

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



**OPTIMIZACIÓN DEL SECADO POR ASPERSIÓN DEL  
MUCILAGO DE LINAZA (*Linum usitatissimum L.*) Y  
EVALUACIÓN DE SUS PROPIEDADES REOLÓGICAS**

**TESIS**

Para optar el título de:

**INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Presentado por:

**BECERRA RAMIREZ, EDIL**

Tingo María – Perú

2017

## DEDICATORIA

De manera especial; A mi madre **Narcisa Ramírez Campos** y mi padre **Nacianseno Becerra Cubas**. Por su apoyo incondicional y haberme inculcado a través de sus ejemplos a ser una persona de bien.

A mis hermanos **Deysi Lucy y Deymer Haly**. A mis cuñados Manuel Rojas y Luz Noemí por su apoyo moral en cada momento que lo necesité.

A mis sobrinos queridos Hugo Junior; Lis Yudelki; Karol Lisbeth y Karen Lesli por poner la alegría en nuestra familia.

A mis tíos **Leoniza; Natividad y José Ludeña** por su confianza y estar siempre pendientes de mi formación personal y profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

- A mi familia: Becerra y Ramírez por el apoyo moral y el aliento a mejorar cada día.
- A mis amigos: Joselo Pisco; Joel Villafuerte; Paola; Marianita; Ángel Saldaña; Adbel; Mario; Dianira; Daniel; Priscila; Martin; Wilner; Pablo; por su amistad y haber compartido buenos momentos, académicos y extras propios de la vida universitaria.
- Al Ing. Jaime Basilio Atencio, asesor del presente trabajo de investigación, por su invaluable apoyo.
- Al Ing. Hans Tafur Pereda, co-asesor del presente trabajo de investigación, por su gran apoyo.
- Al Ing. Humberto Rivera Rojas por el apoyo y orientación en este trabajo de investigación y motivarme a continuar con el trabajo.
- A la Universidad Nacional Agraria De La Selva, por darme la oportunidad de realizar mis estudios en esta prestigiosa Institución.
- A la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias por brindarme las herramientas y conocimientos necesarios para lograr culminar mis estudios y defenderme en el campo profesional.
- A todos mis amigos que compartieron su amistad y compañerismo dentro de la vida universitaria

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Antecedentes.....	3
2.2 Generalidades de la Linaza.....	5
2.2.1 Origen.....	5
2.2.2 Clasificación taxonómica.....	6
2.2.3 Descripción de la semilla.....	6
2.2.4 Beneficios de la linaza.....	7
2.3 Secado por aspersion.....	8
2.4 Reología.....	13
2.4.1 Viscosidad.....	14
2.4.2 Clasificación reológica de los fluidos.....	17
2.4.3 Caracterización reológica de geles alimenticios.....	20
2.4.4 Modelos de ajuste para comportamientos reológicos de alimentos.....	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 Lugar de ejecución.....	24
3.2 Materia prima.....	24
3.3 Equipos, materiales y reactivos.....	24
3.3.1 Materiales.....	24
3.3.2 Equipos de laboratorio.....	25

3.4	Métodos de análisis.....	25
3.5	Metodología experimental.....	25
3.5.1	Pruebas de extracción y secado del mucílago.....	25
3.5.2	Secado por aspersion.....	26
3.3.4	Evaluación reológica.....	27
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1	Pruebas de extracción y secado de mucílago.....	28
4.2	Caracterización reológica del mucílago extraído.....	29
4.3	Caracterización reológica del mucílago reconstituido.....	31
4.4	Efecto de la temperatura y la concentración en las propiedades reológicas del mucilago reconstituido.....	37
4.5	Secado por aspersion de la solución del mucilago.....	41
4.6	Modelo de regresión y el análisis estadístico.....	43
4.6.1	Influencia de la temperatura del aire de entrada.....	44
4.6.2	Influencia de la dilución.....	45
4.6.3	Influencia de la velocidad de la bomba.....	45
4.7	Parámetros óptimos.....	46
V.	CONCLUSIONES.....	48
VI.	RECOMENDACIONES.....	49
VII.	RESUMEN.....	50
VIII.	ABSTRACT.....	51
IX.	REFERENCIASBIBLIOGRÁFICAS.....	52
X.	ANEXOS.....	64

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadros</b>	<b>Página</b>
1: Modelos reológicos para caracterizar fluidos.....	23
2: Rendimiento de extracción de mucilago de linaza.....	29
3: Parámetros reológicas del mucilago fresco de linaza, índice de consistencia (k) y el índice de flujo (n).....	31
4: Índice de consistencia, a diferentes concentraciones y temperaturas.....	38
5: Índice de flujo, a diferentes concentraciones y temperaturas.....	40
6: Las variables y los niveles en el diseño experimental de Box Behnken.....	41
7: El diseño experimental de Box Behnken y respuestas.....	42
8: Coeficientes de regresión para el peso.....	43
9: Parámetros óptimos.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figuras</b>	<b>Página</b>
1: Ilustración esquemática de un sistema de secado por pulverización.....	9
2: Ilustración del proceso de formación de partículas.....	9
3: Determinación de la viscosidad aparente graficando el esfuerzo de corte vs velocidad de cizalla.....	16
4: Clasificación simple del comportamiento reológico.....	18
5: Relación entre la tensión de corte y velocidad de cizallamiento para líquidos newtonianos y no newtonianos.....	19
6: Viscosidad aparente en función a la velocidad de cizalla para los tratamientos en estudio.....	30
7: Reogramas del comportamiento reológico a diferentes temperaturas 10, 30 y 60°C: (a) concentración 1% (b) concentración 3% y (c) concentración 6%.....	33
8: Reogramas del comportamiento reológico a 1, 3 y 6% de concentración: (a) temperatura de 10°C (b) temperatura de 30°C (c) temperatura de 60°C.....	34
9: Viscosidad aparente Vs velocidad de deformación del mucílago reconstituido a diferente temperatura y concentración .....	35
10: Índice de consistencia (k) en función a la concentración de mucílago reconstituido a diferente temperatura .....	39

11	Índice de flujo de mucílago reconstituido a diferentes concentraciones (1, 3 y 6%) y temperaturas (10, 30 y 60°C).....	40
12	Contorno de superficie respuesta estimada: a) dilución vs temperatura b) velocidad de bomba vs temperatura c) velocidad de bomba vs dilución.....	47



## I. INTRODUCCIÓN

La linaza (*Linum usitatissimum* L.), también conocido como lino, es una planta cultivada en el mundo entero, principalmente por sus semillas y fibra (CALDERELLI *et al.*, 2010). La linaza se ha utilizado durante siglos para la fabricación de aceite (HERCHI *et al.*, 2014). Sin embargo, un progresivo interés se observa en los últimos años en el uso de linaza y sus subproductos en la alimentación humana, debido a sus características nutritivas y nutracéuticas prometedoras (HERCHI *et al.*, 2014; KOCA y ANIL, 2007; MARPALLE *et al.*, 2014; OOMAH, 2001; STRUIJS *et al.*, 2007).

La linaza es una fuente valiosa de compuestos bioactivos tales como los ácidos grasos insaturados, fibra dietética y compuestos fenólicos (HERCHI *et al.*, 2014; KAJLA *et al.*, 2015; KOCA y ANIL, 2007; OOMAH, 2001; STRUIJS *et al.*, 2007). Los ácidos grasos insaturados constituyen aproximadamente el 91% de los ácidos grasos totales - con ácido  $\alpha$ -linoleico (57% de ácidos grasos totales) y ácido linoleico (16% de ácidos grasos totales) predominante (MARPALLE *et al.*, 2014). Las semillas de lino (principalmente cascarilla) contienen aproximadamente un 30% de fibra dietética, incluyendo extraíbles en agua fibra dietética (mucílago) por ejemplo, arabinoxilanos y polisacáridos que

contienen ramnosa (WU *et al.*, 2010). La fibra dietética suprime el apetito postprandial, la ingesta de alimentos y lipemia, con lo que contribuye a reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, causa una reducción en el peso corporal y la acumulación de grasa (WU *et al.*, 2010).

Industrialmente el mucílago de linaza ha demostrado un buen rendimiento de la viscosidad, propiedad emulsión y propiedades gelificantes, por lo tanto tiene el potencial de ser utilizado en la industria de alimentos como espesante, emulsionante, estabilizante, etc. (WANG *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2009; WU *et al.*, 2010).

La presente investigación tiene los siguientes objetivos:

- Optimizar las condiciones de secado por aspersion de mucílago de linaza usando el método de superficie respuesta y evaluar sus propiedades reológicas del producto reconstituido.
- Determinar las condiciones de extracción del mucílago fresco de linaza.
- Estudiar el secado por aspersion de la solución del mucilago de linaza
- Estudiar la respuesta reológica del material en condiciones de flujo de cizalla simple en función de la temperatura.
- Estudiar la respuesta reológica del material en condiciones de flujo de cizalla en función de la concentración.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

OOMAH y MAZZA (2001), Estudiaron el secado por pulverización de la linaza; optimizando el secado mediante metodología de superficie respuesta (RSM). Relación de semilla agua (7:20), temperatura de alimentación (25 a 100°C) y la temperatura de salida (60 a 110°C) fueron los factores investigados con respecto al rendimiento, parámetros reológicos, color y contenido de glucósidos cianogénicos de la linaza, secado por pulverización. La optimización del proceso de secado por pulverización se llevó a cabo para conseguir el máximo rendimiento y funcionalidad (propiedades reológicas).

WU *et al.* (2010), Estudiaron las propiedades reológicas de mucílago de linaza bajo diferentes condiciones de extrusión, con o sin tratamiento enzimático. Las pruebas de esfuerzo de corte indicaron que la viscosidad aparente de mucílago de linaza se adaptó bien al modelo de ley de potencia. Todas las muestras mostraron un comportamiento reductor de la cizalla. El índice de consistencia disminuye y el índice flujo aumenta al incrementarse la temperatura. La adición de contenido de humedad inicial mejoró la degradación de mucílago de linaza.

WANG *et al.* (2011), Estudiaron las propiedades reológicas y dimensiones fractales de geles de linaza y se analizaron en diversos valores de fuerza iónica entre 0 y 1000 mM. Sus resultados ayudaron a comprender la microestructura de los geles de linaza y la influencia de la fuerza iónica. Sin embargo, la diferencia en sus resultados de los modelos estudiados da entender que se necesitan más estudios para encontrar el modelo adecuado para geles de linaza.

TONON *et al.* (2011), Estudiaron la influencia de algunas condiciones en el proceso de micro encapsulación de aceite de linaza mediante secado por aspersión. Las variables independientes fueron: temperatura de entrada de aire (138 a 202°C), el contenido total de sólidos (10-30% p/p) y la concentración de aceite respecto a los sólidos totales (10-30% p/p). Un mayor contenido de sólidos y menor concentración de aceite condujeron a una mayor eficiencia de encapsulación y oxidación lipídica.

CHEN *et al.* (2016), Estudiaron el efecto de la adición de goma de linaza en las propiedades de gelificación, reológicas y térmicas de aislado de proteína de maní. Las propiedades reológicas resultantes se estudiaron usando mediciones de cizalla oscilatoria de amplitud constante y pequeñas.

MARPALLE *et al.* (2014), desarrollaron pan funcional enriquecido con omega-3, utilizando harina de linaza tostada y molida. Se estudió pegajosidad de la masa y la absorción de agua como medición del efecto de la

incorporación de linaza sobre los parámetros reológicos de la masa de pan, los resultados demostraron un aumento de la absorción de agua y se observó mayor pegajosidad de la masa con mayor nivel de linaza.

KORUS *et al.* (2015), realizaron un trabajo de investigación donde aplicaron el extracto acuoso de linaza como agente formador de estructuras en la cocción sin gluten y evaluar su influencia en las propiedades reológicas de la masa y calidad del pan, especialmente en su tasa de endurecimiento. El reemplazo de la goma de linaza y la pectina con el mucílago de linaza mejoraron la aceptación sensorial del pan y tuvo una influencia limitada sobre la textura y el endurecimiento del pan.

## **2.2. Generalidades de la Linaza**

### **2.2.1 Origen**

Se cultivó por primera vez en Mesopotamia y, posiblemente, su uso es anterior a la agricultura (DEVINE, 2016). El género *Linum* (Lináceas) consta de aproximadamente 200 especies en todo el mundo. Se divide por razón de la identificación taxonómica de cada cinco (ROGERS, 1982) o seis secciones (DIEDERICHSEN y RICHARDS, 2003). La filogenia molecular de *Linum* se ha estudiado ampliamente (MCDILL *et al.*, 2009).

### 2.2.2 Clasificación taxonómica

Según (ITIS, 2016), la taxonomía de la linaza es la siguiente:

Reino	: Plantae
Sub	: Reyno Viridiplantae
Infra Reyno	: Streptophyta
Super division	: Embryophyta
Division	: Tracheophyta
Subdivisión	: Spermatophytina
Clase	: Magnoliopsida
Superorden	: Rosanae
Orden	: Malpighiales
Familia	: Lináceas
Género	: <i>Linum</i> L.
Especie	: <i>usitatissimum</i> L.

### 2.2.3 Descripción de la semilla

La semilla de linaza es de 4 a 6 mm de longitud, aplanada, de forma oval y con un extremo aguzado. La cubierta de la semilla es de apariencia suave y brillante, y su color puede variar entre marrón oscuro y amarillo claro. El peso de 1000 semillas es de  $5 \pm 1$  g y su peso del hectolitro fluctúa entre 55 y 70 kg (DAUN *et al.*, 2003; OOMAH *et al.*, 2003).

La semilla tiene dos cotiledones aplanados, que constituyen la mayor proporción del embrión; este último está rodeado por las cubiertas de la

semilla y por una delgada capa de endosperma. La testa tiene una capa exterior que contiene la mayoría de la fibra soluble y dos interiores ricas en fibra y lignanos. Desde un punto de vista estructural, la testa, endosperma y cotiledones representan el 22, 21 y 57 %, respectivamente (DAUN *et al.*, 2003; OOMAH *et al.*, 2003; WIESENBORN *et al.*, 2003)

#### **2.2.4 Beneficios de la linaza**

Los beneficios de los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) para la salud humana se han demostrado en la prevención de enfermedades cardiovasculares, la hipertensión y la inflamación, entre otros. Entre los PUFA, las familias más importantes son el n-3 y ácidos grasos n-6. PUFAs son precursores de compuestos biológicamente activos conocidos como eicosanoides que participan en varios procesos fisiológicos. Ácido alfa-linolénico (C18: 3 n-3) y linoleico (C18: 2 n-6) se consideran esenciales porque el cuerpo humano es incapaz de sintetizar ellos, aunque se puede metabolizar a derivados de cadena más larga. Además, la dieta debe cubrir el organismo necesita para estos ácidos grasos. Una de la fuente vegetal más importante de PUFA es de linaza, también conocido como semilla de lino, que se destaca debido a su alto contenido en aceite (40% en peso., Aproximadamente), dentro de más de 50% de los ácidos grasos totales está representado por  $\alpha$  ácido linolénico. Gracias a su composición, el aceite de linaza se está convirtiendo en un importante ingrediente alimentario funcional ya que proporciona aceite rico en ácidos grasos  $\omega$ -3. De hecho, el consumo de linaza está vinculada a varios beneficios potenciales para la salud. Las evidencias mostraron que la

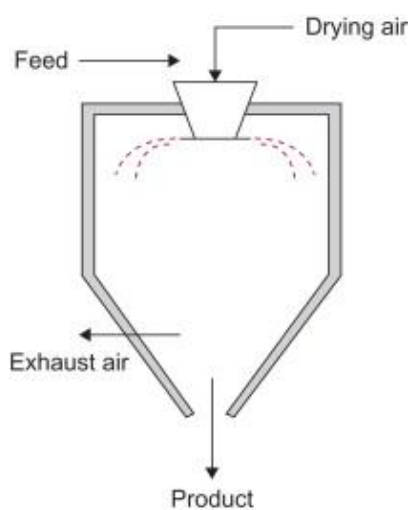
alimentación con semillas de lino (aceite o producto enriquecido) podría ayudar a prevenir muchas enfermedades como la crónica, trastornos cardiovasculares, la obesidad y el cáncer (PIORNOS *et al.*, 2017).

