

**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior  
Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico de Orizaba

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“SECADO POR LECHO FLUIDIZADO  
DE QUESO FRESCO”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

*I. Q. Alejandra Nallely Buendía González*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dra. Guadalupe Luna Solano*

CODIRECTOR DE TESIS:

*Dr. Galo Rafael Urrea García*



Orizaba, Veracruz, México.

Septiembre 2016



FECHA: 29/09/2016  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

C. ALEJANDRA NALLELY BUENDIA GONZALEZ  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"SECADO POR LECHO FLUIDIZADO DE QUESO FRESCO".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ggc





FECHA : 22/09/2016

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

ALEJANDRA NALLELY BUENDIA GONZALEZ

la cual lleva el título de:

"SECADO POR LECHO FLUIDIZADO DE QUESO FRESCO".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO

SECRETARIO : DR. GALO RAFAEL URREA GARCIA

VOCAL : DR. DENIS CANTU LOZANO

VOCAL SUP. : DR. JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I Tesis





**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**  
Aviso de Realización del Acto de Recepción Profesional



Referencia a la Norma ISO 9001; 7.5.1

Revisión: OR-I 01

Código: ITORI-AC-PO-008-03

Página 1 de 1

Fecha: 07/10/2016

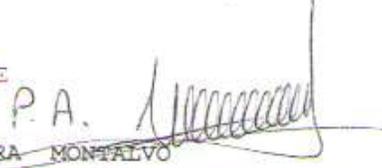
Opción: I Tesis

C. Integrantes del jurado

Presidente: DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO  
Secretario: DR. GALO RAFAEL URREA GARCIA  
Vocal: DR. DENIS CANTU LOZANO  
Vocal Sup.: DR. JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS

Por este medio le informo que el Acto de Recepción Profesional del  
C. ALEJANDRA NALLELY BUENDIA GONZALEZ  
con No. de control M14011370 egresado del Instituto Tecnológico de Orizaba,  
pasante de la maestría en: CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA se  
realizará el día: Lunes 17 de Octubre de 2016 a las 13 :00 horas en  
la SALA AUDIOVISUAL de POSGRADO. For lo que se pide su puntual asistencia.

ATENTAMENTE

P.A.   
ING. JOSUE JOEL RIVERA MONTALVO  
Jefe de la División de Estudios Profesionales

c.c.p. Archivo  
c.c.p. Candidato  
c.c.p. Recursos Humanos  
c.c.p. Departamento académico  
c.c.p. Departamento de Servicios Escolares

---

“El éxito en la vida  
no se mide por lo que has  
logrado,  
sino por los obstáculos que has  
tenido  
que enfrentar en el camino”.

---

---

## **-Mahatma Gandhi-**

### **AGRADECIMIENTOS**

#### **Dra. Guadalupe Luna Solano**

Le agradezco de manera especial por confiar en mí y haberme permitido formar parte de su equipo de trabajo, por su asesoría y apoyo a lo largo de la maestría. Gracias por compartir sus experiencias tanto profesionales como personales, por los consejos brindados y por la motivación para seguir adelante, de usted me llevo muy grabado que "Todas las etapas son bonitas si se disfruta lo que se hace" y que "No se debe tener miedo a lo que siga", también le agradezco la sencillez e integración que presenta con sus estudiantes, ya que eso propicia un buen ambiente dentro del laboratorio y que es fundamental para lograr éxito en conjunto.

#### **Dr. Galo Rafael Urrea García**

Le agradezco por su tiempo invertido en el seguimiento y revisión del presente trabajo, por las aportaciones brindadas para el enriquecimiento de esta tesis y por los conocimientos proporcionados en las clases impartidas.

#### **Dr. Denis Cantú Lozano**

Le agradezco su colaboración en mi formación académica, tanto en las asignaturas cursadas con usted como en la revisión de esta tesis, proporcionando observaciones con la finalidad de mejoras en el trabajo. También le agradezco su

---

disponibilidad, sencillez y amabilidad que siempre presentó ante cualquier situación.

**Dr. Juan Manuel Méndez Contreras**

Le agradezco por haber formado parte de mi comité y por la atención prestada ante mi proyecto de investigación.

**CONACYT**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Química que se imparte en esta institución con el número de registro 618942.

**DEDICATORIAS**

**A DIOS**

Por guiarme a diario en mi andar, por darme la capacidad y entendimiento de tomar las decisiones correctas para poder desempeñarme de la mejor manera posible y por haberme mandado a este mundo en el momento exacto y con las personas correctas.

**A MIS PADRES**

Porque sin duda alguna este logro también es de ustedes, gracias por ser los pilares que me sostienen día a día y por ser la luz que ilumina mi recorrido por esta vida, por apoyarme en las decisiones que tomo e impulsarme en mi crecimiento profesional y personal; por enseñarme a nunca rendirme y a que en la vida se tienen tropiezos y

---

caídas, pero siempre hay que levantarse y seguir adelante con toda la actitud. Están más que sabidos cuanto los Amo y lo bendecida que me siento por tener unos padres tan maravillosos y ejemplares como ustedes, gracias por hacer de mí una persona de bien, por educarme e inculcarme valores que han sido mi pase de entrada en muchas ocasiones. Gracias por depositar su confianza en mí y acompañarme a lo largo de esta nueva etapa de mi vida.

### **A MI HERMANA**

Por el apoyo incondicional, porque aunque eres más pequeña me has enseñado mucho de la vida, de ti he aprendido a buscar más allá de las cosas, a que todo pasa por algo y más aún, a no tener miedo y arriesgarme. Gracias por hacer de mis momentos de estrés total, momentos de risas, diversión y regalarme un respiro de tranquilidad, gracias por ser mi amiga, cómplice y mi confidente, por escucharme y estar siempre para mí. Recuerda que siempre has sido, eres y serás el motorcito que me impulse a seguir adelante. Te Amo hermani.

### **A ROSY**

Por los 38 años de amistad que nos avalan amiga, por todo lo que nuestra amistad implica también te dedico este trabajo, por ser mi compañera y amiga a lo largo de mi vida estudiantil, porque más allá de la escuela, tenemos un sin número de experiencias compartidas. Quien diría que aquellas pequeñas de tan solo 4 años que no tenían ni la más mínima idea de lo que sería de sus vidas, terminarían un posgrado a la par. Gracias por todo lo que me has brindado amiga, por estar conmigo cuando más te he necesitado, por apoyarme en mi locura pero también en mi cordura. Porque así como trabajamos en la conservación de alimentos, trabajemos día a día en

---

la conservación de nuestra bonita e irrompible amistad. Te adoro amiga.

### **A JOSÉ MARÍA**

Porque sin pedirlo ni pensarlo, llegaste en un momento clave para formar parte de mi vida y me has tomado de la mano para caminar conmigo durante esta etapa. Te agradezco por el apoyo que me has brindado y por el impulso que me das a diario, por permitir que me apoye en ti en momentos de carga excesiva y por hacerme ver siempre el lado positivo de las cosas. Gracias mi pequeño Saldaña por regalarme esa sonrisa y un motivo más para seguir luchando y crecer cada vez más. Te Amo.

### **A MIS AMIGOS DE GENERACIÓN**

Adán, Lore, Mary y Leo, muchas gracias por las buenas experiencias que me han dejado, por compartir parte de ustedes conmigo y por ser tan bellas personas, Mariana y Emanuel, sin ustedes las clases no habrían tenido ese toque especial, gracias por minimizar la carga y el estrés con sus bromas y su peculiar forma de ser, saben que son unas personas muy especiales para mí. Los quiero amigos.

### **A MIS AMIGOS DEL LABORATORIO**

Buen Alfred que te puedo decir, gracias totales por ser tan buen sensei, compañero y amigo, aunque me explotabas al principio, al final pude darme cuenta que todo sacrificio tiene su recompensa; gracias por compartir de tus conocimientos y experiencias, por darme la confianza de ser parte de tu trabajo y por la motivación para seguirme formando como investigador, también agradezco cada uno de los consejos que sin duda me ayudaron mucho en su momento y fueron claves para mucho de lo que hoy vivo. Cinthia, gracias por recibirme en la mesa 2 y

---

por brindarme tu ayuda cuando la requerí, porque fuiste una buena sensei segunda, por ser siempre tan amable, profesional y una gran amiga. Jose te agradezco tu apoyo y conocimiento brindado, las pláticas cortas pero muy detalladas e informativas, me quedo con algo valioso de esta convivencia y eso es tu amistad. Camilo, muchas gracias por la amistad brindada y por ser un chico tan accesible cuando se le requería, por los desayunos y por hacer de un saludo una plática. Calis gracias por hacer que siempre estuviera sentada derechita y por dejar que pudiera deshacerme de un poco de estrés cuando hacías acto de presencia en el laboratorio, gracias por tu amistad. Alain gracias por compartir tus conocimientos, por esas pláticas interminables y por tan buenas películas, gracias por ser tan buen compañero y amigo. Darwin, mi muchachito, muchas gracias por la amistad y las experiencias vividas durante tu estancia, algunas más extremas que otras y aunque tu estadía fue corta, fue suficiente para ganar un amigo. Yesenia muchas gracias por brindarme tu amistad y por compartir tus experiencias y conocimientos adquiridos a lo largo de tu formación. Cande gracias por ser tan accesible, amable y por tus conocimientos aportados, fue un gusto compartir vivencias contigo. Todos y cada uno han dejado huella en mí, los quiero mucho.

### **A MIS VIEJOS AMIGOS**

Tepi, David, Isabel, Iván, Lalo y Juan, muchas gracias por apoyarme, algunos a distancia pero siempre al pendiente de mí, gracias por confiar y motivarme para alcanzar lo que me propongo, por regalarme de su tiempo para una plática y por los consejos dados, ya sea en el ámbito personal o profesional. Los quiero mucho mis amigos.

---

Esta tesis formó parte del proyecto global “Optimización del proceso de secado de queso fresco y suero aplicando la metodología de superficie de respuesta” (proyecto ORZ-PYR-2015-0132) que se desarrolló en el Instituto Tecnológico de Orizaba durante el periodo Agosto 2015 – Julio 2016.

Las presentaciones en congresos y publicaciones obtenidas de esta tesis se enlistan a continuación:

### **PRESENTACIONES EN CONGRESOS**

2015	Ponencia	Efecto de las variables del proceso de secado por lecho fluidizado sobre el queso fresco. Presentación en el Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, Evento Internacional 2015. Orizaba, Veracruz, México. 22-23 Octubre 2015.
2016	Ponencia	Efecto del almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de queso jarocho deshidratado. Presentación en el I Encuentro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería Delegación Oaxaca. Tuxtepec, Oaxaca, México. 7-8 Julio 2016.
2016	Póster	Effect of fluidized bed drying on physicochemical and microbiological properties of Mexican fresh cheese. Presentation in the IFT 16 Annual Meeting & Food Expo. Chicago, IL, USA. 16-19 Julio 2016.

### **PUBLICACIONES**

2015	Buendía González, A.N., Domínguez Niño, A., Urrea García, G.R. y Luna Solano, G. Efecto de las variables del proceso de secado por lecho fluidizado sobre el queso fresco. <i>Revista Coloquio de Investigación Multidisciplinaria</i> , Vol. 3, Núm. 1. Octubre 2015. Orizaba, Veracruz, México.
2016	Domínguez-Niño, A., Buendía-González, A.N., Cantú-Lozano, D., Andrade-González I. y Luna-Solano, G. 2016. Efecto del secado por lecho fluidizado sobre las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de queso fresco mexicano. <i>Revista Mexicana de Ingeniería Química</i> . Artículo aceptado.

---

---

## RESUMEN

### Secado por lecho fluidizado de queso fresco

**Elaborada por: Ing. Alejandra Nallely Buendía González**

**Dirigida por: Dra. Guadalupe Luna Solano**

**Dr. Galo Rafael Urrea García**

El queso fresco artesanal mexicano es tradicionalmente elaborado de leche cruda, frecuentemente salado y susceptible a cambios causados por enzimas y microorganismos promotores del deterioro, generando alteraciones en el producto a nivel sensorial y nutricional. El objetivo principal de este estudio fue evaluar el efecto de las variables del proceso de secado por lecho fluidizado sobre las características fisicoquímicas del queso. Se utilizó un diseño compuesto central rotatable  $2^3+2(3)+1$  para establecer las condiciones del proceso. Las variables independientes investigadas fueron tiempo de secado 60, 90 y 120 min, temperatura del aire de secado 50, 60 y 70 °C y tamaño de partícula 0.5, 2 y 3.5 cm. El análisis de varianza indicó que el tiempo y la temperatura de secado afectaron significativamente ( $p \leq 0.10$ ) sobre las variables dependientes del queso deshidratado. De acuerdo con los resultados al final del proceso, los mínimos valores para el contenido de humedad, actividad de agua, diferencia de color, contenido de NaCl y grasa fueron: 0.31%, 0.22, 6.63, 1.50% y 38.07%, también cabe mencionar que el mayor contenido de proteínas que se obtuvo fue 39.45%. El secado por lecho fluidizado es una alternativa eficiente para la conservación de alimentos, debido a la alta reducción de agua en un producto perecedero por naturaleza. Durante el secado por lecho fluidizado las muestras deshidratadas a 50 y 60 °C generaron productos estables debido a la reducción del contenido de humedad y actividad de agua a valores menores al 10% y 0.6 respectivamente. Así mismo, a medida que incrementó la temperatura de secado de 50 a 70 °C aumentó la diferencia de color y contenido de grasa en el producto deshidratado. El contenido de cloruro de sodio presentó una tendencia decreciente al reducir la temperatura de 70 a 50 °C debido a la baja concentración de sólidos. Sin embargo se observó de manera evidente una tendencia creciente del contenido de proteínas al aumentar la temperatura de secado de 50 a 70 °C, debido a que la cantidad de sólidos aumenta a razón de que el agua residual disminuye.

---

---

## ABSTRACT

### Fluidized bed drying of fresh cheese

**By: Ing. Alejandra Nallely Buendía González**

**Advisor (s): Dra. Guadalupe Luna Solano**

**Dr. Galo Rafael Urrea García**

Artisan Mexican fresh cheese traditionally made from raw milk, is often salted and susceptible to changes caused by enzymes and spoilage microorganisms, generating alterations in the product at the sensory and nutritional level. The main objective of this study was to evaluate the effect of process variables of fluidized bed drying on the physicochemical characteristics of the cheese. A  $2^3+2(3)+1$  rotatable central composite design was used to establish the fluidized bed drying conditions. The independent variables investigated were drying time 60, 90 and 120 min, drying air temperature 50, 60 and 70 °C, and particle size 0.5, 2 and 3.5 cm. The analysis of variance indicated that time and drying temperature affected significantly ( $p \leq 0.10$ ) on independent variables of dried cheese. According with results the lowest values at the end of the process to moisture content, water activity, color difference, NaCl and fat were: 0.31%, 0.22, 6.63, 1.50% and 38.07% respectively, also it is noteworthy that the highest protein content was 39.45%. Fluid bed drying is an efficient alternative for food preservation, due to high water reduction in a perishable in nature. During the drying fluidized bed drying samples at 50 and 60 ° C generated stable products due to the reduction in moisture content and water activity to lower values than 10% and 0.6, respectively. Also, as the drying temperature increases from 50 to 70 °C color difference and fat content in dried product increased. Sodium chloride content showed a diminution as the drying temperature decrease from 70 to 50 ° due to the low concentration of solids. However a growing trend in protein content by the increment in drying temperature from 50 to 70 °C was observed, this was expected because at these drying conditions dehydrated cheese had the final lowest moisture content.

---

---

## ÍNDICE

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	IV
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	VI
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	3
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	3
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	4
<b>CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	5
1.1 Generalidades del queso .....	6
1.1.1 Clasificación y características del queso .....	7
1.1.2 Queso fresco .....	8
1.1.3 Proceso de fabricación del queso fresco .....	8
1.1.4 Producción de queso .....	10
1.1.5 Aplicaciones del queso .....	10
1.2 Proceso de secado .....	11
1.2.1 Curva de secado .....	11
1.2.2 Métodos y equipos de secado .....	13
1.2.3 Etapas del secado por lecho fluidizado .....	18
1.3 Propiedades fisicoquímicas de los alimentos .....	19
1.3.1 Humedad (X) .....	20
1.3.2 Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	22
1.3.3 Color y sus sistemas de medición .....	24
1.4 Diseño experimental .....	28
1.5 Antecedentes del secado de queso .....	29
<b>CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	31
2.1 Metodología general .....	32

---

2.2 Selección de la materia prima .....	33
2.3 Acondicionamiento de las muestras .....	33
2.4 Caracterización fisicoquímica .....	33
2.4.1 Sólidos totales .....	34
2.4.2 Determinación de humedad (X) .....	34
2.4.3 Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	34
2.4.4 Determinación de los parámetros de color .....	34
2.4.5 Proteínas .....	35
2.4.6 Cenizas .....	36
2.4.7 Grasas .....	36
2.4.8 pH .....	37
2.4.9 Cloruro de sodio (NaCl) .....	37
2.5 Proceso de secado por lecho fluidizado .....	37
2.5.1 Equipo para secado de queso fresco .....	38
2.6 Diseño experimental .....	39
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>41</b>
3.1 Caracterización fisicoquímica del queso fresco .....	42
3.2 Secado por lecho fluidizado de queso fresco .....	43
3.2.1 Contenido de humedad y actividad de agua .....	44
3.2.2 Análisis estadístico del contenido de humedad .....	45
3.2.3 Análisis estadístico de la actividad de agua .....	48
3.2.4 Diferencia de color .....	50
3.2.5 Análisis estadístico de la diferencia de color .....	51
3.2.6 Contenido de proteínas .....	53
3.2.7 Análisis estadístico del contenido de proteínas .....	53
3.2.8 Contenido de grasa .....	55
3.2.9 Análisis estadístico del contenido de grasa .....	55
3.2.10 Contenido de NaCl .....	57
3.2.11 Análisis estadístico del contenido de NaCl .....	57
3.3 Superficie de respuesta .....	59
3.3.1 Superficie de respuesta de la humedad final del queso deshidratado .....	59

---

3.3.2 Superficie de respuesta de la $a_w$ final del queso deshidratado .....	62
3.3.3 Superficie de respuesta de $\Delta E$ del queso deshidratado.....	64
3.3.4 Superficie de respuesta del contenido de proteínas final del queso deshidratado .....	66
3.3.5 Superficie de respuesta del contenido final de grasa del queso deshidratado.. .....	69
3.3.6 Superficie de respuesta del porcentaje final de NaCl del queso deshidratado . .....	71
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

---

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Pág.</b>
1.1	Diagrama del proceso de elaboración del queso.....	9
1.2	Curva de velocidad de secado.....	12
1.3	Secador por bandejas.....	14
1.4	Secador rotatorio.....	16
1.5	Secador continuo de túnel.....	17
1.6	Secador por lecho fluidizado.....	18
1.7	Diagrama del proceso de secado por lecho fluidizado.....	19
1.8	Gráfica de tipos de humedad.....	22
1.9	Diagrama Hunter L, a, b.....	26
1.10	Diagrama sistema CIELAB.....	27
1.11	Diseño compuesto central centrado en las caras para k=3.....	28
2.1	Metodología general para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco.....	32
2.2	Acondicionamiento de muestras de queso con longitud de: a) 0.5 cm, b) 2.5 cm y c) 3.5 cm.....	33
2.3	Secador por lecho fluidizado Retsch TG-200.....	38
3.1	Queso fresco y diagrama Hunter L, a, b.....	43
3.2	Graficas de la comparación de medias de la variable respuesta humedad: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo.....	47
3.3	Graficas de la comparación de medias de la variable respuesta actividad de agua: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo.....	49
3.4	Muestras de queso deshidratado.....	50
3.5	Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta $\Delta E$ : a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo.....	52
3.6	Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta contenido de proteína: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo.....	54
3.7	Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta	

---

	contenido de grasa: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo.....	56
3.8	Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta contenido de NaCl: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo.....	58
3.9	Superficie de respuesta del contenido de humedad en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula.....	60
3.10	Superficie de respuesta del contenido de $a_w$ en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula.....	63
3.11	Superficie de respuesta de la $\Delta E$ en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula.....	65
3.12	Superficie respuesta del contenido de proteínas en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula.....	68
3.13	Superficie respuesta del contenido de grasa en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula.....	71
3.14	Superficie de respuesta del porcentaje final de NaCl en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula.....	73

---

---

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Pág.</b>
1.1	Composición química y valor nutrimental del queso.....	7
2.1	Factores y niveles para el proceso de secado por lecho fluidizado....	39
2.2	Experimentos para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco.....	40
3.1	Caracterización fisicoquímica del queso fresco.....	42
3.2	Variables de respuesta del proceso de secado por lecho fluidizado...	44
3.3	Análisis de varianza de la variable de respuesta contenido de humedad.....	46
3.4	Análisis de varianza de la variable de respuesta actividad de agua...	48
3.5	Análisis de varianza de la variable de respuesta diferencia de color..	51
3.6	Análisis de varianza de la variable de respuesta contenido de proteínas.....	53
3.7	Análisis de varianza de la variable de respuesta contenido de grasa.	55
3.8	Análisis de varianza de la variable de respuesta NaCl.....	57
3.9	Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de respuesta humedad.....	59
3.10	Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta $a_w$ .....	62
3.11	Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta $\Delta E$ .....	64
3.12	Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta contenido de proteínas.....	67
3.13	Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta contenido de grasa.....	69
3.14	Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta contenido de NaCl.....	72

---

---

## INTRODUCCIÓN

El queso es el producto obtenido por coagulación de la leche cruda o pasteurizada (entera, semidescremada o descremada), constituido esencialmente por caseína de la leche en forma de gel parcialmente deshidratado. Mediante este proceso se logra preservar el valor nutritivo de la mayoría de los componentes de la leche, incluidos las grasas, proteínas y constituyentes menores, generando un sabor especial y una consistencia sólida o semisólida en el producto obtenido (Ramírez-López y Velez-Ruiz, 2012).

