % Humedad MD

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	0,0902906	1	0,0902906	0,21	0,6570
B:RPM Disco atomizador	1,02546	1	1,02546	2,38	0,1541
C:% Encapsulante	1,0897	1	1,0897	2,53	0,1430
AA	0,159173	1	0,159173	0,37	0,5570
AB	0,0098	1	0,0098	0,02	0,8832
AC	0,16245	1	0,16245	0,38	0,5531
BB	0,60027	1	0,60027	1,39	0,2654
BC	0,19845	1	0,19845	0,46	0,5129
CC	0,437383	1	0,437383	1,01	0,3376
Error total	4,31265	10	0,431265		
Total (corr.)	8,19342	19			

Anexo 6. Resultados de ANOVA para la variable a_w , GA y MD respectivamente**Análisis de Varianza para a_w GA**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Temperatura aire °C	0,000109049	1	0,000109049	0,07	0,7991
B:RPM Disco atomizador	0,00175299	1	0,00175299	1,10	0,3193
C:% Encapsulante	0,00196498	1	0,00196498	1,23	0,2931
AA	0,00137348	1	0,00137348	0,86	0,3754
AB	0,000010125	1	0,000010125	0,01	0,9381
AC	0,000325125	1	0,000325125	0,20	0,6613
BB	0,000862985	1	0,000862985	0,54	0,4790
BC	0,00148513	1	0,00148513	0,93	0,3574
CC	0,00000223099	1	0,00000223099	0,00	0,9709
Error total	0,0159578	10	0,00159578		
Total (corr.)	0,0240829	19			

Análisis de Varianza para a_w MD

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Temperatura aire °C	0,0000512425	1	0,0000512425	0,11	0,7506
B:RPM Disco atomizador	0,0000491537	1	0,0000491537	0,10	0,7556
C:% Encapsulante	0,000590108	1	0,000590108	1,23	0,2935
AA	0,000172799	1	0,000172799	0,36	0,5619
AB	0,000002	1	0,000002	0,00	0,9498
AC	0,0001125	1	0,0001125	0,23	0,6387
BB	0,000855636	1	0,000855636	1,78	0,2114
BC	0,0001125	1	0,0001125	0,23	0,6387
CC	0,00211864	1	0,00211864	4,41	0,0620
Error total	0,00480019	10	0,000480019		
Total (corr.)	0,00849255	19			

Anexo 7. Resultados de ANOVA para la variable ángulo de reposo, GA y MD respectivamente**Análisis de Varianza para Angulo de reposo GA**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Temperatura aire °C	0,228919	1	0,228919	0,05	0,8209
B:RPM Disco atomizador	7,63848	1	7,63848	1,80	0,2091
C:% Encapsulante	0,0214093	1	0,0214093	0,01	0,9447
AA	3,31448	1	3,31448	0,78	0,3972
AB	2,53125	1	2,53125	0,60	0,4574
AC	0,10125	1	0,10125	0,02	0,8802
BB	15,7453	1	15,7453	3,72	0,0827
BC	14,3113	1	14,3113	3,38	0,0959
CC	19,1031	1	19,1031	4,51	0,0597
Error total	42,3705	10	4,23705		
Total (corr.)	100,08	19			

Análisis de varianza para Angulo de reposo MD

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Taire	0,211615	1	0,211615	0,06	0,8128
B:Vel atomizador	0,179028	1	0,179028	0,05	0,8276
C:Conc maltodextrina	5,81183	1	5,81183	1,62	0,2314
AA	31,9524	1	31,9524	8,92	0,0136*
AB	0,01125	1	0,01125	0,00	0,9564
AC	0,01125	1	0,01125	0,00	0,9564
BB	0,174898	1	0,174898	0,05	0,8295
BC	1,36125	1	1,36125	0,38	0,5513
CC	1,497	1	1,497	0,42	0,5324
Error total	35,802	10	3,5802		
Total (corr.)	75,8255	19			