### **2.3. Secado por aspersion**

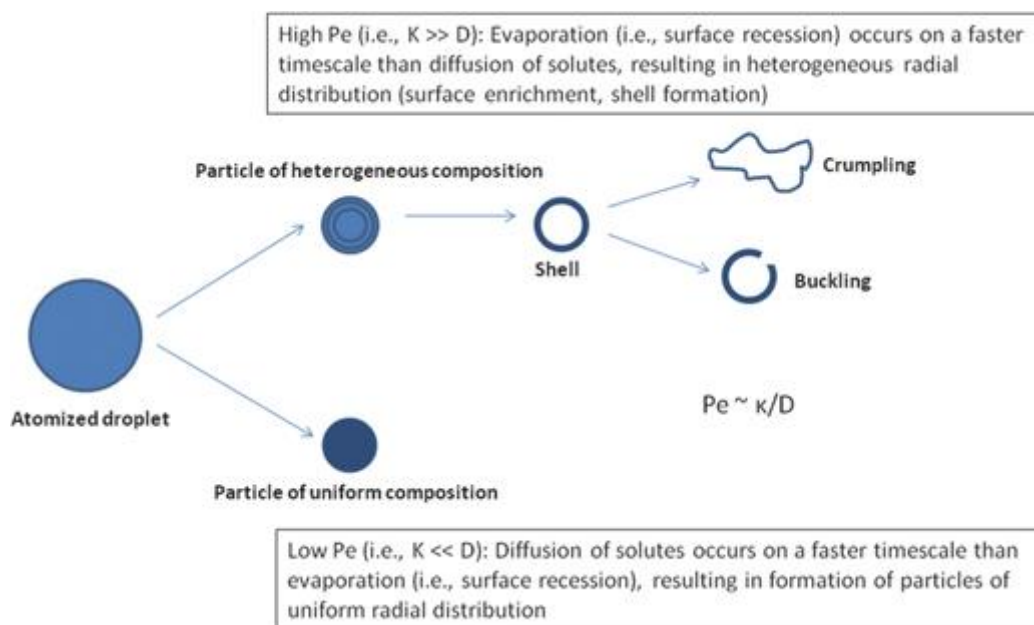
La técnica de secado por atomización es la más utilizada para obtener productos en polvo y micro partículas (BARBOSA *et al.*, 2005). Consiste en agregar el compuesto que se requiere recuperar en una solución de un polímero que lo vehiculice y forme una cavidad protectora. Para el secado de pulpas de frutas, el polímero se mezcla con la pulpa, formando una suspensión, que luego es bombeada a una cámara de atomización. El fluido es atomizado por un disco rotatorio o boquilla de presión y mediante la circulación del aire a temperaturas de entrada superiores a 100 °C e inferiores a 250 °C, se produce la eliminación del agua y la formación de micro partículas (BARBOSA *et al.*, 2005; JATO, 1997).

El secado de productos alimenticios líquidos a menudo se logra en un secador por pulverización. Eliminación de la humedad de un alimento líquido se produce después de que el líquido se atomiza o se pulveriza en el aire calentado dentro de una cámara de secado. Aunque se utilizan diferentes configuraciones de la cámara, la disposición mostrada en la figura 1 ilustra la introducción de gotas de líquido en una corriente de aire caliente (SINGH y HELDMAN, 2014b).





**Figura 1.** Ilustración esquemática de un sistema de secado por pulverización (SINGH y HELDMAN, 2014b)



**Figura 2.** Ilustración del proceso de formación de partículas (WALTERS *et al.*, 2014)

El método se basa en atomizar la solución que va a ser secada en forma de gotas muy finas, en el seno de una corriente de gas caliente que generalmente es aire. Se forman partículas de geometría esférica, con aspecto de esferillas huecas con un diámetro que puede estar entre los 20  $\mu\text{m}$  y hasta los 200  $\mu\text{m}$ . Tienen aspecto de espuma desecada y presentan gran solubilidad (LÓPEZ, 2010).

El aire caliente introducido alcanza una temperatura que oscila entre 100 y 200°C. A pesar de la temperatura relativamente alta del aire, las gotas del líquido atomizado se calientan solo hasta 40°C debido a la corta duración del secado (fracciones de segundo), lo que evita la degradación del producto, ya que a pesar del aporte de aire caliente, este sustrae calor por la vaporización del disolvente. Este método se puede utilizar en operaciones de recubrimiento de sólidos y líquidos porque a medida que se evapora el disolvente, el material de recubrimiento envuelve las partículas, lo que puede ser útil para enmascarar olores y sabores, mejorar la estabilidad y modificar la entrega del fármaco como por ejemplo, los que requieren ser liberados en el colon y necesitan un recubrimiento entérico. Otra utilidad del secado por aspersion es la micro encapsulación de gotas de líquidos oleosos, la que se logra emulsificándolas en agua con ayuda de goma arábica o almidón y luego sometiéndolas al proceso de secado por aspersion (LÓPEZ, 2010).

Actualmente el secado por aspersion es uno de los métodos más utilizados en la industria alimenticia (AUGUSTIN y HEMAR, 2009; DESAI y JIN

PARK, 2005; F. GIBBS, 1999). Dentro de los parámetros más importantes a controlar durante el secado por aspersion se encuentran: las temperaturas de entrada y salida del aire de secado, el flujo de alimentación del producto a secar, el tiempo de residencia y el acondicionamiento de la materia prima (PARRA, 2010).

Entre los materiales auxiliares de secado más frecuentemente usados para el secado por atomización se encuentran las gomas (arábica, carragenina); proteínas (gelatina, caseinato); almidones modificados y maltodextrinas (ASSAF *et al.*, 2005; KANAKDANDE *et al.*, 2007; PEDROZA-ISLAS *et al.*, 1999; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2007; YADAV *et al.*, 2007). La goma arábica (GA) es un biopolímero obtenido del exudado del árbol acacia, de la familia *Leguminosae*, originaria de Egipto de las especies senegal y seyal, es uno de los materiales formadores de película más efectivo para microencapsular; sin embargo, el costo y su limitada disponibilidad comercial, han restringido su uso a nivel industrial (ASSAF *et al.*, 2005; PEDROZA-ISLAS *et al.*, 1999; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2007; YADAV *et al.*, 2007).

Por su parte, la maltodextrina (MD) es un polisacárido no edulcorante, con un aporte nutricional de 4 calorías por gramo, obtenido de la hidrólisis parcial, ácida y/o enzimática del almidón de papa, arroz o maíz obteniendo entre 2 y 20 equivalentes de dextrosa (DE). La aplicación de la MD en el proceso de encapsulación está asociada a la baja viscosidad, a altos contenidos de sólidos, a la buena solubilidad, a la capacidad de formar

películas y a su bajo costo (AVALTRONI *et al.*, 2004; CORTÉS *et al.*, 2015; MADENE *et al.*, 2006; PEDROZA-ISLAS *et al.*, 2000).

La microencapsulación ha permitido solucionar algunos problemas como son minimizar la pérdida de saborizantes y sus posibles cambios químicos, por reducción de la volatilidad y reactividad, con el consiguiente incremento de la estabilidad de los productos alimenticios bajo condiciones ambientales adversas (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2010).

El secado por atomización es el método más común de microencapsulación de ingredientes alimenticios. Entre los parámetros más importantes de esta tecnología están las temperaturas de entrada y salida del aire en el secador, las cuales tienen gran influencia en la calidad del producto microencapsulado (ARAGUEZ *et al.*, 2013). Es recomendable que la temperatura del aire de entrada sea alta para permitir una rápida formación de una membrana semipermeable alrededor de la gota al secarse, pero no puede ser tan alta que cause daño térmico al producto seco (SHIGA *et al.*, 2004). Se han informado temperaturas del aire de entrada entre 160 y 210 °C con altas retenciones de volátiles durante el secado por atomización (ARAGUEZ *et al.*, 2013).

La mayoría de los estudios reportados sobre el efecto de las temperaturas de entrada y salida del aire se han basado en combinaciones puntuales de estas sin considerar su interacción (ARAGUEZ *et al.*, 2013). Las

técnicas de superficie de respuesta son una metodología estadística que permiten determinar, experimentalmente, aquellos niveles de los factores en investigación que producen una respuesta óptima bajo la consideración de los factores principales (temperaturas del aire) y sus interacciones. Solo algunos autores han utilizado esta metodología para evaluar el efecto de las temperaturas del proceso en la microencapsulación del aceite esencial de mandarina y en otros saborizantes de limón y fresa (ARAGUEZ *et al.*, 2013).

#### **2.4. Reología**

La reología es la ciencia que estudia el flujo y las deformaciones de sólidos y fluidos bajo la influencia de la tensión mecánica. La descripción y la modelización de las propiedades reológicas del fluido de la alimentación juegan un papel importante en la ingeniería de procesos. En la etapa de fabricación de alimentos, las medidas reológicas de un producto pueden ser útiles tanto en el control de calidad y optimización de procesos (BARBOZA-CÁNOVAS y IBARZ 2002). Muchos métodos e instrumentos se han utilizado para medir las propiedades reológicas. Las diversas técnicas descritas en la literatura pueden ser clasificados sobre la base de los principios utilizados: empíricos / imitativas o fundamentales. Los resultados de las pruebas empíricas e imitativas no se relacionan directamente con las propiedades físicas del material, sino, por lo general al comportamiento tecnológico. Estas determinaciones son simples, rápidos y adecuados para las pruebas estandarizadas en línea (DOBRASZCZYK y SALMANOWICZ, 2008; EL-BAKRY *et al.*, 2010)

El conocimiento de las propiedades reológicas de los alimentos es muy importante en el diseño de procesos y equipos de ingeniería tales como cintas transportadoras, tuberías, tanques de almacenamiento, pulverizadores o bombas para el manejo de alimentos, además la viscosidad se utiliza para la estimación y cálculo de fenómenos de transporte de cantidad de movimiento, calor y energía. Al obtener información sobre la estructura de un alimento, la reología facilita la comprensión de la distribución de los componentes macromoleculares y sus cambios durante su procesamiento. En el control de la calidad las medidas de la viscosidad en continuo son cada vez más importantes con el objeto de controlar el proceso productivo, la calidad de las materias primas, productos intermedios y acabados (QUINTÁNS, 2009; RAMÍREZ-NAVAS, 2006).

#### **2.4.1 Viscosidad**

Es la oposición que manifiesta un fluido a deformaciones graduales producidas por un esfuerzo de corte (CIFUENTES y NICOLÁS, 2016), En la actualidad, la viscosidad efectiva resulta un parámetro de gran importancia en los cálculos tecnológicos relacionados con el transporte de fluidos no-Newtonianos (BUSTABAD y GONZÁLEZ, 2016).

Existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente (RAMÍREZ-NAVAS, 2006).

### Viscosidad absoluta o dinámica

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a la deformación. La fuerza tangencial por unidad de área se llama esfuerzo cortante y se expresa para el flujo tangencial simple entre placas (flujo unidimensional) como:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica (o absoluta) del fluido,  $u$  es la componente de la velocidad en la dirección del flujo y  $y$  es la dirección normal a la dirección de ese flujo (ÇENGEL *et al.*, 2006).

### Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática se puede obtener dividiendo la viscosidad absoluta de un fluido con la densidad de masa del fluido, En general, la viscosidad dinámica no depende de la presión, pero la viscosidad cinemática sí depende de ésta (ÇENGEL *et al.*, 2006).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

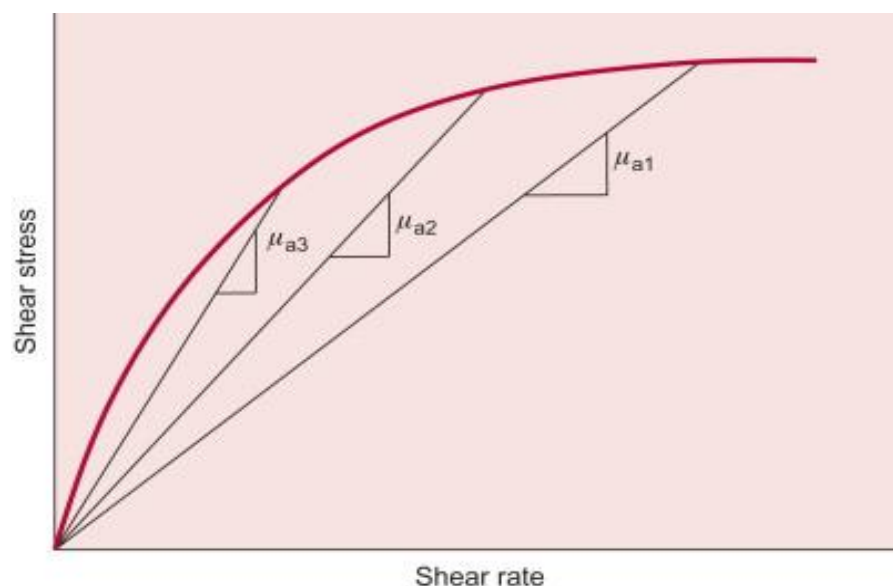
Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\rho$  es la densidad del fluido, dos unidades comunes de la viscosidad cinemática son m<sup>2</sup>/s y el stoke (1 stoke = 1 cm<sup>2</sup>/s = 0.0001 m<sup>2</sup>/s).

### Viscosidad aparente

La viscosidad aparente se calcula mediante el uso de un supuesto de que el líquido no newtoniano obedece la ley de la viscosidad de Newton. La

pendiente de esta recta da un valor para la viscosidad aparente. Usando este método, debe ser evidente que el valor obtenido para la viscosidad aparente es dependiente de la velocidad de cizallamiento seleccionado. Por lo tanto la viscosidad aparente siempre debe expresarse junto con el valor de velocidad de cizallamiento se usa para calcularlo; de lo contrario, no tiene sentido (SINGH y HELDMAN, 2014a)

Los fluidos cuya viscosidad aparente se incrementan con la razón de deformación (como las soluciones con almidón o arena suspendidos) se conocen como fluidos dilatantes o espesantes al corte, y los que exhiben el comportamiento opuesto (el fluido que se vuelve menos viscoso a medida que se le sujeta a un corte más intenso, como algunas pinturas, las soluciones de polímero y los fluidos con partículas suspendidas) se conocen como fluidos pseudoplásticos o adelgazantes al corte (ÇENGEL *et al.*, 2006).