Los quesos pueden ser clasificados como suaves, semiduros y duros basados en el contenido de humedad. Los quesos suaves constituyen la mayoría de los quesos latinoamericanos y poseen un alto contenido de humedad, dentro de esta clasificación se encuentran los quesos frescos, los cuales presentan un contenido de humedad de 41-59%, 17-21% de proteínas, 18-29% de grasa, 1-3% de sal y un pH de 5.3-6.5 (Hnosko *et al.*, 2009; Farkye, 2006). A parte de su consumo directo, el queso puede ser utilizado como ingrediente alimenticio por sus propiedades funcionales tales como proveedor de aroma, sabor, apariencia y propiedades adhesivas.

Para obtener esas propiedades funcionales, el queso necesita ser procesado y el proceso industrial más efectivo es el secado, definido como la remoción de agua en materiales o alimentos, preservando la calidad del producto.

El secado de productos alimenticios es complicado debido a las transformaciones físicas, químicas y bioquímicas que pueden ocurrir durante el proceso, algunas de las cuales son deseables. El secado convectivo es una de las operaciones más empleadas para la deshidratación de alimentos. Entre los cuales se encuentra el secado por lecho fluidizado, el cual presenta una alta tasa de remoción de humedad,

---

alta eficiencia térmica, fácil transporte de material dentro del secador, fácil de controlar y bajos costos de mantenimiento (Law y Mujumdar, 2014).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de las variables del proceso de secado por lecho fluidizado sobre las características fisicoquímicas del queso.

---

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de las variables del proceso de secado por lecho fluidizado sobre las características fisicoquímicas del queso.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar fisicoquímicamente el queso fresco.
- Determinar la humedad, actividad de agua y color (L, a, b,  $\Delta E$ ) del queso obtenido a diferentes condiciones del secado por lecho fluidizado.
- Cuantificar el contenido de proteínas, NaCl y grasas del queso fresco y queso deshidratado.
- Evaluar estadísticamente el efecto de las variables de operación del proceso de secado sobre la humedad,  $a_w$ , color, contenido de proteínas, NaCl y grasa de las muestras de queso deshidratado.

---

## JUSTIFICACIÓN

El queso fresco a nivel nacional figura como el primer subproducto lácteo consumido por la población, dicho producto se genera con la intención de preservar el valor nutritivo de la mayoría de los componentes de la leche, incluidos las grasas, proteínas y constituyentes menores, generando un sabor especial y característico. Por otro lado posee un alto contenido de humedad que lo convierte en un producto inestable, por lo que es factible desarrollar nuevas alternativas que permitan generar un producto con características fisicoquímicas similares a las del queso fresco, tratando de preservar sus propiedades nutricionales y organolépticas. Sin embargo, no se ha aplicado algún proceso para obtener un alimento con alto valor agregado a partir del queso que permita aprovechar sus nutrientes.

Una alternativa eficiente para el procesamiento y conservación de productos alimenticios es el secado, y en este caso la opción más viable es el secado por lecho fluidizado, ya que permite obtener productos de alta calidad sin alterar sus propiedades fisicoquímicas y que podría ser aplicado al queso para obtener un producto deshidratado de alto valor nutritivo. De igual manera los costos de producción, almacenaje y transporte se verían favorecidos debido al cambio de peso y volumen del producto final.

**CAPÍTULO 1**  
**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1 Generalidades del queso

A partir de la leche se elaboran diversos productos ampliamente aceptados por la mayoría de la población, dentro de los cuales destaca el queso, que desde el punto de vista nutricional es considerado como un alimento altamente nutritivo, debido a su variado contenido de materias nitrogenadas, materias grasas, calcio, fósforo y vitaminas.

Los quesos se consumen desde hace muchos siglos y su preparación se realizaba como un método de conservación de la leche. La elaboración del queso se ve condicionada por varios factores, entre los que se tiene la temperatura, el pH, la concentración del agente coagulante, entre otros (Ramírez-López y Vélez-Ruiz, 2012).

Los pasos fundamentales para su elaboración incluyen la coagulación de la leche, el cortado del coágulo, la eliminación del suero (desuerado), el salado, el prensado y la maduración (si se requiere). Los quesos denominados “frescos”, son los más comunes en México, no requieren maduración y usualmente se consumen salados o sazonados con especias (Saca, 2011).

En el mundo existen aproximadamente 1000 variedades de quesos que comparten diversos pasos en su elaboración. Las diferencias de textura, aroma, sabor, etcétera, se deben fundamentalmente a los factores como: a) tipo de leche: vaca, oveja, cabra, búfala, etc; b) calidad de la leche: pasteurizada, cruda, pasteurizada en “frío”, etc; c) relación de concentraciones grasas-proteínas; d) tipos de microorganismos y enzimas añadidos; e) velocidad e intensidad del desarrollo de la acidez; f) tipo y concentración de la enzima coagulante; g) grado y forma de deshidratación del coágulo; h) cantidad y forma de adición de la sal; i) forma y tamaño del queso; j) condiciones de maduración, temperatura, humedad, etcétera; k) tratamientos

superficiales del queso (encerado); perforaciones en el queso para permitir la entrada de aire, y m) adición de enzimas o microorganismos para efectuar la maduración (Badui, 2006).

### 1.1.1 Clasificación y características del queso

El queso contiene de forma concentrada la mayoría de los nutrientes de la leche, a excepción de la lactosa; lo cual se debe en gran parte a la pérdida de agua que se origina durante la elaboración del queso. Además de brindar un gran aporte de proteína con alto valor biológico, el queso se destaca por ser fuente importante de calcio y fósforo (Tabla 1.1). Los procesos tecnológicos empleados en la elaboración del queso no alteran el valor nutritivo de la proteína de la leche (USDA, 2014).

**Tabla 1.1** Composición química y valor nutrimental del queso, (USDA, 2014)

Queso Fresco	Contenido por cada 100 g
Calorías (kcal)	310
Lípidos (g)	24
Colesterol (mg)	70
Sodio (mg)	204
Potasio (mg)	126
Fosforo (mg)	467
Glúcido (g)	2.5
Proteína (g)	20
Vitamina A (IU)	555
Vitamina B6 (mg)	0.1
Hierro (mg)	0.2
Magnesio (mg)	29
Calcio (mg)	690
Vitamina D (IU)	27
Vitamina B <sub>12</sub> (µg)	1.8

### 1.1.2 Queso fresco

El queso hispano es el más popular en los EE. UU., y México, este es un queso obtenido por coagulación con cuajo, elaborado a partir de la leche descremada. Este tipo de queso contiene una humedad entre 46-57%, 18-29% de grasa, 17-21% de proteína, sal de 1-3% y un pH > 6 (Tunick *et al.*, 2012).

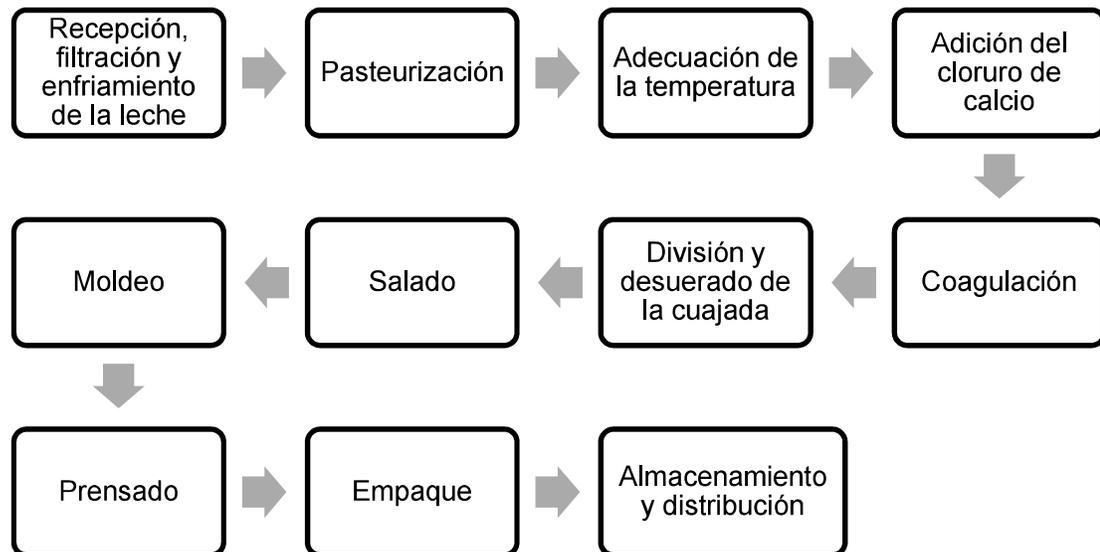
El queso fresco presenta diferentes nombres según la región de producción y numerosas variantes en cuanto a la técnica de elaboración. De acuerdo a la norma oficial mexicana (NOM-121-SSA-1994) el queso fresco se caracteriza por un alto contenido de humedad (debido al suero que retiene durante la coagulación de la caseína en el proceso de elaboración), sabor suave y un periodo de vida de anaquel muy corto, por lo cual requiere de refrigeración (Ochoa-Flores *et al.*, 2013). Los quesos que se consideran de tipo fresco son: panela, ranchero, fresco, blanco, Oaxaca, asadero, adobera, requesón, queso crema, entre otros.

El proceso de elaboración del queso es bastante simple, sin embargo, involucra fenómenos físicos y químicos complejos (Ramírez-López y Vélez-Ruiz, 2012).

### 1.1.3 Proceso de fabricación del queso fresco

La elaboración del queso fresco consiste básicamente en 11 etapas y se presenta de manera general en la Figura 1.1. Inicialmente se recibe la leche, la cual se somete a una serie de pruebas para asegurar su calidad en los aspectos químicos, físicos y biológicos, una vez realizado lo anterior, se lleva a cabo el acondicionamiento de la materia, que consiste en almacenar la leche a temperaturas inferiores a 10 °C (es importante y primordial el almacenamiento de la leche cruda para limitar el contenido bacteriano), esta es llevada a la siguiente etapa la cual consiste en la pasteurización (72 °C por periodos de 15 s), posteriormente se realiza la adecuación de la temperatura de la leche (37 °C) y se adiciona cloruro de calcio, que tiene como

intención conservar la consistencia y rendimiento de la leche. A continuación, se lleva a cabo la coagulación de la leche, que consiste en agregar un cuajo líquido a base de quimosina, una vez agregado, se espera 45 min.



**Figura 1.1** Diagrama del proceso de elaboración del queso

Pasado el tiempo se realiza el rompimiento y desuerado de la cuajada con la ayuda de una lira vertical y horizontal, se deja reposar 15 min para luego drenar el 70 % del suero. La siguiente etapa es el salado que consiste en agregar sal yodada refinada libre de impurezas, una vez salada la cuajada se moldea rápidamente, después se realiza el prensado que permite bajar la humedad de la cuajada logrando una mejor consistencia. Las técnicas de empaque varían de acuerdo a los fabricantes pero consiste básicamente en colocar el queso en bolsas de polietileno esterilizado con agua caliente, se etiquetan con la fecha visible tanto de elaboración como de expiración del queso. Finalmente, el almacenamiento y la distribución deben realizarse a temperaturas no mayores de 4 °C. Cabe destacar que el producto bajo temperaturas de 4 °C tiene una vida útil promedio de 12 días (González, 2002).

#### **1.1.4 Producción de queso**

El queso es uno de los principales productos agrícolas del mundo, según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) se produce anualmente 20 222 000 toneladas, siendo Estados Unidos el mayor productor de queso con 5 093 000 toneladas, seguido por Alemania y Egipto con 2 029 000 y 644 000 toneladas, respectivamente. En América Latina y el Caribe, México ocupa la segunda posición en la producción anual de queso con 154 000 toneladas, de las cuales 56 095 toneladas corresponden a la producción de queso fresco (FAO, 2013).

De acuerdo a Rodríguez-Huezo y Durán-Lugo (2012), Francia es el mayor exportador de queso con un aproximado de 400 000 toneladas anualmente, seguido por Alemania e Italia. Por otra parte, dentro de los países con mayor consumo anual de queso se encuentra en primer lugar, Grecia con un aproximado de 29 kg por persona, Francia es el segundo consumidor mundial con alrededor de 24 kg por persona y en tercera posición se encuentra Italia con 22.9 Kg por persona. Así, México puede considerarse un país con muy bajo consumo anual de queso de 2.8 kg por persona.

#### **1.1.5 Aplicaciones del queso**

El queso tiene un gran número de aplicaciones entre las que se encuentra su consumo como aperitivos o tapas, por si solos, su aporte en ensaladas o como acompañante de platos de pasta, carnes, pescados o bien, su participación en salsas y cremas. El uso del queso es extenso, y logrando darle el punto óptimo en su fabricación, este puede ser ampliamente empleado en la gastronomía (Requena, 2012).

## 1.2 Proceso de secado

El secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor mediante aire caliente. El contenido de humedad en el producto seco final varía dependiendo el producto.

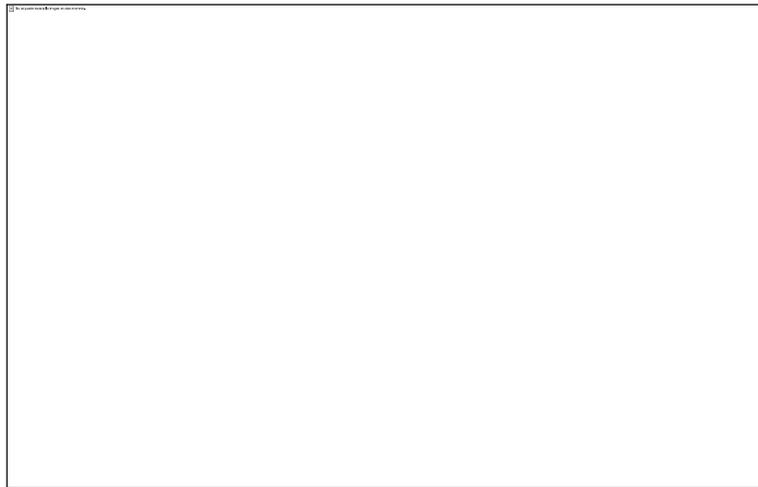
El secado de los materiales biológicos, es un método para lograr la conservación de dichos materiales, este principio se ha utilizado desde la antigüedad para extender la vida útil de los productos alimenticios (Mulet *et al.*, 2003), debido a que los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua. Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10%. Sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en los alimentos, para preservar su sabor y su valor nutritivo. Los alimentos secos pueden almacenarse durante periodos prolongados (Geankoplis, 1998).

Los parámetros a determinar en el proceso de secado tales como la humedad y la actividad de agua, dependen fuertemente de las condiciones de aire de entrada y el tamaño del material, siendo la temperatura el factor más importante durante el proceso de deshidratación.

### 1.2.1 Curva de secado

Cuando un sólido se seca, por lo regular, se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con respecto al tiempo  $t$ , generando una curva que representa el caso general en que el sólido pierde humedad, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un periodo de evaporación de la

superficie saturada que tiene un área gradualmente decreciente y, por último, cuando el agua se evapora en el interior del sólido indica que la velocidad de secado está sujeta a variación en función del tiempo. Esta variación se puede observar con mayor claridad con una curva de velocidad (Figura 1.2), la cual muestra que el secado no es un proceso suave y continuo en que un solo mecanismo ejerce el control a lo largo de toda su duración.



**Figura 1.2** Curva de velocidad de secado (Lozano-Acevedo, 2007)

En la sección A-B la curva representa un periodo de calentamiento del sólido, en el periodo B-C es donde la velocidad de secado empieza a aumentar, en el punto C-D se representa el periodo de velocidad constante y por último el punto D-E representa el periodo de velocidad decreciente.

Esta es una curva característica de secado que refleja el paso del sólido por distintos periodos a medida que la humedad del sólido se reduce desde un valor inicial elevado  $Y_i$  hasta el pequeño valor final, que puede incluso ser la humedad de equilibrio  $Y_e$  (Lozano-Acevedo, 2007).

### 1.2.2 Métodos y equipos de secado

Los métodos y procesos de secado se clasifican de diferentes maneras; se dividen en procesos por lotes, cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo de tiempo; o continuos, si el material se introduce sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Los procesos de secado se clasifican también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua:

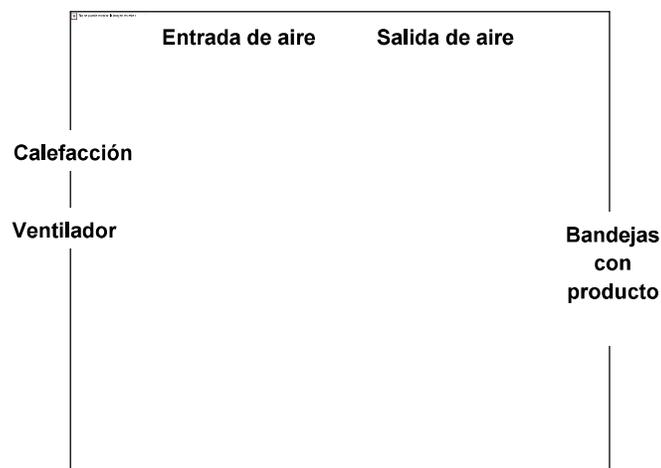
1. En la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua se elimina por medio del mismo aire.
2. En el secado a vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación (también pueden usarse bajas temperaturas con vacío para ciertos materiales que se decoloran o se descomponen a temperaturas altas).
3. En la liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado. Este proceso de secado se ha desarrollado con el fin de reducir las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y el aroma en los alimentos o cualquier material biológico; ya que normalmente son volátiles o termo-sensibles, y por lo tanto se ven afectados en gran medida durante los procesos convencionales (Orrego, 2003).

- **Secador por bandejas**

También llamado, secador de anaqueles, de gabinete o de compartimientos, el material puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad.

Un secador de bandejas típico, tal como el que se muestra en la Figura 1.3, tiene bandejas que se cargan y descargan de un gabinete. Un ventilador recircula un aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo y el resto es aire recirculado.

Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se reemplazan con otras con más material para secar. Una de las modificaciones de estos tipos de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador (Hernández, 2013). Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador.



**Figura 1.3** Secador por bandejas (Hernández, 2013)

En el caso de materiales granulares, el material se coloca sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz, que permite que el aire pase por un lecho permeable y da lugar a tiempos de secado más cortos, debido a una mayor área superficial expuesta al aire.

- **Secadores indirectos al vacío con anaqueles**

Los secadores al vacío con anaqueles se calientan indirectamente y son del tipo de lotes, similares a los de las bandejas. Esta clase de secadores consta de un gabinete construido de hierro colado o plancha de acero con puertas herméticas, de tal manera que se pueda operar al vacío.

Los anaqueles huecos de acero se montan dentro de las cámaras y se conectan en paralelo, con los conectores de vapor de entrada y salida. Las bandejas que contienen los sólidos mojados se colocan sobre los anaqueles huecos.

El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Para operaciones a temperaturas más bajas, se usa circulación de agua caliente en lugar de vapor para suministrar el calor que vaporiza la humedad. Los vapores se colectan en un condensador.

Estos secadores se utilizan para secar materiales costosos o sensibles a la temperatura, o bien que se oxidan fácilmente. Son muy útiles para manejar materiales con disolventes tóxicos o biológicos.

- **Secadores rotatorios**

Un secador rotatorio consta de un cilindro hueco que gira por lo general sobre su eje, con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior, tal como se muestra en la Figura 1.4 y se desplazan por el cilindro a medida que éste gira. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes mediante un flujo a contracorriente, donde las partículas granulares se desplazan hacia adelante con lentitud y una distancia corta antes de caer a través de los gases calientes (Bohorquez, 2011).

En algunos casos, el calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro.



**Figura 1.4** Secador rotatorio (Bohorquez, 2011)

- **Secadores continuos de túnel**

Los secadores continuos de túnel suelen ser compartimientos de bandejas o carretillas que operan en serie, tal como se muestra en la Figura 1.5. Los sólidos se colocan sobre bandejas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo, o a una combinación de ambos.

