

**PROPIEDADES FÍSICAS RELACIONADAS CON EL EMPAQUE Y LA
ESTABILIDAD DE EXTRACTO DE LEVADURA (*Saccharomyces Cerevisiae*) SECADO
POR ASPERSIÓN**

MARÍA ISABEL PÁEZ VALENCIA

UNIVERSIDAD DEL VALLE

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

CALI

2017

**PROPIEDADES FÍSICAS RELACIONADAS CON EL EMPAQUE Y LA
ESTABILIDAD DE EXTRACTO DE LEVADURA (*Saccharomyces Cerevisiae*) SECADO
POR ASPERSIÓN**

MARÍA ISABEL PÁEZ VALENCIA

**Propuesta de trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar al título de
Magíster en Ingeniería de Alimentos**

Directores

Claudia Isabel Ochoa Martínez, Ph. D.

Alejandro Fernández Quintero, Ph. D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

CALI

2017

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	9
2	INTRODUCCIÓN.....	11
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
4	JUSTIFICACIÓN	15
6	OBJETIVOS	16
6.1	Objetivo General	16
6.2	Objetivos específicos.....	16
7	MARCO TEÓRICO	17
7.1	SECADO POR ASPERSIÓN	17
7.2	EXTRACTO DE LEVADURA	20
7.2.1	Obtención de extracto de levadura.....	21
7.2.2	Uso industrial	21
7.3	PROPIEDADES FÍSICAS.....	22
7.3.1	Contenido de humedad	22
7.3.2	Higroscopicidad	22
7.3.3	Tamaño de partícula.....	22
7.3.4	Densidad de partícula.....	23
7.3.5	Densidad aparente.....	23
7.3.6	Isotermas de sorción	23

7.3.7	Temperatura de transición vítrea (T_g)	26
7.3.8	Temperatura de punto de pegajosidad (T_s).....	27
7.3.9	Estabilidad.....	30
8	ANTECEDENTES	32
9	METODOLOGIA.....	44
9.1	Materia prima	44
9.2	Actividades para el cumplimiento del objetivo 1.....	44
9.2.1	Preparación del extracto de levadura líquido para las pruebas de secado por aspersión 44	
9.2.2	Condiciones de operación del secador por aspersión	44
9.2.3	Diseño experimental	45
9.2.4	Determinación de las variables de respuesta	46
9.3	Actividades para el cumplimiento del objetivo 2.....	48
9.3.1	Isotermas de sorción	48
9.3.2	Temperatura de Transición Vítrea (T_g)	50
9.3.3	Temperatura de Punto de pegajosidad (T_s)	51
9.3.4	Construcción del diagrama de estabilidad	52
9.4	Actividades para el cumplimiento del objetivo 3.....	52
9.4.1	Optimización de respuesta múltiple del proceso de secado por aspersión	52
10	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
10.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL EXTRACTO DE LEVADURA COMERCIAL	53
10.2	EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL EXTRACTO DE LEVADURA	53

10.2.1	Efecto de las condiciones de operación sobre el contenido de humedad	53
10.2.2	Efecto de las condiciones de operación sobre el tamaño de partícula.	55
10.2.3	Efecto de las condiciones de operación sobre la densidad aparente	57
10.2.4	Efecto de las condiciones de operación sobre la densidad de partícula.....	60
10.2.5	Efecto de las condiciones de operación sobre la higroscopicidad	63
10.3	ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA DE EXTRACTO DE LEVADURA COMERCIAL EN POLVO.....	65
10.3.1	Isoterma de sorción	65
10.3.2	Modelización de las isotermas de sorción	67
10.4	TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VITREA, TEMPERATURA DE PEGAJOSIDAD Y DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DEL EXTRACTO DE LEVADURA.....	69
10.4.1	Temperatura de transición vítrea	69
10.4.2	Temperatura de punto de pegajosidad	72
10.4.3	Diagrama de estabilidad de extracto de levadura	72
10.5	OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA MÚLTIPLES	74
12	CONCLUSIONES.....	76
14	BIBLIOGRAFIA.....	78
15	ANEXOS.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de atomizadores.....	17
Tabla 2. Efecto de variables de secado por aspersión.....	20
Tabla 3. Características fisicoquímicas del extracto de levadura	21
Tabla 4. Clasificación de los polvos	22
Tabla 5. Investigaciones sobre secado por aspersión en alimentos	35
Tabla 6. Investigaciones sobre propiedades termo físicas de alimentos en polvos	41
Tabla 7. Diseño experimental	46
Tabla 8. Caracterización física de extracto de levadura	53
Tabla 9. Valores de parámetros de los modelos	69
Tabla 10. Perfil de aminoácidos y peso molecular	71
Tabla 11. Optimización de respuesta múltiple del proceso de secado.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del ciclón.....	19
Figura 2. Instrumento de medición de temperatura de pegajosidad (Adaptado de Rahman, (2008))	28
Figura 3. Equipo de sonda óptica (Adaptado de Rahman (2008)).....	29
Figura 4. Diagrama de estabilidad de polvo de mango secado al vacío (Adaptado de Jaya & Das, 2009)	31
Figura 5. Secador por aspersión.....	45
Figura 6. (a) Montaje experimental para la hidratación de extracto de levadura comercial en polvo. (b) Montaje experimental para la medición de la humedad del aire en equilibrio higroscópico con la muestra de extracto de levadura comercial en polvo rehidratada.	49
Figura 7. Calorímetro diferencial de barrido	50
Figura 8. Montaje de viscosímetro.....	51
Figura 9. Montaje experimental para determinación de Temperatura de punto de pegajosidad. (a) Montaje con chaqueta de calentamiento. (b) aguja T con termocupla	52
Figura 10 Comportamiento estadístico del contenido de humedad a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales	54
Figura 11 Comportamiento estadístico del tamaño de partícula a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales. Para el tamaño de partícula	56
Figura 12. Superficie de respuesta múltiple para el tamaño de partícula. Valor fijo para la temperatura de entrada: 190°C.....	57
Figura 13 Comportamiento estadístico de la densidad aparente a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales.....	58
Figura 14 Superficie de respuesta múltiple para la densidad aparente. Valor fijo para la temperatura de entrada: 190°C	60
Figura 15 Comportamiento estadístico de la densidad de partícula a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales	61
Figura 16. Superficie de respuesta múltiple para la densidad de partícula. Valor fijo para el flujo de alimentación 48.3 ml/min.....	62

Figura 17. Comportamiento estadístico de la higroscopicidad a) Grafica de Pareto, b) Grafica de efectos principales.....	64
Figura 18. Isotermas de sorción de extracto de levadura.....	65
Figura 19. Isotermas de sorción experimentales y modeladas de extracto de levadura	67
Figura 20. Relación entre el contenido de humedad, la temperatura de transición vítrea (Tg) y la temperatura (Ts) de pegajosidad.....	70
Figura 21. Diagrama de estabilidad en base a contenido de humedad (CHE), actividad de agua (aw) a 25°C, temperatura de transición vítrea (Tg) y temperatura de punto de pegajosidad (Ts)	73

1 RESUMEN

El extracto de levadura es un aditivo ampliamente utilizado para mejorar el sabor de alimentos como salsas, productos de panadería, productos cárnicos, condimentos, etc. Es un producto que se comercializa en polvo y la técnica empleada para deshidratarlo es el secado por aspersión por lo cual, las condiciones de operación del secador y la naturaleza del alimento influyen en las características del producto obtenido.

Los secadores por aspersión trabajan ya sea con discos atomizadores, o con sistemas de boquillas a presión para generar la micro-gota que entra en contacto con el aire de secado. Se tiene información de la industria local, que al secar por aspersión estos extractos de levadura utilizando discos atomizadores el polvo obtenido es de menor densidad que aquel que se produce en secadores operados con boquillas atomizadoras. Una baja densidad implica que en los envases utilizados en el mercado se empacará menor cantidad. El secado por aspersión de extracto de levadura empleando discos atomizadores debe investigarse, con el propósito de encontrar la incidencia de las variables operativas del secado sobre la densidad del producto y el tamaño de las partículas. La densidad se puede incrementar en función de la humedad final del polvo seco del extracto de levadura, pero la humedad final tiene un límite, el cual está relacionado con la estabilidad del polvo en cuanto a la formación de agregados de partículas como resultado de la pegajosidad entre ellas. La pegajosidad de los productos en polvo es un problema para el manejo y almacenamiento del polvo; esta propiedad es función de la humedad, de su temperatura de almacenamiento y de la temperatura de transición vítrea. En consecuencia, en este trabajo se estudió la relación entre la humedad y la temperatura en polvos de extracto de levadura.

Para el estudio del secado del extracto de levadura comercial rehidratado se utilizó un diseño Central Compuesto ajustado al modelo de superficies de respuesta. Se analizó el efecto de 3 factores (temperatura de entrada del aire, flujo de alimentación y velocidad del disco atomizador), evaluados en 3 niveles cada uno. Se observó el efecto de las condiciones de operación del secador y se encontró una relación entre la densidad del polvo obtenido (tanto densidad de partícula, como densidad a granel), la distribución del tamaño de las partículas en el polvo y la humedad final humedad final del extracto seco, el tamaño de partícula en el

producto, la densidad aparente o a granel del producto seco, la densidad de partícula y la higroscopicidad. Adicionalmente, se hizo un estudio de la temperatura de pegajosidad y temperatura de transición vítrea en relación con la humedad de los polvos secos de extracto de levadura comercial.

2 INTRODUCCIÓN

Las empresas de alimentos deben ofrecer productos de buena calidad disminuyendo los costos de producción, satisfaciendo las necesidades de índole dietética y aumentando la estabilidad en el almacén o lugar de venta (Otero, Cabello, Vasallo, García, & Lopez, 2000).

El desarrollo de aditivos ocupa un puesto importante en el procesamiento de alimentos a nivel internacional. El Institute of Food Technologists (IFT) planteó que para el año 2015 el mercado global de aditivos crecería a más de 39.9 billones de dólares (IFT, 2010). Dentro de la amplia gama de aditivos, la biomasa de la levadura se utiliza para elaborar saborizantes y potenciadores de sabor (Otero & Cabello, 2007). Existe un tipo de levaduras denominadas levaduras especiales que son los productos elaborados a partir de la inactivación, hidrólisis o plasmólisis de las levaduras alimenticias dentro de las cuales se encuentra el extracto de levadura (Lezcano, 2012). Los extractos de levadura que son producidos a partir de una cepa especialmente seleccionada de *Saccharomyces cerevisiae*, tienen la notable propiedad de conferir e intensificar naturalmente el sabor y aroma original de los diversos productos finales, además de conferir cuerpo a alimentos como: sopas, caldos, condimentos, salsas, bocados, embutidos, derivados de tomate y platos preparados. Hoy en día existen además extractos de levadura ricos en aminoácidos libres, minerales y vitaminas, siendo un complejo de nutrientes eficiente para ser utilizado en otros procesos, tales como en fermentación industrial y en medios de cultivo.

El extracto de levadura es el concentrado de la fracción soluble de las células de levadura y se utiliza ampliamente para mejorar el sabor de alimentos como salsas, productos cárnicos, productos de panadería y condimentos, entre otros, incrementando su valor nutricional (Tangüler & Erten, 2009). Este producto posee un carácter gustativo complejo incluyendo aminoácidos, péptidos, y ácidos orgánicos (principalmente ácido ribonucleico) (Otero & Cabello, 2010). Se espera que para el año 2024 las ventas superen los USD 1.5 millones (Global Market Insights, 2017).

El extracto de levadura se comercializa seco como polvo o como pasta (Revillion, Brandelli, & Ayub, 2003) con un porcentaje de humedad en polvo cercano a 5% (Lezcano, 2012). La técnica empleada para obtenerlo es el secado por aspersión (Uribe, 2011). Sin embargo, las

condiciones de operación del secador y la naturaleza del material influyen en las características del polvo obtenido (de Souza, Thomazini, Balieiro, & Fávaro-Trindade, 2013).

Durante el procesamiento, manipulación, almacenamiento y distribución de alimentos, ingredientes y aditivos en polvo experimentan condiciones ambientales variables (temperatura y humedad relativa) que pueden causar alteraciones en el producto en polvo y problemas de fluidez (Bhadra, Muthukumarappan, & Rosentrater, 2012). La interacción entre los componentes del alimento y el agua presente que provoca estos problemas, se puede predecir mediante la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad en equilibrio (isotermas de sorción) (Tonon *et al.*, 2009).

Igualmente, el contenido de agua y la actividad de agua se encuentran ligadas con los cambios de la temperatura de transición vítrea (T_g), siendo los responsables en la disminución de su valor, provocando alteraciones si se trabaja por encima de esta temperatura, ya que el polvo se convierte en un sólido aglomerado y posteriormente se forma un material pegajoso alterando sus características organolépticas y funcionales (Jagannadha Rao, Das, & Das, 2010).

La temperatura de punto de pegajosidad o “*sticky point temperature*” (T_s) es la temperatura en la cual los polvos comienzan el proceso de apelmazamiento (Jaya & Das, 2009). Este es un fenómeno que manifiesta la tendencia que poseen los polvos a aglomerar y adherirse a superficies de contacto (Bhadra *et al.*, 2012). Generalmente, la aglomeración ocurre entre 10 y 20°C por encima de T_g y la pegajosidad ocurre entre 20 y 30°C por encima de T_g (Jagannadha Rao *et al.*, 2010).

La densidad es otra de las propiedades necesarias para ajustar las condiciones de procesamiento, almacenamiento, empaque y distribución y requiere especial cuidado dado que si la densidad se encuentra por debajo o por encima de la densidad especificada entonces se presentarán problemas con la cantidad en peso requerida en el envasado del producto (Barbosa-Canovas, Ortega-Rivas, Juliano, & Yan, 2005).

En este trabajo se evaluó el efecto de las variables de operación de secado por aspersión sobre la humedad final del extracto seco, el tamaño de partícula en el producto, la densidad aparente o a granel del producto seco, la densidad de partícula y la higroscopicidad del extracto de levadura comercial rehidratado. Se obtuvieron las condiciones en las que el extracto de levadura presentó mayor densidad a una humedad típica de extracto de levadura comercial en polvo. Además, se realizó un diagrama de estabilidad donde se relacionó la actividad de agua, la temperatura de transición vítrea y la temperatura de pegajosidad del extracto de levadura comercial en polvo.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las condiciones de operación en el secado por aspersión inciden en las propiedades del producto final en polvo. Los secadores por aspersión poseen discos atomizadores o sistemas de boquillas a presión que generan las gotas que entran en contacto con el aire de secado. De acuerdo con la industria local, al secar por aspersión utilizando discos atomizadores, el polvo obtenido es de menor densidad que los alimentos que se producen con un secador por aspersión operado con boquillas atomizadoras. La baja densidad del extracto de levadura comercial en polvo ha presentado inconvenientes en la industria ya que se requiere mayor cantidad de producto respecto al volumen del empaque. Una de las formas para aumentar la densidad es aumentando el contenido de humedad del producto seco, pero esto influye en que la temperatura de transición vítrea y la temperatura de pegajosidad disminuyan, aumentando la probabilidad de que en condiciones ambientales se presente el fenómeno de aglomeración y pegajosidad del producto. Por lo tanto, es necesario relacionar las condiciones de operación del secador por aspersión con la humedad y densidad del producto.

4 JUSTIFICACIÓN

Dentro de la amplia gama de aditivos, el extracto de levadura resulta de especial interés por su variedad de aplicaciones. Se usa en la industria de alimentos en productos como salsas cárnicas y sales de aderezo. Además, reduce el uso de extractos de carne más costosos ya que imparte un sabor único en los productos cárnicos. El extracto de levadura se comercializa seco y el método ampliamente utilizado para obtenerlo es el secado por aspersión (Otero & Cabello, 2007).

Una de las principales propiedades que posee un polvo secado por atomización es su contenido de humedad el cual cambia de acuerdo a las condiciones en que se opera el secador (Goula, Adamopoulos, & Nikolaos, 2004). La humedad se encuentra relacionada con el colapso estructural, la viscosidad, la aglomeración y la pegajosidad de los alimentos en polvo y los polvos ricos en azúcar (Bhadra *et al.*, 2012), así como con la densidad del producto terminado. Por lo tanto, es necesario tener control sobre las propiedades del extracto de levadura para evitar inconvenientes en la industria y disminuir sus costos de empaque y de operaciones de logística.

6 OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Determinar las propiedades físicas relacionadas al empaque y estabilidad de extracto de levadura obtenido mediante secado por aspersión.

6.2 Objetivos específicos

Evaluar el efecto de la temperatura de entrada del aire de secado, el flujo de alimentación y la velocidad del disco atomizador del sistema de aspersión sobre la humedad final del extracto seco, el tamaño de partícula en el producto, la densidad aparente o a granel del producto seco, la densidad de partícula y la higroscopicidad.

Desarrollar un mapa o diagrama de estabilidad de extracto seco de levadura obtenido por aspersión, basado en las isothermas de sorción, la temperatura de transición vítrea y la temperatura de pegajosidad del producto.

Establecer las condiciones de secado por aspersión que maximicen la densidad a granel de un extracto de levadura secado a la humedad recomendada para almacenamiento comercial.

7 MARCO TEÓRICO

7.1 SECADO POR ASPERSIÓN

El secado por aspersión consiste en la transformación de una solución, suspensión o pasta que se asperja en una cámara con un gas caliente, obteniendo un producto seco en forma de polvo. El proceso se lleva a cabo mediante la generación de gotas con una alta área superficial que permite la evaporación del agua debido al contacto con un medio gaseoso caliente (usualmente aire), que posee la suficiente energía para llevar a cabo la evaporación del líquido (Yanza, 2003).

El secado se lleva a cabo en cuatro etapas (Lozano, 2009):

- a. Atomización: Es la operación más importante del proceso de secado por aspersión. Consiste en la atomización de gotas pequeñas por medio de presión o energía centrífuga. Cuanto mayor sea la energía suministrada al atomizador, más finas serán las gotas formadas. La rápida evaporación se debe a partículas de elevada relación superficie/peso. Es necesario que las partículas sean de tamaño uniforme, debido a que las partículas de gran tamaño no alcanzan a secarse antes de llegar a las paredes y las partículas pequeñas afectan las propiedades del producto y disminuyen la eficiencia del proceso. El objetivo de esta etapa es optimizar la transferencia de calor y masa creando mayor área de transferencia de calor entre el líquido y el aire seco. Entre los atomizadores utilizados se encuentran la boquilla de presión, el disco atomizador giratorio, la boquilla neumática y la boquilla ultrasónica. Las características de algunos atomizadores se presentan en la Tabla 1

Tabla 1. Características de atomizadores

Boquillas neumáticas	Boquillas a presión	Disco atomizador giratorio
Tamaño fino de partícula.	Tamaño de gota mayor y más uniforme respecto al de boquilla neumática.	Tamaño de gota uniforme. No requiere alimentación a presión elevada.

Utiliza aire a presiones menores a 30 psig y se producen burbujas que se fragmentan para formar gotas.	A grandes velocidades genera un movimiento tangencial que produce un cono hueco para finalmente romperse y producir gotas.	El líquido llega a velocidades centrífugas entre 6000 y 30000 rpm
El líquido sale de la boquilla en forma de filamentos.	Requiere alimento homogéneo.	El líquido sale del disco en forma de película delgada que se rompe para formar las gotas.

Fuente: Foust, Wenzel, Clump, Maus & Andersen (2006)

- b. Contacto entre el aire caliente y la gota: Se presenta durante la atomización y el inicio de la etapa de secado. El secado puede ser en paralelo donde el líquido se atomiza en la misma dirección del aire de secado y el polvo se expone a temperaturas entre 50 y 80°C limitando la degradación térmica. También, puede ser en contracorriente donde el líquido se atomiza en la dirección opuesta del aire caliente pero su uso es limitado debido a las altas temperaturas a las que se expone el polvo seco.
- c. Evaporación de la gota de agua: En esta etapa se presenta transferencia de calor y masa. La primera ocurre del aire caliente hacia el producto debido al cambio de temperatura y la segunda ocurre del producto hacia el aire caliente debido a la diferencia de presión de vapor. Durante el secado primero se presenta un aumento de la temperatura de la gota hasta un valor constante (definido como temperatura de bulbo húmedo del aire), luego se evapora el agua de la gota a la presión parcial de vapor de agua y a temperatura constante y finalmente, se forma una costra cuando se alcanza el contenido de agua crítico. En este punto disminuye la velocidad de secado y se presenta una dependencia de la tasa de difusión del agua a través de la costra. El tiempo de duración de las etapas puede ser diferente dependiendo del tipo de alimento y de la temperatura de entrada del aire, ya que si la temperatura es alta la gota se seca rápidamente debido a la alta tasa de evaporación del agua.

- d. Separación del aire húmedo y el producto seco: Se lleva a cabo en un ciclón (Figura 1) ubicado fuera del secador que recupera las partículas secas y las separa del aire húmedo. La fuerza centrífuga empleada permite mover las partículas hacia la pared para separarlas del aire. En la parte inferior del ciclón se recogen las partículas y por la parte superior del ciclón se obtiene el aire limpio con mínima cantidad de partículas del producto.

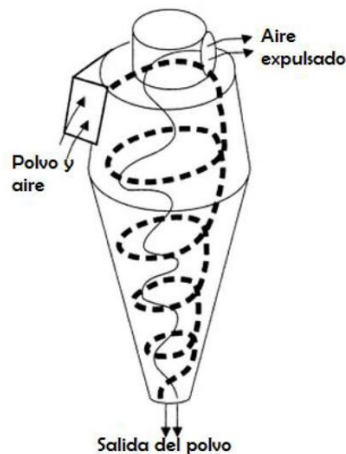


Figura 1. Esquema del ciclón

Fuente: Kure & Yugcha (2012)

Entre las ventajas que posee el secado por aspersión se encuentra la obtención de tamaños y formas definidos del producto, el corto tiempo de residencia que permite que sea aplicable a materiales sensibles al calor y la fácil limpieza del equipo (Yanza, 2003). Las principales variables en el proceso de secado por aspersión son:

- Caudal del líquido de entrada: Regulado por una bomba peristáltica.
- Caudal de aire de atomización: Se suministra por un ventilador y se regula mediante la apertura de la válvula de entrada de aire.
- Temperatura del aire de entrada: Controlada por la resistencia interna del equipo.

En la Tabla 2 se presenta el efecto de algunas variables de proceso sobre algunas variables de respuesta.

Tabla 2. Efecto de variables de secado por aspersión

Variables de proceso incrementadas	Variables de respuesta incrementadas	Variables de respuesta disminuidas
Temperatura de entrada de la cámara	Tamaño de partícula y contenido de humedad del producto	Densidad aparente pero no para suspensiones
Temperatura de salida de la cámara	Degradación térmica del producto	Tamaño de partícula y contenido de humedad del producto
Flujo del gas	Tamaño de partícula y contenido de humedad del producto	Tiempo de residencia
Concentración de alimentación	Densidad aparente y tamaño de partícula	
Velocidad de atomización	Densidad aparente	Tamaño de partícula y contenido de humedad del producto
Humedad del gas de entrada	Contenido de humedad del producto, se presenta acumulación en la pared de la cámara	

Fuente: (AIChE, 2003)

7.2 EXTRACTO DE LEVADURA

El extracto de levadura es el concentrado soluble de las células de la levadura y se compone principalmente de aminoácidos, péptidos y sales. En la Tabla 3 se presenta las características fisicoquímicas del extracto de levadura reportada en la ficha técnica (En los Anexos 1, 2 y 3 se presentan los informes de laboratorio del perfil de aminoácidos, ficha técnica y determinación de cloruro de sodio (NaCl)). El extracto de levadura se obtiene principalmente de subproductos de otros procesos fermentativos como la cerveza o a partir de procesos realizados a levaduras en especial cepas como *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces fragilis* o *Candida utilis* (Otero & Cabello, 2007).