**Figura 3.** Determinación de la viscosidad aparente graficando el esfuerzo de corte vs velocidad de cizalla. (SINGH y HELDMAN, 2014a)



### 2.4.2 Clasificación reológica de los fluidos

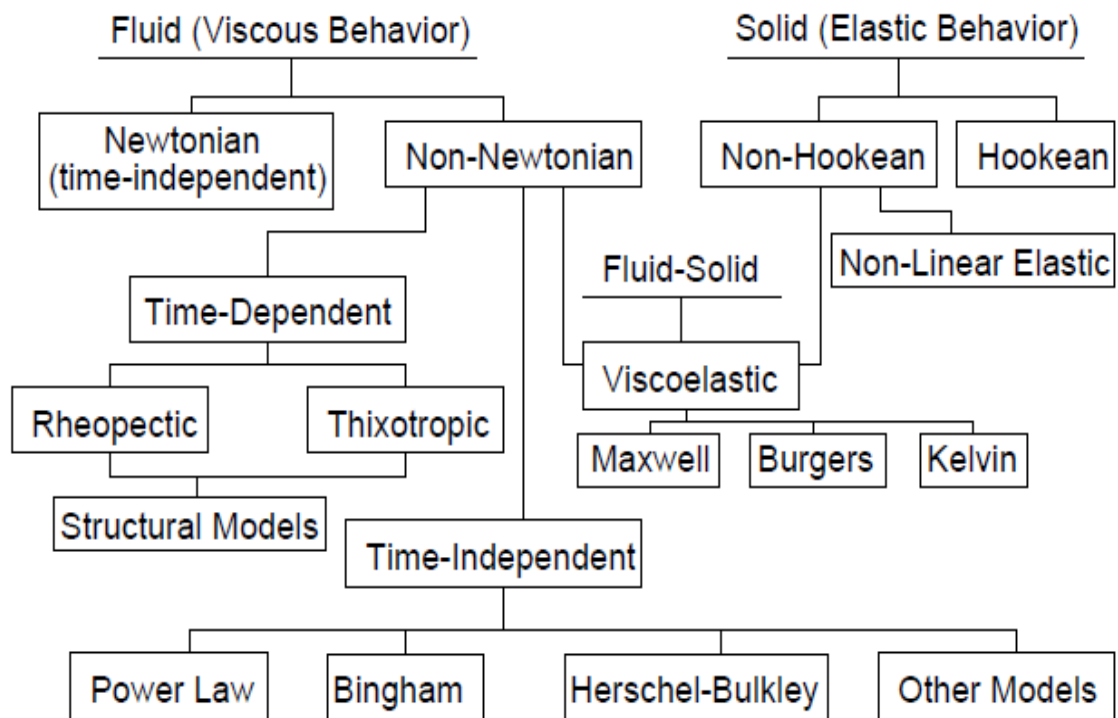
Teniendo en cuenta las características reológicas de los fluidos debido al comportamiento de la viscosidad ( $\mu$ ), estos se pueden clasificar en newtonianos y no newtonianos (BIRD *et al.*, 2008).

En la práctica industrial existen muchas sustancias que no se comportan según la ley de Newton de la viscosidad, son los denominados no-newtonianos, en estos, la viscosidad es función de la temperatura, la presión y del gradiente de velocidad (BENÍTEZ *et al.*, 2016).

Las características reológicas de un fluido son uno de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en el ámbito industrial. Frecuentemente, éstas determinan las propiedades funcionales de algunas sustancias e intervienen durante el control de calidad, los tratamientos (comportamiento mecánico), el diseño de operaciones básicas como bombeo, mezclado y envasado, almacenamiento y estabilidad física, e incluso en el momento del consumo (textura) (RAMÍREZ-NAVAS, 2006)

La clasificación de los fluidos es una forma valiosa para conceptualizar comportamiento de los fluidos; sin embargo, no se pretende dar a entender que los tipos de comportamiento observados en la figura 2 son mutuamente excluyentes. Por ejemplo la salsa de tomate, se puede describir correctamente como, pseudoplástico independiente del tiempo, pero, después de la fabricación el envejecimiento a menudo da al material un gel débil como

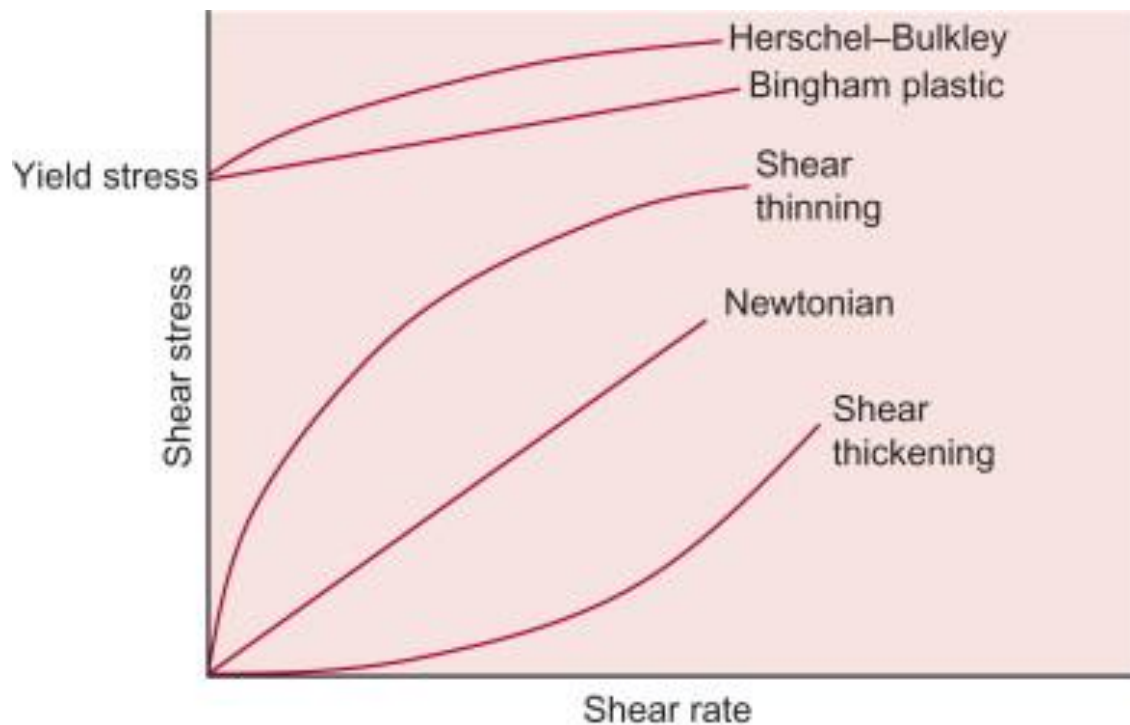
la estructura haciendo que el producto exhiba un comportamiento tixotrópico cuando es utilizado por el consumidor (STEFFE, 1996).



**Figura 4.** Clasificación simple del comportamiento reológico (STEFFE, 1996)

Las propiedades de los líquidos no newtonianos se pueden clasificar como independiente del tiempo y dependiente del tiempo (figura 2). Los líquidos no newtonianos independientes del tiempo responden inmediatamente con un flujo tan pronto como se aplica una pequeña cantidad de esfuerzo de cizallamiento. A diferencia de los líquidos newtonianos, la relación entre la tensión de cizallamiento y velocidad de cizallamiento es no lineal, como se muestra en la Figura 3. Hay dos tipos importantes de líquidos no newtonianos independientes del tiempo, es decir, líquidos de corte adelgazadores y líquidos de estrechamiento por cizalladura. Las diferencias

entre estos dos tipos de líquidos pueden ser fácilmente comprendidos por considerar otro término usado comúnmente, viscosidad aparente (SINGH y HELDMAN, 2014a).



**Figura 5.** Relación entre la tensión de corte y velocidad de cizallamiento para líquidos newtonianos y no newtonianos. (SINGH y HELDMAN, 2014a)

Algunos materiales exhiben características de flujo dependientes del tiempo. Así, al aumentar el tiempo de flujo bajo condiciones constantes, tales fluidos pueden desarrollar un aumento o disminución de la viscosidad. El primero de estos efectos es denominado reopexia, mientras que el último se conoce como tixotropía, y ambos son atribuidos al cambio continuo de la

estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible (TABILO-MUNIZAGA y BARBOSA-CÁNOVAS, 2005).

### **2.4.3 Caracterización reológica de geles alimenticios**

Algunos de los alimentos más populares, tales como postres de gelatina, clara de huevo cocido, salchichas, análogos del mar a base de surimi, y jaleas de frutas, se puede considerar geles. Un gel es un coloide sólido-en-líquido en el que las formas de fase sólida una estructura de red que inmoviliza el líquido y produce propiedades de tipo sólido. Algunos geles alimenticios se forman de manera irreversible por cocción, mientras que otros como forma de gelatina geles reversibles. La gelificación surge ya sea de reticulación química por medio de reacciones covalentes o de reticulación física a través de interacciones polímero-polímero. Las sustancias macromoleculares responsables de la formación de la red en sistemas alimentarios son principalmente polisacáridos y proteínas. La propiedad unificadora entre estos alimentos es que en su mayoría son líquidos, sino que respondan en forma de sólidos viscoelásticos con un alto grado de elasticidad (HAMANN y MACDONALD, 1992; HVIDT y HELLER, 1990; NIJENHUIS, 1990).

Geles de biopolímeros se pueden clasificar basándose en el nivel de la orden de la macromolécula, tanto antes como durante la formación de la red: (1) geles formados a partir de biopolímeros desordenados, tales como carragenanos, pectinas, almidón, gelatina, y (2) las redes de gel que implican interacciones específicas entre partículas más densas y menos flexibles, tales

como proteínas globulares térmicamente desnaturalizados y proteínas agregadas desde enzimática o acción química. Además, basándose en el comportamiento macroscópico de sistema gelificado, verdaderos geles son una consecuencia del desarrollo de las redes tridimensionales, y geles débiles se caracterizan por una red de gel débil que se rompe fácilmente cuando se somete a una tensión lo suficientemente alta (LOPES y RAO, 1999).

Pruebas de tensión-deformación son útiles para estudiar el comportamiento de los geles de alimentos y generalmente se pueden clasificar en dos tipos, las pruebas a pequeña tensión y pruebas a gran tensión. Pruebas-deformación pequeña se refiere a la deformación de una muestra cuando se requiere sólo un pequeño porcentaje de la deformación para romper la muestra, que a menudo se lleva a cabo mediante ensayos fundamentales. Pruebas a gran cepa se refiere a la deformación de una muestra hasta el punto de cambio estructural permanente. Por otra parte, las pruebas a gran tensión a menudo produce información que se correlaciona con la evaluación sensorial (HAMANN y MACDONALD, 1992).

#### **2.4.4 Modelos de ajuste para comportamientos reológicos de alimentos.**

Se han propuesto en la bibliografía numerosas ecuaciones empíricas para expresar el comportamiento reológico de fluidos no newtonianos. Sería deseable que tales funciones pudieran ser desarrolladas a partir de modelos matemáticos basados en la estructura molecular, pero en la

actualidad las teorías moleculares no son capaces de describir satisfactoriamente el comportamiento real de materiales complejos, como suele ser habitual. Por ello, las fuentes más útiles de información reológica son habitualmente los modelos empíricos (QUINTÁNS, 2009).

### **Ley de la potencia de Ostwald-de Waele**

En los fluidos sin umbral de fluencia, este modelo es el más simple de todos ellos.

$$\tau = k\gamma^n \quad (3)$$

Donde  $k$  y  $n$  son los parámetros reológicos del modelo.  $k$  recibe el nombre de consistencia, mientras que  $n$  es el índice de la potencia, y ambos son positivos.

Como para  $n=1$  la expresión (3) describe el comportamiento de un fluido newtoniano de viscosidad  $n = k$ , resulta que la diferencia entre  $n$  y la unidad es una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano. Si  $n < 1$ , el material es un fluido pseudoplástico. Por el contrario, si  $n > 1$  el material es un fluido dilatante (FERNÁNDEZ, 2009).

**Cuadro 1.** Modelos reológicos para caracterizar fluidos

Modelos de 1 parámetro	
Ley de Newton	$\sigma = \mu \cdot \gamma$
Modelo de Newton generalizado	$\sigma = \eta \cdot \gamma$
Modelos de 2 parámetros	
Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta_0 \cdot \gamma$
Casson	$\sigma^{0,5} = (\sigma_0)^{0,5} + K_1(\gamma)^{0,5}$
Ostwald de Waele (Ley de potencia)	$\sigma = K \cdot \gamma^n$
Modelos de 3 parámetros	
Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + K(\gamma)^n$
Casson modificado	$\sigma^{0,5} = (\sigma_0)^{0,5} + K_1(\gamma)^{n_1}$
Herschel-Bulkley generalizado	$\sigma^{n_1} = (\sigma_0)^{n_1} + K_1(\gamma)^{n_2}$
Ellis	$\gamma = K_1\sigma + K_2(\sigma)^{n_1}$
Carreau	$\eta = \frac{n_0}{[1 + (t_1\gamma)^2]^{\frac{(1-n)}{2}}}$
Cross-Williamson	$\eta = \frac{n_0}{1 +  t_1\gamma ^{1-n}}$
Modelos de 4 parámetros	
Carreau de cuatro parámetros	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{[1 + (t_1\gamma)^2]^{\frac{(1-n)}{2}}}$

Fuente: (LOZADA CARBAJAL, 2007)

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Lugar de ejecución**

El trabajo de investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Ingeniería de Alimentos y Análisis de Alimentos, en la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria de la Selva, en la ciudad de Tingo María, provincia Leoncio Prado, región Huánuco, temperatura promedio entre 17 y 32 °C, con 82% de humedad relativa. Las pruebas experimentales se realizaron entre los meses de marzo a julio del 2015.

#### **3.2. Materia prima**

La materia prima fue la linaza (*Linum usitatissimum L.*)

#### **3.3 Equipos, materiales y reactivos**

##### **3.3.1 Materiales**

- Tamices (coladores)
- Colador de tela
- Vasos de precipitación 100, 500, 1000 y 2000 mL.
- Bagueta o agitador
- Pinzas
- Pipetas



- Bandejas
- Jarra
- Calculadora científica

### **3.3.2 Equipos de laboratorio**

- Balanza analítica modelo Scout Pro SP2001 (200 g)
- Baño maría modelo YCW – 010E (GEMMYCO)
- Refrigeradora marca Indurama
- Atomizador LabPlant SD-07
- Viscosímetro de Brookfield DVIII Ultra
- Estufa TOMOS ODGH – 9076<sup>a</sup> Heating Drying
- Potenciómetro modelo 3510 (JENWAY)
- Refractómetro modelo HSR – 500 (ATAGO).