Cuando se desea secar partículas sólidas granulares, pueden utilizarse transportadores perforados o de fondo de tamiz (Figura 1.5). Los sólidos granulares húmedos se transportan en forma de una capa que tiene entre 25 y 150 mm de profundidad, sobre una superficie de tamiz o perforada a través de la cual se fuerza el paso de aire caliente, ya sea hacia arriba o hacia abajo.

El secador cuenta con diversas secciones en serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmosfera. En algunos casos, los materiales en forma de pasta pueden preformarse en cilindros y colocarse sobre el transportador para secarse.



**Figura 1.5** Secador continuo de túnel (Hernández, 2013)

- **Secadores por lecho fluidizado**

Estos secadores utilizan el aire caliente como agente de secado y de fluidización simultáneamente (Figura 1.6). El producto se mantiene en estado fluidizado (en ocasiones con ayuda de una vibración mecánica) dando lugar a una gran superficie efectiva de contacto entre el sólido que se seca y el aire. Aunado a esto, el lecho fluidizado está sometido a una acción de mezcla muy intensa, lo que permite utilizar aire caliente a temperaturas muy elevadas. De este modo se consigue una mayor velocidad de transferencia de materia entre el sólido y el aire y se disminuye el tiempo de procesamiento. Debido a que la retención en el secador es pequeña, las instalaciones empleadas son relativamente pequeñas y ocupan poco espacio en la planta.

Los secadores modernos de lecho fluidizado pueden adoptar muchas formas, pero básicamente consisten en una simple cámara provista en su base por una rejilla para distribuir uniformemente los gases calientes a lo largo y ancho del lecho. Los secadores de lecho fluidizado pueden trabajar de forma continua o por carga. En ambos casos se pueden automatizar completamente.

Gracias a la uniformidad perfecta que se consigue en el secado por fluidización, se puede trabajar con aire a la temperatura máxima soportable por el producto, siendo normales las temperaturas de 150 °C e incluso superiores con productos vegetales (Hernández, 2013).

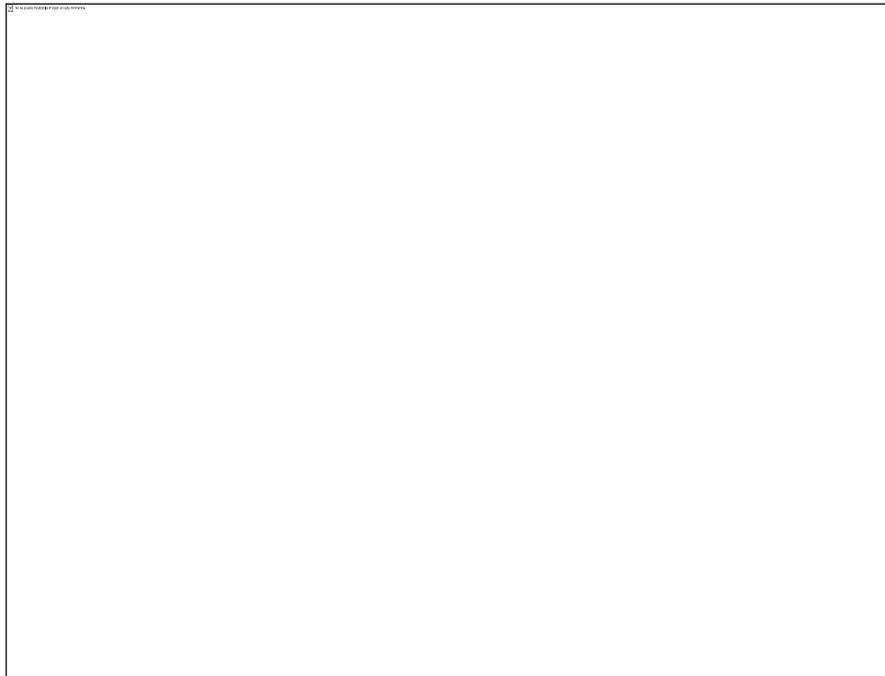


**Figura 1.6** Secador por lecho fluidizado (Hernández, 2013)

### 1.2.3 Etapas del secado por lecho fluidizado

El secado por lecho fluidizado consta principalmente de cuatro etapas como se muestra en Figura 1.7.

- En la primera etapa con un tiempo ( $t_0$ ) y una humedad inicial ( $X_0$ ), existe un ligero movimiento del producto.
- Conforme transcurre el tiempo el movimiento del producto aumenta alcanzando una ligera suspensión.
- En la tercera etapa se tiene una mayor suspensión de la muestra y una ligera expansión.
- Finalmente, en la cuarta etapa se tiene una total distribución del producto en la cámara de secado.



**Figura 1.7** Diagrama del proceso de secado por lecho fluidizado (Lozano-Acevedo, 2007)

Existen dos mecanismos mediante los cuales se pueden realizar la fluidización, uno de ellos es por extracción; en la cual el aire se adquiere en la parte superior del equipo ayudado por un motor; mientras que por impulsión por la parte inferior del equipo utilizando un compresor o bien un ventilador (Lozano-Acevedo, 2007).

### **1.3 Propiedades fisicoquímicas de los alimentos**

En los alimentos existen diferentes estados energéticos en los que se encuentra el agua; es decir, no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades fisicoquímicas, y esto se puede comprobar por las diversas temperaturas de congelamiento que se observan; en general, un alimento se congela a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero aun en estas condiciones una fracción del agua permanece líquida y requiere de temperaturas más bajas, por ejemplo  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  para que se solidifique completamente.

Este tipo de consideraciones ha llevado a que se empleen términos como agua ligada y agua libre, para referencia a la forma y al estado energético que dicho

líquido guarda en un alimento. Se considera que el agua ligada es aquella porción que no congela a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que también se le llama agua no congelable; por otra parte, el agua libre también llamada agua congelable y agua capilar, es la que se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, se congela primero y es la responsable de la actividad de agua (Domínguez, 2014).

Durante el proceso de secado existen diferentes propiedades fisicoquímicas de los alimentos, las cuales son importantes de conocer y de medir para evaluar las características finales de los alimentos deshidratados, ya que estas propiedades definirán la vida útil, calidad y precio del producto terminado.

### **1.3.1 Humedad (X)**

La humedad indica la cantidad de agua presente en una muestra, su estimación durante y después del procesamiento de alimentos se convierte en una parte esencial de la vigilancia y control de calidad (Nuñez, 2016). Todos los alimentos, cualquiera que sea el tipo de procesamiento al que hayan sido sometidos, contienen agua en mayor o menor proporción, oscilando entre 90-95% en verduras y menos de un 5% en alimentos como galletas y harinas.

El agua se encuentra en los alimentos en dos formas generales: como “agua libre” y “agua ligada”. El agua libre es la forma predominante, se libera con gran facilidad y es estimada con la mayor parte de los métodos usados en el cálculo de la humedad. El agua ligada se encuentra en los alimentos con agua de cristalización (en los hidratos) o ligada a las proteínas. Estas formas requieren para su eliminación en forma de vapor, un calentamiento de distinta intensidad. Aunque parte del agua ligada permanece unida al alimento incluso a la temperatura de carbonización.

En los alimentos, la humedad debe mantenerse dentro de límites establecidos, por lo que su determinación es importante para el control de calidad de los mismos ya que:

- a) Determinados alimentos como: azúcar, sal, etc., se aglomeran con exceso de humedad. En otros como la harina, el exceso de humedad da lugar a grumos y a la aparición de moho, pudiendo también fermentar al ser almacenada en un lugar de ambiente caluroso.
- b) La humedad afecta la textura de determinados alimentos como los derivados cárnicos (por lo que el contenido inapropiado de agua hace que estos pierdan valor comercial).
- c) Permite detectar algunas adulteraciones (por ejemplo el aguado de la leche para su distribución como tal o para la fabricación de quesos).

Existen diferentes métodos para determinar la humedad en los alimentos entre los que se encuentran: por pérdida de peso con estufa de secado, por balanza de humedad, por destilación con disolventes no miscibles, el de Kard Fisher, etc. Sin embargo, suele haber una pobre correlación entre los resultados obtenidos con los distintos métodos, lo que se atribuye a la diferencia en el tipo de agua que se mide con los mismos (Sierra *et al.*, 2007). A continuación se describen términos que se utilizan para describir el contenido de humedad.

Contenido de humedad en base húmeda. El contenido de humedad de un sólido o solución se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que esta expresado en base húmeda (Ec. 1.1), es decir, como:

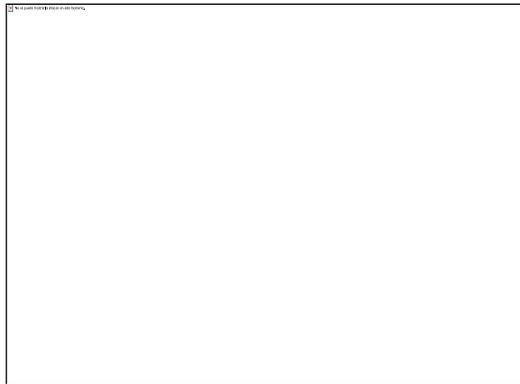
$$\frac{\text{Kg humedad}}{\text{Kg sólido húmedo}} * 100 = \frac{\text{Kg Humedad}}{\text{Kg sólido seco} + \text{Humedad}} * 100 = \frac{100X}{1+X} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Humedad en el equilibrio ( $X^*$ ). Es el contenido de humedad de una sustancia que está en equilibrio con una presión parcial dada del vapor.

Humedad ligada. Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad no ligada. Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad libre. La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio:  $X-X^*$ . Solo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración de vapor en el gas (Treybal, 1998). Estas relaciones se muestran en forma gráfica en la Figura 1.8, para un sólido con un contenido de humedad relativa.



**Figura 1.8** Gráfica de tipos de humedad (Hernández, 2013)

### 1.3.2 Actividad de agua ( $a_w$ )

El agua juega un papel importante en la velocidad con que se deterioran los alimentos. Desde su introducción, hace más de 45 años, el concepto de actividad de agua ( $a_w$ ) ha sido ampliamente usado en la preservación de alimentos y ha servido para mejorar procesos y diseñar nuevos productos.

Aunque el contenido de humedad de un alimento puede ser un factor indicativo de su propensión al deterioro también se ha observado que diferentes alimentos con el mismo contenido de humedad pueden variar en lo que respecta a su estabilidad. El

contenido de humedad es insuficiente para indicar la pericibilidad de un alimento al tomar en cuenta la interacción del agua con los otros componentes del mismo.

El concepto de  $a_w$  es útil en la industria de los alimentos para predecir la estabilidad de los alimentos que contienen una apreciable cantidad de agua y particularmente para predecir de la estabilidad microbiológica de los alimentos concentrados y semihumedos (Chirife y Buera, 1994).

El agua es el componente mayoritario en los alimentos, este contribuye en forma determinante en las características como textura, apariencia, sabor, etc. Por otro lado el agua es un factor importante en el deterioro de los alimentos por el papel que desempeña en diferentes reacciones químicas y enzimáticas, así como en el desarrollo microbiano, que alteran la calidad de los mismos (Fennema, 1994).

La actividad de agua puede ser considerada una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en diferentes reacciones deteriorativas y en el crecimiento microbiano. Puede ser descrita en su forma más simple como la relación de la presión parcial de vapor de agua del alimento dividida por la presión de vapor de agua pura (Ec. 1.2), ambas medidas a la misma temperatura. Su valor varía entre 0 y 1.

En el equilibrio  $a_w$  también se relaciona con la humedad relativa (HR) del medio ambiente que rodea al producto.

$$a_w = \frac{p}{p^0} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde:

$a_w$  = actividad de agua [-]

$p$  = presión parcial de vapor de agua del alimento [kPa]

$p^0$  = presión de vapor de agua pura [kPa]

### 1.3.3 Color y sus sistemas de medición

El sentido físico de las propiedades ópticas de los alimentos, como de cualquier otro material, son las que derivan de los fenómenos de la transformación de la luz que incide sobre ellos: transparencia, turbiedad, luminosidad y brillo.

El color es una de las características importantes para evaluar en un producto, ya que representa la primera impresión del consumidor para aceptarlo, comprarlo y posteriormente consumirlo. Y es definido en el sentido físico como la distribución de la energía de la luz reflejada o transmitida por un alimento en particular.

Sin duda, el color es la propiedad óptica más importante. La transparencia y la opacidad, relacionadas con la cantidad de luz que el material deja pasar a través o que se refleja en él y la turbiedad, relacionadas con el fenómeno de difusión en el seno del material, se aprecian junto con el color.

De mayor importancia tecnológica es la relación que existe entre el color y otros factores de calidad o entre aquel y la composición química en el grado de desarrollo de alteración. La importancia tecnológica de estas relaciones reside en la posibilidad de utilizar el color como índice de transformaciones naturales de los alimentos frescos o de cambios ocurridos en el proceso industrial.

El proceso de secado cambia las condiciones de la superficie del alimento y por tanto, su color y reflectancia. Los cambios químicos experimentados por los pigmentos derivados, carotenos y la clorofila, están producidos por el calor y la oxidación que tienen lugar durante el proceso de deshidratación. Por lo general, cuanto más largo es el proceso de secado y más elevada la temperatura, mayores son las pérdidas en estos pigmentos.

Para entender mejor el tema de color, la medida de color de los alimentos debe distinguirse entre los conceptos color-radiación, color-objeto y color-sensación.

## **Color-radiación**

La luz es esencialmente una radiación electromagnética con longitudes de onda comprendidas entre 380 y 770 nm. Se origina como liberación de energía en procesos térmicos de incandescencia o por excitación de los átomos o moléculas de un gas mediante descargas eléctricas. Al estimular el órgano de la vista se produce entre otras, la sensación de color.

## **Color-objeto**

Cuando se dice que un objeto es de un color, se refiere a la sensación visual que se percibe al observarlo cuando se ilumina con luz blanca. El tipo de sensación depende de la iluminación, de la capacidad del objeto para transformar la luz incidente (color-objeto) y de la percepción humana.

El color-objeto (propiedad del material) se puede medir y definir espectrométricamente, independiente de las características del iluminante y de la capacidad del ojo humano.

## **Color-sensación**

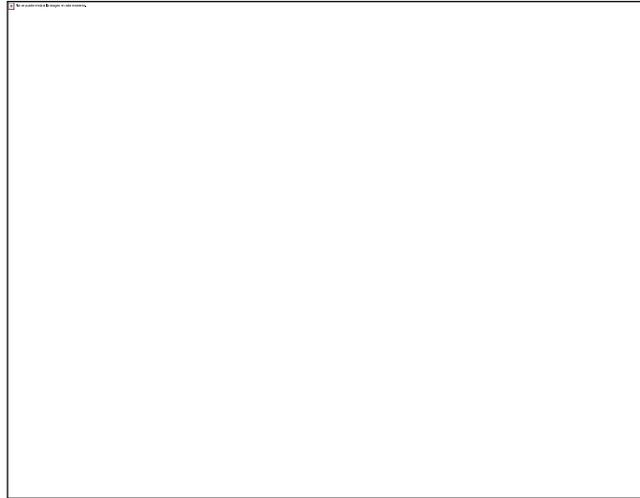
La visión de los colores es en cierta medida comparable entre los distintos seres humanos. De hecho, en la vida diaria, se supone que los colores que percibe otra persona son los mismos que percibe una. Sin embargo, existen personas, cuyas diferencias son tan grandes que se puede decir que poseen una visión cromática “anormal” o “deficiente” (Domínguez, 2014).

## **Sistemas de medición de color**

### **Sistema Hunter**

El espacio de color Hunter  $L$ ,  $a$ ,  $b$  es un espacio de color rectangular de tres dimensiones basadas en la teoría de los colores opuestos de Hering, con estas

nuevas coordenadas se define un espacio cartesiano en el que **L** corresponde a la claridad, **a** y **b** a la cromaticidad (Figura 1.9).



**Figura 1.9** Diagrama Hunter L, a, b (Hunterlab, 2013)

Concretamente **a** define el compuesto rojo-verde; rojo para los valores positivos y verde para negativos. El parámetro **b** define el componente amarillo-azul; amarillo para los valores positivos y azul para los valores negativos. Los colores son tanto más saturados cuando más separados se encuentran del centro del gráfico los puntos que lo definen. Este sistema es el más empleado en los colorímetros Hunter, Garder y similares, muy usados en el campo de los alimentos.

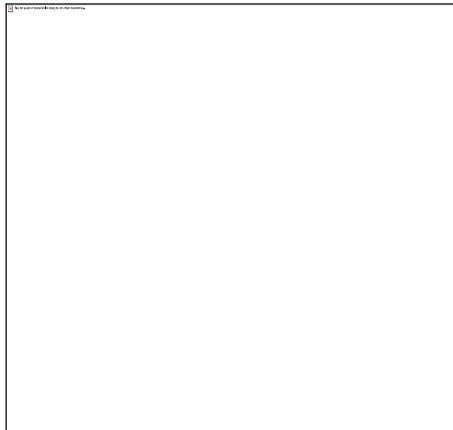
### **Sistema CIELAB**

El año de 1971 la CIE (International Commission on Illumination) propuso un nuevo espacio cromático por transformaciones no lineales del sistema CIE 1931, al que se denomina CIELAB (Figura 1.10). Este nuevo sistema define un espacio en coordenadas rectangulares (**L**, **a**, **b**) junto con otro en coordenadas cilíndricas (**L**, Hue, Chroma). A la difusión del sistema CIELAB ha ayudado decisivamente el hecho de que casi todos los modelos nuevos de colorímetros que aparecen en el mercado dan el color, entre otras, en coordenadas CIELAB.

El CIE  $L^* a^* b^*$  (CIELAB) es el modelo cromático usado normalmente para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano. Los asteriscos (\*) que siguen a cada letra forman parte del nombre, ya que representan  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , de  $L$ ,  $a$ ,  $b$ .

Los tres parámetros en el modelo representan la luminosidad de color ( $L^*$ ,  $L^*=0$  rendimientos a negro y  $L^*=100$  indica blanco), su posición entre rojo y verde ( $a^*$ , valores negativos indican verde, mientras que los valores positivos indican rojo) y una posición entre amarillo y azul ( $b^*$ , valores negativos indican azul y valores positivos indican amarillo).

El modelo de color CIELAB es representado en un espacio tridimensional.



**Figura 1.10** Diagrama sistema CIELAB (Konicaminolta, 2006)

### **Diferencia de color**

En la actualidad el control colorimétrico de los productos de mercado constituye una parte importante de su control de calidad. Ordinariamente se requiere de una especificación normalizada del color y de sus tolerancias, conforme a las necesidades y apreciaciones del consumidor, acudiéndose para ello a medidas colorimétricas más precisas que la sencilla referencia a un determinado muestrario o a una carta o sistema de ordenación del color. Este hecho es particularmente evidente en el caso de ciertas industrias, como las dedicadas a la impresión gráfica o

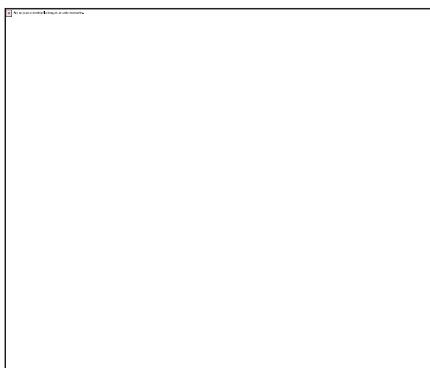
a la elaboración de pinturas o tejidos, donde si no hay una reproducción suficientemente fidedigna del color, pueden existir graves problemas en relación a la demanda del consumidor.

En el sistema Hunter, se pueden calcular los valores delta ( $\Delta L$ ,  $\Delta a$  y  $\Delta b$ ). Estos valores indican que tanto difieren los parámetros **L**, **a** y **b** al iniciar y terminar un experimento; los valores  $\Delta L$ ,  $\Delta a$  y  $\Delta b$  son utilizados regularmente para control de calidad. La diferencia total de color ( $\Delta E$ ) es un valor único en el cual se encuentran las diferencias entre **L**, **a** y **b** de la muestra (final del experimento) y el estándar (inicio del experimento). Este valor indica que parámetro está fuera de tolerancia, (Hernández, 2013).

#### 1.4 Diseño experimental

El diseño compuesto central es probablemente el diseño experimental más utilizado para ajustar superficies de respuestas de segundo orden. El diseño compuesto central consiste en un factorial o factorial fraccionado  $2^k$  aumentado por  $2^k$  puntos axiales y  $n_0$  puntos centrales (Montgomery, 1991).

Una variante del diseño compuesto central es el diseño compuesto central en sus caras. En este diseño los puntos estrella o axiales se localizan en los centros de las caras del cubo para  $k=3$ , como se muestra en la Figura 1.11.



**Figura 1.11** Diseño compuesto central centrado en las caras para  $k=3$  (Montgomery, 1991)

El diseño compuesto central centrado en las caras se representa como  $2^3+2(3)+1$ , donde:

**2<sup>3</sup>** Diseño factorial

**2(3)** Caras centradas

**1** Punto central

En ocasiones se emplea el diseño compuesto central debido a que requiere solo tres niveles de cada factor y en la práctica a menudo es difícil modificar niveles.