7.2.1 Obtención de extracto de levadura

Se obtiene por la separación de los compuestos solubles que se producen durante la ruptura y degradación de las paredes celulares debido a su propia dotación enzimática. De acuerdo con Milic, Rakin & Siler-Marinkovic (2007) y González (2009) se puede obtener a través de los siguientes procesos:

- **Autólisis:** Consiste en la incubación de las células de levadura en medio acuoso a una temperatura entre 45-50°C y un pH de 6.5, donde se presenta la liberación del material intracelular debido a las enzimas endógenas que realizan la degradación de la pared celular. Es un método tradicional, pero posee algunas desventajas como bajo rendimiento, dificultad en la separación del líquido-sólido por los altos contenidos de residuos, riesgo de contaminación debido a la contaminación microbiana y características pobres como resaltador de sabor.
- **Plasmólisis:** Se lleva a cabo la autólisis en presencia de altas concentraciones de cloruro de sodio (hasta 25%) para acelerar el proceso. Su uso es limitado ya que existe una demanda alta de productos con bajos contenidos de sal.
- **Hidrólisis ácida:** La suspensión de levaduras se calienta hasta 100°C en presencia de ácido clorhídrico concentrado y se neutraliza con hidróxido de sodio. Por lo tanto, el producto final contiene altas concentraciones de sal y el triptófano presente es destruido durante el proceso. Es el método más eficiente para solubilizar la levadura.

Tabla 3. Características fisicoquímicas del extracto de levadura

Características	Especificación
pH (solución al 5% p/v)	5 – 5.8
Cloruro de sodio (%)	Máximo 41
Pérdida por secado (%)	Máximo 6
Proteína (base húmeda)	Mínimo 42

7.2.2 Uso industrial

El extracto de levadura se utiliza principalmente en la industria para mejorar el sabor de los alimentos e incrementar el valor nutricional de productos como quesos, salsas, productos de panadería, comida de mar y condimentos. Posee un carácter gustativo complejo que incluye

aminoácidos, péptidos, ácidos nucleicos, ácidos orgánicos, polisacáridos (Otero & Cabello, 2010).

7.3 PROPIEDADES FÍSICAS

7.3.1 Contenido de humedad

Se refiere a toda el agua de un alimento que influye en las propiedades reológicas, coligativas y texturales, así como en las reacciones físicas, químicas, microbiológicas y enzimáticas (Badui, 2006). Juega un papel importante en la manipulación de cualquier polvo ya que está asociado con un aumento de la cohesión debido a la formación de puentes líquidos entre partículas y es el responsable de la aglomeración y problemas de apelmazamiento (Barbosa-Canovas et al., 2005).

7.3.2 Higroscopicidad

Se refiere a la habilidad que posee un polvo para absorber humedad del ambiente. Se encuentra influenciada por la presencia de azúcares, sales y proteínas y se presenta debido a los bajos contenidos de humedad que posee el polvo. El incremento en peso se utiliza para calcular la higroscopicidad luego de colocar la muestra en polvo a una humedad relativamente alta (alrededor de 80%) hasta alcanzar el equilibrio (Early, 1998).

7.3.3 Tamaño de partícula

La industria de alimentos utiliza productos en polvo de diversos tamaños de partícula, pero se requiere de un diámetro medio o tamaño promedio para que puedan clasificarse. En la Tabla 4 se muestra la clasificación de los polvos de acuerdo con Pharmacopoeia Británica (Barbosa-Canovas et al., 2005).

Tabla 4. Clasificación de los polvos

Tipo de polvo	Número de malla (Estándares Británicos)	
	Todo pasa por	No más del 40% pasa por
Grueso	10 (1700 μm)	44
Moderadamente grueso	22 (710 μm)	60
Moderadamente fino	44 (355 μm)	85
Fino	85 (180 μm)	-
Muy fino	120 (125 μm)	-

Fuente: Barbosa-Canovas *et al.*, (2005)

Las propiedades físicas de un alimento en polvo (densidad aparente, compresión, fluidez) se encuentran directamente relacionadas con la medición de la distribución del tamaño de las partículas (Barbosa-Canovas et al., 2005).

7.3.4 Densidad de partícula

Permite determinar el tamaño de partícula y la estructura del polvo a granel. Se define como la densidad del material sólido del cual está hecho el alimento y se excluyen los poros abiertos y cerrados sin depender del grado de compactación y el tamaño de partícula (Barbosa-Canovas et al., 2005).

7.3.5 Densidad aparente

Se utiliza principalmente para ajustar las condiciones de almacenamiento, procesamiento, empaque y distribución y se usa como parte de las especificaciones de los productos que se someten a un proceso de molienda o secado (Barbosa-Canovas et al., 2005). Se define como la relación entre la masa de las partículas y el volumen aparente que ocupa, donde se incluyen poros abiertos y cerrados.

La densidad aparente tiene relación con la porosidad del alimento en polvo ya que al ejercer presión sobre el polvo se presenta una disminución del volumen de los poros, lo cual aumenta la densidad aparente del polvo debido a la disminución del volumen total, ocasionando compactación del polvo y un aumento en la retención de agua debido a la disminución de la porosidad ocupada por el aire (Hernández, 2009).

7.3.6 Isotermas de sorción

La actividad de agua, la adsorción de agua y la humedad crítica son características de interés en el proceso de secado por su relación con el producto ya que permiten evaluar la fuerza impulsora y determinar el punto óptimo de secado. Además, permiten llevar a cabo las predicciones de vida útil y aceptabilidad de un producto que sufre deterioro por la oxidación de lípidos, las reacciones enzimáticas, el pardeamiento no enzimático, y el desarrollo de microorganismos (Ceballos, 2008).

La isoterma de sorción permite conocer el comportamiento de un alimento almacenado en atmósferas húmedas, además representa la cinética de un alimento que es hidratado y permite

diseñar los sistemas de secado, almacenamiento, rehidratación etc., así como conocer la estabilidad del alimento en diferentes condiciones. Para elaborar una isoterma de sorción se requiere la actividad de agua y el contenido de humedad del alimento en equilibrio en un sistema cerrado (Badui, 2006).

El método más simple para obtener una isoterma de sorción es colocando la muestra dentro de un desecador con una humedad relativa controlada que se genera utilizando soluciones de sales saturadas, las muestras se pesan sucesivamente hasta llegar a peso constante. Sin embargo, la principal desventaja con este método es el largo tiempo que se requiere para llegar al equilibrio (aproximadamente 3 semanas) y el riesgo de crecimiento de hongos o bacterias cuando se trabaja con altas humedades relativas. Existe otro método en el cual se varía el contenido de humedad de la muestra, se coloca dentro de un envase cerrado para quedar en equilibrio con el aire en el espacio de cabeza y se utiliza un termohigrómetro para determinar la humedad relativa del aire que se encuentra en equilibrio con el alimento (Sahin & Sumnu, 2006). Este procedimiento evita los cambios degenerativos en la muestra ya que provee medidas rápidas y seguras de la actividad de agua (Bon, Váquiro, & Mulet, 2012).

7.3.6.1 Modelación de isotermas de sorción

Existen más de 30 expresiones matemáticas que buscan representar las isotermas de sorción (Ceballos, 2008), algunos de los modelos utilizados se mencionan a continuación.

- **Modelo de BET (Brunawer, Emmett y Teller)**

El modelo (Ec. 1) se desarrolló en 1938 y supone la formación de multicapas en una superficie homogénea, además, no hay interacción entre las moléculas absorbidas y el calor de sorción ocurre solamente en la primera capa (M. Rahman, 2008). Es un modelo útil para alimentos con una actividad de agua entre 0.05 y 0.45.

$$CHE = \frac{X_o C a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]} \quad (1)$$

Donde X_o es el contenido de humedad en la monocapa, C es la constante relacionada con el calor neto de adsorción, CHE es el contenido de humedad en equilibrio y a_w es la actividad de agua.

- **Modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer)**

El modelo (Ec. 2) se desarrolló en 1985 y corresponde a una extensión del modelo de BET. Es un modelo semiempírico ampliamente aceptado y representativo en los alimentos y permite modelar las isothermas en un intervalo de actividad de agua entre 0.05 y 0.95

$$CHE = \frac{X_o C K a_w}{(1 - K a_w)[1 + (C - 1)K a_w]} \quad (2)$$

Donde X_o es el contenido de humedad en la monocapa, C es la constante Guggenheim y está relacionada con el calor de adsorción en la monocapa, K está relacionada al calor de adsorción en la multicapa, CHE es el contenido de humedad en equilibrio y a_w es la actividad de agua.

Los valores de C y K para garantizar valores de a_w menores a 1 deben estar en el rango $5.67 \leq C < \infty$ y $0.24 < K \leq 1$ (M. Rahman, 2008).

- **Modelo de Smith**

El modelo (Ec. 3) propuesto en 1947 estudia la adsorción de agua en los polímeros de alto peso molecular y se ajusta a las isothermas con actividades de agua superiores a 0.30 (Marquéz, 1998).

$$CHE = B + A \log(1 - a_w) \quad (3)$$

Donde A y B son constantes del modelo características para cada producto.

- **Modelo de Halsey**

El modelo (Ec. 4) se desarrolló en 1948 y tiene en cuenta la condensación del agua en la multicapa. Se aplica satisfactoriamente en isotermas de sorción en un intervalo de actividades de agua entre 0.05 y 0.9 y es un buen modelo para alimentos con un alto contenido de grasas y proteínas (Castell, 2014).

$$CHE = \left(\frac{A}{\ln\left(\frac{1}{a_w}\right)} \right)^{1/B} \quad (4)$$

Donde A y B son constantes del modelo y características de cada producto.

7.3.7 Temperatura de transición vítrea (Tg)

La transición vítrea es una fase de transición de segundo orden en la cual un compuesto amorfo pasa de un estado vítreo (estructura quebradiza) a un estado gomoso (estructura plástica-elástica para una mezcla sólido-líquido) debido a la disminución de la viscosidad y aumento de la movilidad de las partículas (Jaya & Das, 2009). Esta transición ocurre cuando la temperatura excede la temperatura de transición vítrea.

Los materiales amorfos presentan una estructura no homogénea e irregular que se encuentra termodinámicamente en desequilibrio, además se caracterizan porque sus compuestos poseen una viscosidad alta ($>10^{12}$ Pa s) por lo cual sus propiedades mecánicas son similares a los materiales sólidos. Debido a su alta viscosidad se limita la movilidad molecular dando lugar a velocidades de reacción muy bajas (Bick, 2015).

Los alimentos sólidos presentan un estado estable-amorfo sensible a los cambios de humedad y temperatura. Los cambios durante el procesamiento y el almacenamiento al que se someten los alimentos deshidratados están fuertemente relacionados con la movilidad molecular y su estructura, por lo tanto, estos cambios se reflejan en la transición vítrea. La movilidad molecular se debe al agua presente en el alimento, ya que se considera como un plastificante y al tener un contenido de humedad más alto las moléculas pueden moverse más fácilmente (es decir en estado amorfo), disminuyendo las fuerzas moleculares entre las cadenas

poliméricas e incrementando la movilidad, lo que ocasiona una reducción de la temperatura de transición vítrea (López, 2006).

7.3.8 Temperatura de punto de pegajosidad (Ts)

La tendencia que poseen los alimentos en polvo a adherirse se denomina pegajosidad. La pegajosidad es un fenómeno frecuente en la producción y almacenamiento de alimentos secos. Se refiere a la cohesión (pegajosidad partícula – partícula) y a la adhesión (pegajosidad partícula – pared). La cohesión se refiere a la interacción de las superficies similares químicamente y es una propiedad que mide la fuerza para mantener las partículas en contacto como un aglomerado dando lugar a la formación de grumos debido a la exposición a altas temperaturas y humedad (Mani, Jaya, & Das, 2002). Por otro lado, la adhesión consiste en la interacción entre las superficies que son diferentes químicamente, es decir, la tendencia que posee la superficie de la partícula de pegarse en la superficie de los empaques y los equipos. Por lo tanto, la pegajosidad es un problema que poseen principalmente los alimentos obtenidos mediante secado por aspersión y provoca dificultad en el proceso y degradación de la calidad (M. Rahman, 2008).

La temperatura de punto de pegajosidad se define como el valor en el cual el apelmazamiento de un alimento en polvo es instantáneo con poca agitación, es decir, que el alimento ofrece la máxima resistencia a un movimiento de cizallamiento. A esta temperatura se altera el flujo de las partículas y comienzan a pegarse entre sí o a la superficie de contacto. El apelmazamiento se presenta cuando se ha llevado a cabo la transición de estado vítreo a gomoso y siempre se encuentra por encima de la temperatura de transición vítrea (Jaya & Das, 2009). La temperatura de pegajosidad se puede medir mediante los cambios en las propiedades mecánicas o térmicas del producto.

7.3.8.1 Métodos de medición de temperatura de punto de pegajosidad

De acuerdo con Rahman (2008) los métodos utilizados para la medición de la temperatura de pegajosidad se pueden clasificar en directos e indirectos.

7.3.8.1.1 Métodos directos

La temperatura de pegajosidad se determina en función de la temperatura y del contenido de humedad y la medida se realiza explícitamente por la adquisición de señales directas como fuerza, viscosidad y propiedades ópticas (reflectividad) de las partículas en polvo cuando pasa a un estado pegajoso.

- **Método del impulsor en rotación (impeller-driven method)**

Este método se ha utilizado en alimentos como tomate en polvo, café instantáneo (Bhadra *et al.*, 2012) y polvo de frutas (Jaya & Das, 2009). El equipo consiste en un envase hermético que contiene el producto en polvo con una humedad conocida. El envase se sumerge en un baño de agua en el cual se controla la temperatura y se aumenta razonablemente a una velocidad entre 1 y 2°C/min. Un impulsor dentro del envase se encarga de agitar la muestra mientras se aumenta la temperatura. La temperatura en la cual se alcance la máxima fuerza requerida para rotar el impulsor se toma como la temperatura de punto de pegajosidad (Figura 2).

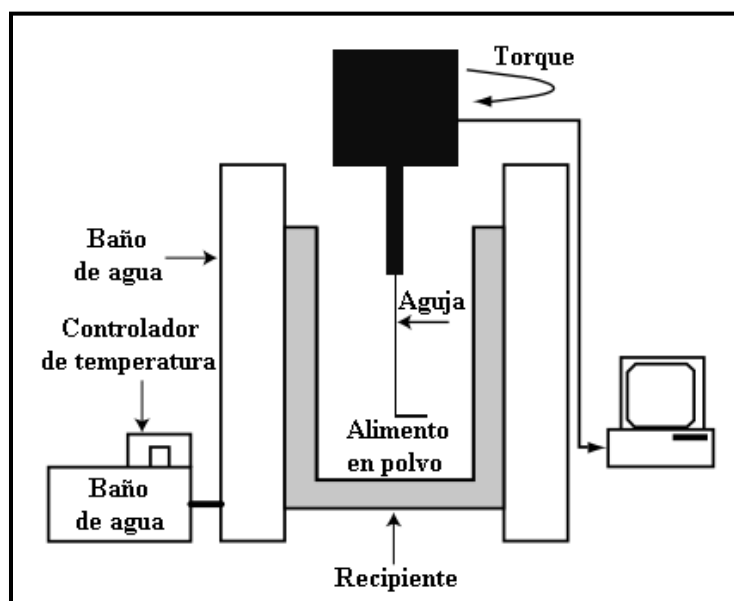


Figura 2. Instrumento de medición de temperatura de pegajosidad (Adaptado de Rahman, (2008))

- **Método de penetración**

El método consiste en utilizar un analizador de textura para una muestra en polvo que ha sido compactada y acondicionada a diferentes temperaturas desde temperatura ambiente hasta 700°C. La temperatura de pegajosidad se reporta cuando se ha penetrado 1mm (Rahman, 2008).

- **Método de sonda óptica**

Consiste en el cambio de las propiedades ópticas específicamente de la reflectividad superficial durante la transición de no pegajoso a pegajoso. Un sensor de fibra óptica registra la reflexión de la luz desde el iluminador a la muestra a través de un tubo y un sensor de reflectancia registra el voltaje que corresponde a la cantidad de luz reflejada por la muestra. El equipo consiste en un tubo sellado que contiene la muestra en polvo y es sumergido en un ángulo de 30° en un baño de aceite con temperatura programable. La muestra se coloca sobre un montaje que permite girar la muestra a 50 rpm y causa que las partículas se deslicen y roten. Dentro de la muestra se coloca un sensor de temperatura que permite almacenar los datos de temperatura. Las señales del sensor de reflectancia permanecen constantes ya que las partículas fluyen libremente. En el momento en que se presente un aumento de las señales de reflectancia indica que el polvo ha llegado a su punto de pegajosidad (Figura 3) (Rahman, 2008).

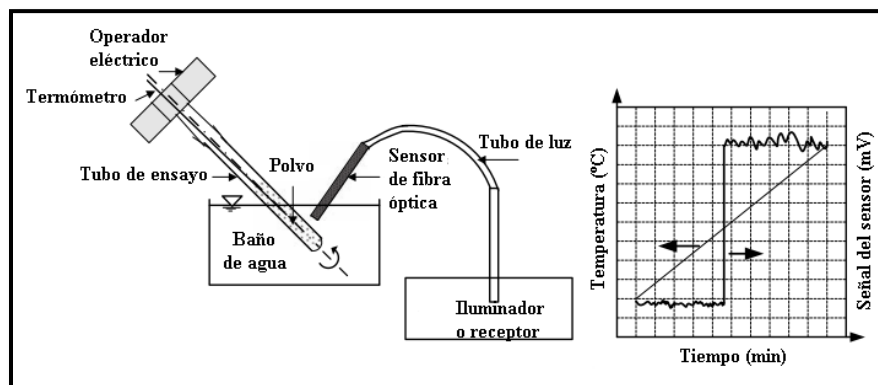


Figura 3. Equipo de sonda óptica (Adaptado de Rahman (2008))

7.3.8.1.2 Métodos indirectos

Mediante la temperatura de transición vítrea se pueden medir los cambios en el volumen, la entalpía y las propiedades mecánicas y dieléctricas que permiten predecir el contenido de humedad y la temperatura en la cual el alimento pasa a un estado pegajoso.

- **Prueba de compresión termomecánica**

Es un método simple que permite determinar la temperatura de transición vítreo-gomoso, específicamente de proteínas de alto peso molecular, carbohidratos y mezclas que son difíciles de medir mediante un calorímetro diferencial de barrido (DSC) debido al pequeño cambio que se produce en la capacidad calorífica. El método consiste en aplicar una fuerza de compresión a tensión constante sobre una capa fina de la muestra (aproximadamente 1 mm) durante 300 segundos para estabilizar la muestra y posteriormente aumentar la temperatura a una velocidad de 30°C/min. El desplazamiento de la sonda de compresión detecta el cambio de estado vítreo a gomoso de la muestra (Rahman, 2008).

7.3.9 Estabilidad

Mediante la elaboración de un diagrama de estabilidad se relaciona el efecto de la actividad de agua sobre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad (Figura 4). Los diagramas de estabilidad permiten describir los estados físicos y químicos de un alimento en función de sus diferentes condiciones. Es importante debido a que explica los cambios en las propiedades de flujo y mecánicas del alimento en el tiempo debido al efecto plastificante del agua y a la transición vítrea. En este diagrama se pueden observar los valores críticos de la actividad de agua y del contenido de humedad que influyen en la pegajosidad del polvo y en las condiciones de almacenamiento (humedad relativa y temperatura) (Jaya & Das, 2009).

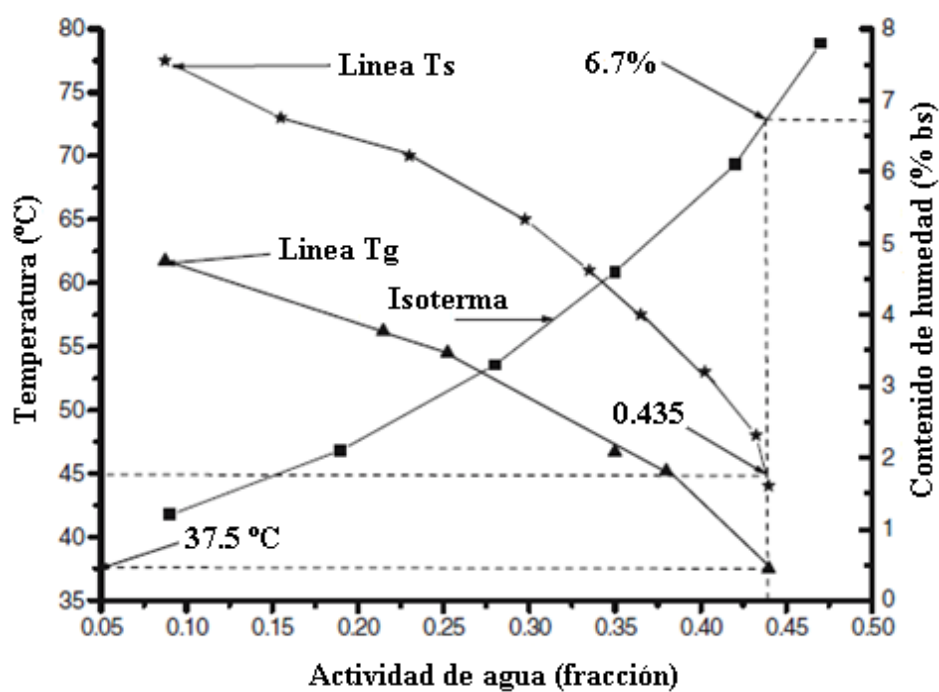


Figura 4. Diagrama de estabilidad de polvo de mango secado al vacío (Adaptado de Jaya & Das, 2009)

8 ANTECEDENTES

Se presentan algunas investigaciones relacionadas con el efecto de las condiciones de operación del secado por aspersión sobre las propiedades físicas de diversos alimentos, así como investigaciones donde han relacionado las isotermas de sorción con la temperatura de transición vítrea y temperatura de punto de pegajosidad.

El contenido de humedad es una propiedad que ha sido estudiada para diferentes alimentos obtenidos mediante secado por aspersión. Dentro de las investigaciones se encuentran la realizada por Chegini *et al.* (2005), Souza *et al.* (2009) y León *et al.* (2010), quienes trabajaron con jugo de naranja, pulpa de tomate y mucilago de nopal respectivamente, donde reportaron que aumentar la temperatura del aire a la entrada disminuye el contenido de humedad y lo asocian al incremento en la velocidad de secado debido al aumento en el gradiente de temperatura entre el alimento atomizado y la temperatura del aire, por lo tanto, aumenta la fuerza motriz para la evaporación del agua y disminuye el contenido de humedad. Sin embargo, entre los estudios revisados, Largo *et al.* (2015) reportaron un comportamiento diferente, debido a que al aumentar la temperatura de la gota se podría generar la formación de una costra que impedía la difusión del agua desde su interior.

Igualmente se ha estudiado la relación entre el flujo de alimentación y velocidad de atomización sobre el contenido de humedad y se evidenció que un aumento en el flujo de alimentación hace menos eficiente el proceso de transferencia de calor entre las gotas atomizadas y el aire de secado (Thirugnanasambandham & Sivakumar, 2015). De otro lado, estudios han determinado que al aumentar la velocidad de atomización el contenido de humedad del polvo obtenido disminuye ya que la gota generada es más pequeña y se aumenta la superficie de contacto facilitando el proceso de evaporación del agua (Chegini & Ghobadian, 2005; León, Méndez, & Rodríguez, 2010; Souza *et al.*, 2009).

Se ha evaluado el efecto de la temperatura de entrada, flujo de alimentación y velocidad de atomización sobre la densidad aparente. Investigaciones como las de Sarabandi *et al.* (2014) y Karaaslan *et al.* (2012) han relacionado la densidad aparente del polvo obtenido con la temperatura de entrada del aire, donde sugieren que un aumento en la temperatura de entrada provoca una disminución de la densidad aparente y atribuyen el resultado a un aumento en

la velocidad de evaporación de la gota lo que provoca que la porosidad del alimento seco sea mayor y tiendan a conformar partículas huecas. Por otro lado, Banat *et al.* (2002) y Wang *et al.* (2015) reportan que el flujo de alimentación y la densidad aparente tienen un comportamiento directamente proporcional ya que al incrementar el flujo de alimentación aumenta el contenido de humedad de la gota y el agua al ser más densa que las partículas sólidas genera un aumento en la densidad aparente del producto en polvo. En cuanto a la velocidad de atomización, Souza *et al.* (2009) y Caicedo *et al.* (2014) reportaron que al disminuir la velocidad de atomización disminuye la densidad aparente. El resultado lo atribuyen al tamaño de la gota y el contenido de humedad la cual es más grande y más densa por el aumento en el contenido de humedad.