### **3.4. Métodos de análisis**

**Extracción del mucílago:** según el método indicado por (OOMAH y MAZZA, 2001)

### **3.5. Metodología experimental**

#### **3.5.1 Pruebas de extracción y secado del mucílago**

El proceso de extracción de mucílago consistió en lavar minuciosamente las semillas con agua clorada, luego se acondicionaron de dos maneras: semillas enteras (A1), semillas molidas (A2)

El material se colocó en un recipiente de acero inoxidable y se agregó agua desionizada a 25 °C, se utilizaron dos relaciones linaza:agua (kg/kg) 1:16 (B1) y 1:20 (B2). La temperatura y tiempo de extracción fue de 95 °C por 20 minutos. Una vez obtenido el mucílago, se separó del material sólido por decantación y filtrado con un filtro de malla N°100, luego se almacenó en recipientes de vidrio en refrigeración a 5 °C para su posterior análisis.

Las muestras de extracto de mucílago, obtenidas se secaron en un rango de temperatura entre 160 a 200 °C. El método y las condiciones de extracción se seleccionaron de acuerdo al rendimiento de mucílago fresco, al rendimiento de los polvos y la viscosidad del mucílago

El rendimiento de extracción se obtuvo al calcular el porcentaje de mucílago extraído con relación al peso de semillas y de agua empleados para llevar a cabo la extracción.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{peso de mucílago extraído}}{\text{peso de linaza} + \text{peso de agua}} \times 100$$

Se determinaron los grados Brix del extracto de mucílago alimentado al secador, el contenido de humedad y el pH del mucílago fresco.

### **3.5.2 Secado por aspersión**

Para obtener polvos a partir del extracto acuoso de mucílago de linaza, se utilizó un secador por aspersión a escala piloto marca LabPlant SD-07. El extracto acuoso de mucílago se alimentó al secador a temperatura de

60°C; para esta investigación, se empleó el diseño de Box Behnken, debido que es más adecuado, pues permite estudiar el efecto de los factores por separado y en conjunto sobre las variables respuesta; se evaluó el efecto de las variables: Temperatura de entrada del aire, 160 a 200 °C, velocidad de la bomba de 5 a 15 rpm y dilución de 1:20 a 1:16 (Kg/kg).

Se determinó el contenido de humedad del mucílago secado por aspersión y los grados Brix y pH del polvo rehidratado.

### **3.5.3 Evaluación reológica**

La evaluación reológica se realizó utilizando el Viscosímetro Brookfield DVIII ultra, determinándose el índice de flujo ( $n$ ) y el índice de consistencia ( $k$ ), para poder caracterizar el fluido, mediante el modelo Ley de potencia según el  $R^2$ .

Para la determinación de los parámetros reológicos del polvo reconstituido se prepararon soluciones acuosas de 500 mL al 1, 3 y 6 p/p; para ello los polvos se dispersaron en agua desionizada con agitación magnética durante 2 horas a temperatura ambiente. Todas las determinaciones se realizaron a temperaturas de 10, 30 y 60 °C y concentraciones 1, 3 y 6%.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1. Pruebas de extracción y secado de mucílago

En los últimos 20 años una serie de estudios se han llevado a cabo en la extracción, la caracterización, la composición química y las propiedades fisicoquímicas de la fracción soluble de la goma de linaza. El mucílago de linaza se produce principalmente en la capa más externa de la cascara. Se han realizado análisis en investigaciones anteriores en mucílago extraído a partir de semilla entera de linaza (CALDERELLI *et al.*, 2010; HERCHI *et al.*, 2014; KOCA y ANIL, 2007; MARPALLE *et al.*, 2014), y a partir de harina (OOMAH, 2001; STRUIJS *et al.*, 2007).

CUI *et al.* (1994), optimizaron el proceso de extracción en términos de temperatura, pH y la proporción semilla: agua, encontrando que los valores óptimos en temperatura está entre 85 y 90°C; pH de 6,5 a 7,0 con una relación semilla: agua de 1:13 Kg/Kg.

Los resultados demuestran que las condiciones de extracción tiene efecto significativo sobre el rendimiento (Cuadro 2), el rendimiento de extracción está estadísticamente influenciado por las proporciones Linaza:agua

y el acondicionamiento de la semilla (Anexo A-I), cuando la extracción se efectúa a una temperatura entre 85 a 90°C y un rango promedio de pH entre 6,5 a 6,9; logrando mejores rendimientos a partir de semilla entera, este hecho podría explicarse a razón de que la cascara de linaza es rica en fibra y esta es capaz de liberar material mucilaginoso (goma soluble) fácilmente cuando se sumergen en agua (KAJLA *et al.*, 2015), facilitando la extracción y consecuentemente el incremento del rendimiento.

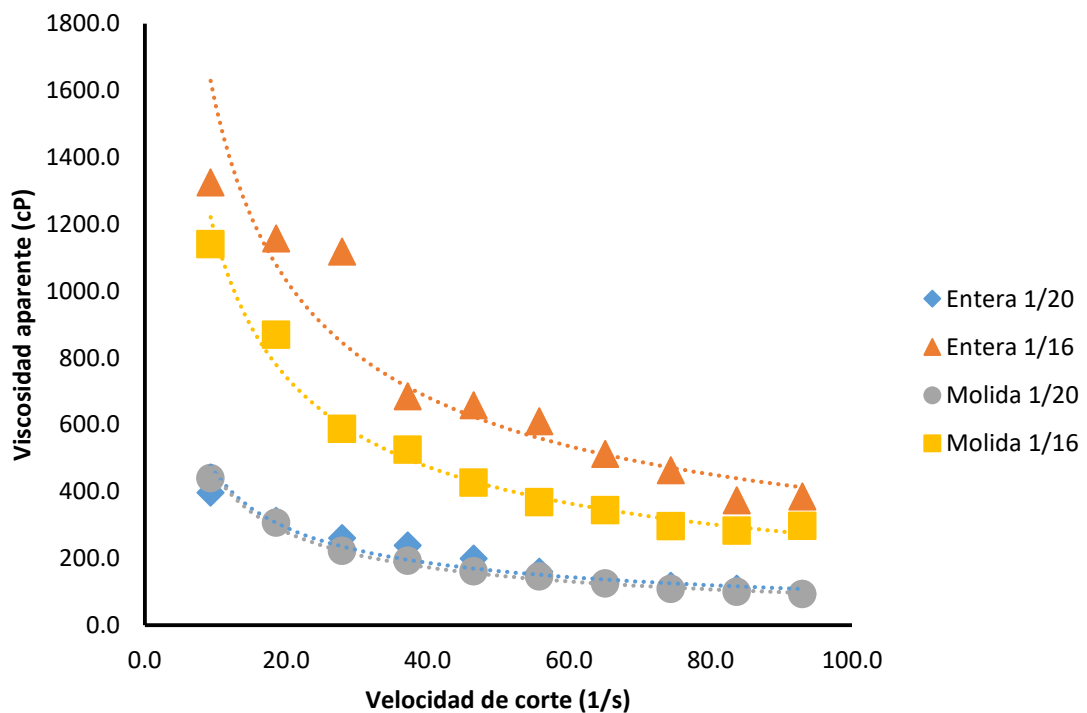
**Cuadro 2.** Rendimiento de extracción de mucilago de linaza

Diluciones  Linaza:Agua (Kg/Kg)	Rendimiento (%)	
	A1 (Semillas enteras)	A2 (Semillas molidas)
B1 (1:16)	80,980±1,480 <sup>a</sup>	70,883±0,295 <sup>b</sup>
B2 (1:20)	85,477±0,235 <sup>b</sup>	79,050±1,261 <sup>a</sup>

#### 4.2. Caracterización reológica del mucílago extraído

Las propiedades reológicas de polisacárido desempeñan un papel importante cuando el polisacárido se aplica en el sistema de alimentación (DICKINSON, 2003). Las viscosidades aparentes de todas las muestras disminuyeron con el aumento de la velocidad de cizalla (Figura 6), lo que sugiere que el mucílago de linaza exhibió un comportamiento no newtoniano pseudoplástico (WANG *et al.*, 2008; WU *et al.*, 2010). Aquí, la velocidad a la

que las matrices poliméricas fueron interrumpidas por el movimiento impuesto externamente quien era mayor que la de formación de nuevas matrices. Este hecho agota la densidad de reticulación del mucílago en solución y consecuentemente la disminución de la viscosidad (WANG *et al.*, 2009).



**Figura 6.** Viscosidad aparente en función a la velocidad de cizalla para los tratamientos en estudio.

El acondicionamiento de la linaza y las proporciones linaza: agua, tienen efectos estadísticamente significativos en el índice de consistencia (Cuadro 3) y (Anexo A-2).  $k$  disminuyó con el aumento del contenido de humedad, esto puede deberse a que el aumento de contenido de humedad inicial dio lugar a una caída significativa de la fuerza de fricción (WU *et al.*, 2010).

El índice de flujo, no es afectado por la relación linaza: agua (Cuadro 3), sin embargo, el tipo de acondicionamiento influye significativamente (Anexo A-3). El mucilago de linaza tiene comportamiento pseudoplástico debido a la interacción electrostática o coacervación compleja entre las proteínas y los polisacáridos (LIU *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2014).

**Cuadro 3.** Parámetros reológicos del mucilago fresco de linaza, índice de consistencia e índice de flujo.

Diluciones Kg/Kg	Acondicionamiento	K	n
1:16	Semillas enteras	76,464±2,866 <sup>a</sup>	0,369±0,028 <sup>a</sup>
	Semillas molidas	45,079±3,169 <sup>b</sup>	0,338±0,014 <sup>b</sup>
1:20	Semillas enteras	14,501±0,908 <sup>c</sup>	0,407±0,028 <sup>a</sup>
	Semillas molidas	2,730±1,418 <sup>d</sup>	0,325±0,012 <sup>b</sup>

Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ )

#### 4.3. Caracterización reológica del mucílago reconstituido

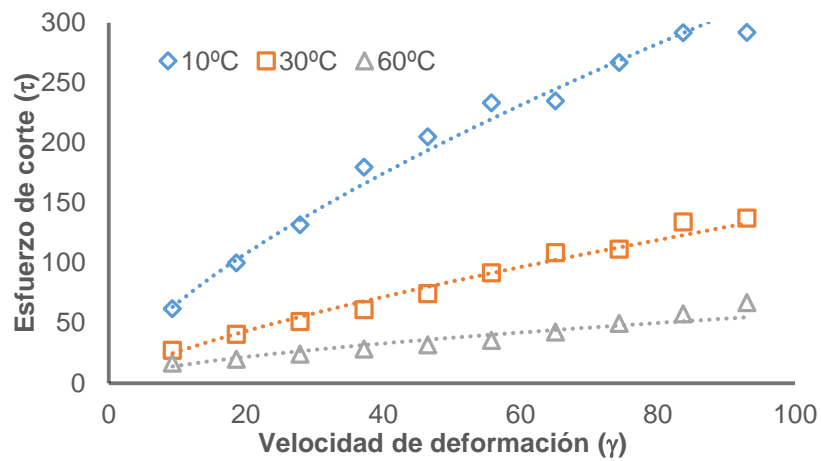
Las curvas de flujo ( $\tau$  vs.  $\gamma$ ) de mucílago reconstituido se midieron a diferentes concentraciones y temperaturas mediante el modelo de la ley de potencia, este modelo fue utilizado en diversos estudios con características similares (CEVOLI *et al.*, 2013), Midieron las propiedades reológicas de seis dispersiones diferentes de hidrocoloides en agua como son carboximetilcelulosa, goma de tara, goma guar, goma de algarrobo, goma de xantano y alginato de sodio, a diferentes concentraciones, que se utilizan en la

preparación de alimentos. Todos los parámetros medidos mostraron una fuerte correlación con la concentración de la dispersión mediante el modelo de la Ley de la Potencia con un  $R^2$  entre 0,966 y 0,993.

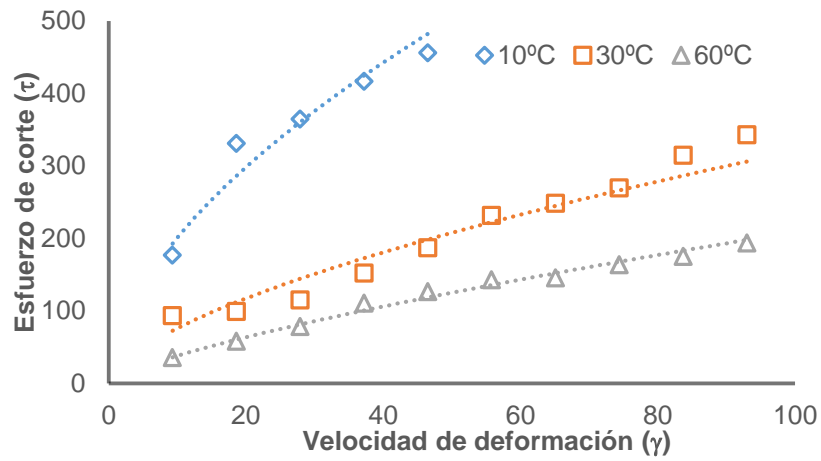
En la Figura 7 se muestran los Reogramas del comportamiento reológico a las temperaturas de 10, 30 y 60°C con 1% de concentración (Figura 7a), 3% de concentración (Figura 7b) y 6% de concentración (Figura 7c). El mucilago reconstituido muestra un comportamiento pseudoplástico, en todos los tratamientos; el valor del índice de comportamiento de flujo fue menor a la unidad (Cuadro 5), y gráficamente la curva es cóncava hacia abajo. Se observa que al aumentar la temperatura los esfuerzos de corte ( $\tau$ ) van disminuyendo para un mismo valor de velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ).

En la Figura 8 se muestran los Reogramas del comportamiento reológico a las concentraciones de 1, 3 y 6% a las temperaturas de: 10° (figura 8a), 30° (figura 8b) y 60° (figura 8c). La concentración tiene una influencia sobre el esfuerzo de corte, cuando aumenta la concentración el reómetro registra mayores valores de esfuerzo cortante a las diferentes temperaturas estudiadas. Tanto los resultados reportados en las figuras 7 y 8 se observan curvas ascendentes que se encuentran sobrepuestas, indican que el fluido presenta un comportamiento reológico independiente del tiempo (CUI y MAZZA, 1996).