### **1.5 Antecedentes del secado de queso**

A continuación se presentan algunos antecedentes relacionados con el presente trabajo:

Berrones-Hernández *et al.*, (2007) realizaron un estudio del proceso de deshidratación del queso fresco chiapaneco mediante un secado solar. En el cual obtuvieron como resultados el descenso de humedad después de 10 días, del 50% de humedad inicial hasta 16% al final del secado. La temperatura máxima registrada en el secador tradicional fue de 34.16 °C y en el secador solar de 51.43 °C.

Jumah *et al.*, (2011) evaluaron los parámetros de fabricación y características de calidad de secados por aspersión de un producto previo al queso, obteniendo la temperatura del aire de entrada que fue entre 80 y 150 °C, así mismo la temperatura del aire de salida entre 45 y 81 °C, la presión de atomización de 2 bar, el contenido de grasa con un 18.33% y finalmente la mayor densidad que fue de 0.583 g/cm<sup>3</sup>.

Castell-Palou *et al.*, (2011) analizaron los perfiles de humedad en el secado de queso por el TD-NMR usando un modelo matemático de transferencia de masa. Con el que obtuvieron parámetros como la difusividad de humedad de  $3.71 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s,

coeficiente de transferencia de masa con valor de  $2.95 \times 10^{-8}$  m/s, con una media relativa del error de 0.4%.

Tunick *et al.*, (2012) realizaron un estudio de la caracterización de queso fresco durante su almacenamiento a 4 y 10 °C” donde obtuvieron que el queso fresco estudiado posee 2.5% NaCl.

Erbay y Koca (2012) publicaron durante la producción de queso blanco en polvo, resultados de temperatura de aire en la entrada de 160 a 230 °C, temperatura de aire a la salida de 60 a 100 °C, presión de atomización que va de 294 a 588.4 KPa y contenido de grasa de 46.69%.

Erbay *et al.*, (2015) realizaron la optimización del proceso de secado por aspersión en la producción de queso en polvo. Sus resultados fueron la temperatura de aire a la entrada de 174 °C, temperatura de aire de salida 68 °C, la presión de atomización de 354 KPa, el contenido de grasa de 40.7% y la mayor densidad que fue de 252 Kg/m<sup>3</sup>.

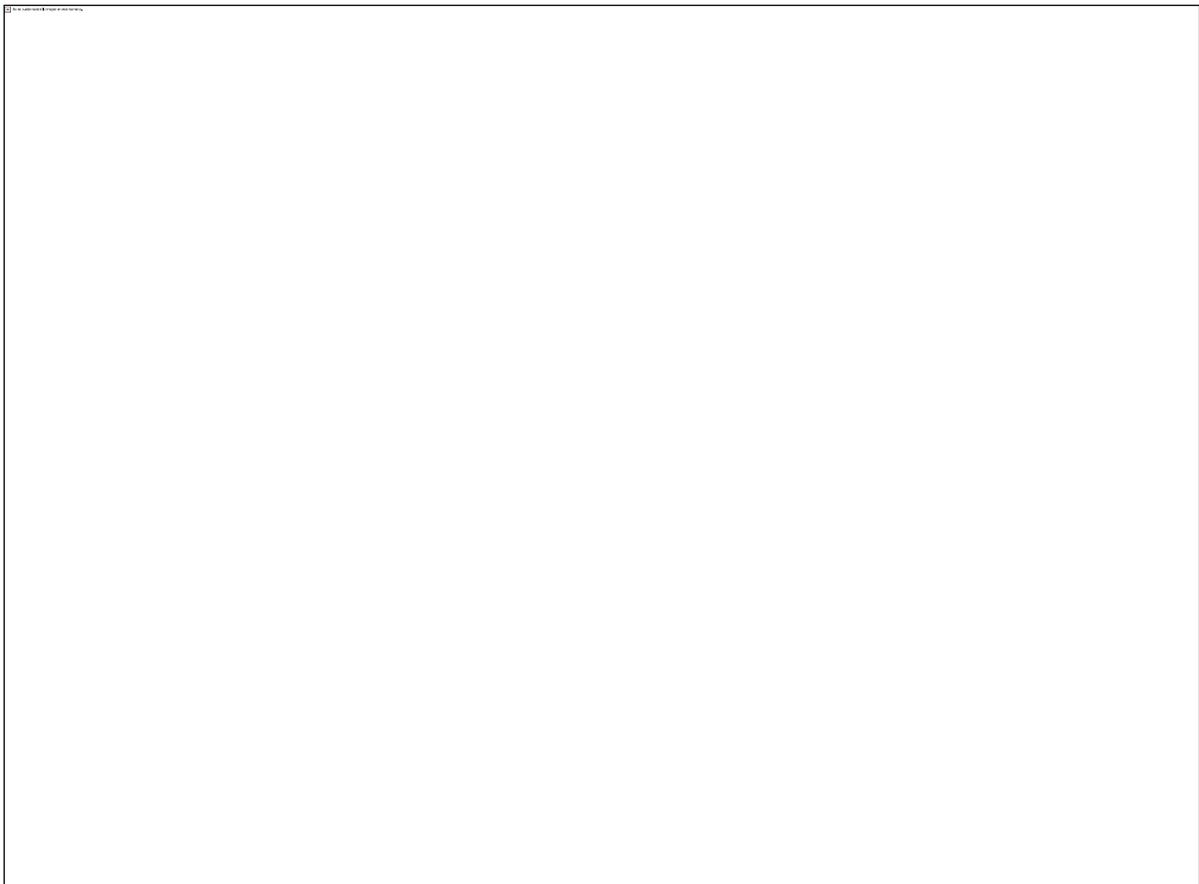
Comúnmente reconocido por sus ventajas el secado por lecho fluidizado, incluye una tasa alta de remoción de humedad, alta eficiencia térmica, fácil transporte de material dentro del secador y bajos costos de mantenimiento (Law y Mujumdar, 2014). Como se puede ver, se han desarrollado algunos trabajos sobre el proceso de secado y almacenamiento de diferentes productos lácticos. Sin embargo, no se han encontrado reportes directamente relacionados con el estudio sobre la deshidratación de queso fresco mexicano por lecho fluidizado.

**CAPÍTULO 2**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Metodología general

Para lograr el objetivo general del presente proyecto, se estudiaron las condiciones para el secado por lecho fluidizado de queso fresco en un secador Retsch TG-200 y posteriormente se analizaron las variables de respuesta del queso deshidratado (humedad,  $a_w$ , color, proteínas y grasas). En la Figura 2.1 se muestra de manera general la metodología que se empleó para realizar esta investigación.



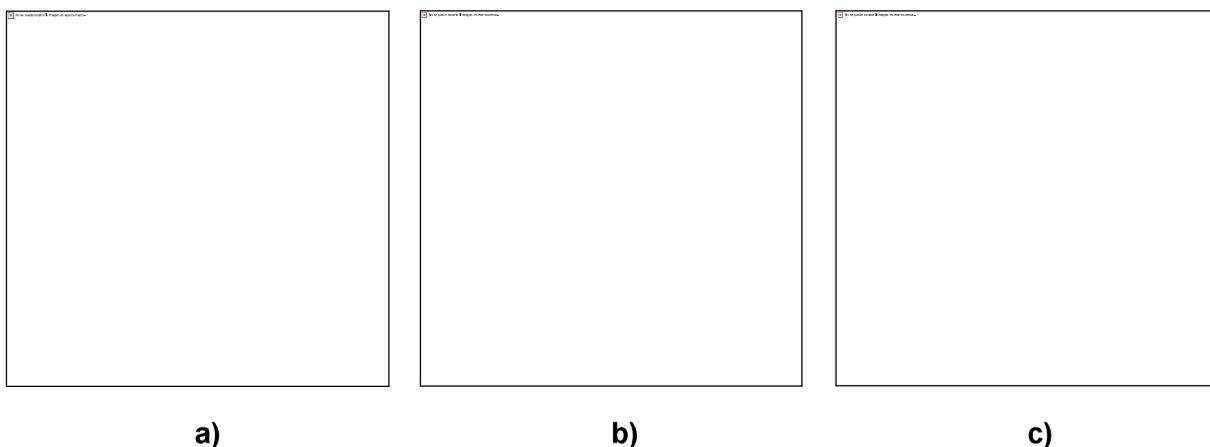
**Figura 2.1** Metodología general para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco

## 2.2 Selección de la materia prima

Para el desarrollo del presente trabajo de tesis se utilizó queso fresco, el cual fue proporcionado por los productores de queso de la región de Paso Carretas, Tlaxicoyan del estado de Veracruz.

## 2.3 Acondicionamiento de las muestras

Antes de realizar el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco, fue necesario acondicionar las muestras realizando cortes de 0.5, 2 y 3.5 cm de longitud como se observa en la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Acondicionamiento de muestras de queso con longitud de: a) 0.5 cm, b) 2 cm y c) 3.5 cm

## 2.4 Caracterización fisicoquímica

Se realizaron análisis fisicoquímicos del queso fresco, entre ellos la medición del pH, cuantificación del contenido de sólidos totales, proteínas, cenizas, grasas, NaCl, humedad,  $a_w$ , así como los parámetros de color **L**, **a** y **b**.

### **2.4.1 Sólidos totales**

El contenido de sólidos totales se determinó utilizando una termobalanza marca Sartorius, modelo MA 35. La determinación de sólidos totales se llevó a cabo colocando 1 g de muestra (queso fresco o queso deshidratado) en el platillo de aluminio dentro de la cámara de secado, distribuyendo homogéneamente la muestra, a una temperatura de 65 °C y seleccionando el tiempo de secado en forma automática.

### **2.4.2 Determinación de humedad (X)**

La determinación de humedad (X) se realizó empleando una termobalanza marca Ohaus, modelo MB35. Consistió en colocar una muestra de 1 g en el platillo de aluminio procurando distribuir la muestra a medir. Se programó a una temperatura de 65 °C, después de un tiempo el equipo proporciona la lectura de la humedad en base húmeda y en base seca.

### **2.4.3 Actividad de agua ( $a_w$ )**

Para la determinación de la actividad de agua del queso antes y después del proceso de secado por lecho fluidizado, se utilizó un medidor de actividad de agua AquaLab serie 3 modelo TE. Se colocó 1 g de queso (fresco o deshidratado) en la taza del cajón deslizable, se cerró la cámara del equipo y se inició la medición a una temperatura de  $25 \pm 1$  °C.

### **2.4.4 Determinación de los parámetros de color**

La determinación de color se realizó empleando un colorímetro MiniScan XE Plus marca HunterLab para sólidos, donde los resultados se capturaron con la ayuda del programa Universal Software versión 4.10, con la finalidad de obtener la diferencia total de color.

Mediante el uso del colorímetro se obtuvieron los parámetros de color **L**, **a** y **b** del queso deshidratado con los cuales se determinó la diferencia de color (Ec. 2.1), que es un valor único en el cual se encuentran consideradas las diferencias entre **L** (Ec. 2.2), **a** (Ec. 2.3) y **b** (Ec. 2.4) de la muestra al final del proceso de secado comparada con la lectura del queso fresco utilizado como estándar.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

$$\Delta L = L_{final} - L_{inicial} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\Delta a = a_{final} - a_{inicial} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$\Delta b = b_{final} - b_{inicial} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

#### 2.4.5 Proteínas

Para determinar el contenido de proteínas en el queso fresco y deshidratado se utilizó un digestor de proteínas marca NOVATECH. Se aplicó el método Kjeldahl para analizar nitrógeno orgánico. Con esta técnica se digieren las proteínas del queso fresco o deshidratado y otros componentes orgánicos con ácido sulfúrico en presencia de catalizadores como sulfato de potasio y sulfato de cobre. El nitrógeno orgánico total es convertido en sulfato de amonio. La mezcla digerida se neutraliza con hidróxido de sodio y se destila posteriormente en una solución de ácido bórico. Los aniones de borato formados, se titulan con HCl normalizado, lo cual se convierte en el nitrógeno de la muestra. Se empleó la Ec. 2.5 para calcular el contenido de proteína cruda del queso.

$$\% \text{ Proteínas} = \frac{14 \times N \times V \times 100 \times \text{factor}}{m \times 1000} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

$V = 50 \text{ mL de H}_2\text{SO}_4 \text{ 0.1 N}$

$N$  = gasto de HCl 0.1 N

$factor$  = 6.38 para leche y productos lácteos, descrito por James (1995).

#### 2.4.6 Cenizas

La determinación en seco es el método más común para cuantificar la totalidad de minerales en alimentos y se basa en la descomposición de la materia orgánica quedando solamente materia inorgánica en la muestra. Para calcular el contenido de cenizas se pesaron de 3 a 5 g de muestra en balanza analítica utilizando el crisol a peso constante. Se colocó la muestra durante dos horas a peso constante para posteriormente ser llevada a una mufla (FELISA modelo 330E) a 500 °C para su calcinación. Después de dos horas de calcinación se colocó la muestra en un desecador y posteriormente se pesó el crisol. El contenido de cenizas se calculó empleando la Ec. 2.6.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{g de residuo fijo} \times 100}{\text{muestra seca}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

#### 2.4.7 Grasas

El contenido de grasa presente en el queso fresco o deshidratado se cuantificó por el método de extracción con el equipo Soxhelt de acuerdo a la norma NMX-F-089-S-1978. Aproximadamente 2 g de muestra se colocaron en cartuchos de papel filtro, que posteriormente se colocaron dentro del cuerpo de extracción del extractor Soxhlet, se adaptó el cartucho con muestra en el recipiente. Se añadió hexano en el extremo superior del refrigerante y se calentó el sistema durante 4 h, se dejó enfriar el matraz del disolvente con la muestra extraída y se llevó a peso constante a 100 °C. Posteriormente se volvió a pesar y utilizando la Ec. 2.7 se calculó el porcentaje de grasa.

$$\% \text{ Grasas} = \frac{\text{g del matraz con grasa} - \text{del matraz tarado}}{\text{g muestra}} (100) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

### 2.4.8 pH

Para realizar las mediciones de pH se utilizó un medidor portátil CONDUCTRONIC modelo pH10. Para poder determinar el pH de las muestras de queso, el equipo debió ser calibrado con una solución patrón pH 7 antes de utilizarlo, logrando tener una mayor exactitud en las mediciones y un menor índice de error.

### 2.4.9 Cloruro de sodio (NaCl)

Para cuantificar el contenido de NaCl presente en las muestras de queso fresco y deshidratado se empleó el método de Volhard, el cual consistió en colocar una muestra de 3 g en un matraz, se le agregó 10 mL de agua destilada y 12.5 mL de Nitrato de plata 0.1 N, la solución se calentó a temperatura de 75-80 °C y se le agregaron 10 mL de ácido nítrico concentrado. Para calcular el porcentaje de sal, se empleó la Ec. 2.8:

$$\% NaCl = \frac{(B-S)ml \times 0.1 \times 0.0585 \times 100}{\text{peso de la muestra}} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Dónde:

*B*= titulación del blanco

*S*= titulación de la muestra

## 2.5 Proceso de secado por lecho fluidizado

Para la etapa de secado de queso se empleó un secador por lecho fluidizado Retsch TG-200 (Figura 2.3) ubicado en el laboratorio de Bioprocesos del Instituto Tecnológico de Orizaba.

### 2.5.1 Equipo para secado de queso fresco

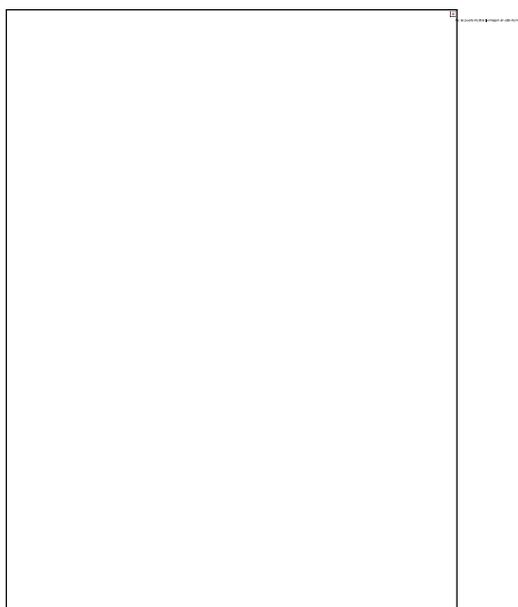
El secador Retsch TG-200 tiene la capacidad de secar materiales sólidos con una humedad máxima del 80%, siempre y cuando estos no sean explosivos o fácilmente inflamables, ni aquellos materiales cuyo punto de inflamación esté situado por debajo de 180 °C. El tamaño de la carga asciende por regla general a 1000 g. La temperatura máxima que alcanza el equipo es de 150 °C. El tamaño del grano mínimo no debe ser inferior a 63 µm. Es considerado un equipo de laboratorio para un funcionamiento de 8 h. El funcionamiento en vacío sin material a secar es de aproximadamente 185 m<sup>3</sup>/h.

#### Dimensiones del equipo

- Alto: hasta aproximadamente 100 cm, ancho: 40 cm, profundidad: 48 cm.
- Peso aproximado: 21 Kg sin recipiente de secado.

#### Condiciones ambientales y atmosféricas para operar el equipo

- Temperatura ambiente: 5 °C a 40 °C
- Humedad relativa del aire: 80 % con temperaturas hasta 31 °C, con descenso lineal hasta el 50 % de humedad relativa a 40 °C.



**Figura 2.3** Secador por lecho fluidizado Retsch TG-200

## 2.6 Diseño experimental

Para llevar a cabo el estudio de secado por lecho fluidizado de queso fresco, se utilizó un diseño compuesto centrado en sus caras representado como  $2^3+2(3)+1$ . Para cada factor se utilizaron 2 niveles con 6 puntos centrales en sus caras y un punto central. En la Tabla 2.1 se muestran los factores y niveles que se consideraron para cada factor o variable del proceso de secado por lecho fluidizado (Montgomery, 1991).

**Tabla 2.1** Factores y niveles para el proceso de secado por lecho fluidizado

Factor	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
Temperatura del aire de entrada (°C)	70	60	50
Tamaño de partícula (cm)	3.5	2	0.5
Tiempo de secado (min)	120	90	60

En la Tabla 2.2 se muestran los experimentos realizados de manera aleatoria, los cuales se analizaron posteriormente usando el programa NCSS 2007; con la finalidad de obtener el modelo para poder aplicar la metodología de superficie de respuesta y así conocer las mejores condiciones del proceso de secado por lecho fluidizado.

Las variables de respuesta obtenidas durante el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco, fueron: humedad (X), actividad de agua ( $a_w$ ), parámetros de color (L, a, b,  $\Delta E$ ), proteínas (%), NaCl (%) y grasas (%).

**Tabla 2.2** Experimentos para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco

Experimento	Temperatura del aire de entrada (°C)	Tamaño de partícula (cm)	Tiempo de secado (min)
1	50	0.5	60
2	50	3.5	60
3	70	0.5	60
4	70	3.5	60
5	50	0.5	120
6	50	3.5	120
7	70	0.5	120
8	70	3.5	120
9	60	2	90
10	60	3.5	90
11	60	0.5	90
12	70	2	90
13	50	2	90
14	60	2	120
15	60	2	60

**CAPÍTULO 3**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Caracterización fisicoquímica del queso fresco

Para llevar a cabo el desarrollo del presente trabajo se utilizó queso fresco proporcionado por los productores de queso de la región de Paso Carretas, Tlaxcoyan del estado de Veracruz, el cual se caracterizó fisicoquímicamente antes de someterlo al proceso de secado, cada una de las determinaciones se realizaron por duplicado, en la Tabla 3.1 se muestra la media de los resultados obtenidos del estudio de su caracterización.

**Tabla 3.1** Caracterización fisicoquímica del queso fresco

Factor	Queso fresco
X (%)	47.435 <sup>5.112</sup>
$a_w$	0.975 <sup>0.009</sup>
Color	
<b>L</b>	52.980 <sup>2.588</sup>
<b>a</b>	0.560 <sup>0.014</sup>
<b>b</b>	9.845 <sup>2.962</sup>
Proteínas (%)	15.597 <sup>0.762</sup>
Grasas (%)	2.931 <sup>0.239</sup>
NaCl (%)	1.518 <sup>0.130</sup>
Cenizas (%)	3.539 <sup>0.236</sup>
pH	6.315 <sup>0.190</sup>

De acuerdo a los resultados obtenidos de la caracterización, el queso fue adecuado para realizarle un proceso de secado por lecho fluidizado debido a que al tener un valor de actividad de agua cercano a 1, lo convierte en un alimento propenso a reacciones microbiológicas. Los valores de actividad de agua varían entre 0 y 1, por lo que los productos frescos perecederos tienen  $a_w$  altas, superiores a 0.9, mientras

que los alimentos deshidratados y estables generalmente tienen  $a_w$  por debajo de 0.6 (Domínguez, 2014).

Por otra parte, analizando los parámetros de color se observó que la luminosidad (parámetro **L**) y la cromaticidad (parámetros **a** y **b**), ubican al queso como un producto amarillo rojizo y posee un pH ligeramente ácido.