Fernandes *et al.* (2013) informa que un aumento de la temperatura de entrada disminuye la densidad de partícula debido a la formación de vapor en la gota lo que provoca la expansión de la partícula. Sin embargo, el flujo de alimentación no tuvo un efecto significativo sobre la densidad de partícula. Caicedo *et al.* (2014) encontraron un comportamiento distinto de la temperatura de entrada sobre la densidad de partícula, ya que al aumentar la temperatura de entrada aumenta el gradiente de temperatura facilitando la transferencia de calor y masa ocasionando una pérdida de volumen lo cual se traduce en mayor densidad de partícula. También, reportaron que un aumento en la velocidad de atomización disminuye la densidad de partícula y lo relacionan con el contenido de humedad de la muestra.

El tamaño de partícula es una propiedad que se ve afectada por la temperatura de entrada del aire. Un aumento en la temperatura de entrada del aire establece rápidamente la estructura de la partícula evitando la contracción durante el proceso de secado, resultando en una partícula de mayor tamaño (Layusa, Barraquio, Dizon, Elegado, & Sevilla, 2013; Wang *et al.*, 2015). Sin embargo, Caicedo *et al.* (2014) no encontraron una relación de la temperatura de entrada del aire con el tamaño de partícula. De acuerdo con los trabajos presentados por Chegini *et al.* (2005; 2013) y Cortés (2014), aumentar el flujo de alimentación genera un aumento en el contenido de humedad residual de las partículas ocasionando un aumento en el tamaño de partícula. También encontraron que aumentar la velocidad de atomización disminuye el

tamaño de partícula debido a un aumento en la energía de atomización que disminuye el tamaño de la gota y por lo tanto el tamaño de partícula en polvo.

Tonon *et al.* (2008) y Largo *et al.* (2015) estudiaron la influencia de la temperatura de entrada de aire sobre la higroscopicidad del polvo obtenido donde encontraron que al aumentar la temperatura de entrada aumenta la higroscopicidad debido a la disminución del contenido de humedad, lo cual aumenta la capacidad de adsorción de agua debido al aumento del gradiente de concentración en agua entre el alimento y los alrededores. Sin embargo, Karaaslan *et al.* (2012) y Sarabandi *et al.* (2014) encontraron que al aumentar la temperatura de entrada del aire disminuye la higroscopicidad y atribuyen el resultado al aumento en la temperatura de transición vítrea ya que se relaciona con el contenido de humedad y la estabilidad del alimento en polvo durante el almacenamiento. Bazarria *et al.* (2016) y Fernandes *et al.* (2013) reportaron que el flujo de alimentación ejerce un efecto inverso sobre la higroscopicidad y este comportamiento lo explican ya que al disminuir el flujo de alimentación el contenido de humedad es menor y como se dijo anteriormente, aumenta la capacidad de adsorción de agua por lo tanto, la higroscopicidad aumenta. Por otra parte, se demostró que el aumento en la velocidad de atomización aumenta la higroscopicidad del polvo ya que ocurre una disminución del tamaño de partícula. La disminución del tamaño de partícula incrementa el área superficial y por consiguiente la adsorción de agua del ambiente (Largo *et al.*, 2015).

Por otra parte, se han realizado investigaciones donde relacionan la isoterma de sorción de un alimento, la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad en función del contenido de humedad.

Algunos autores han trabajado con alimentos obtenidos mediante secado por aspersión y han relacionado la isoterma de sorción con la temperatura de transición vítrea. En los estudios realizados se encontró que la temperatura de transición vítrea disminuye al aumentar el contenido de humedad debido al efecto plastificante del agua. Shrestha *et al.* (2007) trabajaron con lactosa hidrolizada de leche desnatada y reportan la dificultad de trabajar en el secado por aspersión ya que el producto en polvo queda retenido en el ciclón y cámara de secado debido a la baja temperatura de transición vítrea que poseen los alimentos hidrolizados. Cabe resaltar que la lactosa hidrolizada se compone principalmente de glucosa

y galactosa los cuales poseen Tg bajos. Por otra parte, Kurozawa *et al.* (2009) y Tonon *et al.* (2009) trabajaron con proteína hidrolizada de carne de pollo y jugo de açaí respectivamente, e informaron que los alimentos en polvo que utilizaron un agente de secado como maltodextrina o goma arábiga presentaron un aumento en la temperatura de transición vítrea en comparación a los alimentos que no utilizaron, ya que los agentes de secado poseen compuestos de mayor peso molecular lo cual se ve reflejado en un aumento de Tg.

Otros trabajos relacionaron la isoterma de sorción, la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad. Ozmen *et al.* (2002) trabajaron con leche desnatada en polvo secada por aspersión, Jaya *et al.* (2009) utilizaron frutas secas obtenidas mediante estufa al vacío y pulverizados con un molino de martillos y Jagannadha *et al.*, (2010) emplearon gránulos secos de productos de azúcar de caña utilizando un secador de bandejas y luego un molino de martillos para disminuir su tamaño. Con base en los resultados se observó el mismo comportamiento en la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad en función del contenido de humedad, es decir, que al aumentar la cantidad de agua del producto seco, se disminuyó la Tg y Ts. Además, encontraron que la temperatura de punto de pegajosidad siempre fue mayor que la temperatura de transición vítrea y se atribuye el resultado al método utilizado para determinar cada temperatura.

En la Tabla 5 y Tabla 6 se resumen varias de las investigaciones referidas previamente sobre el secado por aspersión y sobre las propiedades termofísicas en alimentos secos en polvo.

Tabla 5. Investigaciones sobre secado por aspersión en alimentos

Autor/Año	Título	Factores	Variables de respuesta	Conclusiones
Banat <i>et al.</i> (2002)	Effect of operating parameters on the spray drying of tomato paste	Flujo de alimentación (ml/min): 8-20 Sólidos totales (%): 4..67- 13.36 Temperatura de alimentación (°C): 25-55 Temperatura de entrada del aire (°C):	Sólidos totales Diámetro medio de partícula	El incremento en sólidos totales incrementa los sólidos del producto en polvo, el tamaño de partícula y la densidad aparente, mientras que disminuye la solubilidad. El incremento en el flujo de alimentación disminuye los sólidos totales del producto en polvo, el tamaño de partícula y la solubilidad y por otro lado incrementa el tamaño medio de partícula y la densidad aparente.

		130-160 Velocidad de flujo de aire (cm ³ /s): 632-792 Adición de almidón (%): 25-50	Densidad aparente Solubilidad	La temperatura de entrada del aire incrementa los sólidos totales, el tamaño de partícula y la solubilidad y disminuye la densidad aparente. La velocidad de flujo de aire no tuvo efecto significativo sobre las variables estudiadas.
Cheguini <i>et al.</i> (2005)	Effect of Spray- Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder	Flujo de alimentación (ml/min): 150-250-350-450 Velocidad de atomización (rpm): 10000-15000-20000- 25000 Temperatura de entrada de aire (°C): 110-130-150-170-180	Densidad aparente Tamaño de partícula Humedad residual Humectabilidad Sólidos insolubles	Al incrementar la temperatura de entrada, se disminuye la densidad aparente y el tamaño de partícula y se incrementa el contenido de humedad residual, el porcentaje de sólidos solubles y la humectabilidad. Al incrementar la velocidad de atomización, el contenido de humedad residual, los sólidos solubles y el tamaño de partícula disminuyen, mientras que la densidad aparente aumenta. El incremento en el flujo de alimentación produce un aumento en el contenido de humedad residual, la densidad aparente y el tamaño de partícula y reduce el porcentaje de sólidos insolubles y la humectabilidad.
Tonon <i>et al.</i> (2008)	Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai (Euterpe oleraceae Mart.) powder produced by spray drying	Temperatura de entrada de aire (°C): 138-202 Flujo de alimentación (g/min): 5-25 Concentración de maltodextrina (%): 10-30	Contenido de humedad Higroscopicidad Rendimiento Retención de antocianinas	La temperatura de entrada del aire tiene un efecto significativo sobre todas las variables de respuesta estudiadas. Aumentar la temperatura de entrada genera un aumento del rendimiento e higroscopicidad y bajo contenido de humedad. El flujo de alimentación tiene efecto negativo sobre el rendimiento e higroscopicidad y efecto positivo sobre el contenido de humedad. El incremento de la concentración de maltodextrina reduce el rendimiento y disminuye la higroscopicidad.
Souza <i>et al.</i> (2009)	Influence of spray drying conditions on the physical	Temperatura de entrada del aire (°C): 200, 210, 220	Contenido de humedad Densidad aparente	El incremento en la temperatura de entrada y disminución en el flujo de alimentación, reduce el contenido de humedad.

	properties of dried pulp tomato	Flujo de alimentación (g/min): 127, 201, 276 Velocidad de atomización (rpm): 25000, 30000, 35000	Tamaño de partícula Porosidad Densidad real	La densidad aparente disminuye con el incremento de la temperatura de entrada, el flujo de alimentación y la disminución de la velocidad de atomización.. Los factores estudiados no tuvieron efecto sobre la densidad real. El tamaño de partícula disminuye con el incremento de la velocidad de atomización y la disminución del flujo de alimentación.
León <i>et al.</i> (2010)	Spray drying of nopal mucilage (<i>Opuntia ficus-indica</i>): Effect on powder properties and characterization	Temperatura de entrada de aire (°C): 130-170 Flujo de alimentación (L/h): 2.3-3.3 Velocidad de atomización (rpm): 21000-24000	Rendimiento Contenido de humedad Densidad aparente	El rendimiento aumenta al aumentar la velocidad de atomización, y disminuir el flujo de alimentación y la temperatura de entrada de aire. El contenido de humedad disminuye cuando se disminuye el flujo de alimentación, se incrementa la temperatura de entrada de aire y la velocidad de atomización. La densidad aparente disminuye cuando se aumenta la temperatura de entrada de aire o hay una disminución del contenido de humedad.
Mendez <i>et al.</i> (2011)	Secado por aspersión de jugo de mandarina (<i>Citrus nobilis</i>): Estudio de las propiedades fisicoquímicas del producto polvo	Temperatura de entrada del aire: 140, 160, 180°C Concentración de encapsulante: 7, 10 y 13% Velocidad del giro del disco: 30000, 35000 y 40000 RPM	Contenido de humedad Rendimiento Color Solubilidad en agua	La velocidad de giro del disco no tiene efecto sobre las variables de respuesta. La temperatura de entrada más alta produjo el mayor contenido de humedad y el rendimiento más bajo del polvo. Al incrementar la concentración del encapsulante hay mayor rendimiento y menor contenido de humedad en el producto obtenido. La maltodextrina es un buen agente para disminuir la pegajosidad y evitar aglomeraciones dentro de la cámara de secado.

Karaaslan <i>et al.</i> (2012)	Spray drying of liquorice (Glycyrrhiza glabra) extract	Temperatura de entrada del aire (°C): 110, 120, 130 Concentración de maltodextrina (%): 10, 15, 20	Contenido de humedad Densidad aparente Cambio de color Higroscopicidad Acidez y Ph Solubilidad	Incrementar la temperatura de entrada del aire y la concentración de maltodextrina disminuye el contenido de humedad, la densidad aparente, la higroscopicidad, la acidez y pH La solubilidad disminuye con la disminución de la temperatura de entrada del aire y el incremento de la concentración de maltodextrina.
Chegini <i>et al.</i> (2013)	Whey powder: Process technology and physical properties: a review	Flujo de alimentación Tipo de atomizador Temperatura de entrada y salida del aire	Densidad aparente Tamaño de partícula Contenido de humedad Sólidos insolubles Humectabilidad Morfología	Incrementar la temperatura de entrada y salida del aire incrementa el tamaño de partícula, la humectabilidad y los sólidos insolubles y disminuye la densidad aparente y el contenido de humedad. El incremento del flujo de alimentación disminuye los sólidos insolubles y aumenta la densidad aparente y tamaño de partícula.
Fernandes <i>et al.</i> (2013)	Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties	Concentración de material encapsulante (%): 10-30 Temperatura de entrada de aire (°C): 135-195 Flujo de alimentación (L/h): 0.5-1.0	Contenido de humedad Higroscopicidad Humectabilidad Solubilidad Densidad aparente y compactada Densidad de partícula Fluidez Cohesión	Al aumentar la temperatura de entrada y disminuir el flujo de alimentación, el contenido de humedad disminuye. Disminuir la temperatura de entrada y aumentar el flujo de alimentación, disminuye la higroscopicidad Incrementar la temperatura de entrada del aire disminuye la densidad aparente Incrementar la temperatura de entrada y material encapsulante, disminuye la densidad de partícula
Layusa <i>et al.</i> (2013)	Optimization of spray drying parameters for yogurt-ice cream mix	Temperatura de entrada del aire (°C): 140, 160, 180 Velocidad de la bomba (rpm):	Contenido de humedad	Incrementar la velocidad de la bomba y disminuir la temperatura de entrada del aire, incrementa el contenido de humedad. El tamaño de partícula aumenta cuando se incrementa la temperatura de entrada del aire, la

		10000, 13000, 16000 Temperatura de alimentación (°C): 30, 40, 50	Tamaño de partícula Densidad aparente	velocidad de la bomba y la temperatura de alimentación. Disminuir la temperatura de entrada del aire y la velocidad de la bomba, incrementa la densidad aparente.
Caicedo <i>et al.</i> (2014)	Evaluación de las condiciones de operación en el secado por aspersión de extracto de levadura sobre las propiedades fisicoquímicas del producto	Temperatura de entrada del aire (°C): 190, 200, 210 Temperatura de salida (°C): 90, 100, 110 Velocidad de disco atomizador (rpm): 20000, 25000, 30000	Rendimiento Humedad Actividad de agua Solubilidad en agua Higroscopicidad Tamaño de partícula Densidad aparente Densidad de partícula	La velocidad de atomización incide sobre las propiedades del extracto de levadura ya que afecta el contenido de humedad, variable de la que dependen otras propiedades como higroscopicidad y densidad. El índice de solubilidad no se afecta por los factores estudiados por el alto grado de compuestos solubles que presenta. Las condiciones óptimas para el secado fueron una temperatura de entrada de aire de 196°C, temperatura de salida de aire de 110°C y velocidad del disco atomizador de 22237rpm. Con las condiciones óptimas se puede obtener un producto con las mismas propiedades del producto comercial rehidratado.
Cortés <i>et al.</i> (2014)	Optimization of spray drying conditions for production of <i>Bidens pilosa</i> L. dried extract	Temperatura de entrada (°C): 100, 130, 160 Flujo de alimentación (g/min): 4, 6, 8 Proporción de celulosa microcristalina: 10/40, 25/25, 40/10	Contenidos de flavonoides totales Actividad antioxidante Concentración de compuestos Tamaño de partícula Contenido de humedad residual Solubilidad Propiedades de flujo Recuperación de producto Eficiencia de secado	Al aumentar la temperatura de entrada disminuye el contenido de humedad del polvo obtenido. Aumentar el flujo de alimentación y la temperatura de entrada, aumenta el tamaño de partícula.

Sarabandi <i>et al.</i> (2014)	Physical properties of spray dried grape syrup as affected by drying temperature and drying aids	Temperatura de entrada del aire (°C): 150, 170 Relación de maltodextrina/ jarabe de uva: 0.5, 1, 2, 4	Contenido de humedad Actividad de agua Densidad aparente Solubilidad Higroscopicidad Humectabilidad	Un aumento en la temperatura de entrada produce la disminución del contenido de humedad, la densidad aparente e higroscopicidad y un aumento en la solubilidad del polvo obtenido
Largo <i>et al.</i> (2015)	Influence of Maltodextrin and Spray Drying Process Conditions on Sugarcane Juice Powder Quality	Contenido de Maltodextrina (%): 10, 20 Temperatura de entrada de aire (°C): 130, 150 Temperatura de salida de aire (°C): 75, 85 Velocidad del disco atomizador (rpm): 22000, 26000	Porcentaje de recuperación efectiva Porcentaje de formación de depósitos en la cámara de secado Actividad de agua Contenido de Humedad Solubilidad del polvo Higroscopicidad	El contenido de humedad disminuye cuando se incrementa el contenido de maltodextrina, se disminuye la temperatura de entrada de aire, se incrementa la temperatura de aire de salida y se incrementa la velocidad de rotación del disco atomizador. La recuperación efectiva del producto se reduce cuando se incrementa la temperatura del aire de entrada, se disminuye el contenido de maltodextrina o se incrementa la temperatura de entrada y salida de aire y cuando se reduce la velocidad del disco. La solubilidad del polvo incrementa cuando el contenido de maltodextrina y la temperatura de entrada y salida de aire es alta, también cuando la velocidad del disco atomizador fue baja a la concentración de maltodextrina fue media. La higroscopicidad disminuye cuando el contenido de maltodextrina fue bajo, la temperatura de entrada de aire fue alto, la temperatura de salida de aire fue baja y la velocidad del disco atomizador fue alta.
Thirugnanasambandham <i>et al.</i> (2015)	Influence of process conditions on the physicochemical properties of pomegranate juice in spray drying process: Modelling and optimization	Temperatura de entrada del aire (°C): 130, 145, 160 Flujo de alimentación (rpm): 4, 6, 8 Velocidad del aspirador (%): 50, 75, 100	Contenido de humedad Higroscopicidad Rendimiento del polvo	Un aumento en la temperatura de entrada produce la disminución del contenido de humedad, higroscopicidad y rendimiento del polvo. Aumentar el flujo de alimentación genera un aumento en el contenido de humedad, la higroscopicidad y el rendimiento del producto en polvo

Wang <i>et al.</i> (2015)	Impacts of spray drying conditions on the physicochemical properties of soy sauce powders using maltodextrin as auxiliary drying carrier	Temperatura de entrada del aire (°C): 140, 160, 180, 200 Flujo de alimentación (g/min): 19, 27, 35, 43 Flujo de aire de atomización: 3, 4, 5, 6	Rendimiento Densidad aparente Cohesión Tamaño de partícula	El rendimiento del producto en polvo aumenta con la disminución de la temperatura de entrada del aire y la reducción del flujo de alimentación. La densidad aparente disminuye cuando se incrementa la temperatura de entrada del aire y se disminuye el flujo de alimentación. El tamaño de partícula aumenta cuando se incrementa la temperatura de entrada del aire y es difícil determinar el efecto que posee el flujo de alimentación.
Bazaria <i>et al.</i> (2016)	Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM)	Temperatura de entrada (°C): 160-180 Adición de maltodextrina (%): 5-15 Flujo de alimentación (ml/h): 400-600	Rendimiento Higroscopicidad Valor de enrojecimiento Retención de betalaina Actividad de barrido radical	Aumentar la temperatura de entrada del aire y disminuir el flujo de alimentación, aumenta el rendimiento del polvo. Incrementar el flujo de alimentación y la temperatura de entrada del aire, aumenta la higroscopicidad del polvo

Tabla 6. Investigaciones sobre propiedades termo físicas de alimentos en polvos

Autor/Año	Título	Tipo de secado	Condiciones de secado	Conclusiones
Ozmen <i>et al.</i> (2002)	Comparison of glass transition temperature and sticky point temperature for skim milk powder	Secador por aspersión		La temperatura de transición vítrea estuvo entre 46.7°C y 87.7°C, aumentando a medida que disminuye el contenido de humedad. La diferencia de temperatura entre la transición vítrea y el punto de pegajosidad estuvo por encima de los 10°C.
Shrestha <i>et al.</i> (2007)	Water sorption and glass transition properties of spray dried lactose hydrolysed skim milk powder	Secado por aspersión	Temperatura de entrada (°C): 130 Temperatura de salida (°C): 65	El secado de la leche desnatada con lactosa hidrolizada es un proceso difícil debido a la cantidad de polvo que se queda dentro de la cámara por la baja temperatura de transición vítrea que posee. Los modelos de BET y GAB se adaptaron bien a las isotermas de sorción del polvo, el contenido de humedad

				de la monocapa fue de 7.55 y 8.27g/100g respectivamente. El polvo obtenido contiene valores de actividad de agua críticos más bajos que la lactosa, indicando la vulnerabilidad que posee bajo las condiciones de procesamiento, manipulación y almacenamiento.
Kurozawa <i>et al.</i> (2009)	Effect of maltodextrin and gum arabic on water sorption and glass transition temperature of spray dried chicken meat hydrolysate protein	Secador por aspersión	Temperatura de entrada del aire (°C): 180 Temperatura de salida (°C): 91-102 Flujo de alimentación (kg/h): 0.2 Flujo del aire (m³/h): 0.6	Las isotermas de sorción muestran que el contenido de humedad en equilibrio con el uso de maltodextrina o goma arábica fue más bajo con los aditivos. La temperatura de transición vítrea aumenta con el incremento del peso molecular, además la adición de maltodextrina o goma arábica contribuye a mejorar la estabilidad del polvo. La proteína de carne de pollo hidrolizado presentó un bajo contenido de humedad y actividad de agua crítico, así como una baja Tg, pero al adicionar maltodextrina o goma arábica aumentó la Tg contribuyendo a la estabilidad del polvo.
Jaya <i>et al.</i> (2009)	Glass transition and Sticky point Temperatures and Stability/Mobility Diagram of Fruits Powders	Secado al vacío	Temperatura de secado (°C): 70°C Presión de vacío(kPa): 94.5-100	El diagrama de estabilidad/movilidad permite explicar los cambios en las propiedades mecánicas y de flujo que se producen por la transición vítrea y la plastificación del agua y sirve de guía para evitar la pegajosidad de los polvos durante la manipulación. La fase de transición de los polvos ricos en azúcar no solo depende de la cantidad de azúcar y ácido, sino también de las características estructurales. La temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad disminuyen al aumentar el contenido de humedad. El diagrama de estabilidad/movilidad muestra los valores críticos para la actividad de agua y contenido de humedad
Tonon <i>et al.</i> (2009)	Water sorption and glass transition temperature of spray dried acai	Secado por aspersión	Velocidad de flujo de aire de secado (m³/h): 73	Ambos modelos BET y GAB describen bien las isotermas de sorción del polvo de acai. La temperatura de transición vítrea disminuye cuando se aumenta el contenido de humedad.

	(<i>Euterpe oleracea</i> Mart.) juice		Presión de compresión de aire (MPa): 0.06 Velocidad de flujo de alimentación (g/min): 15 Temperatura de entrada de aire (°C): 140 ± 2 Temperatura de salida de aire (°C): 78 ± 2	El contenido de humedad crítico se encuentra entre 0.061 y 0.1g/g materia seca y la actividad de agua crítica se encuentra entre 0.535 y 0.574. Por encima de estos valores el polvo se empieza a colapsar y se vuelve pegajoso.
Jagannadha <i>et al.</i> (2010)	Effect of moisture content on glass transition and sticky point temperatures of sugarcane, palmyra-palm and date-palm jaggery granules	Secador de bandejas	Temperatura de secado (°C) 50 Humedad relativa (%): 14 Velocidad de flujo de aire (m/s): 2 Tiempo de secado (h): 14	La temperatura de transición vítrea disminuye con el aumento del contenido de humedad. La temperatura de transición vítrea es similar en las muestras por encima de 10% de humedad. Se observó una diferencia de 18 K entre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad para los gránulos de azúcar de caña secos pero se reduce a medida que aumenta el contenido de humedad. El contenido de humedad crítico para los productos concentrados de caña de azúcar, palma palmira y palmera datilera fueron 1.0-2.0, 3.1-4.3 y 1.9-2.9% en base seca respectivamente.

9 METODOLOGIA

9.1 Materia prima

Se empleó extracto de levadura comercial en polvo EXLV-3111 (Extracto de levadura alta en sal, entre 36%-40%) adquirido en la empresa Tecnas S.A (Medellín). Se mantuvo almacenada a 4°C para su conservación.

9.2 Actividades para el cumplimiento del objetivo 1

- Evaluar el efecto de la temperatura de entrada del aire de secado, el flujo de alimentación y la velocidad del disco atomizador del sistema de aspersión sobre la humedad final del extracto seco, el tamaño de partícula en el producto, la densidad aparente o a granel del producto seco, la densidad de partícula y la higroscopicidad.

9.2.1 Preparación del extracto de levadura líquido para las pruebas de secado por aspersión

El extracto de levadura comercial en polvo se rehidrató hasta obtener una solución al 30% (en peso), teniendo en cuenta que se está simulando una solución del proceso real antes del secado.