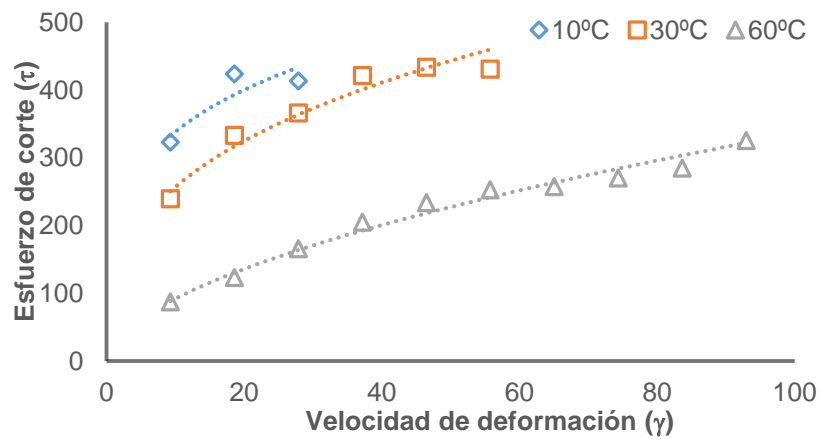




(a)

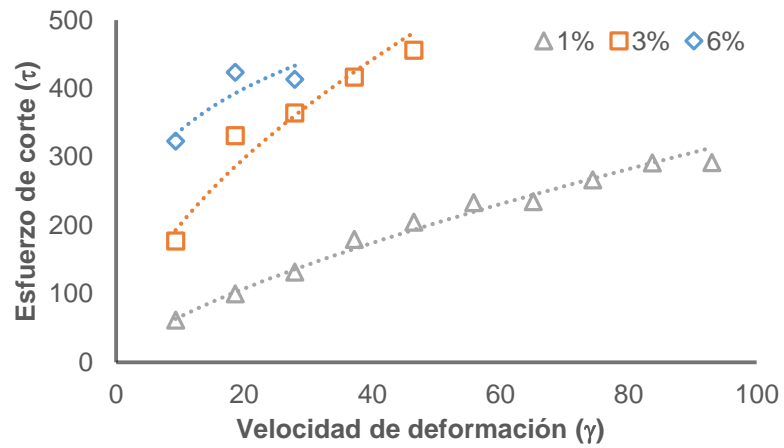


(b)

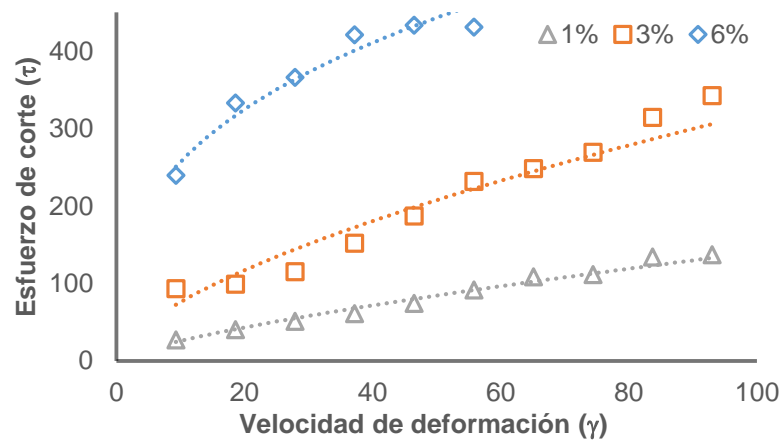


(c)

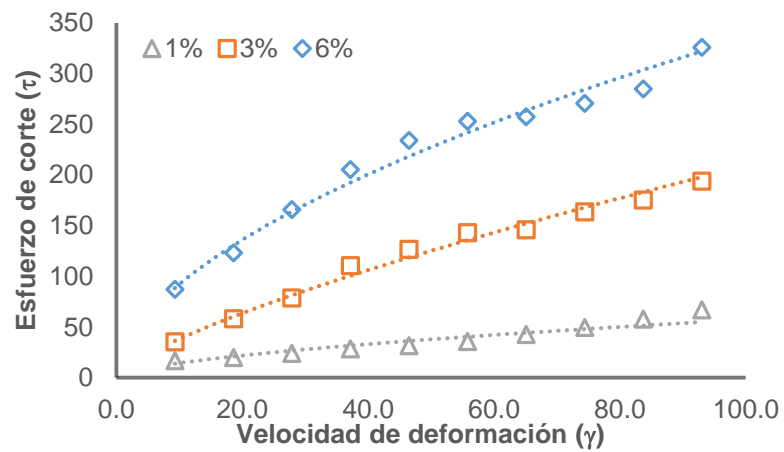
**Figura 7.** Reogramas del comportamiento reológico a diferentes temperaturas 10, 30 y 60°C: (a) concentración 1% (b) concentración 3% y (c) concentración 6%.



(a)

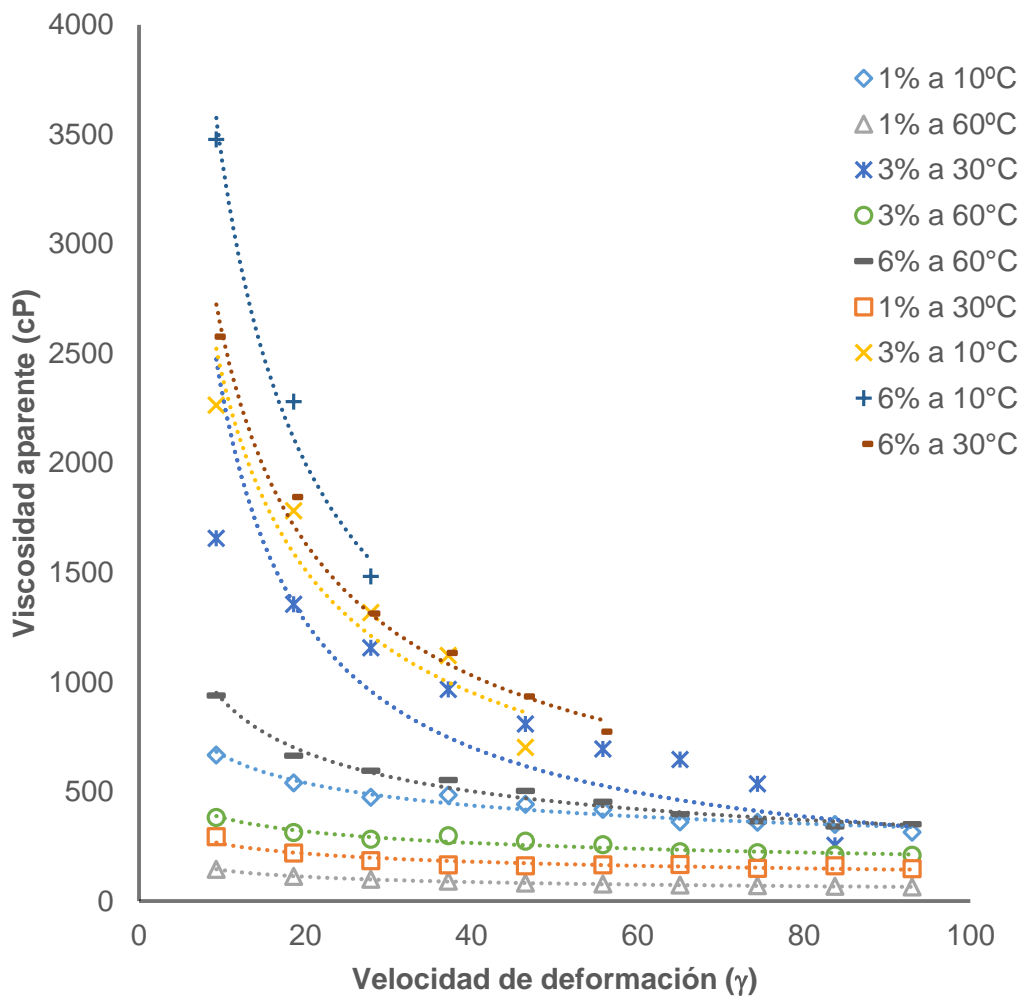


(b)



**Figura 8.** Reogramas del comportamiento reológico a 1, 3 y 6% de concentración: (a) temperatura de 10° (b) temperatura de 30° (c) temperatura de 60°C

La goma de linaza se compone principalmente de dos polisacáridos: un arabinoxilano neutro y un polisacárido ácido. El polisacárido neutro tiene un tamaño molecular mayor y exhibe un comportamiento de flujo adelgazante por cizallamiento en soluciones acuosas por encima del 1% (p / p), mientras que el polisacárido ácido tiene polímeros de menor tamaño molecular y exhibe un comportamiento de flujo de tipo newtoniano incluso a una concentración mucho mayor(WU *et al.*, 2015).



**Figura 9.** Viscosidad aparente Vs velocidad de deformación del mucílago reconstituido a diferente temperatura y concentración.

Una característica importante de los polisacáridos es su comportamiento reológico, debido a que estos tienen impacto notable en la fabricación, el almacenamiento, el espesamiento, estabilización y atributos de textura de los polisacáridos en aplicaciones industriales, sino que también tienen relaciones internas a la estructura molecular y la conformación de la cadena (LAGO *et al.*, 2011).

El aumento de la temperatura resulta en una considerable disminución de la viscosidad en el mucílago reconstituido a las concentraciones de 1, 3 y 6% (Figura 7). Con el aumento de la temperatura, la energía térmica de las moléculas aumenta y se desarrolla un distanciamiento molecular debido a la reducción de las fuerzas intermoleculares, por lo tanto, la viscosidad aparente de los fluidos disminuye (KARAZHIYAN *et al.*, 2009).

La viscosidad aparente de todas las muestras disminuye con el incremento de la velocidad de cizalla, sugiriendo que el mucílago de linaza reconstituido tiene comportamiento no Newtoniano, la disminución de la viscosidad aparente puede deberse a la degradación de polisacáridos de gran peso molecular en polisacáridos de peso molecular comparativamente más bajo (WU *et al.*, 2010). Este tipo constante de comportamiento al esfuerzo de corte es ampliamente observado en biopolímeros (LAGO *et al.*, 2011).

El incremento de la concentración también obedece a un fluido con comportamiento pseudoplástico ( $n < 1$ ) (Figura 9); debido a que al aumentar la

concentración se aumenta la cantidad de solutos disueltos, lo que acentúa las interacciones polímero-agua aumentando la resistencia de la disolución que tiene un comportamiento de gel, otorgando una mayor firmeza y elasticidad (HOSSEINI-PARVAR *et al.*, 2010; KARAZHIYAN *et al.*, 2009; WU *et al.*, 2015).

#### **4.4. Efecto de la temperatura y la concentración en las propiedades reológicas del mucilago reconstituido**

Se observa según la Figura 8 y el Cuadro 5, que las soluciones de mucílago de linaza mostraron una característica del comportamiento no newtoniano, debido a que las cadenas del polisacárido de la linaza pueden crear una red entrelazándose entre sí, dependiendo de la concentración y la temperatura (ANDHARE *et al.*, 2017).

Se analizó el parámetro índice de consistencia (Cuadro 4), los resultados demuestran que ambos factores tienen influencia estadística significativa en el índice de consistencia (Anexo A-4), el efecto de la temperatura y la concentración de mucílago reconstituido sobre el índice de consistencia se muestra en la Figura 9. El índice de consistencia es inversamente proporcional con la temperatura y directamente proporcional a la concentración de mucilago reconstituido; CENGIZ *et al.* (2013) en la caracterización de las interacciones reológicas de la goma del *Gleditsia triacanthos*, menciona que a medida que se concentra las partículas de la goma en solución, el índice de consistencia aumenta. Este fenómeno se puede interpretar en la teoría de los “aglomerados”, al ir aumentando el grado de concentración, las partículas

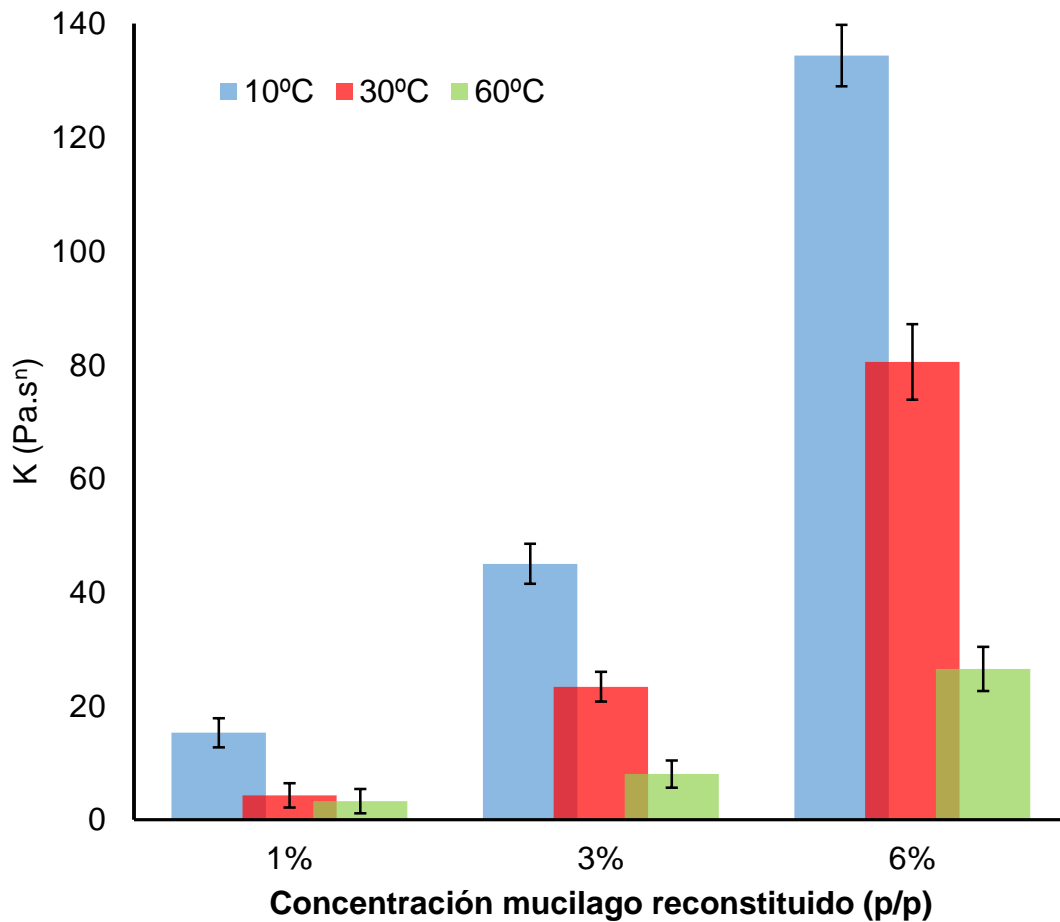
individuales quedarían más próximas unas de otras, facilitando su atracción y posible formación. Dichos grumos, a su vez, pueden unirse, dando lugar a la formación de agregados, aunque las fuerzas que los mantendrían unidos serían más débiles que las anteriores. Estos agregados también pueden agruparse para formar una red o malla, entre la que quedaría atrapada la fase dispersante, que sería difícil de separar por la acción de una fuerza centrífuga.