**Figura 3.1** Queso fresco y diagrama Hunter L, a, b

### 3.2 Secado por lecho fluidizado de queso fresco

Las variables de respuesta durante el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco fueron: contenido de humedad ( $X$ ), actividad de agua ( $a_w$ ), diferencia de color ( $\Delta E$ ), contenido de proteínas, contenido de grasas y el contenido de NaCl, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.2. Una vez obtenidos los análisis de varianza y los modelos de segundo orden para cada una de las variable a evaluar, se procedió a realizar el análisis de metodología de superficie de respuesta con la finalidad de obtener las mejores condiciones empleadas en el proceso de secado por lecho fluidizado para obtener las características deseadas en el producto deshidratado.

**Tabla 3.2** Variables de respuesta del proceso de secado por lecho fluidizado

EXP.	X (%)	$a_w$	$\Delta E$	PROTEÍNAS (%)	GRASAS (%)	NaCl (%)
1	0.841	0.3464	13.99	29.1169	38.0715	1.5022
2	1.005	0.4830	14.66	33.0121	43.8317	3.3945
3	0.430	0.2530	15.63	33.9369	43.2744	3.2066
4	0.525	0.3045	14.83	36.6118	46.2459	2.3441
5	0.660	0.2990	12.67	38.2789	38.1681	3.4318
6	0.545	0.3990	14.55	36.6692	39.6718	3.2031
7	0.785	0.1480	13.15	38.1490	46.8443	2.1959
8	0.315	0.2405	13.19	38.5634	45.4981	3.4565
9	1.240	0.2335	18.39	37.9904	42.5300	3.1764
10	0.820	0.3415	15.06	32.8653	43.2061	1.8683
11	0.925	0.2435	15.68	39.4583	42.5162	2.8041
12	1.225	0.2290	12.84	38.8719	41.1426	3.2301
13	1.295	0.4265	13.16	34.5500	41.2700	2.4346
14	0.855	0.2710	15.82	30.8404	44.8394	3.3945
15	1.575	0.3290	14.12	36.9111	39.3201	3.5562

### 3.2.1 Contenido de humedad y actividad de agua

En la Tabla 3.2 se presentan los valores obtenidos para contenido de humedad y actividad de agua de las muestras resultantes del proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco, donde se observó que los valores obtenidos de (X) se encuentran por debajo del 1.6%, por lo que el producto deshidratado se considera estable debido a que los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de humedad es menor al 10% en peso (Welti y Vergara, 1997). Sin embargo, lo ideal es reducir el contenido de humedad por debajo del 5% en peso para poder conservar tanto el sabor como el valor nutritivo (Geankoplis, 1998).

La reducción del contenido de humedad fue influenciado por el tamaño de partícula ya que entre más grande sea este, la superficie de contacto es menor generando humedades relativamente elevadas en comparación a tamaños menores.

Las condiciones del experimento 8 (Tabla 2.2) son las que mostraron el menor porcentaje de humedad en el queso (0.315%), mientras que el mayor porcentaje de humedad en el queso se obtuvo al aplicar las condiciones del experimento 15 que corresponde al 1.575%, de manera que el resto de los resultados se encuentran dentro de este intervalo indicando que los valores son aceptados para el producto deshidratado, logrando así, una mayor estabilidad durante el almacenamiento ya que con dichos valores no se favorecen reacciones deteriorativas.

La actividad de agua es una propiedad del agua en el material en equilibrio que depende de la temperatura, composición y microestructura del alimento (Flores, 2010). Los valores obtenidos para la  $a_w$  de las muestras de queso deshidratado, varían entre 0.148 (Exp. 7) y 0.483 (Exp. 2), esto quiere decir que los productos obtenidos presentan condiciones aceptables para su conservación

González-Miguel y López-Malo (2010) mencionan que para conservar un alimento utilizando como factor de estrés solo la reducción de  $a_w$ , esta debe disminuirse a valores iguales o menores de 0.60, los alimentos totalmente deshidratados por ejemplo, tienen valores de  $a_w$  aproximadamente a 0.30 para controlar no solo el crecimiento microbiano sino también otras reacciones de deterioro.

### **3.2.2 Análisis estadístico del contenido de humedad**

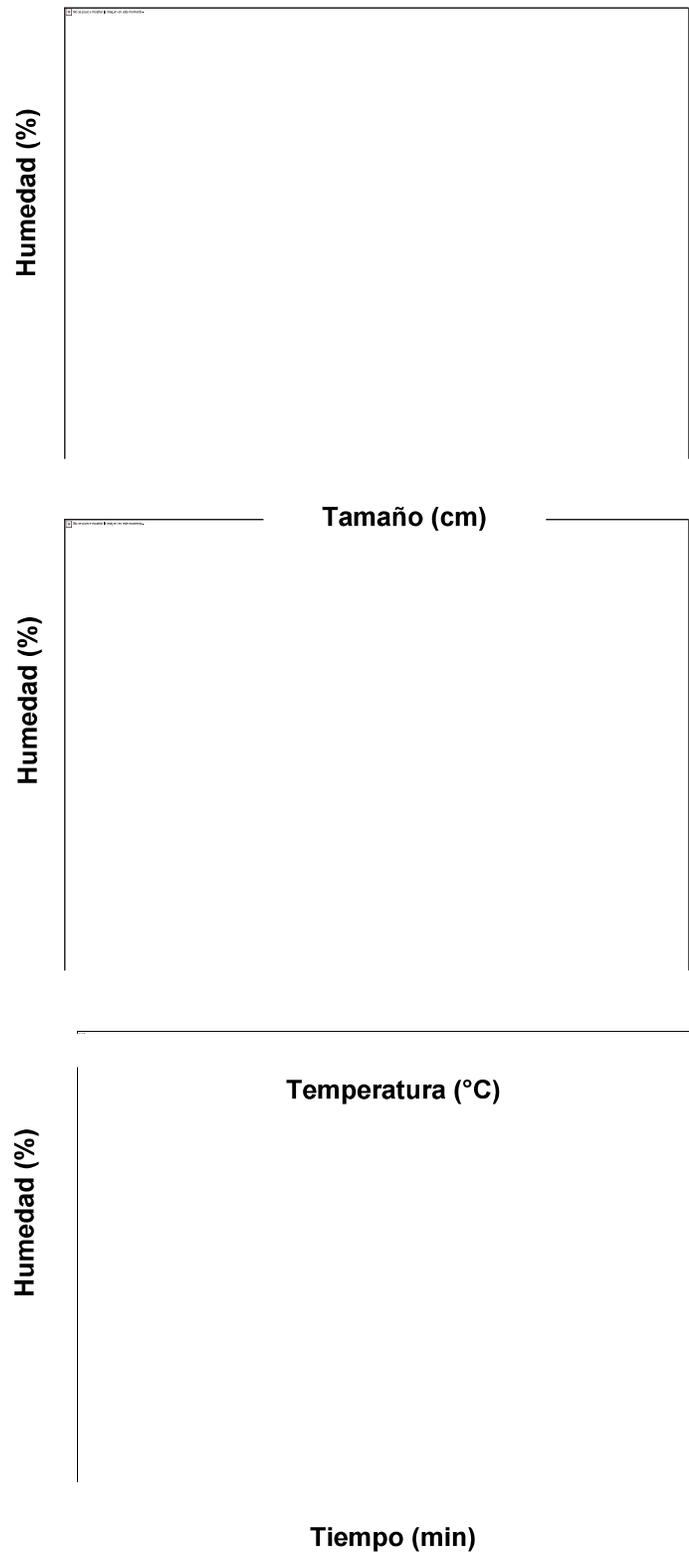
En la Tabla 3.3 se presenta el análisis de varianza de la variable de respuesta humedad, sobre los factores de estudio para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco, obtenidos en el software NCSS 2007. Se observó que dentro del análisis, el tamaño de partícula presentó efecto significativo sobre el contenido final de humedad.

**Tabla 3.3** Análisis de varianza de la variable respuesta contenido de humedad

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	$\alpha=0.10$
Tamaño	2	0.5851285	0.2925642	6.44	0.2021549*	0.871650
Temperatura	2	0.1308791	6.543953 E-02	1.44	0.292206	0.353198
Tiempo	2	0.1892676	9.463382 E-02	2.08	0.186953	0.456397
S	8	0.3634299	4.542874 E-02			
Total ajustado	14	1.742986				
Total	15					

\*Término de significancia  $\alpha=0.10$

En la figura 3.2 se muestran las gráficas de comparación de medias de la variable de respuesta humedad, para cada uno de las variables independientes (tamaño de partícula, temperatura del aire de entrada y tiempo de secado) es sus niveles alto, medio y bajo. Como se puede observar de manera evidente, los menores valores del contenido de humedad en las muestras de queso deshidratado fueron obtenidos empleando un tamaño de partícula de 3.5 cm, temperatura del aire de entrada de 70 °C y un tiempo de secado de 120 min. Algunos investigadores como Reyes *et al.*, 2012 y Kumar *et al.*, 2015, han reportado que la velocidad de secado depende fuertemente de las condiciones de operación, tiempo de secado y tamaño de partícula del material; de acuerdo con ellos, el incremento de temperatura resultó en una reducción significativa del contenido de humedad, mientras que al utilizar tamaños de partículas grandes durante el proceso de secado, se generan productos con alto contenido de humedad. Esta última observación es contradictoria con los resultados obtenidos durante la deshidratación de queso; sin embargo en la sección 3.3.1 se hará una discusión más a fondo.



**Figura 3.2** Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta humedad: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo

### 3.2.3 Análisis estadístico de la actividad de agua

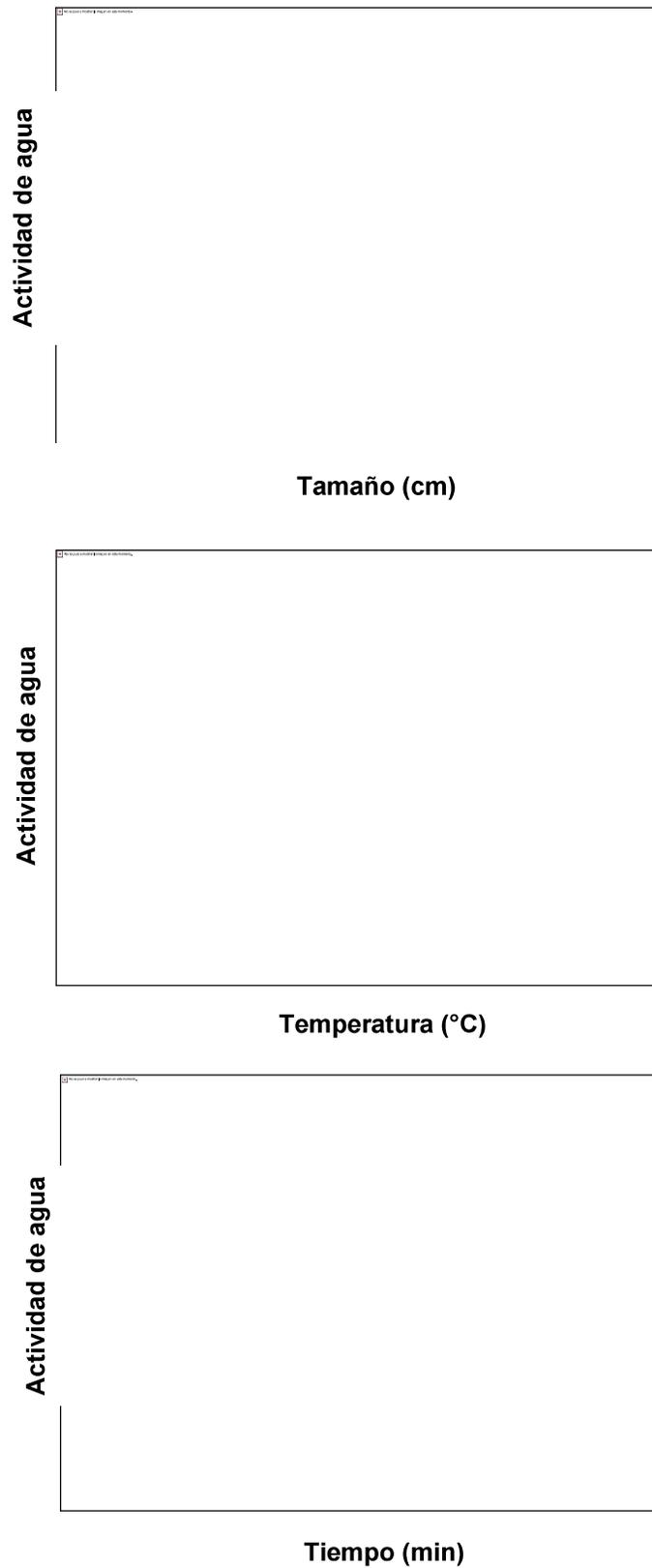
En la Tabla 3.4 se observa el análisis estadístico de la variable respuesta actividad de agua sobre los factores involucrados en el presente trabajo de investigación. Se observó que los tres factores (tamaño de partícula, temperatura y tiempo) presentaron influencia significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre la  $a_w$  para las muestras de queso al final del proceso de secado por lecho fluidizado.

**Tabla 3.4** Análisis de varianza de la variable respuesta actividad de agua

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	$\alpha=0.10$
Tamaño	2	2.297094E-02	1.148547E-02	13.31	0.002850*	0.992046
Temperatura	2	6.301636E-02	3.150818E-02	36.52	0.000095*	1.000000
Tiempo	2	0.0128607	6.430351E-03	7.45	0.014877*	0.912324
S	8	6.902008E-03	8.62751E-04			
Total ajustado	14	0.1062297				
Total	15					

\*Término de significancia  $\alpha=0.10$

En la Figura 3.3 se muestra la influencia de cada uno de los factores sobre la variable respuesta, se observó que empleando el tamaño de partícula de 0.5 cm, la temperatura de 70 °C y un tiempo de secado de 120 min, se obtuvieron los valores de actividad de agua más bajos.

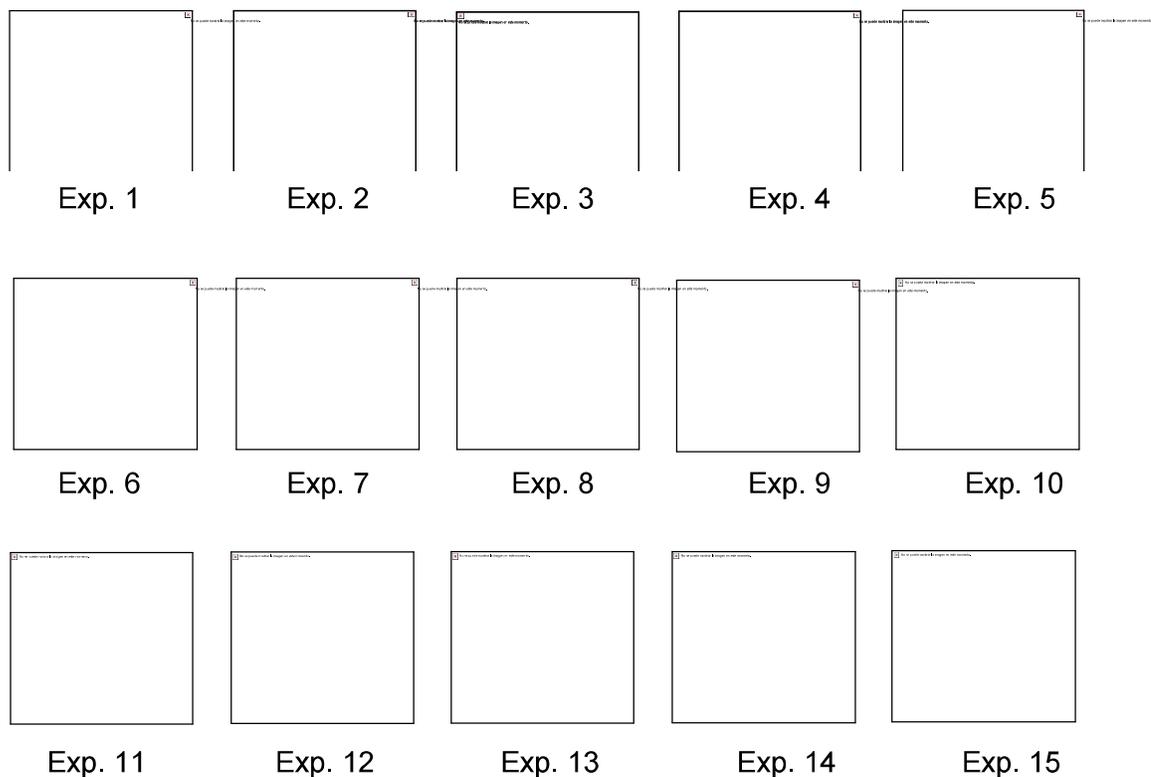


**Figura 3.3** Gráficas de la comparación de medias de la variable de respuesta actividad de agua: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo

### 3.2.4 Diferencia de color

Dado a que el color de un producto tiene influencia ante la aceptación o rechazo por el consumidor, fue necesario realizar la evaluación de  $\Delta E$  tomando en cuenta los parámetros de **L**, **a** y **b** del sistema Hunter. Los valores evaluados para  $\Delta E$  indicaron un mayor cambio de color con respecto al estándar establecido. En la Tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos para la variable respuesta  $\Delta E$ , teniendo como valor mínimo 12.67 y un máximo de 18.39.

Cabe mencionar que las muestras de queso deshidratado se compararon con un estándar evaluando la diferencia de color respecto al producto fresco y se observó que los valores de  $\Delta E$  indicaron un cambio significativo. En la tabla 3.2 se observa que el experimento 9 presentó la mayor diferencia de color (18.39), dicho experimento se llevó a cabo con los niveles medios de cada factor (60 °C, 2 cm y 90 min).



**Figura 3.4** Muestras de queso deshidratado

El comportamiento anterior se puede observar con mayor claridad en la Figura 3.4, donde se presentan las muestras de queso deshidratado a las diferentes condiciones de secado.

### 3.2.5 Análisis estadístico de la diferencia de color

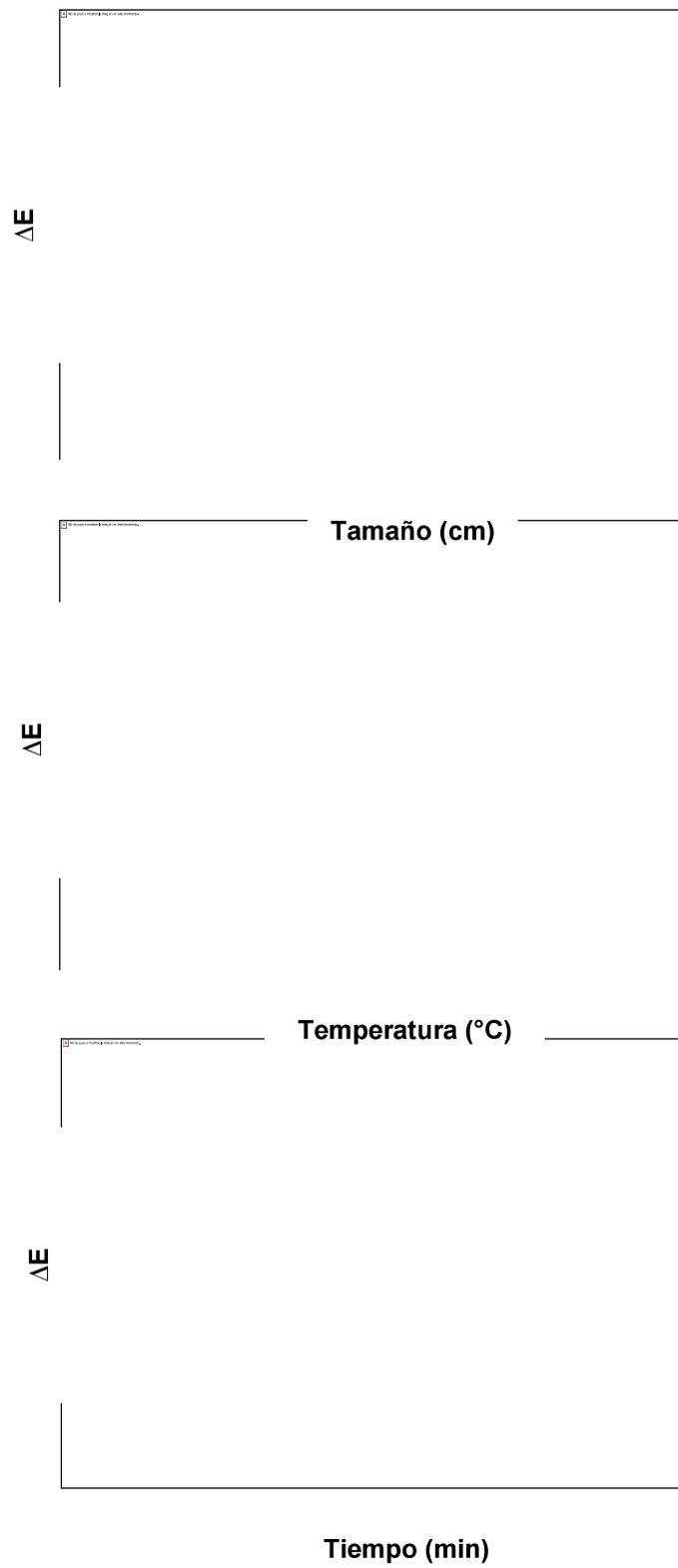
En la Tabla 3.5 se muestra el análisis de varianza correspondiente para la variable respuesta  $\Delta E$  sobre los factores involucrados en el proceso de secado por lecho fluidizado. Se aprecia que ningún factor presentó influencia significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre la diferencia de color.