9.2.2 Condiciones de operación del secador por aspersión

El secado se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle, en un secador piloto (marca VIBRASEC, Medellín, Colombia) con un atomizador de disco (Figura 5). Se ajustó la temperatura de entrada, el flujo de alimentación y la velocidad del disco de acuerdo con el diseño experimental presentado en la Tabla 7. La capacidad del motor del ventilador fue de 100% y la apertura de la válvula de paso de aire del 80% y se mantuvieron constantes durante el plan experimental. El extracto de levadura se alimentó al secador a temperatura ambiente. Las corridas se realizaron de forma aleatoria para reducir los efectos de los factores externos.



Figura 5. Secador por aspersión

9.2.3 Diseño experimental

Se realizó un diseño Central Compuesto ajustado al modelo de superficies de respuesta donde se analizó el efecto de 3 factores (temperatura de entrada, flujo de alimentación y velocidad del disco atomizador). El diseño se estructuró a partir de un diseño factorial con $n_f = 2^k$ tratamientos (donde n_f es el número de tratamientos y k es el número de factores), se aumentó el diseño con 3 puntos centrales y 2^k puntos axiales con una distancia (rotabilidad) de $\alpha = (n_f)^{1/4}$ es decir 6 puntos axiales con una rotabilidad de 2 para un total de 17 tratamientos (Anexo 4) (Oropeza, 2006).

Se utilizó el software Statgraphics para el análisis de datos estadísticos con un nivel de confianza del 95%. En la Tabla 7 se muestra la distribución del diseño de forma codificada y para los puntos axiales se da en -2 y +2, respectivamente.

Tabla 7. Diseño experimental

Variables de control						Variables de respuesta
Factores	Niveles					
	-2	-1	0	+1	2	
Temperatura de entrada del aire (°C) [A]	170	180	190	200	210	Humedad Higroscopicidad Tamaño de partícula Densidad aparente Densidad de partícula
Flujo de alimentación (ml/min) [B]	37	39.6	48.3	53.3	55.5	
Velocidad (rpm) [C]	20000	25000	30000	35000	40000	

9.2.4 Determinación de las variables de respuesta

A continuación, se describen los métodos utilizados para determinar las variables de respuesta

9.2.4.1 Contenido de humedad

Se determinó por triplicado mediante el método AOAC 4.1.06(2000). Se secaron 2g de muestra durante 24 horas en estufa a vacío a 60°C. Se empleó la Ecuación 5 para determinar la humedad en base húmeda:

$$\% \text{ Humedad } (b.h) = \frac{m_{\text{muestra}} - m_{\text{muestra seca}}}{m_{\text{muestra}}} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

m_{muestra} : Peso de muestra [g]

$m_{muestra\ seca}$: Peso de muestra seca [g]

9.2.4.2 Higroscopicidad

Se evaluó de acuerdo a la metodología descrita por Cai and Corke (2000) con modificaciones. Se expusieron aproximadamente 2g de extracto de levadura seco a una atmósfera con humedad relativa de 76% empleando una solución saturada de cloruro de sodio y una temperatura de 25°C. La muestra se pesó después de 7 días y la higroscopicidad se expresó como la cantidad de agua absorbida por 100 g de materia seca. La prueba se realizó por triplicado.

$$\% \text{ Higroscopicidad (b.s)} = \frac{m_{final} - m_{inicial}}{m_{materia\ seca}} \times 100 \quad (6)$$

m_{final} : Peso de la muestra final (g)

$m_{inicial}$: Peso de la muestra inicial (g)

$m_{materia\ seca}$: Peso de la materia seca de la muestra inicial (g)

9.2.4.3 Tamaño de partícula

Se empleó un analizador de tamaño de partícula marca Malvern Mastersizer 2000 disponible en la Escuela de Ingeniería de Materiales. Teniendo en cuenta que se requiere un solvente en el cual la muestra no sea soluble, la muestra se suspendió en aceite mineral.

9.2.4.4 Densidad de partícula

La densidad de partícula se determinó mediante el método presentado por Barbosa – Canovas *et al.* (2005). Se pesó 1.5 g de muestra dentro de un picnómetro vacío y luego se llenó con un volumen medido de éter de petróleo. Se utilizó éter de petróleo como solvente ya que posee la habilidad de penetrar los poros externos conectados a la superficie del material sin que el material se disuelva en él. La densidad de partícula se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{(m_s - m_0)\rho}{(m_1 - m_0) - (m_{sl} - m_s)} \quad (7)$$

Donde:

m_s : Peso de picnómetro con el polvo (g)

m_0 : Peso de picnómetro vacío (g)

ρ : Densidad del éter de petróleo (kg/m^3)

m_1 : Peso de picnómetro con el éter de petróleo (g)

m_{sl} : Peso de picnómetro con el polvo y el éter de petróleo (g)

9.2.4.5 Densidad aparente

Se pesaron 2 g de extracto de levadura seco dentro de una probeta de 50 mL, se golpeó ligeramente en la base durante 1 minuto y se dividió la masa del polvo por el volumen ocupado en la probeta (Goula & Adamopoulos, 2005). La prueba se realizó por triplicado.

9.2.4.6 Análisis de datos

Se utilizó el software Statgraphics para el análisis de datos estadísticos de las variables de respuesta con un nivel de confianza del 95%.

9.3 Actividades para el cumplimiento del objetivo 2

– Desarrollar un mapa o diagrama de estabilidad de extracto seco de levadura obtenido por aspersión, basado en las isotermas de sorción, la temperatura de transición vítrea y la temperatura de pegajosidad del producto.

Para las actividades de este objetivo se utilizó el extracto de levadura comercial en polvo con un contenido de humedad inicial de 2.02%.

9.3.1 Isotermas de sorción

9.3.1.1 Montaje experimental

Para obtener diferentes contenidos de humedad, se hidrató la muestra empleando un recipiente cerrado en el que se garantizó una humedad relativa alta (con agua en la parte inferior y una malla para soportar la muestra). Se introdujeron 50 g de muestra. El montaje se mantuvo a temperatura ambiente entre 5 y 240 minutos (Figura 6a).

Para la medición de la humedad relativa en equilibrio (igual a la actividad de agua), se colocaron aproximadamente 40g de la muestra humidificada previamente, dentro de un erlenmeyer de 100 ml cerrado con un tapón y se introdujo un termohigrómetro (marca Vaisala MI70) poner referencia en el espacio de cabeza. Se registró la humedad relativa aproximadamente 2 horas hasta llegar al equilibrio (Figura 6b). Al finalizar el ensayo se determinó el contenido de humedad de la muestra. Las isothermas se construyeron a 3 temperaturas (15, 25 y 35°C).

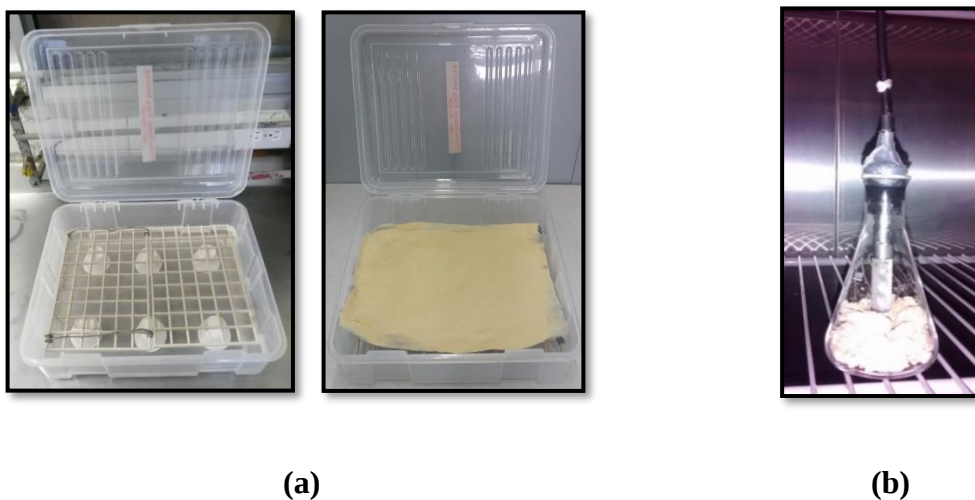


Figura 6. (a) Montaje experimental para la hidratación de extracto de levadura comercial en polvo. (b) Montaje experimental para la medición de la humedad del aire en equilibrio higroscópico con la muestra de extracto de levadura comercial en polvo rehidratada.

9.3.1.2 Modelado de la isoterma de sorción

Las isothermas de sorción se modelaron con las ecuaciones matemáticas de GAB, BET, Smith y Halsey presentadas en las ecuaciones 1 a 4.

La calidad del ajuste del modelo se evaluó determinando el coeficiente de determinación (R^2) (8) y el error medio relativo (EMR) (9).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (a_{w_{pred}} - a_{w_{exp}})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{a_{w_{pred}}} - a_{w_{pred}})^2} \quad (8)$$

$$EMR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |a_{w_{pred}} - a_{w_{exp}}| \quad (9)$$

Donde:

$a_{w_{pred}}$: Actividad de agua calculada por cada modelo

$a_{w_{exp}}$: Actividad de agua experimental

N : Número de observaciones

9.3.2 Temperatura de Transición Vítrea (T_g)

Se utilizó un Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC) TA instrument Q100 (Figura 7) (laboratorio de Transiciones de fase del Departamento de Física, Universidad del Valle) para determinar la temperatura de transición vítrea. El instrumento se calibró con indio (In) ($T_{\text{fusión}} = 156,6^{\circ}\text{C}$) en un crisol cerrado. Se colocaron entre 4 y 4.5mg de la muestra en un crisol que fue debidamente sellado. Las muestras se llevaron a -90°C y se mantuvo a esa temperatura durante 10 minutos, posteriormente se calentaron hasta 100°C con una velocidad de calentamiento de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Se utilizó un crisol de aluminio vacío como referencia (Tonon et al., 2009).

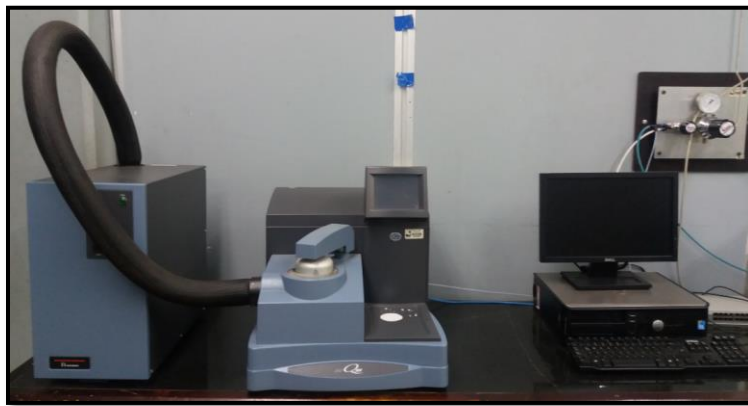


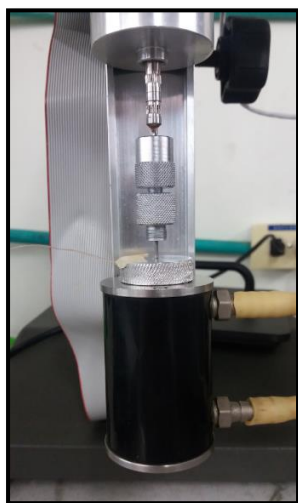
Figura 7. Calorímetro diferencial de barrido

9.3.3 Temperatura de Punto de pegajosidad (Ts)

Para determinar la temperatura de punto de pegajosidad del extracto de levadura seco, se empleó un método directo utilizando un viscosímetro rotacional (Brookfield Modelo DVIII) (Figura 8), acoplado con un impulsor o aguja en forma de T (aguja 94), Figura 9b. Se utilizó un recipiente de acero inoxidable enchaquetado. La temperatura de la muestra se controló haciendo pasar agua caliente por la chaqueta. La velocidad de calentamiento del baño de agua fue de $2.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ desde una temperatura inicial de 5°C hasta 60°C (Figura 9a). La prueba se realizó con 10 g de extracto de levadura. La aguja se introdujo en la muestra y se realizó un proceso de sellado con un tapón para evitar la pérdida de calor. Se le hicieron dos perforaciones en la tapa del recipiente: Una en el centro para introducir la aguja y otra cerca de la periferia para introducir la termocupla para el registro de la temperatura de la muestra (Figura 9b). La velocidad de rotación de la aguja se controló en 50 rpm. El torque generado debido a la rotación de la aguja se monitoreó continuamente. La temperatura a la cual se presentó un incremento repentino del torque se registró como la temperatura de punto de pegajosidad de la muestra (Jagannadha Rao *et al.*, 2010).



Figura 8. Montaje de viscosímetro



(a)



(b)

Figura 9. Montaje experimental para determinación de Temperatura de punto de pegajosidad. (a) Montaje con chaqueta de calentamiento. (b) aguja T con termocupla

9.3.4 Construcción del diagrama de estabilidad

Luego de obtener las isoterma de sorción a 15, 25 y 35°C, determinar la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad, se relacionaron en un diagrama para poder encontrar las condiciones críticas de actividad de agua y contenido de humedad del extracto de levadura comercial en polvo.

9.4 Actividades para el cumplimiento del objetivo 3

– Establecer las condiciones de secado por aspersión que maximicen la densidad a granel de un extracto de levadura secado a la humedad recomendada para almacenamiento comercial.

9.4.1 Optimización de respuesta múltiple del proceso de secado por aspersión

Se utilizaron los modelos obtenidos de las variables de respuesta del proceso de secado por aspersión para realizar la optimización de respuesta múltiple. Se utilizó la técnica numérica del software Statgraphics Centurion para determinar la combinación de los valores de las variables de entrada que optimizan las variables de respuesta. Los parámetros de optimización fueron maximizar la densidad aparente y obtener un contenido de humedad similar al producto comercial (2.45%).

10 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL EXTRACTO DE LEVADURA COMERCIAL

En la Tabla 8 se muestra la caracterización del producto comercial.

Tabla 8. Caracterización física de extracto de levadura

Humedad (% , bh)	2.54 ± 0.74
Densidad aparente (kg/m³)	699.32 ± 51.51
Densidad de partícula (kg/m³)	1373.42 ± 46.45
Higroscopicidad (g agua absorbidos/ g ms) *	0.70 ± 0.01

* Cantidad de agua absorbida en una semana en un ambiente a 76% de humedad relativa

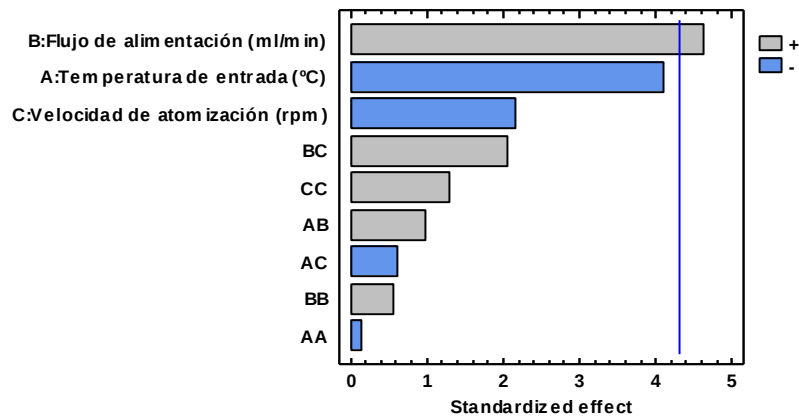
10.2 EFECTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL EXTRACTO DE LEVADURA

10.2.1 Efecto de las condiciones de operación sobre el contenido de humedad

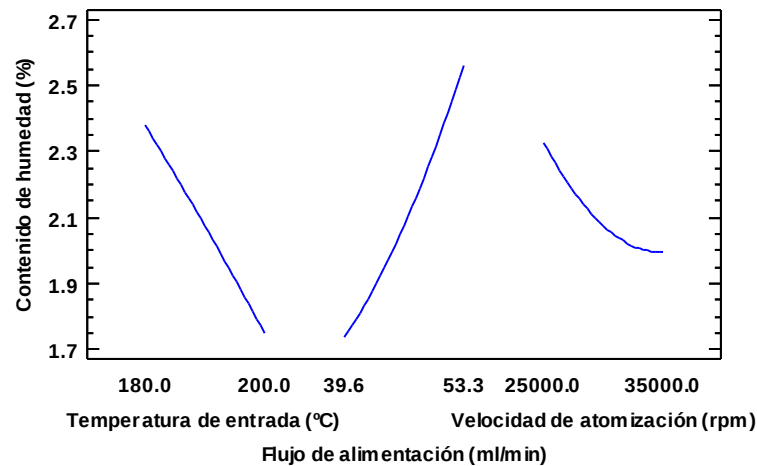
La ecuación del modelo matemático ajustado (Ec. (10)) describe el contenido de humedad del extracto de levadura secado por aspersión.

$$\begin{aligned} \text{Humedad} = & 19.2137 + 1.88785 \times 10^{-3}A - 4.233 \times 10^{-1}B - 3.73359 \times 10^{-4}C - \\ & 1.30951 \times 10^{-4}A^2 + 1.21396 \times 10^{-3}AB - 1.28686 \times 10^{-6}AC + 5.88064 \times \\ & 10^{-5}B^2 + 8.37539 \times 10^{-6}BC + 3.35468 \times 10^{-9}C^2 \end{aligned} \quad (10)$$

De acuerdo al resultado del análisis de varianza (Anexo 5) se indica que únicamente el efecto lineal del flujo de alimentación tiene significancia estadística ($p < 0.05$) en el contenido de humedad. Se esperaba que el modelo matemático lograra explicar el comportamiento de esta variable. Sin embargo, en este caso el coeficiente de determinación (r^2) indica que este modelo sólo explica el 52.693 % del comportamiento.



a)



b)

Figura 10 Comportamiento estadístico del contenido de humedad a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales

De acuerdo con la gráfica de Pareto (Figura 10a) y la gráfica de efectos principales (Figura 10b), el flujo de alimentación tiene un efecto positivo sobre el contenido de humedad. Este resultado puede ser atribuido al aumento en la cantidad de líquido dentro de la cámara de secado ocasionando la colisión entre las gotas atomizadas debido a la cohesión interna de las partículas y ocasionando un aumento en el tamaño de la gota, por lo tanto, se presenta una

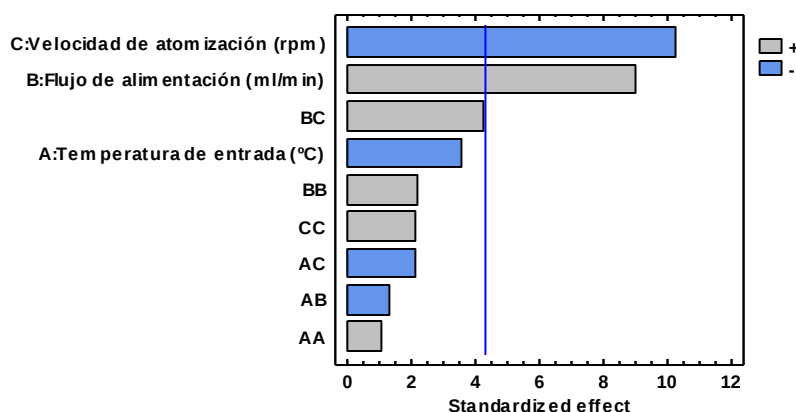
disminución en el tiempo de contacto entre el aire de secado y la gota. Como consecuencia se tiene menor eficiencia en el proceso de evaporación del agua lo que se traduce en mayor contenido de agua en el polvo obtenido (Chegini & Ghobadian, 2007). Resultados similares encontraron Souza *et al.* (2009), Chegini *et al.* (2005) y Layusa *et al.* (2013) para el secado por aspersión de pulpa de tomate, jugo de naranja y helado de yogurt, respectivamente.

10.2.2 Efecto de las condiciones de operación sobre el tamaño de partícula.

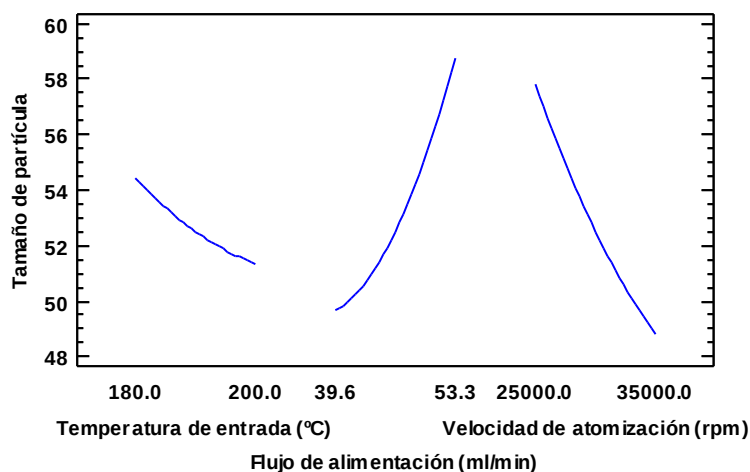
La ecuación del modelo matemático ajustado (Ec. (11)) describe el efecto de los factores sobre el tamaño de partícula del extracto de levadura secado por aspersión.

$$\begin{aligned} \text{Tamaño partícula} = & 88.2383 + 4.1437 \times 10^{-2}A - 2.08198 \times 10^{-1}B - 1.42042 \times 10^{-3}C + 3.41587 \times 10^{-3}A^2 - 1.575 \times 10^{-2}AB - 2.57575 \times 10^{-5}AC + 1.62724 \times 10^{-2}B^2 + 7.90328 \times 10^{-5}BC + 3.02734 \times 10^{-8}C^2 \end{aligned} \quad (11)$$

De acuerdo al resultado del análisis de varianza (Anexo 6) en donde se indica que el efecto lineal (flujo de alimentación y velocidad de atomización), tienen significancia estadística ($p < 0.05$) en el tamaño de partícula, se esperaría que el modelo matemático lograra explicar el comportamiento de esta variable, en este caso el coeficiente de determinación (r^2) indica que este modelo explica el 83.2409 % del comportamiento.



a)



b)

Figura 11 Comportamiento estadístico del tamaño de partícula a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales. Para el tamaño de partícula

De acuerdo con la gráfica de Pareto (Figura 11a) y la gráfica de efectos principales (Figura 11b), el flujo de alimentación tiene un efecto positivo y la velocidad de atomización un efecto negativo sobre el tamaño de partícula. El flujo de alimentación está asociado con la velocidad de la bomba peristáltica que alimenta la solución al disco atomizador, el efecto positivo puede atribuirse a que al aumentar el líquido alimentado la energía de atomización disminuye cuando entra en contacto con la gota lo que hace insuficiente la reducción del tamaño. Por lo cual se presenta la colisión y fusión de las pequeñas gotas que son atomizadas (Anandharamakrishnan, Padma Ishwarya, 1991). Wang *et al.* (2015), Al-Asheh *et al.* (2003) Souza *et al.* (2009) encontraron resultados similares para salsa de soya en polvo y tomate en polvo obtenidos mediante secado por aspersión.

Por otro lado, al aumentar la velocidad de atomización, se imparte una fuerza centrífuga al alimento líquido antes de entrar en contacto con el aire de secado. El alimento líquido se extiende sobre la superficie giratoria como una fina película. Cuanto mayor sea la velocidad del disco, mayor será la fricción generada entre el alimento y el aire, permitiendo la desintegración de la película o lámina en gotas más pequeñas obteniendo así partículas en polvo de menor tamaño (Masters, 1991). Resultados similares encontraron Chegini *et al.*

(2005) en jugo de naranja, Gholamreza (2013) en suero en polvo y Souza *et al.* (2009) en tomate en polvo obtenidos mediante secado por aspersión.

En la Figura 12 se puede observar una tendencia de aumento del tamaño de partícula a medida que se aumenta el flujo de alimentación y se disminuye la velocidad de atomización evidenciando el efecto positivo y negativo de estas variables descrito anteriormente.