**Cuadro 4.** Índice de consistencia, a diferentes concentraciones y temperaturas.

Concentración Kg/Kg	Índice de consistencia (k)		
	T1 (10°C)	T2 (30°C)	T3 (60°)
C1 (1%)	15,266±0,546 <sup>a</sup>	4,272±0,148 <sup>b</sup>	3,267±0,141 <sup>c</sup>
C2 (3%)	44,974±1,522 <sup>b</sup>	23,360±0,608 <sup>c</sup>	8,017±0,395 <sup>a</sup>
C3 (6%)	134,358±3,384 <sup>c</sup>	80,478±4,634 <sup>a</sup>	26,509±1,896 <sup>b</sup>

Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ )

En la Figura 10 se observa la disminución de los valores de índice de consistencia (K), a medida que se incrementa la temperatura y la concentración, otros resultados demuestran comportamientos similares (HOSSEINI-PARVAR et al., 2010; KHATTAR y JINDAL, 2008; XIU et al., 2011).



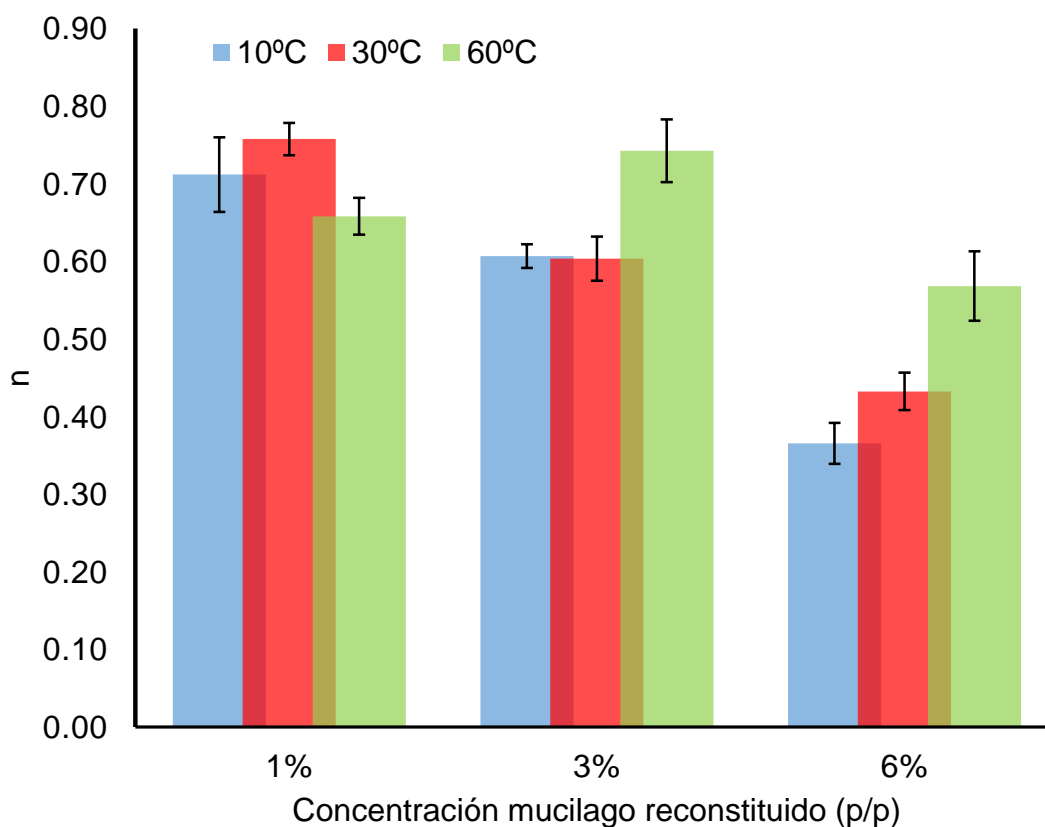
**Figura 10.** Índice de consistencia (k) en función a la concentración de mucilago reconstituido a diferente temperatura.

El índice de flujo, es influenciado estadísticamente por la temperatura y la concentración ( $p < 0,05$ ), se observa que existe una tendencia a que el índice de flujo disminuya con el incremento de la concentración y no está claro el comportamiento de este parámetro reológico respecto a la temperatura (Figura 11), trabajos similares reportan que este parámetro se incrementa cuando sube la (KARAZHIYAN *et al.*, 2009; WU *et al.*, 2015).

**Cuadro 5.** Índice de flujo, a diferentes concentraciones y temperaturas.

Concentración Kg/Kg	Índice de flujo (n)		
	T1 (10°C)	T2 (30°C)	T3 (60°)
C1 (1%)	0,712±0,048 <sup>a</sup>	0,758±0,0021 <sup>b</sup>	0,658±0,0024 <sup>c</sup>
C2 (3%)	0,607±0,015 <sup>b</sup>	0,603±0,028 <sup>c</sup>	0,742±0,0040 <sup>a</sup>
C3 (6%)	0,365±0,027 <sup>c</sup>	0,432±0,024 <sup>a</sup>	0,568±0,045 <sup>b</sup>

Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ )



**Figura 11.** Índice de flujo de mucilago reconstituido a diferentes concentraciones (1, 3 y 6%) y temperaturas (10, 30 y 60°C).



#### 4.5. Secado por aspersión de la solución del mucilago

El diseño Box Behnken se aplicó en este estudio para optimizar el proceso de secado por atomización. El objetivo de la optimización de los procesos de secado fue determinar los parámetros de operación como la temperatura de entrada de aire en grados centígrados, la relación linaza: agua que para este estudio se denominó dilución y la velocidad de la bomba en revoluciones por minuto. Las respuestas observadas para 15 experimentos se presentan en el cuadro 6. Se seleccionaron valores basados en experimentos preliminares, para la metodología de superficie respuesta que implica el diseño de Box Behnken, un total de 15 experimentos fueron diseñados para los tres factores en tres niveles de cada parámetro Cuadro 7.

**Cuadro 6.** Las variables y los niveles en el diseño experimental de Box Behnken

<b>Variables independientes</b>		<b>Niveles</b>		
		<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
X <sub>1</sub>	Temperatura de entrada (°C)	160	180	200
X <sub>2</sub>	Dilución linaza/agua (Kg/Kg)	1:20	1:17,778	1:16
X <sub>3</sub>	Velocidad de la bomba (Rpm)	5	10	15
<b>Variables dependientes</b>		<b>Restricciones</b>	<b>Óptimo</b>	
Y <sub>1</sub>	Peso de linaza secado por atomización	$Y_1 \geq 0$	ND	

ND: no definido

La metodología de la superficie de respuesta determina la influencia de las variables independientes consideradas como los factores más importantes que afectan al secado por pulverización del mucílago de linaza. La Figura 12 indica claramente el efecto de los factores estudiados como son: temperatura, dilución o relación semilla: agua y la velocidad de la bomba.

**Cuadro 7.** Diseño experimental de Box Behnken y sus respuestas

N°	Temperatura de	Dilución	Velocidad de la bomba	Peso (g)
	entrada (°C)	(kg/kg)	(Rpm)	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>
1	160	0,05	10	2,42
2	200	0,05	10	2,542
3	160	0,0625	10	2,24
4	200	0,0625	10	2,067
5	160	0,05625	5	2,334
6	200	0,05625	5	2,008
7	160	0,05625	15	2,231
8	200	0,05625	15	2,244
9	180	0,05	5	2,668
10	180	0,0625	5	2,204
11	180	0,05	15	2,689
12	180	0,0625	15	2,785
13	180	0,05625	10	2,946
14	180	0,05625	10	2,726
15	180	0,05625	10	2,782

#### 4.6. Modelo de regresión y el análisis estadístico

Las relaciones entre el peso (Y), y tres variables independientes temperatura del aire de entrada ( $X_1$ ), la dilución ( $X_2$ ) y la velocidad de la bomba ( $X_3$ ). La respuesta obtenida en la cuadro 8 se correlacionó con las tres variables independientes usando una ecuación polinómica, el mejor modelo de ajuste de los factores codificados es:

$$Y = -38,984 + 0,419788X_1 + 211,58X_2 - 0,248375X_3 - 0,00110375X_1^2 - 0,59X_1 \cdot X_2 + 0,0008475X_1 \cdot X_3 - 1516,8X_2^2 + 4,48X_2 \cdot X_3 - 0,00689X_3^2 \quad (4)$$

**Cuadro 8.** Coeficientes de regresión para el peso

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
Constante	-38,9834
$X_1$ : Temperatura	0,419788
$X_2$ : Dilución	211,58
$X_3$ : Velocidad de bomba	-0,248375
$X_1 \cdot X_1$	-0,00110375
$X_1 \cdot X_2$	-0,59
$X_1 \cdot X_3$	0,0008475
$X_2 \cdot X_2$	-1516,8
$X_2 \cdot X_3$	4,48
$X_3 \cdot X_3$	-0,00689
$R^2$	93,9967

El análisis de varianza (Anexo A-6) indica que los factores que tienen efectos estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ) sobre el peso son la dilución, la interacción entre las temperaturas y la interacción de las velocidades de la bomba peristáltica del equipo atomizador.

#### **4.6.1 Influencia de la temperatura del aire de entrada**

La temperatura del aire de entrada tiene un efecto negativo cuadrático, y un efecto positivo lineal sobre el peso ( $Y$ ). El efecto cuadrático de la temperatura es negativo y estadísticamente significativo ( $p < 0,05$ ) (Ver anexo A-6), es decir si se incrementa la temperatura manteniendo constantes los otros factores el peso disminuiría, Esto puede explicarse por el hecho de que a mayor temperatura del aire de entrada, existe un gradiente de temperatura más grande entre las finas gotitas de alimentación y el aire caliente de secado, resultando una mayor tasa de transferencia de calor a las partículas y proporcionando una mejor fuerza de accionamiento para el contenido de humedad (THIRUGNANASAMBANDHAM y SIVAKUMAR, 2015), por consiguiente facilitando el proceso de secado.

Durante el secado por pulverización, la evaporación del agua en la superficie de la gotita crea una capa sobresaturada atrapando el agua restante, que se evapora y se elimina lentamente por difusión a través de la pared sólida o por agujeros desarrollados por la presión interna (GUIMARÃES *et al.*, 2015).

Por otro lado el análisis reológico del mucílago reconstituido, sugiere que el incremento de temperatura hace que disminuya la viscosidad aparente en solución acuosa, permitiendo de esta manera reducir la capacidad de retención de agua (SUDHA *et al.*, 2010).

#### **4.6.2 Influencia de la dilución**

La dilución o la proporción linaza:agua es estadísticamente significativo ( $p < 0,05$ ) (Anexo A-6), este fue el factor más influyente en el proceso de secado y el resultado concuerda con un estudio realizado por (OOMAH y MAZZA, 2001). La ecuación (4) y el cuadro 8, demuestran que la proporción linaza/agua tiene un efecto positivo lineal principalmente, es decir, el aumento de la proporción linaza: agua incrementa el rendimiento de secado, pero requería una mayor temperatura para secar por pulverización el mucílago (OOMAH y MAZZA, 2001).

#### **4.6.3 Influencia de la velocidad de la bomba**

El análisis estadístico de los datos experimentales la velocidad del caudal identificado como ( $X_3$ ) como la variable independiente o factor demuestra que esta tiene un efecto cuadrático estadísticamente significativo ( $p < 0,05$ ) en el proceso de secado por atomización de mucílago de linaza (Anexo A-6). Como se muestra en la ecuación (4) y el cuadro 8, la tasa de flujo de alimentación que es función de la velocidad de la bomba es lo que realmente se analiza, esta tiene un gran efecto negativo en el secado, es decir disminuye el rendimiento del secado. Esto se debe principalmente al hecho de

que durante el caudal de alimentación más alto, la transferencia de calor entre las gotitas de alimentación y el aire de secado llega a ser menos eficiente que causa menor evaporación de agua, lo que produce un mayor contenido de humedad en el proceso de secado por pulverización (THIRUGNANASAMBANDHAM y SIVAKUMAR, 2015)

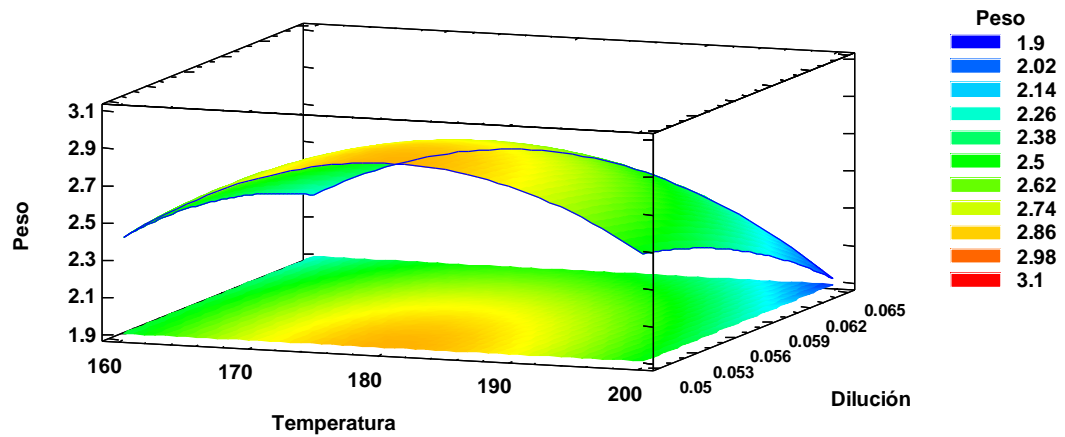
#### 4.7. Parámetros óptimos

El siguiente cuadro resume los valores óptimos para el secado por atomización de la linaza:

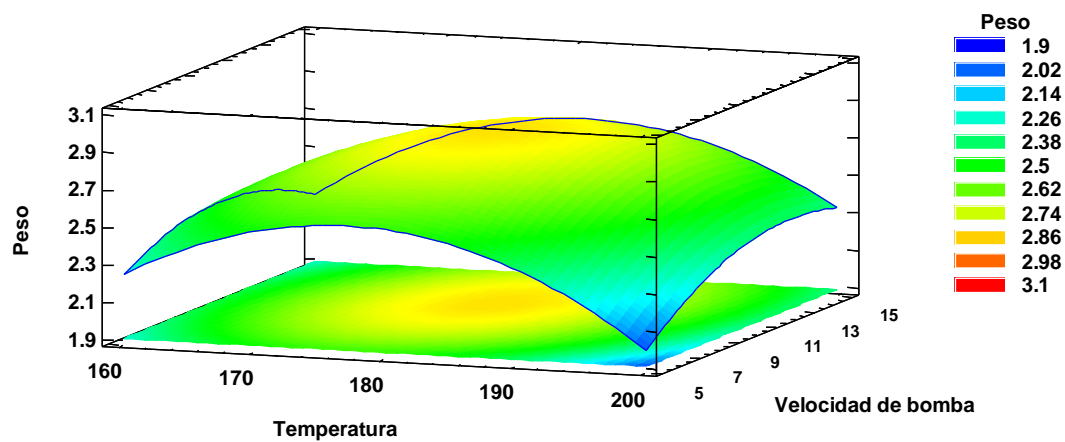
**Cuadro 9:** Parámetros óptimos

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Temperatura (°C)	160,0	200,0	180,379
Dilución (Kg/Kg)	0,05	0,0625	0,05
Velocidad bomba (rpm)	5,0	15,0	9,32414

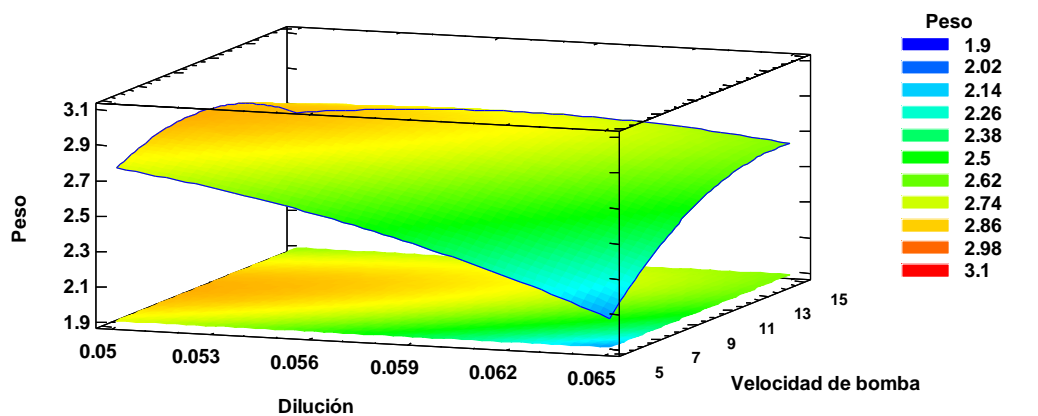
Esta metodología simplifica el análisis experimental mediante la conversión de un problema de optimización de múltiples respuesta en una sola respuesta que es más fácil de interpretar (SILVA *et al.*, 2013).