**Tabla 3.5** Análisis de varianza de la variable respuesta diferencia de color

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	$\alpha=0.10$
Tamaño	2	0.4078671	0.2039336	0.90	0.910690	0.116639
Temperatura	2	10.78978	5.394889	2.50	0.143059	0.518292
Tiempo	2	1.496714	0.7483571	0.35	0.716709	0.161535
S	8	17.23598	2.154497			
Total ajustado	14	31.78597				
Total	15					

\*Término de significancia  $\alpha=0.10$

En la Figura 3.5 se presentan las gráficas de comparación de medias donde se observó que al emplear el tamaño de partícula de 2 cm, la temperatura más alta que fue de 70 °C y el periodo de tiempo de 120 min, se obtuvo la menor diferencia de color.



**Figura 3.5** Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta  $\Delta E$ : a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo

### 3.2.6 Contenido de proteínas

El contenido de proteínas es un factor que influye en el valor nutritivo que se puede dar a un producto, debido a esto se realizó la cuantificación de proteínas para las muestras de queso deshidratado (Tabla 3.2), observando que al reducir el contenido de agua presente en el producto fresco el contenido de proteínas incrementó de manera considerable después de ser sometidas a un proceso de secado por lecho fluidizado. Los valores se encontraron en un intervalo de 29.1169 a 39.4583% de proteínas.

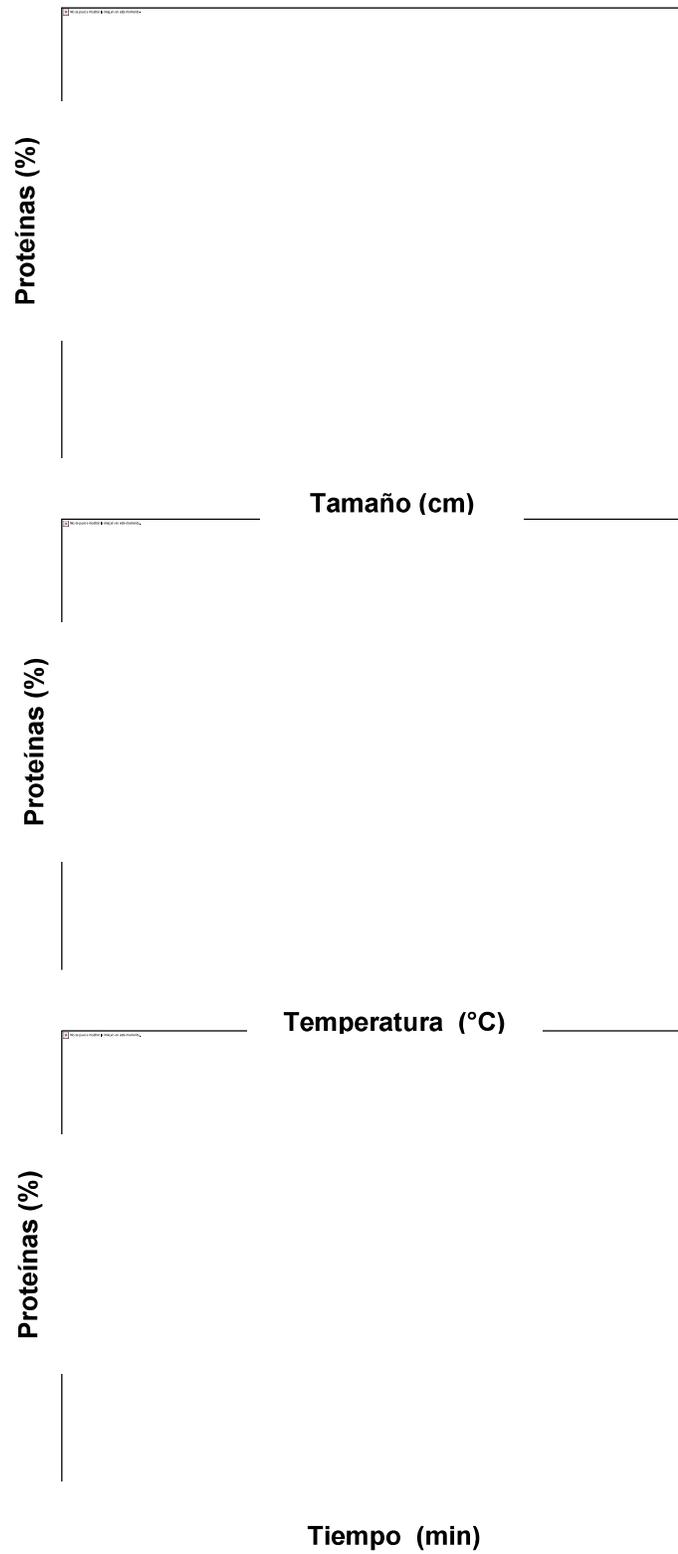
### 3.2.7 Análisis estadístico del contenido de proteínas

En la Tabla 3.6 se muestra el análisis de varianza correspondiente para la variable respuesta contenido de proteínas sobre los factores involucrados en el proceso de secado por lecho fluidizado. Se aprecia que ningún factor presentó influencia significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre el contenido proteico.

**Tabla 3.6** Análisis de varianza de la variable respuesta contenido de proteínas

<b>Factor</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Nivel de probabilidad</b>	<b><math>\alpha=0.10</math></b>
<b>Tamaño</b>	2	20.15918	10.07959	1.09	0.381160	0.293388
<b>Temperatura</b>	2	30.95411	15.47705	1.67	0.246843	0.391948
<b>Tiempo</b>	2	8.639084	4.319542	0.47	0.642695	0.182993
<b>S</b>	8	73.92667	9.240833			
<b>Total ajustado</b>	14	131.3633				
<b>Total</b>	15					

\*Término de significancia  $\alpha=0.10$



**Figura 3.6** Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta contenido de proteínas: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo

En la Figura 3.6 se muestran las gráficas de comparación de medias donde se observa que al emplear el tamaño de partícula de 0.5 cm, la temperatura más alta que es de 70 °C y un periodo de tiempo de 60 min, se obtiene el mayor contenido de proteínas.

### 3.2.8 Contenido de grasa

Los resultados obtenidos para la cuantificación de grasa en las muestras deshidratadas se presentan en la Tabla 3.2 de manera general, se observó que el aumento de la temperatura en el secado por lecho fluidizado incrementó el contenido de grasa en el queso deshidratado. Los valores obtenidos para dicha variable oscilan entre un 38.0715 y un 46.8443%

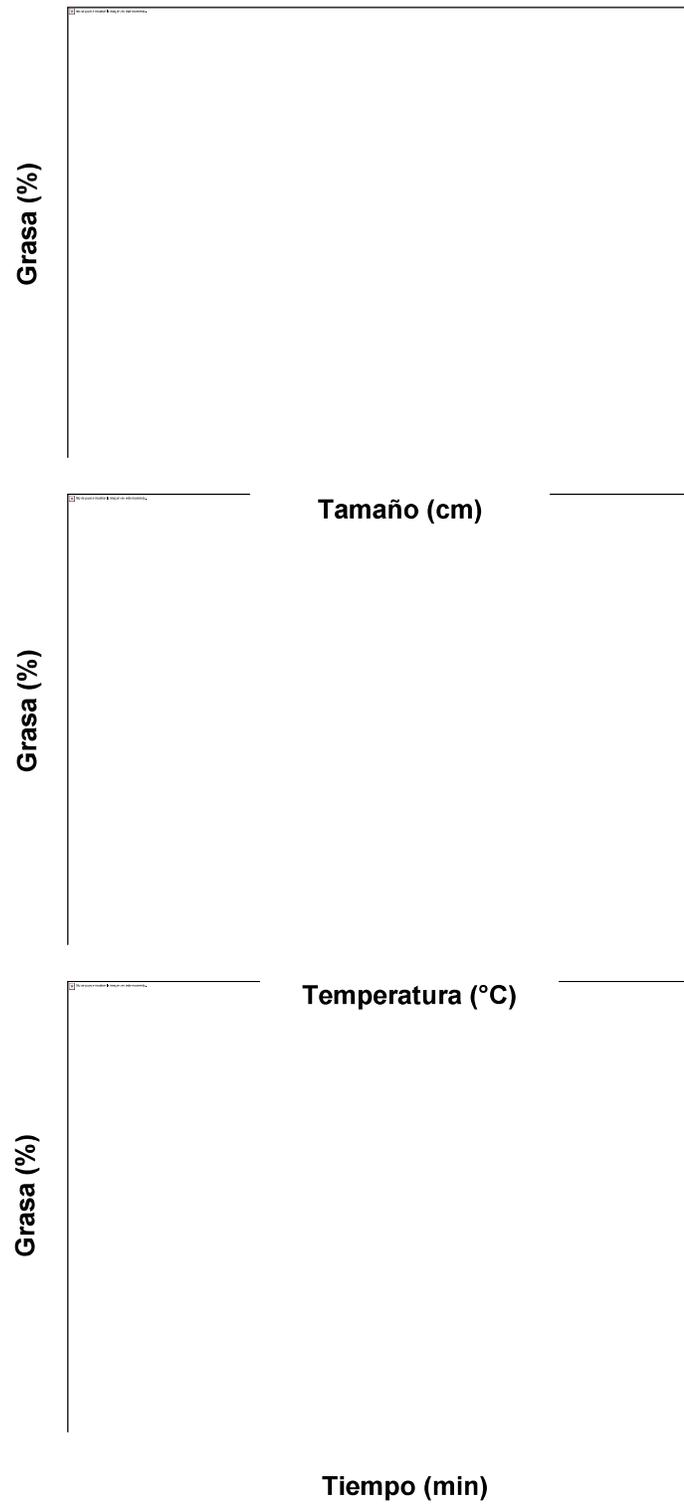
### 3.2.9 Análisis estadístico del contenido de grasa

En la Tabla 3.7 se muestra el análisis de varianza correspondiente para el contenido de grasas sobre los factores involucrados en el proceso de secado por lecho fluidizado. Se observa que el factor que presentó influencia significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre dicha variable fue la temperatura de secado, dado que al incrementar la temperatura de secado aumentó el contenido de grasa del producto, debido a que altas temperaturas dañan o eliminan los glóbulos de grasa causando que quede desprotegida y fluya como lagunas hacia la superficie de la partícula generando un incremento de grasa libre, lo cual coincide con lo reportado anteriormente por Vignolles *et al.*, 2007 y Erbay *et al.*, 2015.

**Tabla 3.7** Análisis de varianza de la variable respuesta contenido de grasa

<b>Factor</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Prueba F</b>	<b>Nivel de probabilidad</b>	<b><math>\alpha=0.10</math></b>
<b>Tamaño</b>	2	12.00159	6.000797	1.02	0.401878	0.281718
<b>Temperatura</b>	2	49.31181	24.6559	4.21	0.056436*	0.717967
<b>Tiempo</b>	2	2.013353	1.006677	0.17	0.845208	0.130278
<b>S</b>	8	46.88825	5.861031			
<b>Total</b>	14	110.0056				
<b>ajustado</b>						
<b>Total</b>	15					

0\* Término de significancia  $\alpha=0.10$



**Figura 3.7** Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta contenido de grasa: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo

En la Figura 3.7 se presenta la comparación de medias para el contenido de grasa, como se puede observar, el uso de un tamaño de 0.5 cm, temperatura de 50 °C y un tiempo de secado de 60 min, generó muestras deshidratadas con el menor contenido de grasa.

### 3.2.10 Contenido de NaCl

En la Tabla 3.2 se muestran los valores experimentales del contenido de NaCl para cada uno de los tratamientos. De acuerdo con los resultados el contenido de cloruro de sodio se encontró en un rango de 1.50 y 3.55%, que corresponden al valor promedio de un queso fresco.

Las propiedades antimicrobianas de cloruro de sodio se utilizan generalmente para la conservación de alimentos. La baja actividad de agua debida a la sal junto con la temperatura y el pH, es uno de los principales parámetros que afecta el crecimiento microbiano (Faccia *et al.*, 2012).

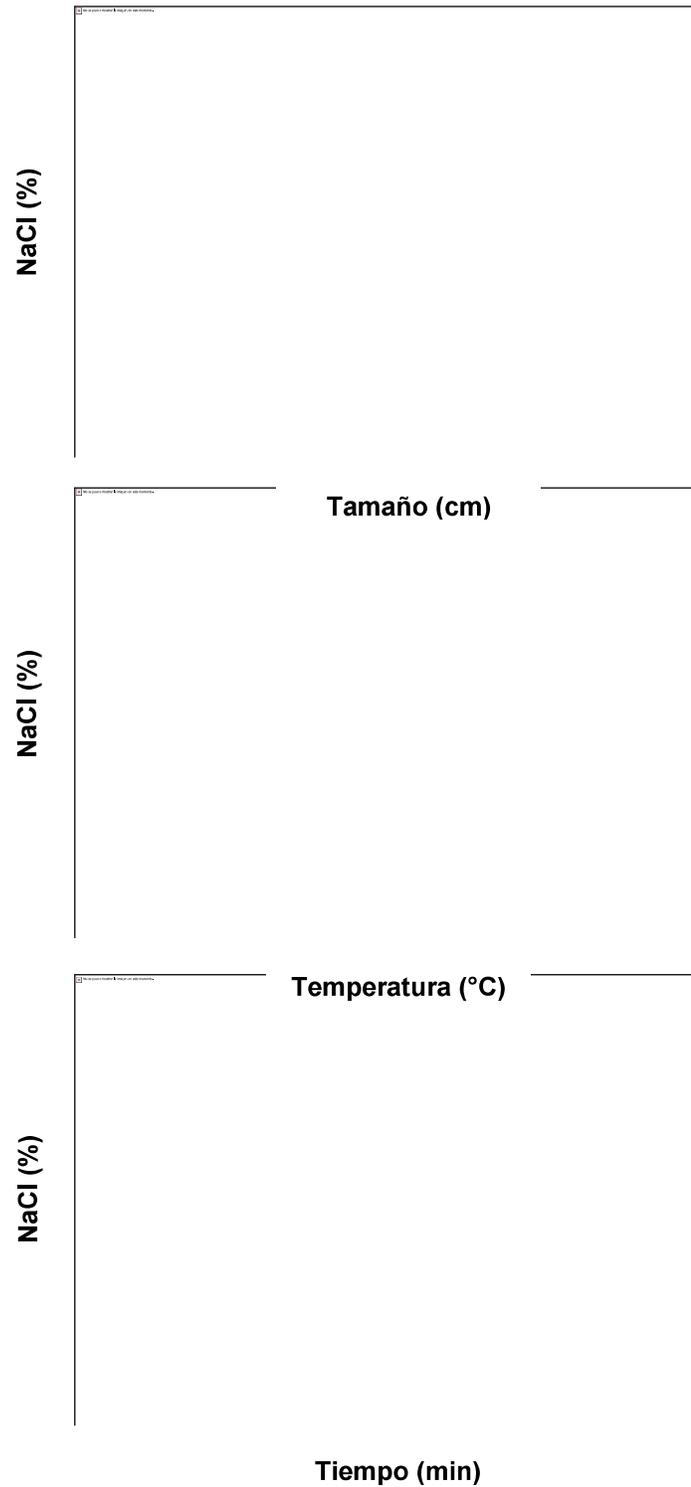
### 3.2.11 Análisis estadístico del contenido de NaCl

De acuerdo al análisis de varianza para el contenido de NaCl que se presenta en la Tabla 3.8, ninguno de los factores presentó influencia significativa sobre esta variable respuesta.

**Tabla 3.8** Análisis de varianza de la variable respuesta NaCl

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	$\alpha=0.10$
Tamaño	2	1.038425	0.5192123	1.00	0.408955	0.277890
Temperatura	2	0.0471531	2.35765E-02	0.05	0.955767	0.107981
Tiempo	2	1.041837	0.5209184	1.01	0.407880	0.278466
S	8	4.145527	0.5181909			
Total ajustado	14	5.92618				
Total	15					

\*Término de significancia  $\alpha=0.10$



**Figura 3.8** Gráficas de la comparación de medias de la variable respuesta contenido de NaCl: a) tamaño, b) temperatura y c) tiempo

En la Figura 3.8 se muestran las gráficas de comparación de medias en la que se observa que al usar el tamaño de partícula más pequeño de 0.5 cm, la temperatura baja de 50 °C y un periodo de tiempo de 90 min, se presenta el menor contenido de NaCl en el queso deshidratado que se obtuvo.

### 3.3 Superficie de respuesta

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas estadísticas que son utilizadas en el tratamiento de problemas en los que la respuesta de interés es influida por varios factores y el objetivo es el encontrar las condiciones que proporcionen las características deseadas en este caso para el producto. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable de respuesta y determinar el modelo matemático que mejor se ajuste a los datos obtenidos con el objetivo de establecer los valores de los factores que mejoren la variable respuesta (Domínguez, 2014).

#### 3.3.1 Superficie de respuesta de la humedad final del queso deshidratado

En la Tabla 3.9 se muestra el ANOVA para el modelo de segundo orden, el cual representa una  $R^2$  del modelo final que explica el 89.97 % de la variabilidad de los resultados de la humedad del queso deshidratado.

**Tabla 3.9** Análisis de varianza para el modelo de segundo orden de la variable de respuesta humedad

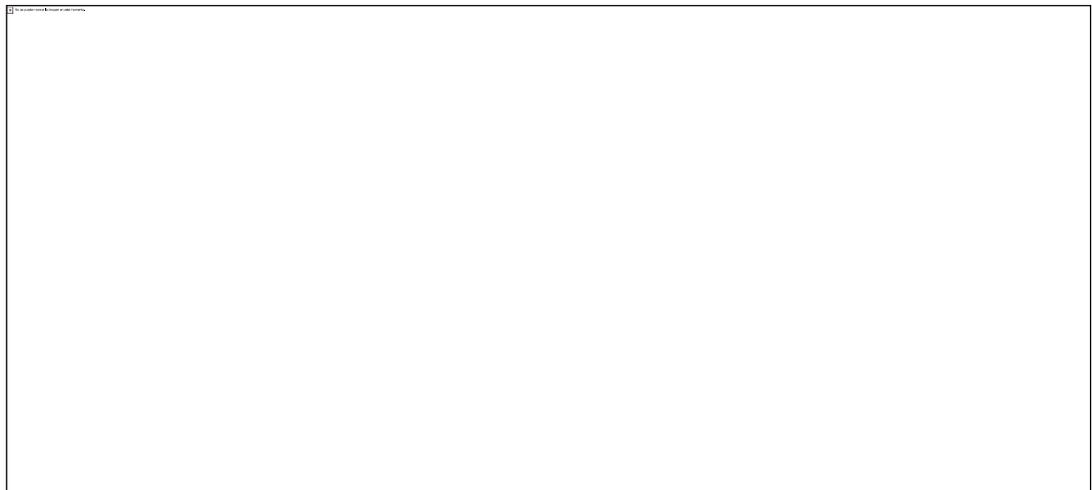
Fuente	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	$R^2$
Regresión	9	1.568294	0.1742549	4.99	0.045778	0.899775
Lineal	3	0.2800773	0.0933591	2.67	0.158460	0.160688
Cuadrático	3	1.099478	0.3664928	10.49	0.013465	0.630802
Interacción	3	0.1887385	6.291284E-02	1.80	0.263669	0.108285
Error total	5	0.1746914	3.493828E-02			0.100225

En la Ec. 3.1 se muestran los coeficientes sustituidos en la ecuación polinomial de segundo orden, los cuales representan la relación entre las variables independientes (temperatura de secado, tamaño de partícula y tiempo de secado) sobre la variable de respuesta (contenido de humedad).

Los coeficientes fueron obtenidos por regresión lineal mediante el software NCSS 2007.

$$\begin{aligned} \%X = & 1.321511 - 0.0431 * \text{tamaño} - 0.1066 * \text{temperatura} - 0.1216 * \text{tiempo} - \\ & 0.4693889 * \text{tamaño}^2 - 0.08188889 * \text{temperatura}^2 - 0.1268889 * \\ & \text{tiempo}^2 - 0.053 * \text{tamaño} * \text{temperatura} - 0.1055 * \text{tamaño} * \text{tiempo} \\ & + 0.09825 * \text{temperatura} * \text{tiempo} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

De acuerdo al modelo presentado en la Ec. 3.1 se puede observar que el tiempo fue la variable que tuvo mayor efecto sobre el contenido de humedad (% X), el cual fue de -0.1216, donde el signo negativo indica que el contenido de humedad disminuye a medida que el tiempo de secado aumenta y para representarlo con mayor claridad, a partir de este modelo se generó la gráfica de superficie de respuesta empleando el software Matlab 2014<sup>a</sup> (Figura 3.9).