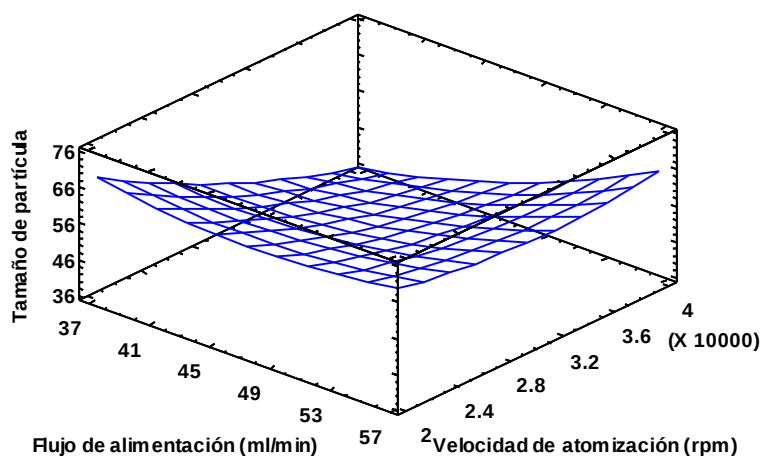


Figura 12. Superficie de respuesta múltiple para el tamaño de partícula. Valor fijo para la temperatura de entrada: 190°C

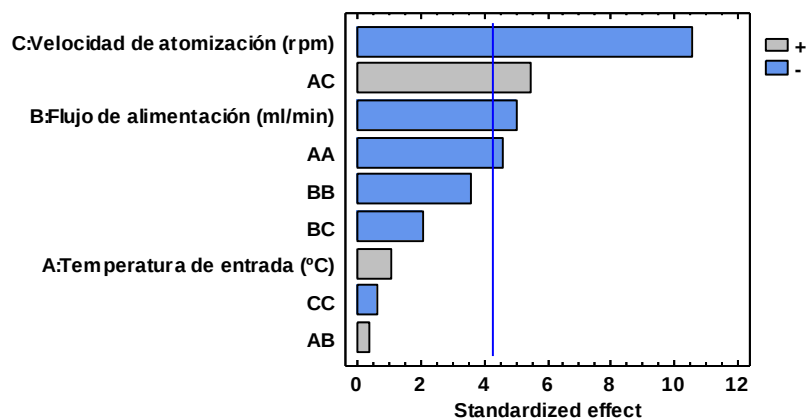
10.2.3 Efecto de las condiciones de operación sobre la densidad aparente

La ecuación del modelo matemático ajustado (Ec. (12)) describe la densidad aparente del extracto de levadura secado por aspersión.

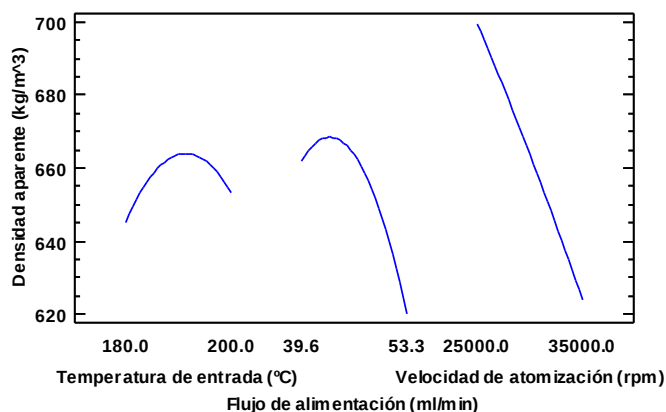
$$\begin{aligned} \text{Densidad Aparente} = & -1676.03 + 33.7366A + 26.6525B - 8.94747 \times 10^{-2}C - 1.41007 \times 10^{-1}A^2 + 8.54197 \times 10^{-2}AB + 5.43425 \times 10^{-4}AC - \\ & 3.73166 \times 10^{-1}B^2 - 3.77117 \times 10^{-4}BC - 6.83272 \times 10^{-8}C^2 \end{aligned} \quad (12)$$

El coeficiente de determinación (r^2) obtenido indica que este modelo explica el 81.6672 % del comportamiento. De acuerdo con el resultado del análisis de varianza (Anexo 7) se observó que los efectos lineales (flujo de alimentación, velocidad de atomización),

cuadráticos (temperatura de entrada) y de interacción (Temperatura de entrada, velocidad de atomización) tienen significancia estadística ($p < 0.05$) en la densidad aparente.



a)



b)

Figura 13 Comportamiento estadístico de la densidad aparente a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales

De acuerdo con la gráfica de Pareto (Figura 13a) y la gráfica de efectos principales (Figura 13b), el flujo de alimentación (B) y la velocidad de atomización (C) tienen efectos negativos sobre la densidad aparente. El efecto negativo del flujo de alimentación se puede explicar por la disminución del diámetro de partícula al disminuir el flujo de alimentación (Figura 11).

Las partículas más pequeñas pueden organizarse fácilmente y disminuir los espacios vacíos entre las partículas por lo tanto genera una estructura más compacta disminuyendo el volumen ocupado por el polvo lo cual aumenta la densidad aparente del producto en polvo. Se encontraron resultados similares para el extracto de jengibre y helado de yogurt obtenidos mediante secado por aspersión (Jangam & Thorat, 2010; Layusa *et al.*, 2013).

Por su parte, la velocidad de atomización se encuentra relacionada con el tamaño de partícula. La distribución inicial del tamaño de las partículas en la atomización se relaciona con el diámetro final del producto en polvo afectando la densidad aparente del polvo obtenido. Al disminuir la velocidad de atomización se aumenta el tamaño de las gotas atomizadas ocasionando una disminución de la interacción entre las partículas y debido a la distribución de tamaño de las partículas, los espacios entre las partículas grandes son ocupados con partículas de menor tamaño generando mejor ordenamiento en el empaque (Zbicinski & Kwapinska, 2003).

De acuerdo con los resultados obtenidos y el comportamiento de los factores estudiados, se puede apreciar que se puede obtener un producto en polvo con una alta densidad aparente con diferentes tamaños de partícula, sin que dependa de la humedad final de la partícula.

La temperatura de entrada del aire (A) no tiene efecto individual pero sí tiene efecto combinado con la velocidad de atomización (C). La combinación A y C da un efecto positivo y esto permite que existan diferentes combinaciones que permitan obtener mayores densidades.

En la Figura 14 se puede observar una tendencia de aumento de la densidad aparente al disminuir el flujo de alimentación y la velocidad de atomización evidenciando el efecto negativo de las variables de respuesta.

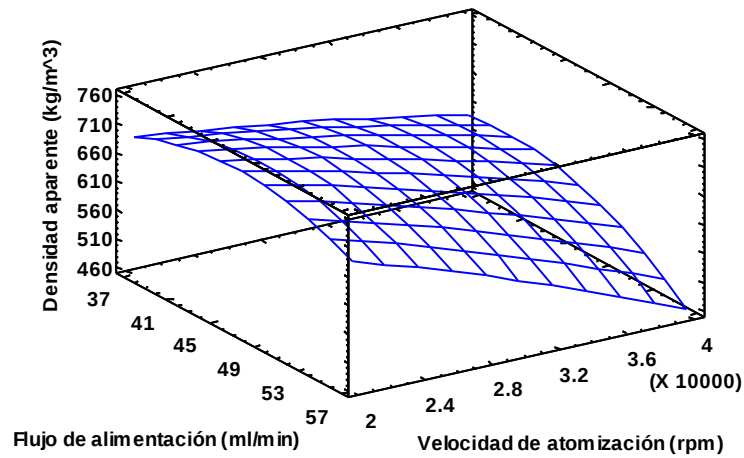


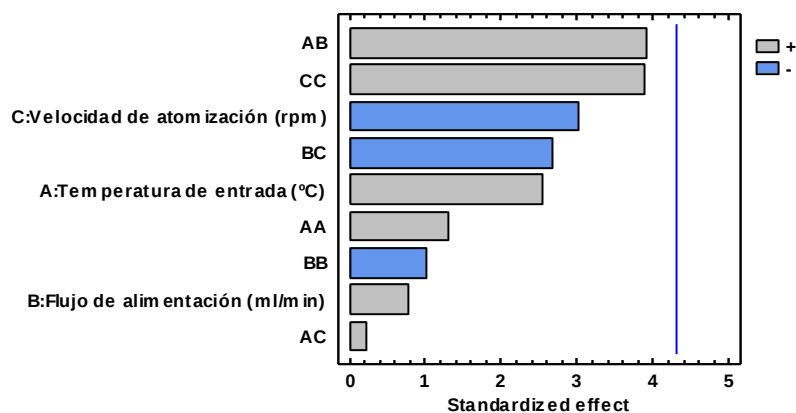
Figura 14 Superficie de respuesta múltiple para la densidad aparente. Valor fijo para la temperatura de entrada: 190°C

10.2.4 Efecto de las condiciones de operación sobre la densidad de partícula

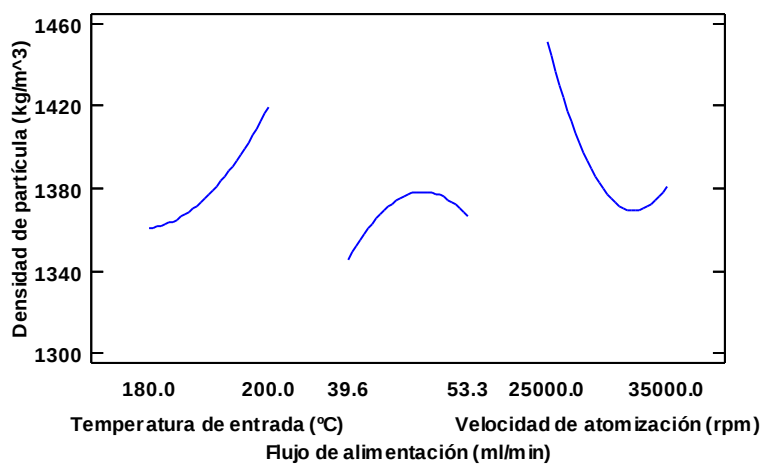
La ecuación del modelo matemático ajustado (Ec. (13)) describe la densidad de partícula del extracto de levadura secado por aspersión en función de los factores estudiados.

$$\begin{aligned} \text{Densidad de partícula} = & 12855.3 - 91.4839A - 92.3846B - 5.68025 \times 10^{-2}C + 1.31652 \times 10^{-1}A^2 + 9.10445 \times 10^{-1}AB + 7.045 \times 10^{-5}AC - \\ & 4.48536 \times 10^{-1}B^2 - 1.2466 \times 10^{-3}BC + 1.57171 \times 10^{-6}C^2 \end{aligned} \quad (13)$$

El resultado del análisis de varianza (Anexo 8) indica que ninguna de las variables estudiadas tiene significancia estadística ($p > 0.05$) en la densidad de partícula. Se esperaría que el modelo matemático lograra explicar el comportamiento de esta variable, en este caso el coeficiente de determinación (r^2) indica que este modelo sólo explica el 71.5337 % del comportamiento.



a)



b)

Figura 15 Comportamiento estadístico de la densidad de partícula a) Gráfica de Pareto, b) Gráfica de efectos principales

De acuerdo con la gráfica de Pareto (Figura 15a) y la gráfica de efectos principales (Figura 15b), la temperatura de entrada (A), el flujo de alimentación (B) y la velocidad de atomización (C) no tienen efecto significativo sobre la densidad de partícula. Los valores de densidad de partícula estuvieron entre 1237 y 1702 kg/m³ y el valor de densidad de partícula para el extracto de levadura comercial fue de 1373.42 kg/m³. Uno de los factores que influyen

en la densidad de partícula es la viscosidad y la cantidad de aire atrapado de la solución que se alimenta al secador (Smithers & Augustin, 2013). La concentración de la solución alimentada no fue un factor estudiado en el proyecto, pero se debe tener en cuenta que todas las corridas experimentales se realizaron con una solución al 30% a temperatura ambiente, por lo tanto, se esperaría que la viscosidad de las muestras sea similar y esto influya en que la densidad de partícula no presente variación. Resultados similares encontraron Souza et al. (2009) durante el secado de pulpa de tomate.

En la Figura 16 se puede observar que no existe una tendencia definida para aumentar la densidad de partícula de ninguno de los factores evidenciando la ausencia de efectos de las variables de respuesta.

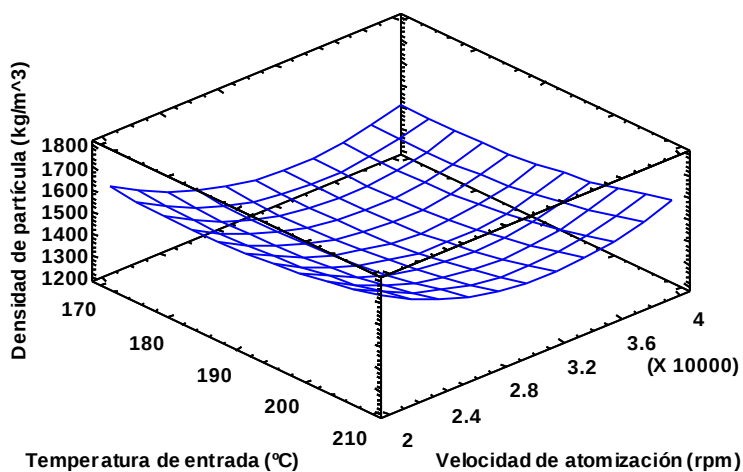


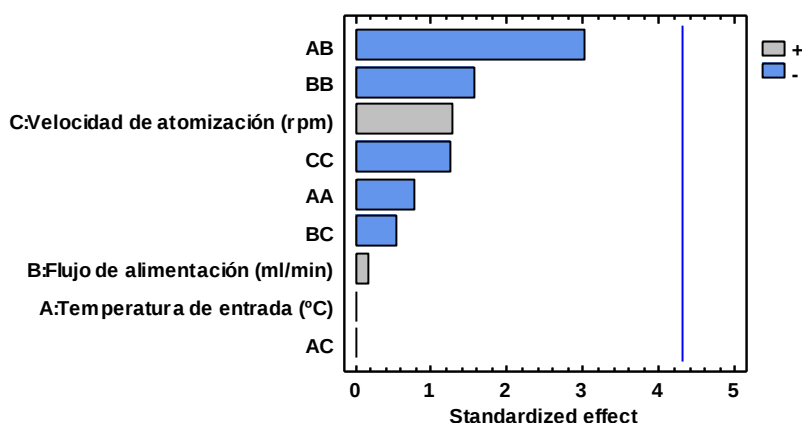
Figura 16. Superficie de respuesta múltiple para la densidad de partícula. Valor fijo para el flujo de alimentación 48.3 ml/min

10.2.5 Efecto de las condiciones de operación sobre la higroscopicidad

La Ec. (14) describe el comportamiento de la higroscopicidad del extracto de levadura secado por aspersión de acuerdo al modelo matemático ajustado en función de las variables de proceso estudiadas.

$$\begin{aligned} \text{Higroscopicidad} = & -10.6125 + 6.19693 \times 10^{-2}A + 2.04913 \times 10^{-1}B + \\ & 4.49823 \times 10^{-5}C - 7.75159 \times 10^{-5}A^2 - 6.99489 \times 10^{-4}AB + 0.0AC - \\ & 6.92319 \times 10^{-4}B^2 - 2.45457 \times 10^{-7}BC - 5.10065 \times 10^{-10}C^2 \end{aligned} \quad (14)$$

De acuerdo al resultado del análisis de varianza (Anexo 9) se indica que los factores estudiados no tienen significancia estadística ($p>0.05$) en la higroscopicidad. Se esperaría que el modelo matemático lograra explicar el comportamiento de esta variable, en este caso el coeficiente de determinación (r^2) indica que este modelo sólo explica el 42.1267 % del comportamiento.



a)

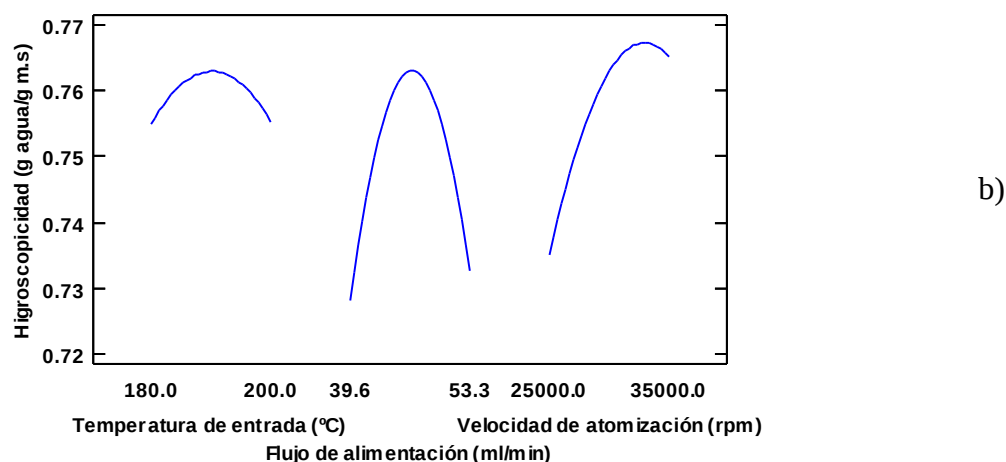


Figura 17. Comportamiento estadístico de la higroscopicidad a) Grafica de Pareto, b) Grafica de efectos principales

De acuerdo con la gráfica de Pareto (Figura 17a) y la gráfica de efectos principales (Figura 17b), ninguno de los factores estudiados tiene efecto significativo sobre la higroscopicidad. Este comportamiento se pudo presentar debido a la poca variación presentada por el contenido de humedad del extracto de levadura obtenido en las corridas experimentales ($2.24 \pm 0.72 \%$) (Caparino *et al.*, 2012). El contenido de humedad se encuentra relacionado con la higroscopicidad ya que a menor contenido de humedad aumenta la higroscopicidad debido a que el gradiente de concentración de agua entre el alimento y los alrededores aumenta, influyendo en el aumento de la capacidad de absorción de agua (Tonon *et al.*, 2008). En el extracto de levadura se encuentran presentes aminoácidos hidrófilos (aspártico, serina, histidina, glutámico, glicina, arginina, treonina, tirosina y lisina). Estos aminoácidos contienen grupos polares que mediante sus fuerzas atractivas permiten su interacción con el agua y aumentan su higroscopicidad (Mellon & Hoover, 1951). Además, contiene un alto porcentaje de cloruro de sodio, que por ser un compuesto iónico posee fuerzas altamente atractivas con las moléculas polares del agua. Por lo tanto, se puede observar que el valor de higroscopicidad para el extracto de levadura estuvo entre 0.62 y 0.81 g/g ms siendo superior a los valores reportados por Goula *et al.* (2004) para tomate en polvo que se encuentran entre

0.04 y 0.14 g/g ms y por Sulieman *et al.* (2014) para leche en polvo que estuvieron entre 0.18 y 0.21 g/g ms.

10.3 ISOTERMAS DE SORCIÓN DE AGUA DE EXTRACTO DE LEVADURA COMERCIAL EN POLVO

10.3.1 Isoterma de sorción

En la Figura 18 se muestran las isotermas de sorción experimentales a 15, 25 y 35°C. Se puede apreciar la forma típica de las isotermas donde se correlaciona la actividad de agua (a_w) y el contenido de humedad (CHE).

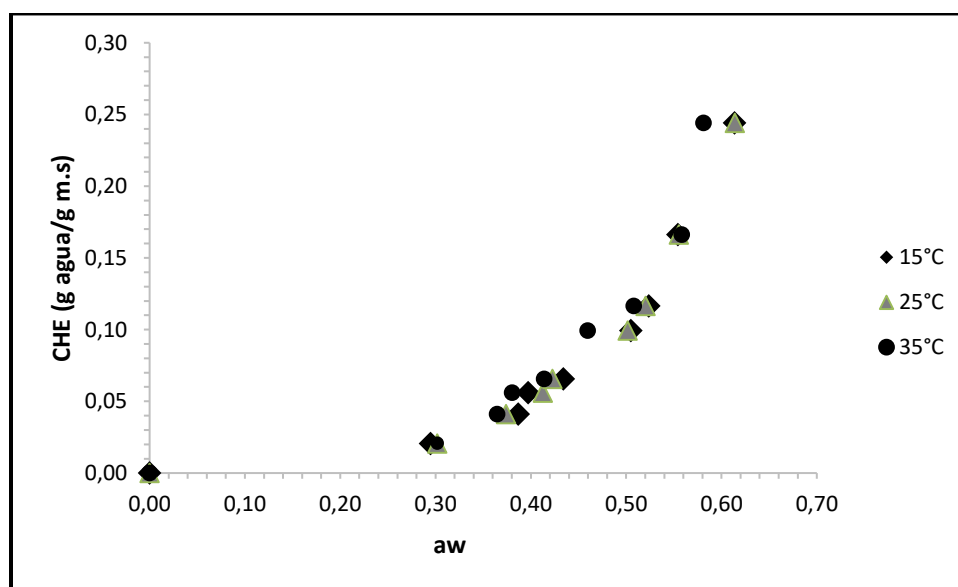


Figura 18. Isotermas de sorción de extracto de levadura

proteínas, aminoácidos y algunas sales minerales (alrededor de 30% de cloruro de sodio) (Anexo 3) los cuales presentan propiedades anfotéricas y diversos grados de ionización que les permite comunicar cargas positivas (grupos amino, cationes ionizados, etc.) y negativas (grupo carboxilo, hidroxilo, aniones ionizados, etc.) a sus moléculas, característica que no poseen las grasas, los carbohidratos y la fibra (Barreiro & Sandoval, 2006). Además, las interacciones iónicas que posee la sal permiten la formación de puentes de hidrógeno firmes facilitando el enlace de moléculas de agua en comparación con otros compuestos (Lewicki,

1997). En este contexto, el extracto de levadura podrá ligar o retener más agua adsorbida que los alimentos ricos en carbohidratos y grasa.

Como se puede observar en la Figura 18 primero se muestra una pequeña ganancia de humedad debido al bajo efecto dieléctrico del agua, el cual no es suficiente para romper las moléculas del material hasta que la actividad de agua se encuentra entre 0.3-0.4. En este punto el contenido de humedad aumenta rápidamente y más agua penetra debido a la disociación de las moléculas del material. Este tipo de comportamiento de sorción es típico de una amplia variedad de alimentos tales como jamón de cerdo cocido (González - Hurtado *et al.*, 2014), mango (Zotarelli *et al.*, 2017), y colorante natural a partir de extractos de cúrcuma (Coronel, 2015).

La representación gráfica de las isothermas de sorción se puede dividir en regiones. La región comprendida entre una actividad de agua que va desde 0.0 a 0.25 donde la disponibilidad para las reacciones químicas es muy limitada ya que el agua presente está fuertemente absorbida y es prácticamente inmóvil. Además, su cantidad no es suficiente para ejercer un efecto plastificante sobre el sólido y carece de capacidad solvente por lo tanto, solamente es parte integrante del sólido. La segunda región corresponde a una actividad de agua comprendida entre 0.25 a 0.8. En esta zona el agua ocupa los sitios libres de la primera capa que permanecen libres y corresponde junto con la monocapa al agua ligada. Mediante enlaces de hidrógeno el agua se asocia con las moléculas de soluto y las moléculas de agua vecinas y la mayoría no congela a -40°C (Fennema, 1992).

En la Figura 18 se observa que no se presenta un efecto de la temperatura sobre las isothermas de sorción de agua estudiadas, es decir, que no existe una relación entre la temperatura y la actividad de agua a humedad constante; esto significa que dentro del rango de temperaturas experimentadas, la higroscopicidad del extracto de levadura es semejante. Este comportamiento se pudo presentar debido a que los niveles de energía alcanzados no permitieron la movilidad del agua ya que no se presentaron cambios en la fijación de las moléculas de agua en la matriz sólida, disociación de las moléculas de agua o aumento de las solubilidad de los solutos (Clemente, 2003). Resultados similares se obtuvieron para proteína texturizada de soya a 10, 20, 30 y 40°C (Cassini, Marczak, & Noreña, 2006).

10.3.2 Modelización de las isotermas de sorción

La adsorción de agua es un fenómeno complejo que depende de la temperatura, la composición y las propiedades de sorción de cada uno de los componentes del alimento. Existen diversos modelos empíricos, semiempíricos y teóricos en la literatura que permiten describir las isotermas de sorción, que brindan diferente tipo de información acerca del proceso de sorción y se pueden ajustar de acuerdo al rango de actividad de agua. Por lo tanto, es recomendable evaluar varios modelos para determinar mayor predicción del comportamiento de la isoterma de sorción y facilitar los puntos extremos en los cuales sea difícil la determinación experimental. La Figura 19 presenta los valores experimentales y modelados del extracto de levadura y en la Tabla 9 muestra el valor de los parámetros obtenidos para cada uno de los modelos.