(a)



(b)



(c)

**Figura 12.** Contorno de superficie respuesta estimada: a) dilución vs temperatura b) velocidad de bomba vs temperatura c) velocidad de bomba vs dilución

## V. CONCLUSIONES

Al culminar la presente investigación se establece las siguientes conclusiones:

- Mediante la extracción se demostró que el mejor rendimiento fue aproximadamente de 85,477% utilizando granos enteros y una dilución de 1:20 Kg/Kg Con temperaturas de 95°C por 15 minutos.
- Se realizó el estudio del secado por aspersion y se determinó los parámetros mínimos y máximos de optimización para los siguientes factores: temperatura de entrada, dilución y velocidad de la bomba peristáltica.
- El mucílago de linaza fresca y reconstituida tiene un comportamiento pseudoplástico ( $n < 1$ ), el mucilago fresco fue estudiado a las diluciones de 1:16 y 1:20 Kg/Kg. mientras que el mucilago reconstituido fue analizado a temperaturas de 10, 30 y 60°C y concentraciones de 1, 3 y 6% (p/p).
- Los parámetros óptimos de secado por aspersion se dio a una temperatura de entrada de 180°C, dilución 1:20 Kg/Kg y una velocidad 09 rpm en la bomba para el caudal de alimentación.



## **VI. RECOMENDACIONES**

Optimizar el proceso de secado considerando la temperatura de salida como un factor importante de estudio, según la bibliografía consultada.

Realizar el estudio reológico utilizando otros modelos como Casson, Herschel-Bulkley, Bingham y otros.

Industrialmente el mucílago de linaza ha demostrado un buen rendimiento de la viscosidad, propiedad emulsión y propiedades gelificantes, por lo tanto se recomienda utilizar en la industria de alimentos como espesante, emulsionante, estabilizante, etc. Por ejemplo hay investigaciones del uso de mucílago de linaza en productos de panadería.

## VII. RESUMEN

En los últimos años se ha promovido el consumo de linaza (*Linum usitatissimum* L.) como alimento funcional por sus beneficios a la salud. La presente investigación tuvo como objetivo: Extraer el mucílago de linaza a partir de semillas enteras y molidas, optimizar las condiciones del secado por aspersion del mucílago de linaza usando el método de superficie de respuestas y evaluar las propiedades reológicas del mucílago fresco y reconstituido. Los factores de estudio fueron la temperatura de entrada, la dilución y el caudal de alimentación. La extracción de mucílago a partir de semillas enteras reportó mejores rendimientos con dilución semilla:agua de 1:20, temperatura 85 a 90 °C y pH 6,5 a 6,9. El secado por aspersion fue optimizado mediante el diseño experimental de Box Behnken determinándose que los parámetros óptimos de secado por aspersion fueron: temperatura de entrada, 180 °C, dilución 1:20 y velocidad 09 rpm en la bomba para el caudal de alimentación. El estudio reológico ha demostrado que el mucilago de linaza tiene un comportamiento no newtoniano pseudoplástico ( $n < 1$ ) en su estado fresco a partir de grano entero y molido, con diluciones (1:16 y 1:20) y en su estado reconstituido a las concentraciones de 1, 3 y 6% a temperaturas de 10, 30 y 60 °C.

**Palabras clave:** Optimización, secado por aspersion, propiedades reológicas, mucílago de linaza

## VIII. ABSTRACT

In recent years the consumption of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) has been promoted as a functional food for its health benefits. The objective of the present investigation was to: Extract the linseed mucilage from whole seeds and ground seeds, optimize the drying conditions by spreading the linseed mucilage using the surface response method and to evaluate the rheological properties of fresh and reconstituted mucilage. The study factors were the inlet temperature, the dilution and the feed rate. The extraction of mucilage from whole seeds reported better yields with seed dilution: water of 1:20, temperature 85 to 90 °C and pH of 6,5 to 6,9. The spray drying was optimized by the Box Behnken experimental design, determining that the optimum spray drying parameters were: inlet temperature, 180 ° C, 1:20 dilution and pump speed 09 rpm for the feed rate. The rheological study has shown that the flax mucilage has a non-Newtonian pseudoplastic behavior ( $n < 1$ ) in its fresh state from whole grain and ground, with dilutions (1:16 and 1:20) and in its reconstituted state The concentrations of 1, 3 and 6% at temperatures of 10, 30 and 60 ° C..

**Key words:** Optimization, Spray drying, Rheological properties, Linseed mucilage

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASSAF, S., PHILLIPS, G. O., & WILLIAMS, P. A. (2005). Studies on acacia exudate gums. Part I: the molecular weight of Acacia senegal gum exudate. *Food Hydrocolloids*, 19(4), 647-660.
- ANDHARE, P., DELATTRE, C., PIERRE, G., MICHAUD, P., & PATHAK, H. (2017). Characterization and rheological behaviour analysis of the succinoglycan produced by Rhizobium radiobacter strain CAS from curd sample. *Food Hydrocolloids*, 64, 1-8. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.008>
- ARAGUEZ, Y., BRINGAS, M., PINO, J. A., & RONCAL, E. (2013). DESARROLLO DE UN SABORIZANTE DE COCO MICROENCAPSULADO MEDIANTE SECADO POR ATOMIZACIÓN. *Influence of drying temperatures on the obtaining of a coconut microencapsulated flavoring.*, 23(3), 21-26.
- AUGUSTIN, M. A., & HEMAR, Y. (2009). Nano-and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical society reviews*, 38(4), 902-912.
- AVALTRONI, F., BOUQUERAND, P., & NORMAND, V. (2004). Maltodextrin molecular weight distribution influence on the glass transition

- temperature and viscosity in aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, 58(3), 323-334.
- BARBOSA, M., BORSARELLI, C., & MERCADANTE, A. (2005). Light stability of spray-dried bixin encapsulated with different edible polysaccharide preparations. *Food Research International*, 38(8), 989-994.
- BARBOZA-CÁNOVAS, G., & IBARZ, A. (2002). Rheology of Food Products *Unit Operations in Food Engineering* (pp. 89-142): CRC Press.
- BENÍTEZ, I., JULIÁN RICARDO, M. C., CABALLERO CALDERÓN, M., & MIÑO VALDÉS, J. E. (2016). Características reológicas de la pasta para producir cemento portland. *Revista Científica de la UCSA*, 3, 13-23.
- BIRD, R. B., STEWART, W. E. L., EDWIN, N., WARREN, E. S., & EDWIN, N. L. (2008). *Fenómenos de transporte*.
- BUSTABAD, O. M., & GONZÁLEZ, G. R. (2016). MODELOS MATEMÁTICOS PARA CALCULAR LA VISCOSIDAD EFECTIVA Y SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO Y EVALUACION DE REDES DE TUBERIAS. *Tecnología Química*, 30(2), 29-35.
- CALDERELLI, V. A. S., BENASSI, M. D. T., VISENTAINER, J. V., & MATIOLI, G. (2010). Quinoa and flaxseed: potential ingredients in the production of bread with functional quality. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53, 981-986.
- ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. M., OLGUÍN, V. C., & SKARINA, S. F. (2006). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*.
- CENGİZ, E., DOĞAN, M., & KARAMAN, S. (2013). Characterization of rheological interactions of Gleditsia triacanthos gum with some

- hydrocolloids: Effect of hydration temperature. *Food Hydrocolloids*, 32(2), 453-462. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.01.018>
- CEVOLI, C., BALESTRA, F., RAGNI, L., & FABBRI, A. (2013). Rheological characterisation of selected food hydrocolloids by traditional and simplified techniques. *Food Hydrocolloids*, 33(1), 142-150. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.02.022>
- CIFUENTES, M., & NICOLÁS, J. (2016). Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada.
- CORTÉS, M., HERNÁNDEZ, G., & CIRO, H. J. (2015). OPTIMIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA FORMULACIÓN DE PULPA DE UCHUVA (*Physalis peruviana*) PARA MEJORAR SU PROCESAMIENTO EN EL SECADO POR ATOMIZACIÓN. *EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF CAPE GOOSEBERRY PULP (*Physalis peruviana*) FORMULATION TO IMPROVE ITS PROCESSING BY SPRAY DRYING.*, 22(2), 130-139. doi: 10.17533/udea.vitae.v22n2a07
- CUI, W., & MAZZA, G. (1996). Physicochemical characteristics of flaxseed gum. *Food Research International*, 29(3-4), 397-402. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0963-9969\(96\)00005-1](http://dx.doi.org/10.1016/0963-9969(96)00005-1)
- CUI, W., MAZZA, G., OOMAH, B. D., & BILIADERIS, C. G. (1994). Optimization of an Aqueous Extraction Process for Flaxseed Gum by Response Surface Methodology. *LWT - Food Science and Technology*, 27(4), 363-369. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/fstl.1994.1074>

- CHEN, C., HUANG, X., WANG, L.-J., LI, D., & ADHIKARI, B. (2016). Effect of flaxseed gum on the rheological properties of peanut protein isolate dispersions and gels. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 528-533. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.013>
- DAUN, J. K., BARTHET, V. J., CHORNICK, T., DUGUID, S., THOMPSON, L., & CUNNANE, S. (2003). Structure, composition, and variety development of flaxseed. *Flaxseed in human nutrition*(Ed. 2), 1-40.
- DESAI, K. G. H., & JIN PARK, H. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying technology*, 23(7), 1361-1394.
- DEVINE, C. E. (2016). Food Products and Ingredients: Primary Food Production *Reference Module in Food Science*: Elsevier.
- DICKINSON, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 25-39. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00120-5)
- DIEDERICHSEN, A., & RICHARDS, K. (2003). 2 Cultivated flax and the genus *Linum* L. *Flax: the genus Linum*, 22.
- DOBRSZCZYK, B. J., & SALMANOWICZ, B. P. (2008). Comparison of predictions of baking volume using large deformation rheological properties. *Journal of Cereal Science*, 47(2), 292-301. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2007.04.008>
- EL-BAKRY, M., DUGGAN, E., O'RIORDAN, E. D., & O'SULLIVAN, M. (2010). Small scale imitation cheese manufacture using a Farinograph. *LWT -*

*Food Science and Technology*, 43(7), 1079-1087. doi:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2010.02.013>

- F. GIBBS, S. K., INTEAZ ALLI, CATHERINE N. MULLIGAN, BERNARD. (1999). Encapsulation in the food industry: a review. *International journal of food sciences and nutrition*, 50(3), 213-224.
- FAVARO-TRINDADE, C., SANTANA, A., MONTERREY-QUINTERO, E., TRINDADE, M., & NETTO, F. (2010). The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate. *Food Hydrocolloids*, 24(4), 336-340.
- FERNÁNDEZ, C. (2009). Caracterización reológica y optimización de la textura de purés de patata frescos y congelados: efectos del proceso y adición de crioprotectores.
- GUIMARÃES, T. F., LANCHOTE, A. D., DA COSTA, J. S., VIÇOSA, A. L., & DE FREITAS, L. A. P. (2015). A multivariate approach applied to quality on particle engineering of spray-dried mannitol. *Advanced Powder Technology*, 26(4), 1094-1101. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.appt.2015.05.004>
- HAMANN, D., & MACDONALD, G. (1992). Rheology and texture properties of surimi and surimi-based foods. *Surimi technology*, 429-500.
- HERCHI, W., ARR, AACUTE, EZ, R., AACUTE, N, D., . . . NDEZ-GUTIERREZ, A. (2014). Phenolic Compounds in Flaxseed: a Review of Their Properties and Analytical Methods. An Overview of the Last Decade. *Journal of Oleo Science*, 63(1), 7-14. doi: 10.5650/jos.ess13135



- HOSSEINI-PARVAR, S. H., MATIA-MERINO, L., GOH, K. K. T., RAZAVI, S. M. A., & MORTAZAVI, S. A. (2010). Steady shear flow behavior of gum extracted from *Ocimum basilicum* L. seed: Effect of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 101(3), 236-243. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.025>
- HVIDT, S., & HELLER, K. (1990). Viscoelastic properties of biological networks and gels. *Physical Networks: Polymers and Gels*. W. Burchard and S. Ross-Murphy, editors. Elsevier, London, 195-208.
- ITIS. (2016). ITIS Standard Report Page: *Linum usitatissimum*. Retrieved 30/09/2016, from [http://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search\\_topic=TSN&search\\_value=29226](http://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=29226)
- JATO, V. (1997). *JL Tecnología Farmacêutica: Formas farmacéuticas*, vol. II, Madrid: Ed. *Sintesis*.
- KAJLA, P., SHARMA, A., & SOOD, D. R. (2015). Flaxseed—a potential functional food source. *Journal of food science and technology*, 52(4), 1857-1871.
- KANAKDANDE, D., BHOSALE, R., & SINGHAL, R. S. (2007). Stability of cumin oleoresin microencapsulated in different combination of gum arabic, maltodextrin and modified starch. *Carbohydrate Polymers*, 67(4), 536-541.
- KARAZHIYAN, H., RAZAVI, S. M., PHILLIPS, G. O., FANG, Y., AL-ASSAF, S., NISHINARI, K., & FARHOOSH, R. (2009). Rheological properties of

- Lepidium sativum seed extract as a function of concentration, temperature and time. *Food Hydrocolloids*, 23(8), 2062-2068.
- KOCA, A. F., & ANIL, M. (2007). Effect of flaxseed and wheat flour blends on dough rheology and bread quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(6), 1172-1175.
- KORUS, J., WITCZAK, T., ZIOBRO, R., & JUSZCZAK, L. (2015). Linseed (*Linum usitatissimum* L.) mucilage as a novel structure forming agent in gluten-free bread. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1, Part 1), 257-264. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.040>
- LAGO, C., BERNSTEIN, A., BRANDELLI, A., & NOREÑA, C. (2011). Estudo do comportamento reológico, da atividade de água e do ponto de início de congelamento do suco de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) a diferentes concentrações. *Braz J Food Technol*, 14(1), 1-9.
- LIU, S., ELMER, C., LOW, N. H., & NICKERSON, M. T. (2010). Effect of pH on the functional behaviour of pea protein isolate–gum Arabic complexes. *Food Research International*, 43(2), 489-495. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.022>
- LOPES, J., & RAO, M. A. (1999). Rheological behavior of food gel systems. *Rheology of fluid and semisolid foods*. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publication, Inc, 219-318.
- LÓPEZ, O. D. (2010). Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersión. *Revista Cubana de Farmacia*, 44, 381-389.
- LOZADA CARBAJAL, M. A. (2007). Extracción y caracterización reológica de polisacáridos tipo pectina de la cáscara de tuna (*Opuntia* spp.).