**Figura 3.9** Superficie de respuesta del contenido de humedad en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula

La Figura 3.9 muestra la superficie de respuesta del contenido de humedad del queso deshidratado en función de la temperatura, tamaño y tiempo de secado. Se observó que las muestras que presentaron menor contenido de humedad fueron aquellas que se deshidrataron a 70 °C con un tamaño de partícula de 3.5 cm durante el tiempo de secado más prolongado que fue de 120 min; sin embargo, las muestras deshidratadas a 50 y 60 °C generaron productos deshidratados estables debido a la reducción del contenido de humedad con valores menores al 10%, (Tasirin *et al.*, 2014). Se observó que a medida que disminuye la temperatura de secado, incrementó el contenido de humedad; de igual manera, se observó una tendencia decreciente de humedad al aumentar el tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm. Ésta última observación es congruente con lo reportado por Reyes *et al.*, (2012) para el secado por lecho fluidizado de brócoli, quienes reportaron que el incremento de temperatura resultó en una reducción significativa del contenido de humedad, sin embargo, al aumentar el tamaño de partícula de 1 a 3 cm, el contenido de humedad resultó ser elevado debido al hecho de que las partículas más grandes tienen un área de superficie específica pequeña. Sin embargo, el área superficial de las partículas aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula y la distancia de transporte de humedad hacia el exterior es más corto. Por lo tanto, la velocidad de secado incrementa a medida que el tamaño de partícula disminuye (Si *et al.*, 2015; Tasirin *et al.*, 2014; Law y Mujumdar, 2014). Muchos investigadores han reportado la disminución de humedad con el incremento de la temperatura y disminución del tamaño de partícula en el uso del secado por lecho fluidizado de varios alimentos y materiales tales como Kozanoglu *et al.* (2012), en semillas de pimienta; Tuyen *et al.* (2009), para distintas variedades de arroz Vietnamita; Murthy y Joshi (2007) para el secado por lecho fluidizado de Aonla (*Emblica officinalis*), entre otros.

### 3.3.2 Superficie de respuesta de la $a_w$ final del queso deshidratado

En la Tabla 3.10 se muestra el ANOVA para el modelo de segundo orden con el cual se representa una  $R^2$  del modelo final que explica el 94.68% de la variabilidad de los resultados del queso deshidratado.

**Tabla 3.10** Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable de respuesta  $a_w$

Fuente	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	$R^2$
<b>Regresión</b>	9	0.1005787	1.117541E-02	9.89	0.010622	0.946804
<b>Lineal</b>	3	9.641937E-02	3.213979E-02	28.44	0.001440	0.907650
<b>Cuadrático</b>	3	2.908295E-03	9.694317E-04	0.86	0.520074	0.027377
<b>Interacción</b>	3	1.250985E-03	4.16995E-04	0.37	0.779325	0.011776
<b>Error total</b>	5	5.651023E-03	1.130205E-03			0.053196

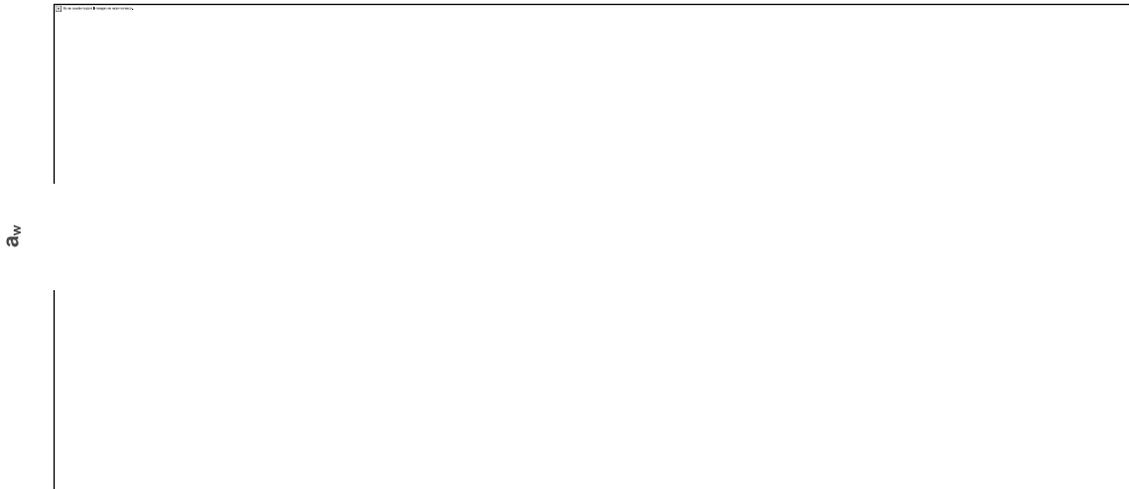
En la Ec. 3.2 se muestran los coeficientes sustituidos en la ecuación polinomial de segundo orden, los cuales representan la relación entre las variables independientes (temperatura de secado, tamaño de partícula y tiempo de secado) y la variable de respuesta  $a_w$ .

Los coeficientes fueron obtenidos por regresión lineal mediante el software NCSS 2007.

$$\begin{aligned}
 a_w = & 0.2847267 + 0.04786 * \text{tamaño} - 0.07789 * \text{temperatura} - 0.03584 * \\
 & \text{tiempo} - 0.005033333 * \text{tamaño}^2 + 0.03021667 * \text{temperatura}^2 + \\
 & 0.002466667 * \text{tiempo}^2 - 2.011575 * \text{tamaño} * \text{temperatura} + \\
 & 0.00055 * \text{tamaño} * \text{tiempo} - 0.0047 * \text{temperatura} * \text{tiempo} \quad (\text{Ec. 3.2})
 \end{aligned}$$

En el modelo de segundo orden (Ec. 3.2), se puede observar que el factor con mayor inclinación para dicha variable fue la temperatura (0.07789), indicando que el contenido de  $a_w$  disminuye a medida que la temperatura de secado aumenta, para

observarlo con mayor claridad a partir de dicho modelo se generaron las gráficas de superficie de respuesta empleando el software Matlab 2014<sup>a</sup> (Figura 3.10).



**Figura 3.10** Superficie de respuesta del contenido de  $a_w$  en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula

Es evidente que el crecimiento de bacterias patógenas en los quesos depende de condiciones como humedad,  $a_w$  y contenido de sal (Hnosko *et al.*, 2009). El uso de agua de grifo, suero de leche y salmuera mantiene una textura suave en el queso; sin embargo, la inmersión de los quesos en dicha sustancia, puede incrementar la carga microbiana y turbidez durante el almacenamiento, por esta razón la vida de anaquel del producto bajo soluciones de sal es muy corta, aproximadamente de 5 a 7 días (Faccia *et al.*, 2012). Algunos investigadores han propuesto el proceso de secado para asegurar la estabilidad de estos productos mediante la reducción del contenido de humedad y actividad de agua (Ghandi *et al.*, 2012; Erbay *et al.*, 2015). La Figura 3.10 muestra el efecto de interacción de la temperatura, tamaño y tiempo de secado sobre la actividad de agua del queso deshidratado. De acuerdo al análisis estadístico, las variables independientes influyeron de manera significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre la  $a_w$  final. Como era de esperarse, la máxima temperatura de secado produjo los menores valores de actividad de agua. De acuerdo con la literatura, valores bajos

de  $a_w$  provee un alto grado de estabilidad microbiológica y química debida a la remoción del agua presente en el alimento y permite que grandes cantidades de alimento altamente perecedero puedan ser conservadas y disponibles a través del tiempo (Jaworska *et al.*, 2014).

Se observa que a medida que disminuye la temperatura de secado de 70 a 50 °C aumentó la actividad de agua; de igual manera, a medida que incrementó el tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm, aumentó el nivel de actividad de agua. Esto debido a que los gradientes de temperatura que se presentan en el proceso de deshidratación del queso fresco, generan gradientes de presión de vapor de agua, con la consiguiente transferencia de humedad y cambios en los niveles de actividad de agua (Villegas-Santiago *et al.*, 2011; Schmidt, 2007).

### 3.3.3 Superficie de respuesta de $\Delta E$ del queso deshidratado

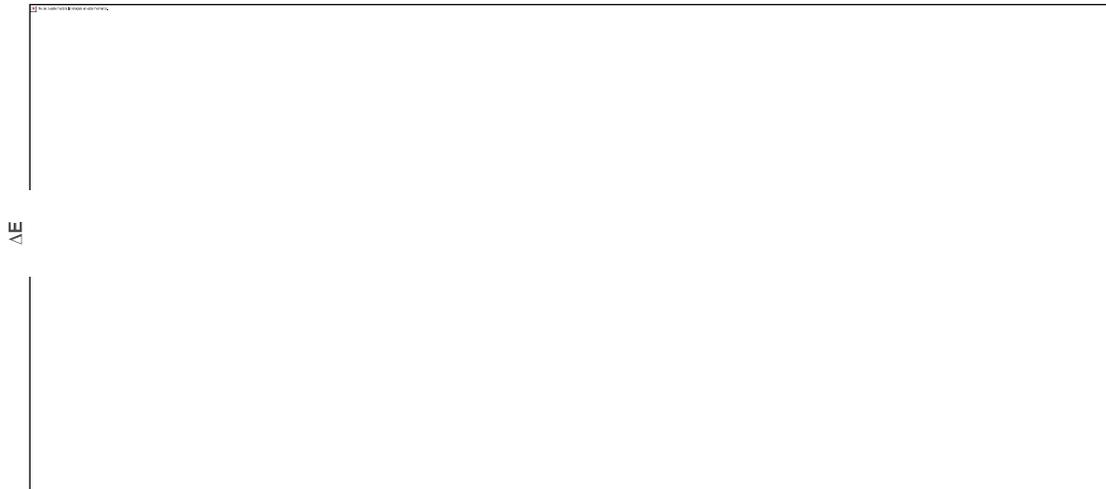
En la Tabla 3.11 se muestra el ANOVA para el modelo de segundo orden correspondiente a la variable respuesta  $\Delta E$ , en el cual se puede apreciar 54.55 % de variabilidad en los resultados obtenidos para las muestras de queso deshidratado, lo anterior puede deberse a las condiciones de operación del equipo o bien, a la cantidad de caroteno presente en el heno consumido por la vaca de la cual se obtiene la leche para la elaboración del queso (Hernández-Morales *et al.*, 2010).

**Tabla 3.11** Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta  $\Delta E$

Fuente	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	R <sup>2</sup>
Regresión	9	17.34107	1.926785	0.67	0.718825	0.545557
Lineal	3	1.658672	0.5528908	0.19	0.897973	0.052183
Cuadrático	3	12.89132	4.297107	1.49	0.324982	0.405566
Interacción	3	2.791075	0.9303584	0.32	0.810042	0.087808
Error total	5	14.44491	2.888981			0.454443

En la Ec. 3.3 se presentan los coeficientes sustituidos en la ecuación polinomial de segundo orden, los cuales representan la relación entre las variables independientes sobre la variable de respuesta, donde el factor con mayor efecto sobre la  $\Delta E$  fue el tiempo, dado que al aumentar dicha variable, la diferencia de color presentó una tendencia decreciente. Tal comportamiento puede observarse en la Figura 3.11, obtenida mediante el software Matlab 2014<sup>a</sup>.

$$\begin{aligned} \Delta E = & 15.713 + 0.1185 * \text{tamaño} + 0.06 * \text{temperatura} - 0.385 * \text{tiempo} + \\ & 0.3225 * \text{tamaño}^2 - 2.045 * \text{temperatura}^2 - 0.075 * \text{tiempo}^2 - 0.4125 \\ & * \text{tamaño} * \text{temperatura} + 0.25625 * \text{tamaño} * \text{tiempo} - 0.33625 * \\ & \text{temperatura} * \text{tiempo} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.3})$$



**Figura 3.11** Superficie de respuesta de la  $\Delta E$  en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que la temperatura de secado influyó de manera significativa ( $p \leq 0.10$ ) sobre  $\Delta E$  del queso deshidratado. En la Fig. 3.11 se observa que a medida que incrementó la temperatura de secado de 50 a 70 °C incrementa la diferencia de color en el producto deshidratado; de igual manera al aumentar el tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm se observó una tendencia creciente de la diferencia de color. Este incremento en la diferencia de color del producto deshidratado está relacionado con la disminución de la luminosidad y con los valores

de cromaticidad a y b. Aday y Karagul (2014) reportaron que el incremento en la concentración de sal disminuyó la luminosidad del queso debido a que altas concentraciones de sal provocan un incremento en la oxidación de los lípidos y cambios en el color del queso. Esta última observación está relacionada con lo reportado por Varming *et al.* (2011), quienes reportaron que la temperatura y la humedad del aire causa la liberación y migración del contenido de grasa hacia la superficie de la partícula, por tanto, mientras más grasa cubra la superficie existirá mayor oxidación en el alimento. De acuerdo a los resultados, un incremento en la temperatura de secado disminuyó la luminosidad en el queso deshidratado y generó una reducción en los valores de **a** y un aumento en los valores de **b** y por consiguiente una tendencia hacia la amarillez, por lo que la diferencia de color final aumentó. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Tuyen *et al.* (2009) quienes al evaluar el efecto de la temperatura del secado por lecho fluidizado, sobre el agrietamiento y molienda de diferentes variedades de arroz Vietnamita, encontraron que los valores de **b** fueron más altos para las muestras deshidratadas a 90 °C que para las muestras deshidratadas a 80 °C. La amarillez (b) también incrementó con el tiempo de secado por lo que la diferencia de color total ( $\Delta E$ ) aumenta.

#### **3.3.4 Superficie de respuesta del contenido de proteínas final del queso deshidratado**

En la Tabla 3.12 se observan los resultados obtenidos para el ANOVA del modelo de segundo orden correspondiente a la variable de respuesta contenido de proteínas, el cual presentó un 84.04 % de variabilidad en los datos reportados para las muestras de queso deshidratado, obtenidas durante el proceso de secado por lecho fluidizado.

**Tabla 3.12** Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta contenido de proteínas

Fuente	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	R <sup>2</sup>
Regresión	9	110.41	12.26778	2.93	0.124742	0.840492
Lineal	3	39.18381	13.06127	3.12	0.126370	0.298286
Cuadrático	3	18.52.97341	6.08426	1.45	0.333117	0.138949
Interacción	3	52.97341	17.6578	4.21	0.077755	0.403259
Error total	5	20.95326	4.190651			0.159506

En la Ec. 3.4 se presentan los coeficientes sustituidos en la ecuación polinomial de segundo orden, representando la relación entre las variables independientes (temperatura de secado, tamaño de partícula y tiempo de secado) y la variable de respuesta (% de proteínas), donde el coeficiente que presentó mayor inclinación fue el de la temperatura con el valor de +1.68025, lo cual indica que el contenido de proteínas tiende a aumentar a medida que la temperatura de secado incrementa. Dicho comportamiento se puede ver reflejado en la superficie de respuesta obtenida al emplear el software Matlab 2014<sup>a</sup>, (Figura 3.12).

$$\begin{aligned} \% \text{ Proteínas} = & 33.7296 - 0.50274 * \text{tamaño} + 1.68025 * \text{temperatura} - \\ & 0.91782 * \text{tiempo} + 2.618544 * \text{tamaño}^2 - 1.028806 * \\ & \text{temperatura}^2 - 0.2892556 * \text{tiempo}^2 - 2.012325 * \text{tamaño} * \\ & \text{temperatura} - 0.6661 * \text{tamaño} * \text{tiempo} - 1.45895 * \\ & \text{temperatura} * \text{tiempo} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.4})$$



**Figura 3.12** Superficie de respuesta del contenido de proteínas en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula

La Figura 3.12 muestra el efecto de interacción de la temperatura, tiempo de secado y tamaño de partícula sobre el contenido de proteínas del queso deshidratado. Se observa una tendencia creciente del contenido de proteínas al aumentar la temperatura de secado de 50 a 70 °C, debido a que la cantidad de sólidos incrementa a razón de que el agua residual disminuye (Vignolles *et al.*, 2007; Caliskan y Nur-Dirm, 2013). Es sabido que la remoción de agua reduce la libertad de movimiento de las moléculas de proteínas y así se previenen cambios conformacionales y desnaturalización de las mismas (Anandharamakrishnan *et al.*, 2007). De acuerdo con la literatura la membrana que rodea a los glóbulos de grasa está protegida por películas de proteínas, las cuales al romperse por efecto de la temperatura permite que los componentes migren hacia la superficie logrando un incremento de grasa libre y proteínas (Kim *et al.*, 2009; Farkye 2006). De igual manera el incremento del tamaño de partícula de 2 a 3.5 cm favoreció la cantidad final de proteínas en el queso deshidratado, posiblemente al hecho de que a mayor tamaño de partícula hay una mayor cantidad de vacuolas las cuales con el tratamiento térmico liberan mayor cantidad de componentes proteicos hacia la superficie.

Muchos investigadores han reportado el efecto de la temperatura sobre el contenido y desnaturalización de proteínas tales como: Erbay y Koca (2012) reportaron un incremento hasta de un 36.32% en el contenido de proteínas del queso blanco durante el proceso de secado por aspersión, Schuck *et al.* (2013) reportaron que la desnaturalización de proteínas es un indicador de la intensidad del tratamiento térmico y la calidad de los productos deshidratados, siendo las temperaturas entre 65 y 75 °C, temperaturas críticas para todas las proteínas solubles. Cruz-Guerra *et al.* (2010) encontraron una desnaturalización de proteínas de 0.5 y 3% en un rango de temperatura de 60 y 80 °C para proteínas de levadura en secado por charolas y secado por lecho fluidizado.

### 3.3.5 Superficie de respuesta del contenido final de grasa del queso deshidratado

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados obtenidos después de realizar la regresión lineal, con una  $R^2$  del modelo final que explica un 74.73% de la variabilidad de los resultados del contenido de grasa en el producto deshidratado obtenido mediante el proceso de secado por lecho fluidizado a diferentes condiciones de operación.

**Tabla 3.13** Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta contenido de grasa

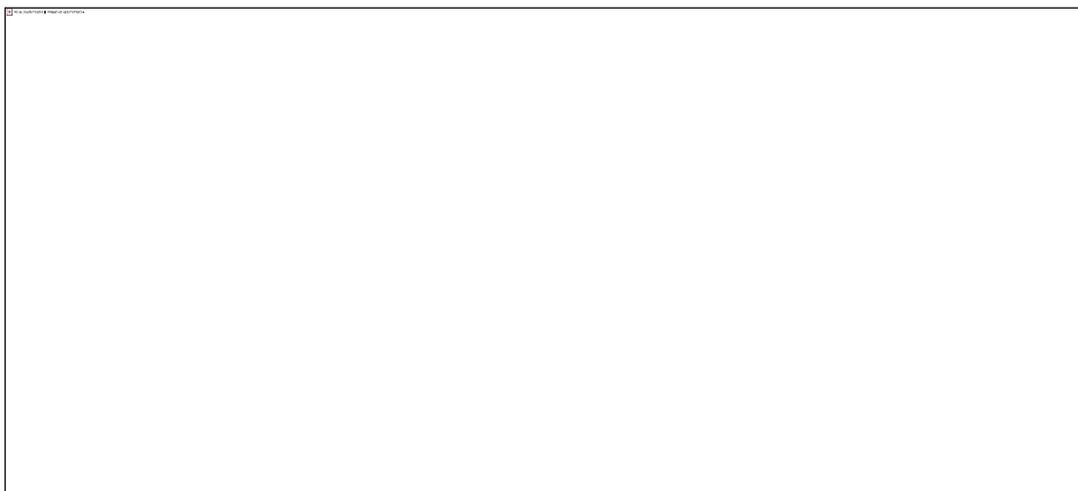
Fuente	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	$R^2$
Regresión	9	82.20723	9.134137	1.64	0.303641	0.747301
Lineal	3	59.37181	19.79061	3.56	0.102711	0.539717
Cuadrático	3	3.745486	1.248495	0.22	0.875604	0.034048
Interacción	3	19.08993	6.36331	1.14	0.416232	0.173536
Error total	5	27.79832	5.559664			0.252699

En la Ec. 3.5 se presentan los coeficientes de sustituidos en la ecuación polinomial de segundo orden, indicando la relación entre las variables independientes y la

variable de respuesta. Cabe mencionar que el coeficiente con mayor efecto en dicho modelo fue la temperatura (2.19922) ya que al aumentar dicho factor, la variable respuesta en este caso el contenido de grasa, incrementó de manera considerable. Para poder representar dicho comportamiento en la Figura 3.13 se muestra la gráfica de superficie de respuesta del contenido de grasa en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula.

$$\begin{aligned} \% \text{ Grasa} = & 41.9563 + 0.95791 * \text{tamaño} + 2.19922 * \text{temperatura} + \\ & 0.42781 * \text{tiempo} + 1.048272 * \text{tamaño}^2 - 0.06065778 * \\ & \text{temperatura}^2 + 0.2668722 * \text{tiempo}^2 - 0.704825 * \text{tamaño} * \\ & \text{temperatura} - 1.071775 * \text{tamaño} * \text{tiempo} + 0.860675 * \\ & \text{temperatura} * \text{tiempo} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que la temperatura de secado influyó de manera significativa sobre el contenido de grasa del queso deshidratado. En la Figura 3.13 se observa que el incremento de la temperatura de secado de 50 a 70 °C aumentó el contenido de grasa del producto final, debido a que las altas temperaturas dañan o eliminan los glóbulos de grasa causando que esté desprotegida y fluya como lagunas hacia la superficie de la partícula generando un incremento de grasa libre (Farkye *et al.*, 2006). Caso contrario a lo reportado por Kim *et al.*, (2009), quienes al evaluar el efecto del secado por aspersion sobre la composición de la superficie de leche en polvo, concluyeron que un incremento en la temperatura de secado generó una disminución de la grasa de la superficie debido a la formación de costras, además comprobaron que a bajas temperaturas de secado, una cantidad substancial de agua se evapora antes de formar una costra y por lo tanto los componentes tienen más tiempo para migrar hacia la superficie, sin embargo, a altas temperaturas la humedad es evaporada rápidamente y la superficie se solidifica más rápido, así hay menos distribución de componentes (menos grasa y proteínas).