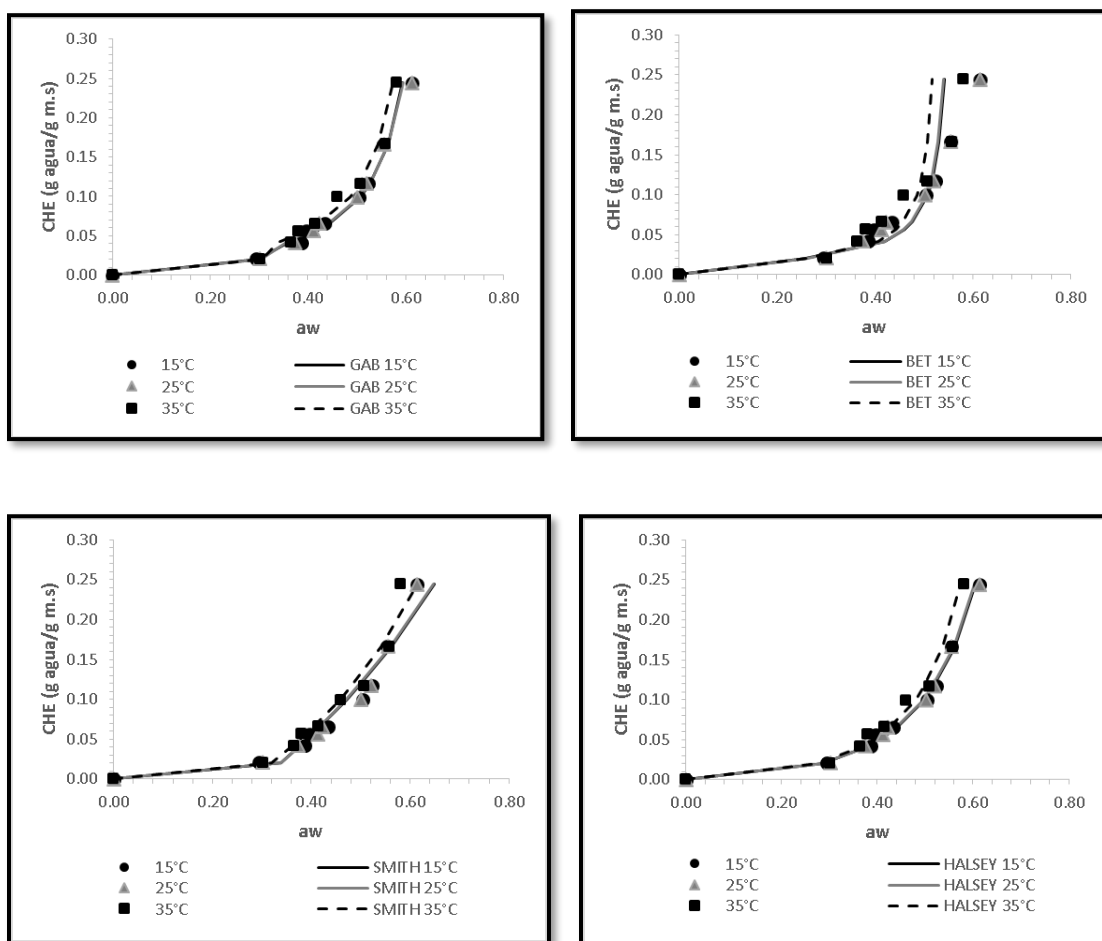


Figura 19. Isotermas de sorción experimentales y modeladas de extracto de levadura

De acuerdo con la Tabla 9 los modelos de GAB y Halsey presentaron mejor ajuste con un coeficiente de correlación mayor al 99% y errores inferiores al 10%, por lo tanto, permiten predecir la a_w a diferentes contenidos de humedad. Por otro lado, los modelos de BET y Smith presentaron menor ajuste en el modelado de los datos experimentales.

La humedad de la monocapa (X_o) dada por el modelo de GAB, representa el contenido de humedad en el cual el agua que se encuentra unida a cada grupo polar e iónico empieza a comportarse como una fase líquida (Andrade, Lemus, & Perez, 2011). Dicho de otra manera, este valor permite representar la cantidad de agua que se encuentra en los primeros sitios activos de la superficie y se considera como el contenido de humedad óptimo en el cual el alimento presenta condiciones estables durante el almacenamiento. Los valores de X_o en las isotermas para el extracto de levadura estuvieron entre 0.02 y 0.021 kg agua/kg ss. Estos valores no presentaron una disminución a medida que aumenta la temperatura, lo que significa que no se presentó destrucción de los sitios activos durante el cambio de temperatura.

La constante cinética C del modelo de GAB fue mayor a 1 para las tres temperaturas indicando la existencia de moléculas de agua ligadas al material que cubren la superficie sorbente (monocapa) y moléculas de agua que presentan menos interacción con la superficie sorbente (multicapa). Además, entre mayor sea el valor de C , mayor será la fuerza entre los enlaces de agua de la monocapa y será mayor la diferencia de entalpía entre las moléculas de la monocapa y la multicapa (Quirijns *et al.*, 2005). La constante K del modelo fue menor a 1 lo que significa que el comportamiento de las moléculas de agua en la multicapa difiere de las moléculas de la fracción líquida (Quirijns *et al.*, 2005).

Por otro lado, el modelo de Halsey fue preciso a bajas temperaturas y de acuerdo con Iglesias y Chirife (1976) este modelo se ajusta adecuadamente en isotermas de alimentos ricos en proteínas.

Tabla 9. Valores de parámetros de los modelos

MODELO	PARÁMETRO	TEMPERATURA		
		15°C	25°C	35°C
GAB	X_o	0.020	0.020	0.021
	C	5.847	5.827	6.023
	K	0.307	0.309	0.301
	EMR (%)	2.362	1.837	2.625
	R^2	0.993	0.996	0.992
BET	X_o	-0.010	-0.009	-0.008
	C	-1.193	-1.203	-1.266
	EMR (%)	7.184	7.607	9.011
	R^2	0.945	0.940	0.925
SMITH	A	-0.815	-0.821	-0.713
	B	-0.126	-0.127	-0.099
	EMR (%)	4.649	3.819	2.827
	R^2	0.979	0.984	0.989
HALSEY	A	0.297	0.301	0.304
	B	0.371	0.367	0.370
	EMR (%)	2.045	1.935	3.464
	R^2	0.996	0.997	0.989

10.4 TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VITREA, TEMPERATURA DE PEGAJOSIDAD Y DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DEL EXTRACTO DE LEVADURA

10.4.1 Temperatura de transición vítrea

Los termogramas del extracto de levadura se muestran en los Anexos 10 a 15. La Figura 20 muestra la relación entre la temperatura de transición vítrea (T_g) y temperatura de pegajosidad (T_s) a diferentes contenidos de humedad para el extracto de levadura. Las

gráficas muestran que ambas temperaturas disminuyen con el aumento del contenido de humedad, siendo mucho menos notorio el efecto del contenido de humedad en la temperatura de transición vítrea. Pero esta disminución se debe a que el agua posee la habilidad de actuar como un plastificante disminuyendo la interacción molecular y ocasionando un aumento en el volumen libre del material amorfo, por lo tanto, flexibiliza la estructura del alimento (Bick, 2015).

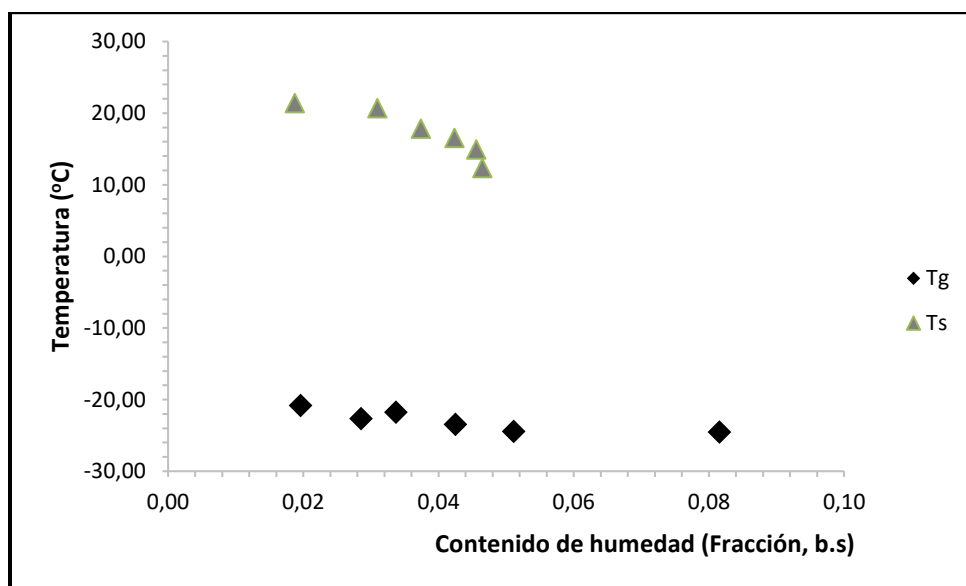


Figura 20. Relación entre el contenido de humedad, la temperatura de transición vítrea (Tg) y la temperatura (Ts) de pegajosidad

Como se observa en la Figura 20 la temperatura de transición vítrea del extracto de levadura estuvo entre -24.52 y -20.79°C. Este comportamiento pudo ser atribuido a la concentración de aminoácidos hidrofílicos presentes en el extracto de levadura (aspártico, serina, histidina, glutámico, glicina, arginina, treonina, tirosina, lisina) que favorecen su higroscopicidad, ya que las moléculas de agua pueden interactuar con los grupos hidrofílicos disminuyendo sus grados de libertad, por lo tanto, estas moléculas de agua no formarían cristales de hielo pero retendrían su movilidad a temperaturas mucho más bajas que la temperatura de cristalización del hielo. El bajo peso molecular (Tabla 10) influye también en la disminución de Tg ya que poseen ramificaciones cortas de aminoácidos con bajos pesos moleculares que se convierten

en estructuras más flexibles por lo cual habrá que suministrarle menor cantidad de calor para que empiece el movimiento de la estructura y se facilite de esta manera la movilidad del agua.

La presencia de cloruro de sodio es otro factor que ejerce un efecto en la reducción de Tg ya que posee un bajo peso molecular y al igual que el agua posee un efecto plastificante, por lo cual, las moléculas de agua sin congelar perderían su movilidad a temperaturas aún más bajas que las temperaturas de cristalización. Esta agua sin congelar perdería su movilidad sólo a Tg más bajas (Farahnaky, Farhat, Mitchell, & Hill, 2009; Inoue & Ishikawa, 2000). Kurozawa *et al.* (2009) presentaron temperaturas de transición vítrea para proteína hidrolizada de carne de pollo secado por aspersión entre -72.23 y 28.41°C.

Tabla 10. Perfil de aminoácidos y peso molecular

AMINOÁCIDO	(%)	PESO MOLECULAR (g/mol)	HIDRÓFILO	HIDRÓFOBO
Aspártico	0.5353	133.10	X	
Serina	2.3684	105.09	X	
Histidina	0.2964	195	X	
Glutámico	2.3298	138.4	X	
Glicina	0.7181	60.1	X	
Arginina	1.4701	225	X	
Treonina	0.2480	119.12	X	
Alanina	1.1044	89.09		X
Prolina	0.4956	115.13		X
Tirosina	0.5781	181.19	X	
Valina	0.8713	119.15		X
Metionina	0.0656	149.21		X
Lisina	1.5760	146.19	X	
Isoleucina	0.8518	131.17		X
Leucina	0.8953	131.17		X
Fenilalanina	0.6386	165.19		X

10.4.2 Temperatura de punto de pegajosidad

La Figura 20 compara la variación de la temperatura de punto de pegajosidad a diferentes contenidos de humedad para el extracto de levadura. Se realizaron tres réplicas para cada contenido de humedad y la desviación estándar de la temperatura estuvo entre 0.15 y 0.66°C. Se puede observar que T_s disminuye con un incremento del contenido de humedad, lo que indica que el extracto de levadura tiene una alta tendencia a aglomerarse y crear problemas de flujo. La curva de T_s confirma que para bajos contenidos de humedad (2% b.s) y para temperaturas por encima de 21°C ocurre la cohesión entre partículas debido a la formación de puentes líquidos que se adhieren entre sí desencadenando en la pegajosidad del extracto de levadura en polvo y creando finalmente un material sólido compacto. Por otro lado, para un contenido de humedad de 4.6% (b.s) se puede observar que la cohesión entre partículas disminuye rápidamente a 12.36°C.

La diferencia entre T_g y T_s estuvo entre 36.7 y 42.2°C. Estos altos rangos de diferencias entre temperatura de transición vítrea y temperatura de pegajosidad obtenidos en comparación con los datos encontrados en la literatura para materiales amorfos (10-20°C) pueden atribuirse a varios factores entre los que se encuentran las variaciones en la composición química, el tamaño de partícula del polvo, y la estructura de la superficie del alimento en polvo (Caparino, Nindo, Tang, & Sablani, 2017). El método aplicado para la determinación de la temperatura de punto de pegajosidad también influye en la variación de los resultados, ya que para determinar T_g el equipo DSC mide el cambio de la capacidad de calor de muestras pequeñas (2.5 a 5 mg) mientras que el método para determinar T_s mide los cambios en las propiedades mecánicas de muestras más grandes (5 a 10g) por lo cual toma más tiempo el calentamiento y ocurrirá a temperatura más alta (Chuy & Labuza, 1994).

10.4.3 Diagrama de estabilidad de extracto de levadura

El efecto del contenido de humedad, la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad se combinan en un diagrama de estabilidad (Figura 21) para mostrar los valores de las condiciones críticas para el contenido de humedad y la actividad de agua que resultan en la pegajosidad del extracto de levadura en las condiciones de almacenamiento. El diagrama permite explicar los cambios en las propiedades de flujo y

mecánicas que son atribuidas a la plastificación del agua (Jaya & Das, 2009). De la figura se puede observar que la temperatura de transición vítrea y la temperatura de punto de pegajosidad en función de la actividad de agua es similar al graficarla en función del contenido de humedad ya que al aumentar la actividad de agua del extracto de levadura se presenta una disminución de T_g y T_s .

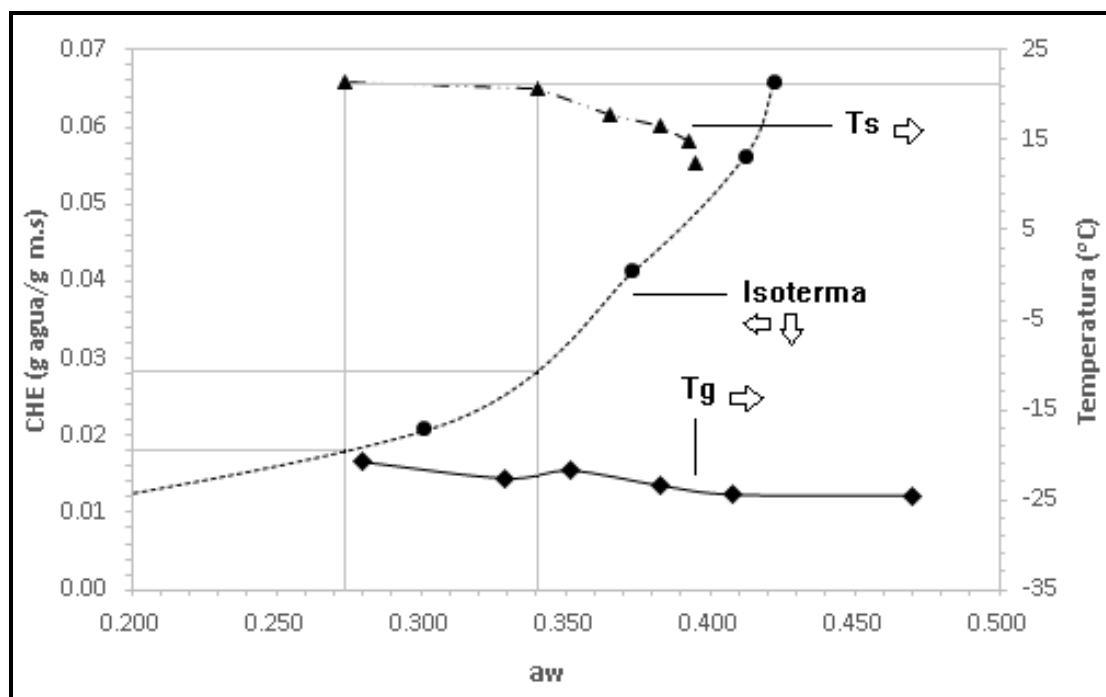


Figura 21. Diagrama de estabilidad en base a contenido de humedad (CHE), actividad de agua (aw) a 25°C, temperatura de transición vítrea (T_g) y temperatura de punto de pegajosidad (T_s)

La actividad de agua y el contenido de humedad críticos son los valores en los cuales la transición vítrea del producto es igual a la temperatura ambiente (25°C). Sin embargo una temperatura de 25°C no se puede visualizar claramente en la gráfica dado que con las condiciones estudiadas en el proyecto la temperatura máxima permitida para que no se desarrolle la pegajosidad en el alimento es de 21.43°C. Sin embargo, se puede determinar la actividad de agua y el contenido de humedad crítico a dicha temperatura, las cuales fueron 0.27 y 0.019 kg agua/ kg ms respectivamente. También se pueden determinar las condiciones críticas cuando se maneja una temperatura de 20.7°C, la actividad de agua que corresponde

a esta temperatura es de 0.34 y el contenido de humedad 0.031 kg agua/kg ms y la temperatura de transición vítrea del extracto de levadura bajo estas condiciones es de -22.18°C.

El bajo contenido de humedad y actividad de agua evidencia claramente la vulnerabilidad del extracto de levadura en polvo bajo las condiciones de manipulación y almacenamiento. Cuando el extracto de levadura se encuentra almacenado a una humedad relativa de 27 % (actividad de agua de 0.27), presentará un contenido de humedad de 0.019 kg agua/kg ms con un Ts de 21°C. Si se encuentra almacenado a una humedad relativa de 34% (actividad de agua de 0.34), presentará un contenido de humedad de 0.031 kg agua/kg ms, Tg de -22.18°C y Ts de 20.7°C. Kurozawa *et al.* (2009) presentaron resultados similares con proteína hidrolizada de carne de pollo donde se indicaba que las condiciones críticas a una temperatura de almacenamiento de 25°C fueron 0.1 para la actividad de agua y 0.04 g agua/g ms para el contenido de humedad.

Por otra parte, el proceso de secado de extracto de levadura se puede ver afectado por las bajas temperaturas de transición vítrea y punto de pegajosidad, dado que las condiciones utilizadas en el secado por aspersión como la temperatura de salida superan estas temperaturas y al aumentarse el gradiente de temperaturas lo hace también del grado de pegajosidad de la muestra. En consecuencia, es probable que durante el secado por aspersión el producto en polvo quede adherido a la cámara del secador y ciclón lo que sugiere que la manipulación del polvo obtenido debe ser lo más controlada posible.

10.5 OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA MÚLTIPLES

Con el fin de obtener un producto con las condiciones ideales (maximizando la densidad aparente para no generar sobrecostos en el empaque y almacenamiento del producto y dejando el contenido de humedad fijo cercano al del extracto de proteína comercial), se llevó a cabo la optimización múltiple a partir de los modelos de las variables de respuesta (Ecuación 14). En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 11. Optimización de respuesta múltiple del proceso de secado

	<i>Factor</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Valor óptimo</i>
Factores	Temperatura de entrada del aire de secado (°C)	-	187.1
	Flujo de alimentación (ml/min)	-	44.4
	Velocidad de atomización (rpm)	-	23663
Variables de respuesta	Contenido de humedad (%)	2.458	2.458
	Densidad aparente (kgm ⁻³)	Maximizar	716.726

Para la verificación de las condiciones de operación óptimas obtenidas, se realizó una corrida con dichas condiciones (187 °C, 44.4 ml/min, 24000 rpm). Los resultados obtenidos de contenido de humedad y densidad aparente para la verificación fueron 2.37% y 703.61 kg/m³ respectivamente. Los porcentajes de error (respecto a los valores calculados en la optimización) fueron 3.60% y 1.83% respectivamente. Estos valores son pequeños y podrían ser aceptables para los enfoques prácticos. Por lo tanto, los resultados obtenidos de verificación estuvieron cercanos a los predichos de los modelos optimización. Además, la densidad del producto obtenido fue cercana a la del producto comercial (699.32± 51.51, Tabla 8).

12 CONCLUSIONES

El flujo de alimentación afecta significativamente las variables de respuesta estudiadas. Al disminuir el flujo de alimentación se obtiene el menor contenido de humedad y se disminuye el tamaño de partícula pero se aumenta la densidad aparente.

Al aumentar la velocidad del disco atomizador disminuye el tamaño de partícula y disminuye la densidad.

Es posible obtener alta densidad aparente del producto en polvo con diferentes tamaños de partícula.

El bajo coeficiente de correlación del contenido de humedad indica que los factores estudiados no poseen la suficiente influencia para explicar el comportamiento de la variable de respuesta. Por lo tanto, no se puede predecir el comportamiento del contenido de humedad con los factores estudiados.

De acuerdo al análisis estadístico, el modelo obtenido para la densidad aparente presentó una buena correlación con los datos experimentales, por lo cual es adecuado para realizar la optimización de las condiciones de operación.

Las isotermas de sorción de extracto de levadura presentaron un comportamiento tipo III características de alimentos ricos en componentes solubles como azúcares o sales. Los modelos que mejor se ajustaron a los datos experimentales fueron GAB y Halsey con un coeficiente de correlación mayor al 99% y unos errores inferiores al 10%, mientras que los modelos de BET y Smith presentaron menor ajuste en el modelado de los datos experimentales

La temperatura de transición vítrea del extracto de levadura estuvo entre -24.52 y -20.79°C para un contenido de humedad entre 0.082 y 0.02 kg agua/kg ms. Por lo tanto se debe tener en cuenta el grado de hidrólisis y el bajo peso molecular de los aminoácidos libres con respecto a la estabilidad del producto.

La temperatura de punto de pegajosidad depende del contenido de humedad del extracto de levadura y disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad confirmando la tendencia que posee de aglomerarse y crear problemas de flujo.

De acuerdo con el diagrama de estabilidad, el extracto de levadura evidencia ser un producto vulnerable en las condiciones de manipulación y almacenamiento, ya que a cuando se encuentra almacenado a una humedad relativa de 34%, presentará un contenido de humedad de 0.031 kg agua/kg ms, Tg de -22.18°C y Ts de 20.7°C.

Las condiciones óptimas de operación para el secado por aspersión de extracto de levadura comercial seco y rehidratado se logran a una temperatura de entrada de 187.1°C, flujo de alimentación de 4.44 ml/min y velocidad de disco atomizador de 23663 rpm.

14 BIBLIOGRAFIA

- AIChE, A. I. of C. E. (2003). Spray dryers A Guide to Performance Evaluation (2nd ed., p. 68). New York.
- Al-Asheh, R., Jumah, R., Banat, F., & Hammad, S. (2003). The use of experimental factorial design for analysing the effect of spray dryer operating variables on the production of tomato powder. *Transaction Institute Chemical Engineering*, 81, 81 – 88.
- Anandharamakrishnan, C. Padma Ishwarya, C. (1991). Introduction to spray drying. In B. Wiley (Ed.), *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation* (1st ed., p. 36).
- Andrade, R. D., Lemus, R., & Perez, C. E. (2011). Models of Sorption Isotherms for Food: Uses and Limitations. *Vitae-Revista De La Facultad De Quimica Farmaceutica*, 18(3), 325–334.
- AOAC 4.1.06. (2000). Determination of moisture content en: official methods of analysis of AOAC international (17th ed.). Gaithersburg, USA.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos*. (E. Quintanar, Ed.) (4th edi, p. 716). México: Pearson Educación de México.
- Banat, F., Jumah, R., Al-Asheh, S., & Hammad, S. (2002). Effect of Operating Parameters on the Spray Drying of Tomato Paste. *Engineering in Life Sciences*, 2, 403–407.
- Barbosa-Canovas, G. ., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2005). *Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality*. (S. S. & B. Media, Ed.) (p. 372). New York: Plenum Publishers.
- Barreiro, J., & Sandoval, A. (2006). Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. (Equinoccio (Universidad Simón Bolívar), Ed.) (1st ed., p. 343). Caracas.