- MADENE, A., JACQUOT, M., SCHER, J., & DESOBRY, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release—a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(1), 1-21.
- MARPALLE, P., SONAWANE, S. K., & ARYA, S. S. (2014). Effect of flaxseed flour addition on physicochemical and sensory properties of functional bread. *LWT - Food Science and Technology*, 58(2), 614-619. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.003>
- MCDILL, J., REPPLINGER, M., SIMPSON, B. B., & KADEREIT, J. W. (2009). The phylogeny of *Linum* and Linaceae subfamily Linoideae, with implications for their systematics, biogeography, and evolution of heterostyly. *Systematic Botany*, 34(2), 386-405.
- OOMAH, B. D. (2001). Flaxseed as a functional food source. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 889-894.
- OOMAH, B. D., & MAZZA, G. (2001). Optimization of a spray drying process for flaxseed gum. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(2), 135-143.
- OOMAH, B. D., THOMPSON, L., & CUNNANE, S. (2003). Processing of flaxseed fiber, oil, protein, and lignan. *Flaxseed in human nutrition*(Ed. 2), 363-386.
- PARRA, R. A. (2010). FOOD MICROENCAPSULATION: A REVIEW. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 63(2), 5669-5684.
- PEDROZA-ISLAS, R., ALVAREZ-RAMIREZ, J., & VERNON-CARTER, E. (2000). Using biopolymer blends for shrimp feedstuff

- microencapsulation—II: dissolution and floatability kinetics as selection criteria. *Food Research International*, 33(2), 119-124.
- PEDROZA-ISLAS, R., VERNON-CARTER, E., DURÁN-DOMÍNGUEZ, C., & TREJO-MARTÍNEZ, S. (1999). Using biopolymer blends for shrimp feedstuff microencapsulation—I. Microcapsule particle size, morphology and microstructure. *Food Research International*, 32(5), 367-374.
- PIORNOS, J. A., BURGOS-DÍAZ, C., MORALES, E., RUBILAR, M., & ACEVEDO, F. (2017). Highly efficient encapsulation of linseed oil into alginate/lupin protein beads: Optimization of the emulsion formulation. *Food Hydrocolloids*, 63, 139-148. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.031>
- QUINTÁNS, L. (2009). *Reología de productos alimentarios*: Univ Santiago de Compostela.
- RAMAKRISHNAN, A., PANDIT, N., BADGUJAR, M., BHASKAR, C., & RAO, M. (2007). Encapsulation of endoglucanase using a biopolymer Gum Arabic for its controlled release. *Bioresource technology*, 98(2), 368-372.
- RAMÍREZ-NAVAS, J. S. (2006). *Introducción a la reología de los alimentos*: Revista ReCiTeIA.
- ROGERS, C. (1982). The systematics of *Linum* sect. *Linopsis* (Linaceae). *Plant Systematics and Evolution*, 140(2-3), 225-234.
- SHIGA, H., YOSHII, H., OHE, H., YASUDA, M., FURUTA, T., KUWAHARA, H., . . . LINKO, P. (2004). Encapsulation of shiitake (*Lenthinus edodes*) flavors by spray drying. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 68(1), 66-71.

- SILVA, P. I., STRINGHETA, P. C., TEÓFILO, R. F., & DE OLIVEIRA, I. R. N. (2013). Parameter optimization for spray-drying microencapsulation of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) peel extracts using simultaneous analysis of responses. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 538-544. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.039>
- SINGH, R. P., & HELDMAN, D. R. (2014a). Chapter 2 - Fluid Flow in Food Processing *Introduction to Food Engineering (Fifth Edition)* (pp. 65-209). San Diego: Academic Press.
- SINGH, R. P., & HELDMAN, D. R. (2014b). Chapter 12 - Dehydration *Introduction to Food Engineering (Fifth Edition)* (pp. 675-710). San Diego: Academic Press.
- STEFFE, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering*: Freeman press.
- STRUIJS, K., VINCKEN, J.-P., VERHOEF, R., VAN OOSTVEEN-VAN CASTEREN, W. H. M., VORAGEN, A. G. J., & GRUPPEN, H. (2007). The flavonoid herbacetin diglucoside as a constituent of the lignan macromolecule from flaxseed hulls. *Phytochemistry*, 68(8), 1227-1235. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.10.022>
- SUDHA, M., KHYRUNNISA, B., & RAMASARMA, P. (2010). Nutritional Characteristics of Linseed/Flaxseed (*Linum Usitatissimum*) and its Application in Muffin Making.
- TABILO-MUNIZAGA, G., & BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67(1-2), 147-156. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.062>

- NIJENHUIS, K. (1990). Viscoelastic properties of thermoreversible gels. *Physical networks: Polymers and gels*, 15-33.
- 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: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.11.005>
- TONON, R. V., GROSSO, C. R. F., & HUBINGER, M. D. (2011). Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying. *Food Research International*, 44(1), 282-289. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.018>
- WALTERS, R. H., BHATNAGAR, B., TCHESSALOV, S., IZUTSU, K.-I., TSUMOTO, K., & OHTAKE, S. (2014). Next Generation Drying Technologies for Pharmaceutical Applications. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 103(9), 2673-2695. doi: 10.1002/jps.23998
- WANG, B., ADHIKARI, B., & BARROW, C. J. (2014). Optimisation of the microencapsulation of tuna oil in gelatin–sodium hexametaphosphate using complex coacervation. *Food Chemistry*, 158, 358-365. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.135>
- WANG, Y., LI, D., WANG, L.-J., WU, M., & ÖZKAN, N. (2011). Rheological study and fractal analysis of flaxseed gum gels. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 594-599. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.078>

- WANG, Y., WANG, L.-J., LI, D., ÖZKAN, N., CHEN, X. D., & MAO, Z.-H. (2008). Effect of flaxseed gum addition on rheological properties of native maize starch. *Journal of Food Engineering*, 89(1), 87-92.
- WANG, Y., WANG, L.-J., LI, D., XUE, J., & MAO, Z.-H. (2009). Effects of drying methods on rheological properties of flaxseed gum. *Carbohydrate Polymers*, 78(2), 213-219.
- WIESENBORN, D., TOSTENSON, K., & KANGAS, N. (2003). Continuous abrasive method for mechanically fractionating flaxseed. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 80(3), 295-300.
- WU, M., LI, D., WANG, L.-J., ZHOU, Y.-G., & MAO, Z.-H. (2010). Rheological property of extruded and enzyme treated flaxseed mucilage. *Carbohydrate Polymers*, 80(2), 460-466. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.12.003>
- WU, Y., DING, W., JIA, L., & HE, Q. (2015). The rheological properties of tara gum (*Caesalpinia spinosa*). *Food Chemistry*, 168, 366-371.
- YADAV, M. P., IGARTUBURU, J. M., YAN, Y., & NOTHNAGEL, E. A. (2007). Chemical investigation of the structural basis of the emulsifying activity of gum arabic. *Food Hydrocolloids*, 21(2), 297-308.

## **X. ANEXOS**



**A-1. Análisis de Varianza para Rendimiento de extracción**

Fuente	S.C.	G.L.	C.M	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Acondicionamiento	204,765	1	204,765	208,83	0,0000
B:Dilución	120,27	1	120,27	122,66	0,0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	10,1017	1	10,1017	10,30	0,0124
RESIDUOS	7,84413	8	0,980517		
TOTAL (CORREGIDO)	342,981	11			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual  $p < 0,05$

**Pruebas de Múltiple Rangos para Rendimiento de extracción por Dilución**

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Dilución	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
B1	6	75,9317	0,404252	X
B2	6	82,2633	0,404252	X

**Contraste Sig. Diferencia +/- Límites**

B1 - B2	*	-6,33167	1,31834
---------	---	----------	---------

\* indica una diferencia significativa.

## Pruebas de Múltiple Rangos para Rendimiento de extracción por Acondicionamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Acondicionamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
A2	6	74,9667	0,404252	X
A1	6	83,2283	0,404252	X

### Contraste Sig. Diferencia +/- Límites

A1 - A2	*	8,26167	1,31834
---------	---	---------	---------

\* indica una diferencia significativa.

## A-2. Análisis de Varianza para k de mucílago fresco

Fuente	S.C.	G.L.	C.M.	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Acondicionamiento	402,197	1	402,197	76,27	0,0000
B:Dilución	5331,39	1	5331,39	1010,98	0,0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	1176,95	1	1176,95	223,18	0,0000
RESIDUOS	42,1878	8	5,27347		
TOTAL (CORREGIDO)	6952,72	11			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### Pruebas de Múltiple Rangos para K por Acondicionamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Acondicionamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
A2	6	33,9042	0,937503	X
A1	6	45,4828	0,937503	X

#### Contraste Sig. Diferencia +/- Límites

A1 - A2	*	11,5787	3,05737
---------	---	---------	---------

\* indica una diferencia significativa.

### Pruebas de Múltiple Rangos para K por Dilución

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Dilución	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
B2	6	18,6155	0,937503	X
B1	6	60,7715	0,937503	X

#### Contraste Sig. Diferencia +/- Límites

B1 - B2	*	42,156	3,05737
---------	---	--------	---------

\* indica una diferencia significativa.

**A-3. Análisis de Varianza para n de mucílago fresco**

Fuente	S.C.	G.L.	C.M.	Razón-F	Valor-P
EFECTOS					
PRINCIPALES					
A:Acondicionamiento	0,00948094	1	0,00948094	19,95	0,0021
B:Dilución	0,000450187	1	0,000450187	0,95	0,3589
INTERACCIONES					
AB	0,00188251	1	0,00188251	3,96	0,0817
RESIDUOS	0,00380139	8	0,000475173		
TOTAL	0,015615	11			
(CORREGIDO)					

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

**Pruebas de Múltiple Rangos para n por Dilución**

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Dilución	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
B1	6	0,35365	0,00889919	X
B2	6	0,3659	0,00889919	X

**Contraste Sig. Diferencia +/- Límites**

B1 - B2	-0,01225	0,0290219
---------	----------	-----------

\* indica una diferencia significativa.

### Pruebas de Múltiple Rangos para n por Acondicionamiento

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Acondicionamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
A2	6	0,331667	0,00889919	X
A1	6	0,387883	0,00889919	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
-----------	------	------------	-------------

A1 - A2	*	0,0562167	0,0290219
---------	---	-----------	-----------

\* indica una diferencia significativa.

#### A-4. Análisis de Varianza para k de mucílago reconstituido

Fuente	S.C.	G.L.	C.M.	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentración	25949,8	2	12974,9	2940,89	0,0000
B:Temperatura	12337,6	2	6168,79	1398,21	0,0000
INTERACCIONES					
AB	7443,85	4	1860,96	421,80	0,0000
RESIDUOS	79,4143	18	4,41191		
TOTAL (CORREGIDO)	45810,7	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### Pruebas de Múltiple Rangos para K por Temperatura

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
T3	9	12,5976	0,700151	X
T2	9	36,0367	0,700151	X
T1	9	64,8661	0,700151	X

#### Contraste Sig. Diferencia +/- Límites

T1 - T2	*	28,8294	2,52825
T1 - T3	*	52,2685	2,52825
T2 - T3	*	23,4391	2,52825

\* indica una diferencia significativa.

### Pruebas de Múltiple Rangos para K por Concentración

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
C1	9	7,60172	0,700151	X
C2	9	25,4504	0,700151	X
C3	9	80,4482	0,700151	X

#### Contraste Sig. Diferencia +/- Límites

C1 - C2	*	-17,8487	2,52825
C1 - C3	*	-72,8465	2,52825
C2 - C3	*	-54,9978	2,52825

\* indica una diferencia significativa.

**A-5. Análisis de Varianza para n - Suma de Cuadrados Tipo III**

Fuente	S.C.	G.L.	C.M.	Razón-F	Valor-P
EFECTOS					
PRINCIPALES					
A:Concentración	0,318119	2	0,15906	154,07	0,0000
B:Temperatura	0,0411983	2	0,0205991	19,95	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,0754678	4	0,018867	18,27	0,0000
RESIDUOS	0,0185832	18	0,0010324		
TOTAL (CORREGIDO)	0,453368	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

**Pruebas de Múltiple Rangos para n por Temperatura**

Método: 95.0 porcentaje LSD

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
T1	9	0,5613	0,0107103	X
T2	9	0,597778	0,0107103	X
T3	9	0,656144	0,0107103	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T1 - T2	*	-0,0364778	0,0318221
T1 - T3	*	-0,0948444	0,0318221
T2 - T3	*	-0,0583667	0,0318221

\* indica una diferencia significativa.

### Pruebas de Múltiple Rangos para n por Concentración

Método: 95.0 porcentaje LSD

Concentración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
C3	9	0,4553	0,0107103	X
C2	9	0,650822	0,0107103	X
C1	9	0,7091	0,0107103	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
C1 - C2	*	0,0582778	0,0318221
C1 - C3	*	0,2538	0,0318221
C2 - C3	*	0,195522	0,0318221

\* indica una diferencia significativa.



**A-6. Análisis de Varianza para Peso**

<b>Fuente</b>	<b>S.C.</b>	<b>G.L.</b>	<b>C.M.</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
A:Temperatura	0,016562	1	0,016562	1,14	0,3341
B:Dilución	0,130816	1	0,130816	9,02	<b>0,0300</b>
C:Velocidad de bomba	0,0675281	1	0,0675281	4,66	0,0834
AA	0,719713	1	0,719713	49,62	<b>0,0009</b>
AB	0,0217562	1	0,0217562	1,50	0,2752
AC	0,0287303	1	0,0287303	1,98	0,2183
BB	0,0129621	1	0,0129621	0,89	0,3879
BC	0,0784	1	0,0784	5,41	0,0676
CC	0,109551	1	0,109551	7,55	<b>0,0404</b>
Error total	0,0725157	5	0,0145031		
Total (corr.)	1,20794	14			