Anexo 8. Resultados de ANOVA para solubilidad, GA y MD respectivamente**Análisis de Varianza para % Solubilidad GA**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	2,71853	1	2,71853	0,86	0,3759
B:RPM Disco atomizador	28,8251	1	28,8251	9,11	0,0129*
C:% Encapsulante	65,5333	1	65,5333	20,70	0,0011*
AA	1,10151	1	1,10151	0,35	0,5683
AB	5,1842	1	5,1842	1,64	0,2295
AC	48,8072	1	48,8072	15,42	0,0028*
BB	0,620639	1	0,620639	0,20	0,6673
BC	34,528	1	34,528	10,91	0,0080*
CC	8,11943	1	8,11943	2,57	0,1403
Error total	31,6535	10	3,16535		
Total (corr.)	228,082	19			

Análisis de Varianza para % Solubilidad MD

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura Entrada	39,4469	1	39,4469	5,84	0,0363*
B:Velocidad Atomizador	0,406239	1	0,406239	0,06	0,8113
C:Concentracion MD	117,351	1	117,351	17,37	0,0019*
AA	31,8748	1	31,8748	4,72	0,0550
AB	12,4501	1	12,4501	1,84	0,2045
AC	2,48645	1	2,48645	0,37	0,5576
BB	8,57255	1	8,57255	1,27	0,2863
BC	6,9938	1	6,9938	1,04	0,3329
CC	20,1737	1	20,1737	2,99	0,1147
Error total	67,5637	10	6,75637		
Total (corr.)	298,302	19			

Anexo 9. Resultados de ANOVA para variable densidad aparente, GA y MD respectivamente

Análisis de Varianza para Densidad aparente GA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	0,0241977	1	0,0241977	3,48	0,0915
B:RPM Disco atomizador	0,000959956	1	0,000959956	0,14	0,7178
C:% Encapsulante	0,085854	1	0,085854	12,36	0,0056*
AA	0,00031551	1	0,00031551	0,05	0,8355
AB	0,0003125	1	0,0003125	0,05	0,8363
AC	0,0019845	1	0,0019845	0,29	0,6046
BB	0,00223637	1	0,00223637	0,32	0,5829
BC	0,011858	1	0,011858	1,71	0,2205
CC	0,000339783	1	0,000339783	0,05	0,8294
Error total	0,0694345	10	0,0694345		
Total (corr.)	0,197171	19			

Análisis de Varianza para Densidad aparente MD

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:temp	0,0347878	1	0,0347878	5,61	0,0394*
B:velo	0,000624663	1	0,000624663	0,10	0,7575
C:concent	0,0770258	1	0,0770258	12,42	0,0055*
AA	0,0000164803	1	0,0000164803	0,00	0,9599
AB	0,0032805	1	0,0032805	0,53	0,4837
AC	0,0002645	1	0,0002645	0,04	0,8405
BB	0,00103974	1	0,00103974	0,17	0,6908
BC	0,014112	1	0,014112	2,28	0,1623
CC	0,0000653762	1	0,0000653762	0,01	0,9202
Error total	0,0619977	10	0,0619977		
Total (corr.)	0,193157	19			

Anexo 10. Resultados de ANOVA para variable Índice de Carr, GA y MD respectivamente

Análisis de Varianza para Índice de Carr

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	0,241311	1	0,241311	0,04	0,8521
B:RPM Disco atomizador	6,94961	1	6,94961	1,05	0,3286
C:% Encapsulante	27,9703	1	27,9703	4,25	0,0663
AA	2,8513	1	2,8513	0,43	0,5255
AB	57,9426	1	57,9426	8,80	0,0141*
AC	5,39561	1	5,39561	0,82	0,3867
BB	38,1691	1	38,1691	5,79	0,0369*
BC	0,567112	1	0,567112	0,09	0,7752
CC	17,6268	1	17,6268	2,68	0,1329
Error total	65,8783	10	6,58783		
Total (corr.)	216,669	19			