- Bazaria, B., & Kumar, P. (2016). Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. doi:10.1016/j.jssas.2016.09.007
- Bhadra, R., Muthukumarappan, K., & Rosentrater, K. (2012). Measurement of sticky point temperature of coffee powder with a rheometer. *International Journal of Food Properties*, 16(5), 1–21.
- Bick, A. (2015). Lactose crystallization in drum dried , freeze dried and spray dried skim milk powders (Master Thesis). Lunds Universitet, Lund, Suecia.
- Bon, J., Vázquez, H., & Mulet, A. (2012). Modeling sorption isotherms and isosteric heat of sorption of mango pulp cv. Tommy atkins. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 10(2), 34–43.
- Cai, Y., & Corke, H. (2000). Production and properties of Spray-dried *Amaranthus Betacyanin* Pigments. *Journal of Food Science*, 65(6), 1248–1252.
- Caicedo, A., & Marín, L. (2014). Evaluación de las condiciones de operación en el secado por aspersión de extracto de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) sobre las propiedades fisicoquímicas del producto (Trabajo de grado de pregrado). Universidad del Valle. Cali, Cali, Colombia.
- Caparino, O., Nindo, C. I., Tang, J., & Sablani, S. S. (2017). Rheological measurements for characterizing sticky point temperature of selected fruit powders: An experimental investigation. *Journal of Food Engineering*, 195, 61–72. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.09.010
- Caparino, O., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine “Carabao” var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 135–148. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010

- Cassini, A., Marczak, L., & Noreña, C. (2006). Water adsorption isotherms of texturized soy protein. *Journal of Food Engineering*, 77, 194–199. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.05.059
- Castell, Á. P. (2014). Uso de RMN de campo bajo para el análisis de procesos de transferencia de materia. Aplicación al secado-maduración de queso (Tesis doctoral). Universitat de les illes balears, Palma de Mallorca, España.
- Ceballos, A. M. (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, Manizales, Colombia.
- Chegini, G., & Ghobadian, B. (2005). Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder. *Drying Technology*, 23, 657–668. doi:10.1081/DRT-200054161
- Chegini, G., & Ghobadian, B. (2007). Spray Dryer Parameters for Fruit Juice Drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), 230–236.
- Chegini, G., & Taheri, M. (2013). Whey Powder : Process Technology and Physical Properties : A Review. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 13(10), 1377–1387. doi:10.5829/idosi.mejsr.2013.13.10.1239
- Chuy, L. E., & Labuza, T. P. (1994). Caking and stickiness of dairy-based food powders as related to glass transition. *Journal of Food Science*, 59(1), 43–46. doi:10.1111/j.1365-2621.1994.tb06893.x
- Clemente, G. (2003). Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Coronel, A. (2015). Efecto de las condiciones de secado por aspersión en la obtención de un colorante natural a partir de extractos líquidos de cúrcuma (*Curcuma longa* L) (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia.

- Cortés, D., Fernandes, C., & Oliveira, W. (2014). Optimization of spray drying conditions for production of *Bidens pilosa* L. dried extract. *Chemical Engineering Research and Design*, 93, 366–376. doi:10.1016/j.cherd.2014.06.010
- De Souza, V. B., Thomazini, M., Balieiro, J. C. D. C., & Fávaro-Trindade, C. S. (2013). Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification byproducts of the Bordo grape (*Vitis labrusca*). *Food and Bioproducts Processing*, 93, 1–12. doi:10.1016/j.fbp.2013.11.001
- Early, R. (Ralph). (1998). *The technology of dairy products* (p. 446). Blackie Academic.
- Farahnaky, A., Farhat, I. A., Mitchell, J. R., & Hill, S. E. (2009). The effect of sodium chloride on the glass transition of potato and cassava starches at low moisture contents. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1483–1487. doi:10.1016/j.foodhyd.2008.08.007
- Fennema, O. (1992). *Química de los alimentos*. (Acribia, Ed.) (2nd ed., p. 1249).
- Fernandes, R., Borges, S., & Botrel, D. (2013). Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties. *Ciencia E Tecnologia de Alimentos*, 33(Supl 1), 171–178.
- Foust, A. S., Wenzel, L., Clump, C. W., Maus, L., & Andersen, B. (2006). *Principios de operaciones unitarias*. (C. editorial Continental, Ed.) (2nd ed., p. 753). Mexico. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Global Market Insights. (2017). *Yeast extract market size, price trends – Industry share report 2024*. Retrieved April 19, 2017, from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/yeast-extract-market>
- González Hurtado, M. I., Porras Barrientos, L. D., Agudelo Florez, A. C., Quintero Cardona, O. A., & Diosa Quintero, C. F. (2014). Determinación de isoterma de desorción en jamón de cerdo cocido almacenado entre 4°C y 12°C. *Vitae*, 21(2), 97–106.

- González, M. J. C. (2009). Efecto de la adición de hidrolizados de levadura *saccharomyces cerevisiae* en la obtención de leches acidificadas (Trabajo de grado de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2005). Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. *Journal of Food Engineering*, 66, 35–42.
- Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., & Nikolaos, K. (2004). Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. *Drying Technology*, 22(5), 1129–1151. doi:10.1081/DRT-120038583
- Hernández, J. (2009). Propiedades hídricas en mezclas de sustratos con diferentes proporciones y tamaños de partícula. Colegio de Postgraduados, Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, Montecillo, México.
- IFT. (2010). Global food additives market to exceed 33 B by 2015. Retrieved from <http://www.ift.org/food-technology/daily-news/2010/june/08/global-food-additives-market-to-exceed-33-b-by-2015.aspx>
- Inoue, C., & Ishikawa, M. (2000). The contribution of water to the specific heat change at the glass-to-rubber transition of the ternary system BSA-water-NaCl. *Journal of Food Science*, 65(7), 1187–1193. doi:10.1111/j.1365-2621.2000.tb10263.x
- Jagannadha Rao, P. V. K., Das, M., & Das, S. K. (2010). Effect of moisture content on glass transition and sticky point temperatures of sugarcane, palmyra-palm and date-palm jaggery granules. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 94–104. doi:10.1111/j.1365-2621.2009.02108.x
- Jangam, S. V., & Thorat, B. N. (2010). Optimization of spray drying of ginger extract. *Drying Technology*, 28, 1426–1434. doi:10.1080/07373937.2010.482699

- Jaya, S., & Das, H. (2009). Glass transition and sticky point temperatures and stability/mobility diagram of fruit powders. *Food and Bioprocess Technology*, 2, 89–95. doi:10.1007/s11947-007-0047-5
- Karaaslan, İ., & Dalgıç, A. C. (2012). Spray drying of liquorice (*Glycyrrhiza glabra*) extract. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 3014–3025. doi:10.1007/s13197-012-0847-0
- Kure, J., & Yugcha, A. (2012). Estudio del proceso de secado del látex de papaya deshidratado por aspersión (Trabajo de grado de pregrado). Escuela superior politécnica del litoral. Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Kurozawa, L. E., Park, K. J., & Hubinger, M. D. (2009). Effect of maltodextrin and gum arabic on water sorption and glass transition temperature of spray dried chicken meat hydrolysate protein. *Journal of Food Engineering*, 91(2), 287–296. doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.09.006
- Largo, E., Cortes, M., & Ciro, H. (2015). Influence of maltodextrin and spray drying process conditions on sugarcane juice powder quality. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7509–7520. doi:10.15446/rfnamv68n1.47839
- Layusa, D. R. C., Barraquio, V. L., Dizon, E. I., Elegado, F. B., & Sevilla, C. C. (2013). Optimization of spray drying parameters for yogurt-ice cream mix. *Philippine Agricultural Scientist*, 96, 392–403.
- León, F. M., Méndez, L. L., & Rodríguez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 81, 864–870. doi:10.1016/j.carbpol.2010.03.061
- Lewicki, P. P. (1997). Water sorption isotherms and their estimation in food model mechanical mixtures. *Journal of Food Engineering*, 32(97), 47–68. doi:10.1016/S0260-8774(97)00002-2

- Lezcano, E. (2012). Cadena de la levadura. Retrieved from http://www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/sectores/farinaceos/Productos/Levadura_2012_03Mar.pdf
- López, A. (2006). La temperatura de transición vítrea en el secado convectivo con condiciones variables de ajo (*Allium sativum* L.). Instituto Politécnico Nacional.
- Lozano, M. (2009). Obtención de microencapsulados funcionales de zumo de *Opuntia Stricta* mediante secado por atomización. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Mani, S., Jaya, S., & Das, H. (2002). Sticky Issues on Spray Drying of Fruit Juices. The Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems, (X), 1–18.
- Marquéz, M. L. (1998). Modelización de la operación de secado de malta, por aire caliente, en lecho fijo y en capa profunda (Tesis doctoral). Universidad de Llerida, Lérida, España.
- Masters, K. (1991). Spray drying handbook. (L. S. & Technical, Ed.) (5th ed., p. 722).
- Mellon, E., & Hoover, S. (1951). Hygroscopicity of aminoacids and its relationship to the vapor phase water absorption of proteins. *Journal of the American Chemical Society*, 73(9), 3879–3882. doi:10.1021/ja01152a095
- Mendez, J., & Mercado, M. (2011). Secado por sspersión de jugo de Mandarina: Estudio de las propiedades fisicoquímicas del producto en polvo (Trabajo de grado de pregrado). Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Milić, T. V., Rakin, M., & Šiler-Marinković, S. (2007). Utilization of baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) for the production of yeast extract: Effects of different enzymatic treatments on solid, protein and carbohydrate recovery. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 72(5), 451–457. doi:10.2298/JSC0705451V

- Oropeza, D. (2006). Aplicación de diseño central compuesto para la formulación de un néctar a base de melón, parchita y limón (Tesis de maestría). Univerisidad Simón Bolívar, Barranquilla, Colombia.
- Otero, M., & Cabello, A. (2007). Procesamiento de levadura para la obtención de derivados. Diferentes alternativas. Red de Revistas Cientificas de America Latina, El Caribe, España Y Portugal, XLI(1), 2–11.
- Otero, M., & Cabello, A. (2010). Obtención de extracto de levadura a partir de residuo de extracción alcalina de ácido ribonucleico de *Candida utilis*. Red de Revistas Cientificas de America Latina, El Caribe, España Y Portugal, 44(2), 16–20.
- Otero, M., Cabello, A., Vasallo, M., García, L., & Lopez, J. (2000). Tecnología para la utilización integral de la levadura de cerveza en la industria alimenticia. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 50(4), 361–365.
- Ozmen, L., & Langrish, T. A. G. (2002). Comparison of glass transition temperature and sticky point temperature for skim milk powder. *Drying Technology*, 20(6), 1177–1192. doi:10.1081/DRT-120004046
- Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 1805–1814. doi:10.1002/jsfa.2140
- Rahman, M. (2008). Food properties handbook. (M. S. Rahman, Ed.) Agricultural and Food Engineering Technologies Service (2nd ed., pp. 1–34). Boca raton, Florida, USA: CRC Press. doi:10.1201/9781420003093
- Revillion, J. P. D. P., Brandelli, A., & Ayub, M. Z. (2003). Production of yeast extract from whey using *Kluyveromyces marxianus*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 46, 121–127.

- Sahin, S., & Sumnu, S. (2006). Physical properties of food. (E. Board, Ed.)Physical Properties of Foods SE - 5 (pp. 193–228). San Marcos, California. doi:10.1007/0-387-30808-3_5
- Sarabandi, K., Peighambardoust, S. H., & Shirmohammadi, M. (2014). Physical properties of spray dried grape syrup as affected by drying temperature and drying aids. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7(12), 928–934.
- Shrestha, A. K., Howes, T., Adhikari, B. P., & Bhandari, B. R. (2007). Water sorption and glass transition properties of spray dried lactose hydrolysed skim milk powder. *LWT - Food Science and Technology*, 40, 1593–1600. doi:10.1016/j.lwt.2006.11.003
- Smithers, G. W., & Augustin, M. A. (2013). *Advances in Dairy Ingredients*. (G. W. Smithers & M. A. Augustin, Eds.)Advances in Dairy Ingredients (1st ed., p. 352). doi:10.1002/9781118448205
- Souza, A. S., Borges, S. V., Magalhães, N. F., Ricardo, H. V., Cereda, M. P., & Daiuto, E. R. (2009). Influence of spray drying conditions on the physical properties of dried pulp tomato. *Ciência E Tecnologia de Alimentos*, 29(2), 291–294. doi:10.1590/S0101-20612009000200008
- Sulieman, A. M. E., Elamin, O. M., Elkhalfifa, E. a., & Laleye, L. (2014). Comparison of Physicochemical Properties of Spray-dried Camel's Milk and Cow's Milk Powder. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 4(1), 15–19. doi:10.5923/j.food.20140401.03
- Tangüler, H., & Erten, H. (2009). The effect of different temperatures on autolysis of baker's yeast for the production of yeast extract. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 33, 149–154. doi:10.3906/tar-0803-17
- Thirugnanasambandham, K., & Sivakumar, V. (2015). Influence of process conditions on the physicochemical properties of pomegranate juice in spray drying process: Modelling

and optimization. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. doi:10.1016/j.jssas.2015.11.005

Tonon, R. V., Baroni, A. F., Brabet, C., Gibert, O., Pallet, D., & Hubinger, M. D. (2009). Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice. Journal of Food Engineering, 94(3-4), 215–221. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.03.009

Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced by spray drying. Journal of Food Engineering, 88, 411–418. doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029

Uribe, C. (2011). Efecto del método de secado, temperatura y pH sobre la actividad antimicrobiana de nisina producida por *Lactococcus lactis* UQ2 (Trabajo de grado de pregrado). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

Wang, W., Dufour, C., & Zhou, W. (2015). Impacts of spray-drying conditions on the physicochemical properties of soy sauce powders using maltodextrin as auxiliary drying carrier. CyTA Journal of Food, 13(4), 548 – 555. doi:10.1080/19476337.2015.1014430

Yanza, E. (2003). Diseño de un secador por atomización a nivel piloto para jugo concentrado de tomate de árbol (Trabajo de grado de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.

Zbicinski, I., & Kwapinska, M. (2003). Physical properties formed during spray drying of materials with the properties of an agglomerate. Acta Agrophysica, 2(2), 443–455.

Zotarelli, M. F., da Silva, V. M., Durigon, A., Hubinger, M. D., & Laurindo, J. B. (2017). Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying. Powder Technology, 305, 447–454. doi:10.1016/j.powtec.2016.10.027

15 ANEXOS

Anexo 1. Perfil de aminoácidos de extracto de levadura



LABORATORIO DE ALIMENTOS Y SIMILARES S.A.S.
MICROQUIM
VERSION No. 00

No. Orden
284307

ANALISIS MICROBIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS DE:
PRODUCTOS TERMINADOS Y SEMITERMINADOS,
MATERIAS PRIMAS, SUPERFICIES, AMBIENTES Y
MANIPULADORES DE LA INDUSTRIA ALIMENTICIA,
AGUAS DE TAPQUES Y PISCINAS,
ASESORIA Y CAPACITACIÓN EN BUENAS PRÁCTICAS DE
MANUFACTURAS (BPM) Y HACCP.

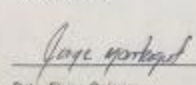
Página 1 de 1

INFORME DE RESULTADO MICROBIOLÓGICO Y FÍSICO-QUÍMICO

ANALISIS SOLICITADO POR.....: CLAUDIA ISABEL OCHOA 43498144	
DIRECCION.....: CLL 13 # 100-00	FAX :
TELEFONOS.....: 3188799321 - 3136076609	
NOMBRE DE LA MUESTRA SEGUN CLIENTE: EXTRACTO DE LEVADURA MUESTRA 1	
MUESTREO REALIZADO POR.....: CLIENTE	
LUGAR DE RECOLECCION.....: PLANTA	
FECHA RECEPCION EN EL LABORATORIO.: Miércoles 30 de Noviembre del 2016	HORA: 11:45
FECHA DEL INFORME.....: Jueves 22 de Diciembre del 2016	
CODIFICACION MUESTRA Y SU NORMA...: 221 NORMA CLIENTE	
PRODUCTO TERMINADO	

ANALISIS FÍSICO-QUÍMICO Y MÉTODO UTILIZADO	RESULTADOS	PARAMETRO DE COMPARACIÓN	UNIDADES
1199 PERFIL AMINOACIDOS			

* VER ANEXO.


Dpto. Físico-Químico

Dpto. Microbiología


NELSON MONTES
Director Técnico

LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME SOLO AFECTAN LA MUESTRA SOMETIDA AL ENSAYO
ESTE INFORME NO PUEDE REPRODUCIRSE PARCIALMENTE SIN LA APROBACION POR ESCRITO DE MICROQUIM

CARRERA 28 No. 6 - 88 - PBX: 514 7000 - FAX: 556 6625
microquim2009@hotmail.com - www.microquim.net - Cali - Colombia



LABORATORIO DE ALIMENTOS Y SIMILARES S.A.S.

MICROQUIM

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS DE
PRODUCTOS TERMINADOS Y SEMITERMINADOS,
MATERIAS PRIMAS, SUPERFICIES, AMBIENTES Y
MANIPULADORES DE LA INDUSTRIA ALIMENTICIA,
AGUAS DE TANQUES Y PISCINAS,
ASESORIA Y CAPACITACIÓN EN BUENAS PRÁCTICAS DE
MANUFACTURAS (BPM) Y HACCP

Santiago de Cali, Diciembre 22 de 2016

ANEXO
CLAUDIA ISABEL OCHOA MARTINEZ
UNIVERSIDAD DEL VALLE

No orden	Muestra	Observaciones
284307	Extracto de levadura Muestra 1	Perfil de aminoácidos: Aspartico: 0.5353% Serina: 2.3684% Asparagina: N.D Histidina: 0.2984% Glutamico: 2.3298% Glicina: 0.7181% Arginina: 1.4701% Treonina: 0.2480% Alanina: 1.1044% Prolina: 0.4956% Cisteina: N.D Tirosina: 0.5781% Valina: 0.8713% Metionina: 0.0653% Lisina: 1.5760% Isoeucina: 0.8518% Leucina: 0.8953% Fenilalanina: 0.6386% Triptofano: N.D

Anexo 2. Ficha técnica de extracto de levadura comercial en polvo

		FICHA TECNICA DE PRODUCTO TERMINADO		PT-1903
FD-17 - Versión N°7		Fecha: 2014-03-18	Aprobado por: LSV	
Versión: 6		Fecha de aprobación de ficha técnica: 2014-05-16		
IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO				
Nombre	EXTRACTO LEVADURA (EXLV-3111)		Referencia	N/A
Ingredientes	Extracto de Levadura y sal			
CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO				
CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS				
CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACION		METODO	
ASPECTO	Polvo fino homogéneo		EO-CC-11. Basado en NTC 2680	
COLOR APARENTE	Crema claro a café claro		EO-CC-12. Basado en NTC 4604	
OLOR	Característico		EO-CC-13. Basado en NTC 2680	
SABOR	Característico		EO-CC-14. Basado en NTC 2680	
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS				
CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	ESPECIFICACION	METODO	
pH (Solución al 5%P/V)	N/A	5,00 - 5,80	EO-CC-15. Basado en NTC 4592	
CLORURO DE SODIO	%	Máximo 41,0	EO-CC-17. Basado en NTC 696	
PÉRDIDAS POR SECADO	%	Máximo 6,0	EO-CC-19. Basado en NTC 529	
PROTEÍNA (Base húmeda)	%	Mínimo 42,0	EO-CC-46. Basado en NTC 4657	
CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS Y ENTOMOLÓGICAS				
CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	ESPECIFICACION	METODO	
Recuento microorganismos aerobios mesófilos	U.F.C./g	Máximo 10000	EO-CC-03. Basado en NTC 4519	
Recuento mohos y levaduras	U.F.C./g	Máximo 100	EO-CC-04. Basado en NTC 4132	
Coliformes totales	N.M.P./g	< 3,0	EO-CC-05. Basado en NTC 4516	
Coliformes fecales	N.M.P./g	< 3,0	EO-CC-05. Basado en NTC 4516	
Detección de Salmonella	spp/25g	Ausente	EO-CC-09. Basado en NTC 4574	
CARACTERÍSTICAS A EVALUAR				
Aspecto, color aparente, olor, sabor, cloruros de sodio, pérdidas por secado				

REVISADO Y APROBADO POR DIRECTORA DE PROYECTOS

TECNAS S.A. web: www.tecnas.com.co
e-mail: servicioalcliente@tecnas.com.co
Itagüí - Colombia

Cra 50G No. 12 sur - 29, A.A. 51040
Teléfonos: (57)(4) 2854290- 2858290
Fax: (57)(4) 2553809

Anexo 3. Determinación de cloruro de sodio de extracto de levadura






INFORME DE LABORATORIO
VERSIÓN No. 00

EMPRESA UNIVERSIDAD DEL VALLE
SUCUR/SEDE N/A
CONTACTO CLAUDIA ISABEL OCHOA MARTÍNEZ
CARGO N/A
TEL/FAX 3188799321
DIRECCIÓN CALLE 13 NO. 100 - 00
CORREO claudia.ochoa@correounivalle.edu.co

REFERENCIA 216120013059
FECHA INGRESO 2016 NOV 30
FECHA ANÁLISIS 2016 DIC 05
FECHA RESULTADO 2016 DIC 07



ORIGINAL

LUGAR DE RECOLECCIÓN	N/A		
MUESTRA	EXTRACTO DE LEVADURA		
MUESTREO REALIZADO POR	CLIENTE	ASPECTO	Polvo compacto
OLOR	Característico	COLOR	Amarillo
LOTE	N/R	CLASE DE EMPAQUE	BOLSA ZIPLOC
CANT. MUESTRA	434.0g		

RESULTADO FISICOQUÍMICO

ANÁLISIS	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO	MÉTODO
CLORUROS (EXPRESADOS COMO NaCl)	%	N/A	33.20	Volumetría

Las muestras se almacenaran durante 1 mes (muestras de alimentos no perecederos, materias primas, productos farmacéuticos) y 1 semana (muestras de agua y alimentos perecederos)
 El resultado aplica únicamente a la muestra recibida y analizada
 No se permite la reproducción total o parcial de este documento sin autorización expresa del laboratorio.
 El plan de muestreo es realizado por el cliente



DIANA MARCELA RÍOS
 TECNÓLOGA QUÍMICA T.Q. 1156
 ANALISTA PROCESO FISICOQUÍMICO
Fecha de impresión: Viernes, 9 de Diciembre de 2016



CAROLINA MENDOZA
 QUÍMICA PQ-5598
 DIRECTORA TÉCNICA FISICOQUÍMICO
--- FIN DEL INFORME ---

Anexo 4. Corridas experimentales

TEMPERATURA DE ENTRADA (°C)	FLUJO DE ALIMENTACIÓN (ml/min)	VELOCIDAD DEL DISCO ATOMIZADOR (rpm)
180	53.3	25000
210	48.3	30000
180	39.6	25000
190	48.3	30000
180	53.3	35000
200	53.3	25000
170	48.3	30000
190	48.3	20000
190	48.3	30000
200	39.6	35000
200	53.3	35000
190	48.3	30000
200	39.6	25000
180	39.6	35000
190	37	30000
190	55.5	30000
190	48.3	40000

Anexo 5. Análisis de varianza para el contenido de humedad

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Temperatura de entrada (°C)	1.53311	1	1.53311	16.70	0.0550
B:Flujo de alimentación (ml/min)	1.97063	1	1.97063	21.47	0.0436
C:Velocidad de atomización (rpm)	0.430294	1	0.430294	4.69	0.1628
AA	0.00217906	1	0.00217906	0.02	0.8917
AB	0.0896148	1	0.0896148	0.98	0.4273
AC	0.0331199	1	0.0331199	0.36	0.6090
BB	0.0276734	1	0.0276734	0.30	0.6381
BC	0.385881	1	0.385881	4.20	0.1768
CC	0.154435	1	0.154435	1.68	0.3241
Lack-of-fit	3.79816	5	0.759632	8.28	0.1113
Pure error	0.183566	2	0.0917831		
Total (corr.)	8.41679	16			