Análisis de Varianza para Índice Carr

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tempe	1,6584	1	1,6584	0,65	0,4380
B:Veloc	0,327141	1	0,327141	0,13	0,7272
C:Concen	1,00241	1	1,00241	0,39	0,5441
AA	9,41345	1	9,41345	3,70	0,0832
AB	0,91125	1	0,91125	0,36	0,5626
AC	9,46125	1	9,46125	3,72	0,0825
BB	30,0746	1	30,0746	11,83	0,0063*
BC	3,38	1	3,38	1,33	0,2756
CC	13,4844	1	13,4844	5,31	0,0440*
Error total	25,4162	10	2,54162		
Total (corr.)	87,2245	19			

Anexo 11. Resultados de ANOVA para variable Higroscopicidad, GA y MD respectivamente**Análisis de Varianza para % Higroscopicidad**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	0,295546	1	0,295546	0,32	0,5841
B:RPM Disco atomizador	1,7256	1	1,7256	1,87	0,2016
C:% Encapsulante	1,02968	1	1,02968	1,11	0,3159
AA	2,73041	1	2,73041	2,96	0,1163
AB	0,45125	1	0,45125	0,49	0,5005
AC	1,53125	1	1,53125	1,66	0,2269
BB	1,91535	1	1,91535	2,07	0,1804
BC	0,45125	1	0,45125	0,49	0,5005
CC	2,95669	1	2,95669	3,20	0,1039
Error total	9,23719	10	0,923719		
Total (corr.)	21,082	19			

Análisis de Varianza para % Higroscopicidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	0,245095	1	0,245095	0,59	0,4606
B:RPM Disco atomizador	1,3419	1	1,3419	3,22	0,1028
C:% Encapsulante	7,09891	1	7,09891	17,06	0,0020*
AA	0,698188	1	0,698188	1,68	0,2244
AB	0,02205	1	0,02205	0,05	0,8226
AC	0,00045	1	0,00045	0,00	0,9744
BB	1,06129	1	1,06129	2,55	0,1414
BC	2,80845	1	2,80845	6,75	0,0266*
CC	2,51866	1	2,51866	6,05	0,0337*
Error total	4,16194	10	0,416194		
Total (corr.)	20,4215	19			

Anexo 12. Resultados de ANOVA para variable % retención Vitamina C, GA y MD respectivamente

Análisis de Varianza para % Retención Vit C GA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	217,668	1	217,668	6,00	0,0343*
B:RPM Disco atomizador	41,5391	1	41,5391	1,15	0,3097
C:% Encapsulante	1256,91	1	1256,91	34,65	0,0002*
AA	41,2693	1	41,2693	1,14	0,3112
AB	0,15125	1	0,15125	0,00	0,9498
AC	3,78125	1	3,78125	0,10	0,7534
BB	4,98559	1	4,98559	0,14	0,7186
BC	6,66125	1	6,66125	0,18	0,6774
CC	174,292	1	174,292	4,80	0,0532
Error total	362,744	10	36,2744		
Total (corr.)	2106,5	19			

Análisis de Varianza para % Retención Vit C MD

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura aire °C	207,589	1	207,589	4,48	0,0604
B:RPM Disco atomizador	77,0809	1	77,0809	1,66	0,2261
C:% Encapsulante	1068,59	1	1068,59	23,06	0,0007*
AA	41,3924	1	41,3924	0,89	0,3668
AB	2,53125	1	2,53125	0,05	0,8199
AC	3,25125	1	3,25125	0,07	0,7965
BB	6,45881	1	6,45881	0,14	0,7167
BC	9,90125	1	9,90125	0,21	0,6538
CC	94,5156	1	94,5156	2,04	0,1837
Error total	463,294	10	46,3294		
Total (corr.)	1958,15	19			

Anexo 13. Resultados de ANOVA para variable variación de color, GA y MD respectivamente

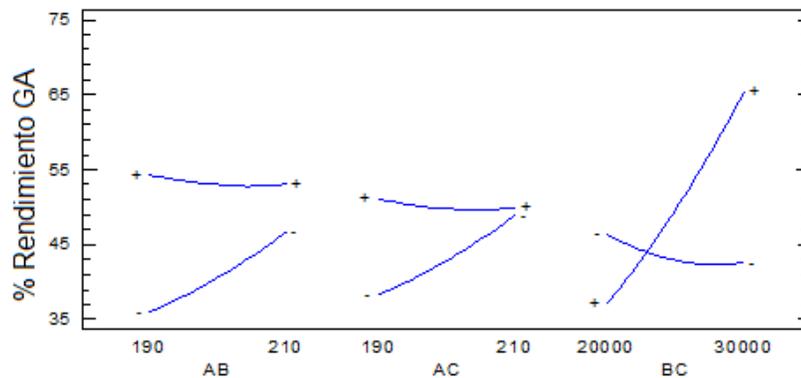
Análisis de Varianza para variación de color con GA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0,685909	1	0,685909	0,02	0,8909
B:Vel atomizador	4,22773	1	4,22773	0,12	0,7341
C:Conc Encap	959,014	1	959,014	27,67	0,0004*
AA	119,653	1	119,653	3,45	0,0928
AB	2,04202	1	2,04202	0,06	0,8131
AC	6,77994	1	6,77994	0,20	0,6677
BB	70,2449	1	70,2449	2,03	0,1850
BC	11,772	1	11,772	0,34	0,5729
CC	6,30596	1	6,30596	0,18	0,6787
Error total	346,571	10	34,6571		
Total (corr.)	1505,09	19			

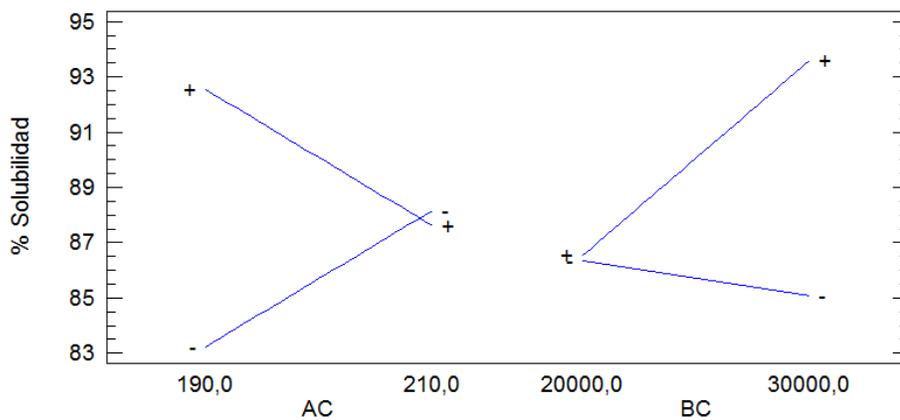
Análisis de Varianza para variación de color con MD

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0,00432953	1	0,00432953	0,00	0,9927
B:Vel atomizador	0,22307	1	0,22307	0,00	0,9478
C:Conc Encap	819,846	1	819,846	16,57	0,0022*
AA	101,409	1	101,409	2,05	0,1827
AB	2,61721	1	2,61721	0,05	0,8227
AC	5,92727	1	5,92727	0,12	0,7364

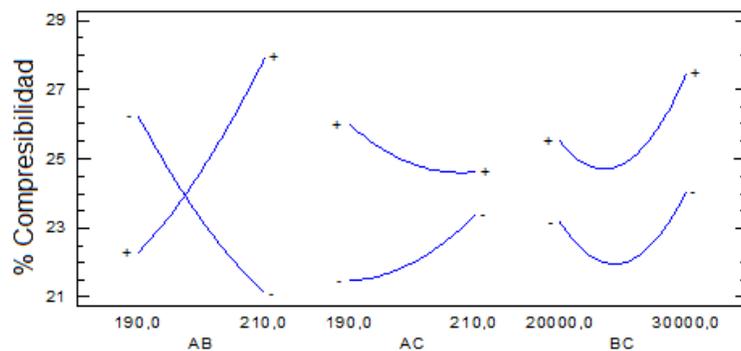
Anexo 16. Gráfico de interacciones para % de rendimiento para polvos con GA



Anexo 17. Gráfico de interacciones para % de Solubilidad para polvos con GA



Anexo 18. Gráfico de interacciones para % Compresibilidad para polvos con GA



Anexo 19. Gráfico de interacciones para % Higroscopicidad para polvos con MD