Anexo 6. Análisis de varianza tamaño de partícula

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Temperatura de entrada (°C)	36.8991	1	36.8991	12.43	0.0719
B:Flujo de alimentación (ml/min)	239.686	1	239.686	80.73	0.0122
C:Velocidad de atomización (rpm)	309.688	1	309.688	104.31	0.0095
AA	3.14973	1	3.14973	1.06	0.4113
AB	4.85567	1	4.85567	1.64	0.3293
AC	13.269	1	13.269	4.47	0.1688
BB	14.3876	1	14.3876	4.85	0.1586
BC	53.1577	1	53.1577	17.91	0.0516
CC	13.3784	1	13.3784	4.51	0.1678
Lack-of-fit	122.67	5	24.5341	8.26	0.1115
Pure error	5.9376	2	2.9688		
Total (corr.)	767.391	16			

Anexo 7. Análisis de varianza densidad aparente

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Temperatura de entrada (°C)	242.733	1	242.733	1.22	0.3850
B:Flujo de alimentación (ml/min)	4999.94	1	4999.94	25.06	0.0377
C:Velocidad de atomización (rpm)	22093.4	1	22093.4	110.75	0.0089
AA	4256.46	1	4256.46	21.34	0.0438
AB	36.3452	1	36.3452	0.18	0.7111
AC	5906.21	1	5906.21	29.61	0.0322
BB	2545.68	1	2545.68	12.76	0.0702
BC	885.388	1	885.388	4.44	0.1697
CC	81.8899	1	81.8899	0.41	0.5873
Lack-of-fit	8936.32	5	1787.26	8.96	0.1035
Pure error	398.989	2	199.494		
Total (corr.)	50921.4	16			

Anexo 8. Análisis de varianza de densidad de partícula

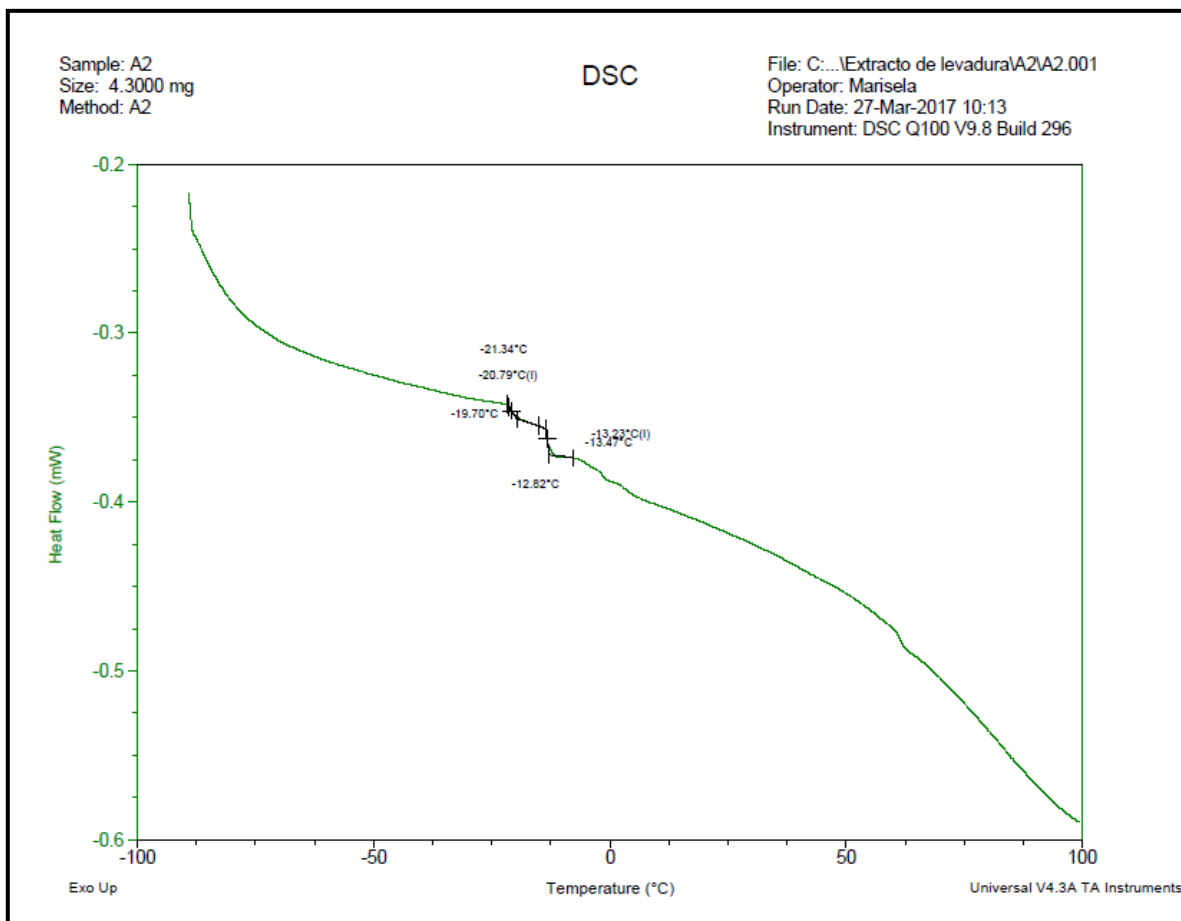
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Temperatura de entrada (°C)	13428.7	1	13428.7	6.41	0.1270
B:Flujo de alimentación (ml/min)	1277.23	1	1277.23	0.61	0.5167
C:Velocidad de atomización (rpm)	19036.2	1	19036.2	9.09	0.0947

AA	3563.62	1	3563.62	1.70	0.3221
AB	32250.4	1	32250.4	15.39	0.0592
AC	99.264	1	99.264	0.05	0.8479
BB	2188.57	1	2188.57	1.04	0.4142
BC	15115.4	1	15115.4	7.21	0.1151
CC	31743.8	1	31743.8	15.15	0.0601
Lack-of-fit	53162.1	5	10632.4	5.08	0.1728
Pure error	4190.01	2	2095.01		
Total (corr.)	201474.	16			

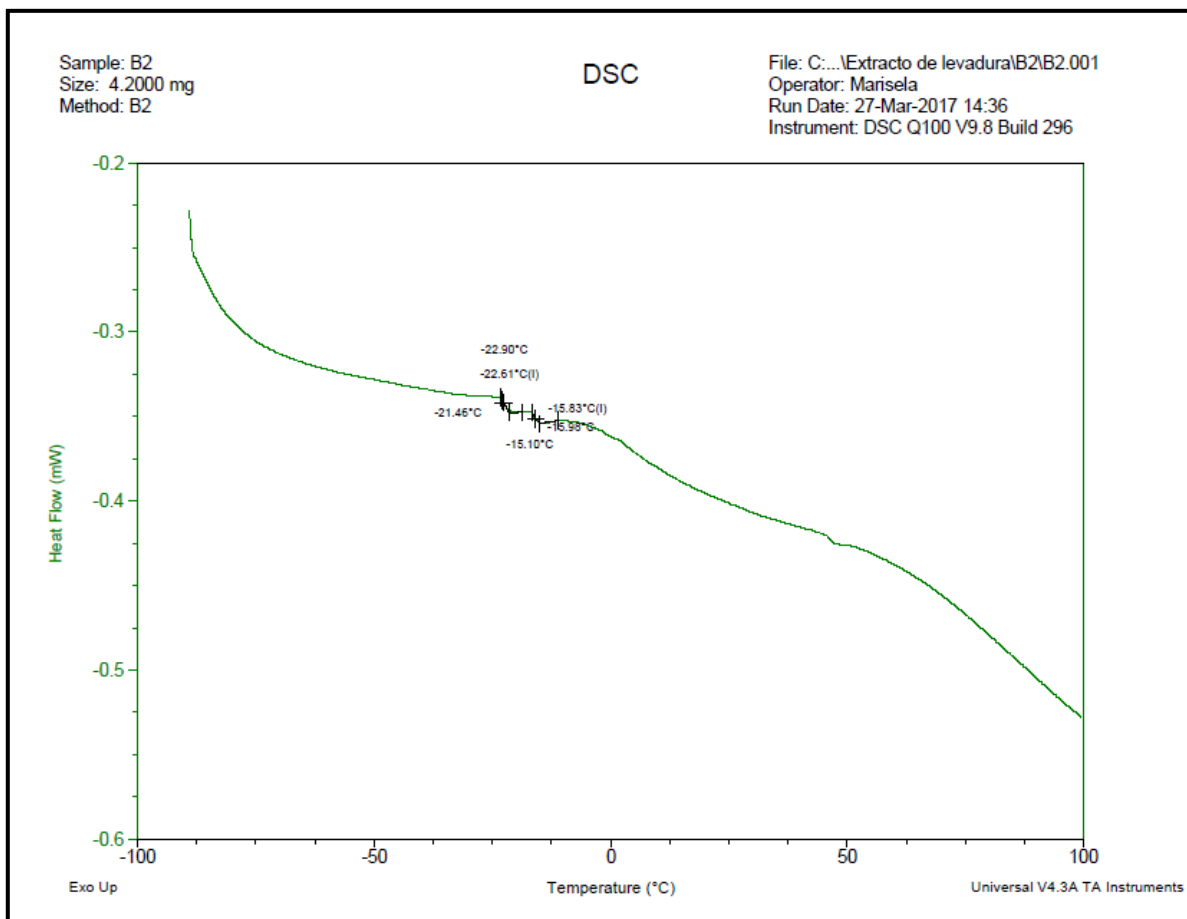
Anexo 9. Análisis de varianza de higroscopicidad

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
A:Temperatura de entrada (°C)	7.49907E-7	1	7.49907E-7	0.00	0.9866
B:Flujo de alimentación (ml/min)	0.0000592774	1	0.0000592774	0.03	0.8820
C:Velocidad de atomización (rpm)	0.00342463	1	0.00342463	1.63	0.3298
AA	0.00123543	1	0.00123543	0.59	0.5232
AB	0.0190366	1	0.0190366	9.07	0.0949
AC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BB	0.00521408	1	0.00521408	2.48	0.2558
BC	0.000586029	1	0.000586029	0.28	0.6501
CC	0.00334321	1	0.00334321	1.59	0.3343
Lack-of-fit	0.0372917	5	0.00745835	3.55	0.2342
Pure error	0.0042	2	0.0021		
Total (corr.)	0.0716941	16			

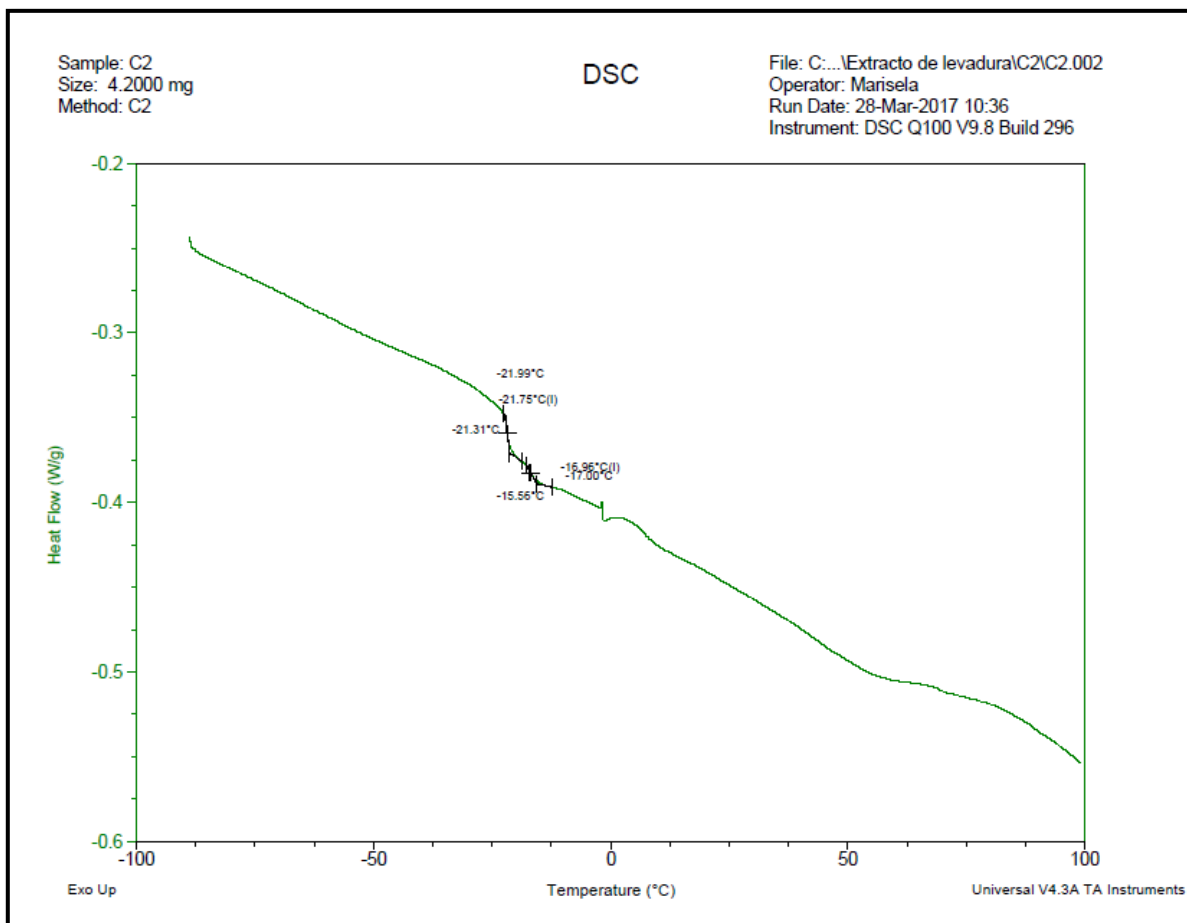
Anexo 10. Termograma extracto de levadura con 1.92% de humedad



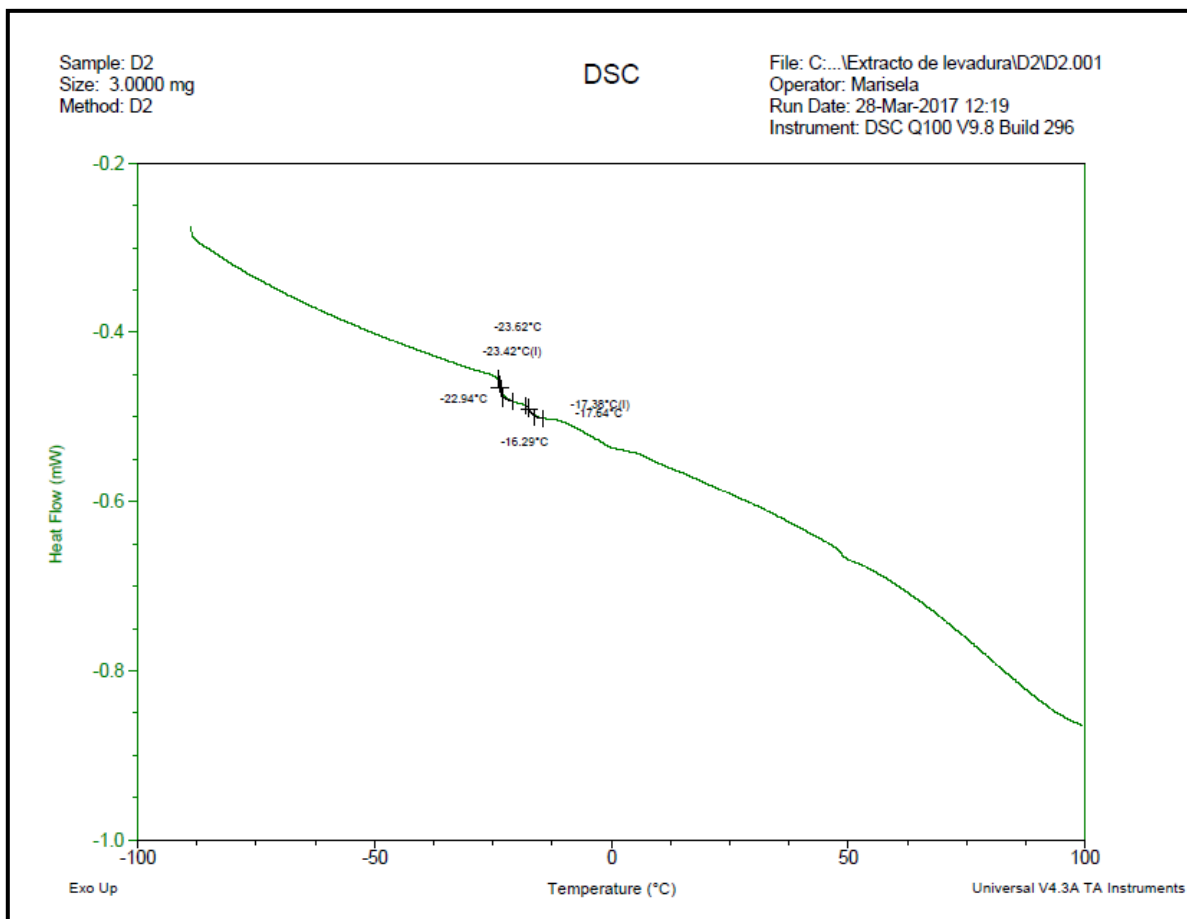
Anexo 11. Termograma extracto de levadura con 2.77% de humedad



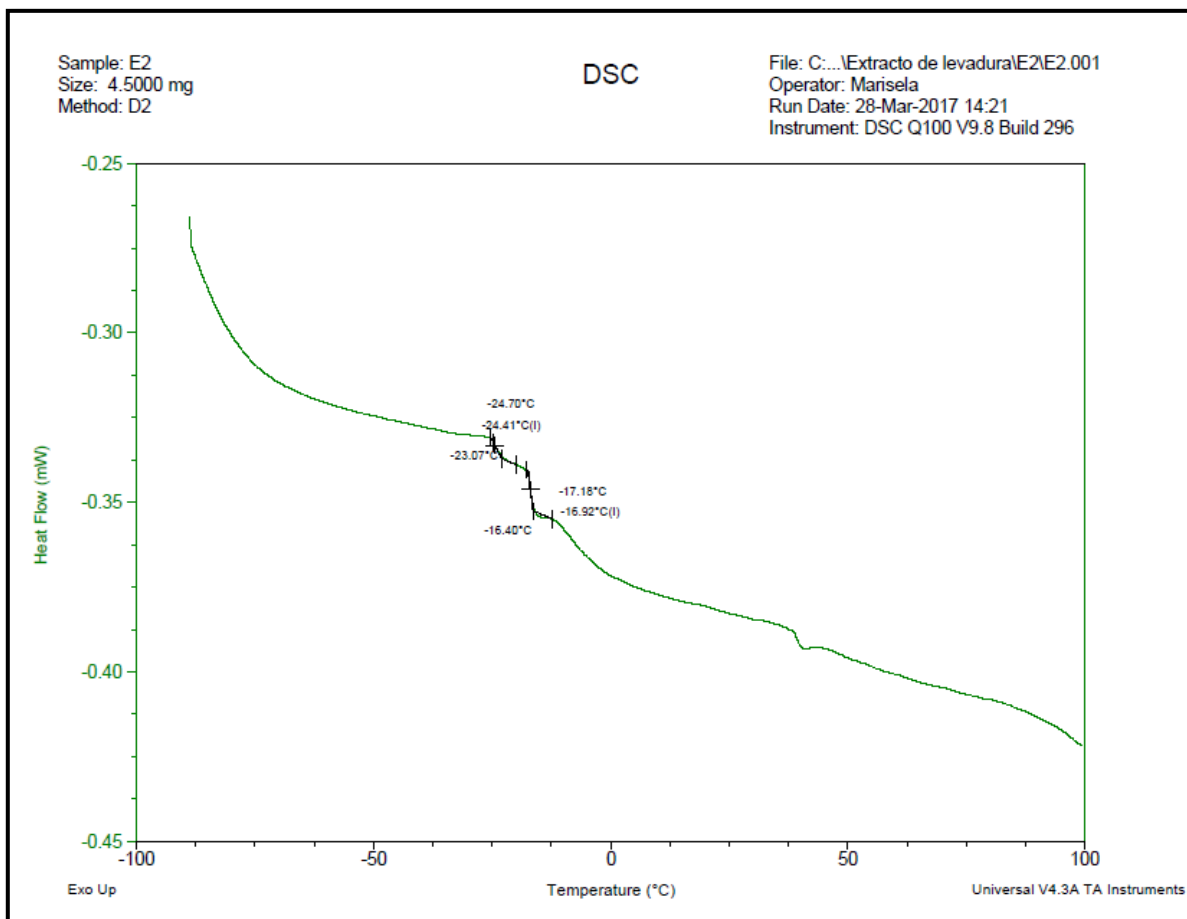
Anexo 12. Termograma extracto de levadura con 3.26% de humedad



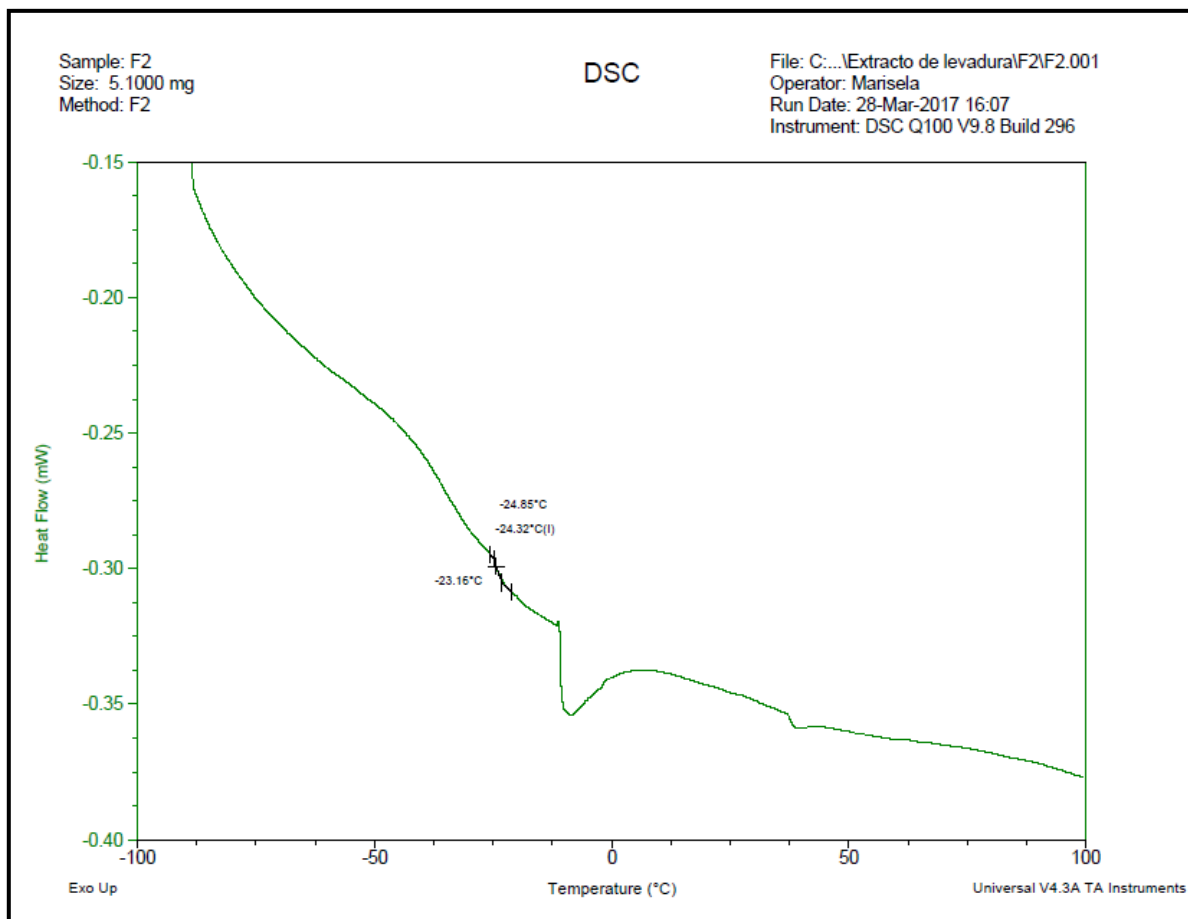
Anexo 13. Termograma extracto de levadura con 4.07% de humedad



Anexo 14. Termograma extracto de levadura con 4.86% de humedad



Anexo 15. Termograma Extracto de Levadura con 7.54% de humedad



Anexo 16. Operación de la bomba peristáltica en ml/min

Operación de la bomba peristáltica (%)	% Operación de la bomba peristáltica (ml/min)
8	37
10	39.6
12	48.3
14	53.3
16	55.5