**Figura 3.13** Superficie de respuesta del contenido de grasa en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula

De igual manera se observó una tendencia creciente del contenido de grasa al aumentar el tamaño de partícula de 0.5 a 3.5 cm, posiblemente al hecho de que a mayor tamaño de partícula hay una mayor cantidad de vacuolas las cuales con el tratamiento térmico liberan grasa hacia la superficie. Esta última observación es consistente con lo reportado por Vignolles *et al.* (2007) quienes reportan que durante el proceso de secado por aspersion de productos lácteos, las partículas de mayor tamaño tienen menor área de contacto en relación al volumen, así pueden encapsular más grasa. Sin embargo, la presencia de grasa en la superficie de la partícula reduce la fluidez, es susceptible a la oxidación y al desarrollo de rancidez (Kim *et al.*, 2009), además, influye sobre la diferencia de color final del queso deshidratado (Aday y Karagul, 2014).

### **3.3.6 Superficie de respuesta del porcentaje final de NaCl del queso deshidratado**

En la Tabla 3.14 se muestra el ANOVA para el modelo de segundo orden, el cual se obtuvo con una  $R^2$  del modelo final que explica el 39.07% de la variabilidad de los resultados obtenidos para el contenido de NaCl, lo que indica que dicho modelo sólo

es ajustable en una mínima proporción para los resultados obtenidos en dicha variable respuesta.

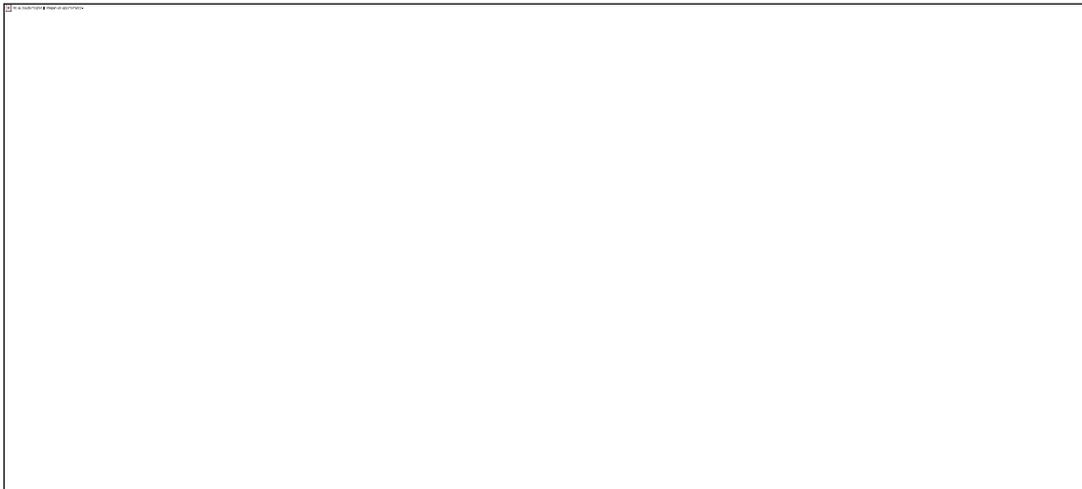
**Tabla 3.14** Análisis de varianza del modelo de segundo orden de la variable respuesta contenido de NaCl

Fuente	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Prueba F	Nivel de probabilidad	R <sup>2</sup>
Regresión	9	2315606	0.2572895	0.36.	0.915159	0.390742
Lineal	3	0.4302095	0.1434032	0.20	0.893133	0.072595
Cuadrático	3	1.350443	0.4501477	0.62	0.629961	0.227877
Interacción	3	0.5349534	0.1783178	0.25	0.860459	0.090270
Error total	5	3.610574	0.7221148			0.609258

En la Ec. 3.6 se presentan los coeficientes sustituidos en la ecuación polinomial de segundo orden, los cuales representan la relación de las variables independientes (temperatura de secado, tamaño de partícula y tiempo de secado) sobre la variable de respuesta (% NaCl), indicando que el factor con mayor efecto sobre la variable de respuesta es el tiempo, con el valor de +0.16782, por lo cual el contenido de NaCl incrementa conforme transcurre el tiempo, dicho comportamiento se puede observar con mayor claridad en la Figura 3.14.

$$\begin{aligned} \% \text{ NaCl} = & 2.980582 + 0.11259 * \text{Tamaño} + 0.0467 * \text{Temperatura} + \\ & 0.16782 * \text{Tiempo} - 0.5954278 * \text{Tamaño}^2 - 0.09927778 * \\ & \text{Temperatura}^2 + 0.5437222 * \text{Tiempo}^2 - 0.1581875 * \text{Tamaño} \\ & * \text{Temperatura} + 0.0002625 * \text{Tamaño} * \text{Tiempo} - 0.2045625 * \\ & \text{Temperatura} * \text{Tiempo} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

La sal en el queso ejerce tres funciones: actúa como preservativo, contribuye directamente sobre el sabor y provee una fuente de sodio la cual es importante para regular la presión de la sangre, el transporte dentro y fuera de las células y transmisión de impulsos nerviosos del ser humano.



**Figura 3.14** Superficie de respuesta del porcentaje de NaCl en función de la temperatura, tiempo y tamaño de partícula

Además de estas funciones, en el queso, la sal es el mayor determinante de la actividad de agua, y por lo tanto ejerce un control sobre el crecimiento microbiano, actividad enzimática y cambios bioquímicos durante el almacenamiento y el desarrollo de sabor y aroma deseables (Guinee, 2004; Soares *et al.*, 2015). Los niveles de sal en los quesos difieren significativamente de acuerdo a la variedad <0.2% en Quark comparado con 3.5% para el Roqueford (McCarthy *et al.*, 2015); de 1 a 3% para queso fresco, 4 a 5% para queso Cotija, 0.8 a 1.9% para queso Oaxaca, 4 a 5% para queso Manchego, entre otros (Hnosko *et al.*, 2009), permitiendo al consumidor una amplia elección con respecto al contenido de NaCl. Durante el proceso de deshidratación la cantidad de cloruro de sodio incrementó de 1.50 a 3.55% manteniendo la concentración de sal dentro del rango típico de quesos frescos, una vez llevado a la operación de secado. El análisis de varianza (ANOVA) indicó que las variables independientes no influyen significativamente sobre el contenido de cloruro de sodio del queso deshidratado. Como se puede observar en la Figura 3.14, al disminuir el tamaño de partícula de 3.5 a 0.5 cm se produjo una reducción del contenido de cloruro de sodio en las muestras deshidratadas, de igual manera la reducción de la temperatura de secado de 70 a 50 °C disminuyó la cantidad de cloruro de sodio en el producto final. Bajos niveles de humedad fueron

observados en las muestras deshidratadas en un tiempo de secado de 120 min por lo que el contenido de cloruro de sodio resultó ser alto debido a la pérdida de humedad durante el proceso.

**CONCLUSIONES**

**Y**

**RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se evaluaron diferentes condiciones para el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco, lográndose establecer condiciones adecuadas de operación, así mismo se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del producto fresco y deshidratado.

Llevar a cabo el proceso de secado para el queso fresco resultó conveniente debido a que dicho producto presentó valores de humedad y actividad de agua mayor al 40% y 0.90 respectivamente, convierten al queso en un producto propenso a reacciones deteriorativas y una vida de anaquel corta.

Para las variables de respuesta humedad y actividad de agua del queso deshidratado, la temperatura y el tiempo de secado presentaron influencia significativa debido a que al aumentar el tiempo de secado de 60 a 90 min y la temperatura de 50 a 60 °C, el contenido de humedad y actividad de agua se encontraron en el intervalo de  $0.315\% < X > 1.575\%$  y  $0.148 < a_w > 0.483$ , respectivamente, lo cual asegura que el producto es estable y no presentará reacciones deteriorativas ni crecimiento de microorganismos.

La temperatura de secado y el tamaño de partícula fueron factores que afectaron de manera significativa la diferencia de color, por lo que la menor diferencia de color con respecto al estándar (muestra de queso fresco) se presentó en el proceso de secado, con condiciones de temperatura de secado de 50 °C, tamaño de partícula de 0.5 cm y un tiempo de secado de 120 min, obteniendo así un producto con un color aceptable.

En lo que respecta al contenido de proteínas, se logró un incremento considerable a medida que se aumentó la temperatura de secado de 50 a 70 °C, esto debido a la disminución del agua residual presente, logrando una concentración de sólidos en las muestras deshidratadas.

Los resultados del contenido de NaCl al final del proceso se encontraron dentro de los rangos del contenido característico de un queso fresco, esto quiere decir que dicha variable de respuesta no se vio influenciada por los factores estudiados en el proceso de deshidratación.

Se recomienda que el contenido de NaCl se especifique desde el momento de la adición en el proceso de elaboración del queso, con la finalidad de mantener un estándar en los quesos producidos, de tal manera que al llevarlos a un proceso de secado, dicho contenido no presente un incremento elevado para las cantidades de consumo permisibles.

Se recomienda realizar la optimización del proceso en futuras investigaciones para obtener un panorama más claro sobre el proceso de secado por lecho fluidizado de queso fresco.

Se recomienda llevar a cabo el análisis sensorial para las muestras de queso deshidratado, así como también pruebas de almacenamiento para el producto obtenido y así poder evaluar el efecto del almacenamiento sobre las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de las muestras secas.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aday, S. y Karagul, Y.Y. 2014. Physicochemical y sensory properties of mihalic cheese. *Journal of Food Properties*. **17**: 2207-2227.
- Anandharamakrishnan, C., Rielly, C.D. y Stapley, A.G.F. 2007. Effects of process variables on the denaturation of whey proteins during spray drying. *Journal of Drying Technology*. **25**: 799-807.
- Badui D. S. 2006. Química de los alimentos. Ed. Pearson Educación. México.
- Berrones-Hernández, R., Saldaña-Trinidad, S., Pantoja, J., Grajales-Bonifaz M.C., Interiano-Grajales, O., Pérez-Pérez, K.M., Silvano-López, P.L., y Solís-Candelaria, A. 2007. Estudio del proceso de deshidratación del queso fresco chiapaneco mediante un secador solar de convección natural. *V Congreso Internacional de Ingeniería Bioquímica*, **16**:1-12.
- Bohorquez, A. H. E. 2011. Maquinaria y equipos de alimentos. Programa de ingeniería de alimentos. Universidad nacional abierta y a distancia. Bogotá, - Colombia.
- Caliskan, G. y Nur-Dirim, S. 2013. The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. *Journal of Food and Bioproducts Processing*. **91**: 539-548.
- Castell-Palou, A., Rosselló, C., Femenia, A., Bon, J. y Simal, S. 2011. Moisture profiles in cheese drying determined by TD-NMR: Mathematical modeling. *Journal of Food Engineering*, **104** (2011): 525-531.
- Chirife, J. y Buera, M. D. P. (1994). Water Activity, Glass transition and microbial stability in concentrated/semimoist food system. *J. food Sci.* 59, 921.
- Cruz-Guerra, E., Pliego-Bravo, Y., Andrade-González, I., Jiménez-Fernández, M. y Luna-Solano, G. Inactivation of bakers yeast: moisture levels,  $a_w$  y protein changes during drying. In *Proceedings of the International Drying Symposium*, Magdeburg, Germany, October 3-6, 2010.
- Domínguez, N. A. 2014. Proceso de secado por aspersion de suero de leche. Tesis de grado. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- Erbay, Z. y Koca, N. 2012. Energetic, exergetic, and exergoeconomic analyses of Spray-Drying process during white cheese powder production. *Drying Technology: An International Journal*, **30**(4): 435-444.

- Erbay, Z., Koca, N., Kaymak-Ertekin, F. y Ucuncu, M. 2015. Optimization of spray drying process in cheese powder production. *Journal of Food and Bioproducts Processing*. **93**: 156-165.
- Faccia, M., Mastromatteo, M., Conte, A. y Del Nobile M.A. 2012. Influence of the different sodium chloride concentrations on microbiological and physicochemical characteristics of Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Research*. **79**: 390-396.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2013. Statistical yearbook. World food and agriculture. Editorial FAO. Roma.
- Farkye, N.Y. 2006. Significance of milk fat in milk powder. En: Advanced Dairy Chemistry. P.F. Fox y P.L.H. McSweeney, Eds.
- Fennema O. R. (1985). Química de los alimentos. 2° Edición. Reverté, S. A. Barcelona.
- Flores A., E. 2010. Cosntrucción de sistemas nanoestructurados y su aplicacion en estudios sobre estabilidad de alimentos. Tesis de grado. Instituto Politecnico Nacional. México.
- Geankopolis, C. J. 1998. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. 3ª ed. Ed Continental.
- Ghandi, A., Powell, I.B., Chen, X.D. y Adhikari, B. 2012. The effect of dryer inlet and outlet air temperatures and protectant solids on the survival of *Lactococcus lactis* during spray drying. *Journal of drying technology*. **30**: 1649-1657.
- González V., M. 2002. Tecnología para la elaboración de queso blanco, amarillo y yogurt. Secretaría nacional de ciencia, tecnología e innovación. Soná, Veraguas, República de Panamá. pp.1-16.
- González-Miguel, M. E. y López-Malo, A. 2010. Frutas conservadas por métodos combinados. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*. (4-2): 58-67.
- Guinee, T.P. 2004. Salting and the role of salt in cheese. *Journal of Dairy Technology*. **57**: 99-109.
- Hernández, C. I. 2013. Proceso de secado por lecho fluidizado del zacate (*Cymbopogon citratus*). Tesis profesional. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

- Hernández-Morales, C., Hernández-Montes, A., Aguirre-Mandujano, E. y Villegas, A. 2010. Physicochemical, microbiological, textural and sensory characterisation of Mexican Añejo cheese. *Society of Dairy Technology*. 63(4): 525-560.
- Hnosko, J., Clark, S. y Van Hekken, D. 2009. Latin American Cheeses. En: The sensory evaluation of dairy products. S. Clark., M. Costello., M. Drake y F. Bodyfelt, Eds.
- Hunterlab. 2013. Hunter Associates Laboratory, Inc. <http://www.hunterlab.com/> (Consultado en Septiembre 2015).
- Jaworska, G., Pogon, K., Bernas, E. y Skrzypczak A. 2014. Effect of different drying methods and 24-month storage on water activity, rehydration capacity, and antioxidants in *Boletus edulis* mushrooms. *Journal of Drying Technology*. 32: 291-300.
- Jumah, R., Tashtoush, B., Shaker, R. y Zraly, A. 2011. Manufacturing parameters and quality characteristics of spray dried jameed. *Drying Technology*, 18(4): 967-984.
- Kim, E.H.J., Chen, X.D. y Pearce, D. 2009. Surface composition of industrial spray-dried milk powders. 2. Effects of spray drying conditions on the surface composition. *Journal of food engineering*. 94: 169-181.
- Konicaminolta. 2006. Konica Minolta Sensing Americas, Inc. <http://sensing.konicaminolta.com.mx/> (Consultada en Octubre 2015).
- Kozanoglu, B., Martinez, J., Alvarez, S., Guerrero-Beltrán, J.A. y Welte-Chanes, J. 2012. Influence of Particle Size on Vacuum-Fluidized Bed Drying. *Journal of Drying Technology*. 30: 138-145.
- Kumar, V., Tewari, R. y Singh, K. 2015. Comparative studies of drying methods on yield and composition of the essential oil of *Cymbopogon citratus*. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*. 18: 744-750.
- Law, C.L. y Mujumdar, A.S. 2014. Fluidized bed dryers. En: Handbook of Industrial Drying. A.S. Mujumdar, Ed.
- Lozano-Acevedo, A. 2007. Secado de lecho fluidizado de minihojuelas de papa (*Solanum tuberosum*). Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- McCarthy, M.C., Wilkinson, M.C., Kelly, P.M. y Guinee, T.P. 2015. Effect of salt and fat reduction on the composition, lactose metabolism, water activity and

- microbiology of Cheddar cheese. *Journal of Dairy Science & Technology*. **95**: 587-611.
- Montgomery, C. A. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo editorial Iberoamericana.
- Mulet, A., Cárcel, J., Sanjuán, N., y Bon, B. 2003. New Food Drying Technologies- Use of Ultrasound. *Food Science and Technology International*. (9): 215-221.
- Murthy, Z.V.P. y Joshi, D. 2007. Fluidized Bed Drying of Aonla (*Emblica officinalis*). *Journal of Drying Technology*. **25**: 883-889.
- NMX-F-089-S-1978. Determinación de extracto etéreo (Método Soxhlet) en alimentos.
- NOM-121-SSA-1994. Norma oficial. Bienes y servicios. Quesos: frescos, madurados y procesados. Especificaciones sanitarias para lácteos y sus derivados.
- Núñez, G. Y. 2016. Proceso de secado por aspersion de pulque proveniente de *Agave salmiana*. Tesis de grado. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Ochoa-Flores, A., Hernández-Becerra, J., López-Hernández, E., y García-Galindo, S. 2013. Rendimiento, firmeza y aceptación sensorial de queso panela adicionado con estabilizantes. *Universidad y Ciencia*. **29**(3) : 277-286.
- Orrego A. C. E. 2003. Procesamiento de alimentos. 1° Edición. Ed. UNC. Colombia.
- Ramírez-López, C. y Vélez-Ruiz, J. F. 2012. Quesos frescos: propiedades, métodos de determinación de factores que afectan su calidad. *Temas selectos de ingeniería en alimentos*. (1): 131-148.
- Requena, P. J. M. 2012. El queso y sus aplicaciones culinarias. *Revista digital innovación y experiencias educativas*. (50): 1-11.
- Reyes, A., Mahn, A., Guzmán, C. y Antoniz, D. 2012. Analysis of the Drying of Broccoli Florest in a Fluidized Pulsed Bed. *Drying Technology*, 30: 1368-1376.
- Rodríguez-Huezo, M. E. y Durán-Lugo, R. 2012. Los quesos mexicanos y del mundo. Hablemos claro. Reporte Teórico. Tecnológico de estudios superiores de Ecatepec.
- Saca Aguilar Lenin Vicente. 2011. Evaluación bromatológica y organoléptica de quesos frescos de leche cruda procedentes de Yangana, Gozanamá,

- Saraguro, Zalapa y Chuquiribamba. Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja. Ecuador.
- Schmidt, S.J. 2007. Water mobility in foods. En: Water activity in foods. G.V. Barbosa-Cánovas., A.J. Fontana., S.J. Schmidt. y T.P. Labuza, Eds.
- Schuck, P., Fouere, C. y Jeantet, R. 2013. Changes in functional properties of milk protein powders: effects of vacuum concentration and drying. *Journal of Drying Technology*. **31**: 1578-1591.
- Si, C., Wu, J., Wang, Y., Zhang, Y. y Shang, Xiaoling. 2015. Drying of low-rank coals: A review of fluidized bed technologies. *Journal of Drying Technology*. **33**: 277-287.
- Sierra A. I., Morante Z. S. y Pérez Q. D. 2007. Experimentación en Química Analítica. 1° Edición. Ed. DYKINSON, S. L. Madrid.
- Soares, C., Fernando, A.N., Mendes, B. y Martins, P.L.A. 2015. The effect of lowering salt on the physicochemical, microbiological and sensory properties of São João cheese of Pico Islan. *Journal of Dairy Technology*. **3**: 409-419.
- Tasirin, M.S., Puspasari, I., Sahalan, Z.A., Mokhtar, M., Kamel, M. y Yaakob, Z. 2014. Drying of Citrus sinensis Peels in an Inert Fluidized Bed: Kinetics, Microbiological Activity, Vitamin C, and Limonene Determination. *Journal of Drying Technology*. **32**: 497-508.
- Treybal R. E., (1998). Operaciones de transferencia de masa. 2° Edición. Ed. Mc Graw Hill.
- Tunick, M., Van Hekken, D., Iandola, S., y Tomasula, P. 2012. Caracterización de queso fresco durante su almacenamiento a 4 y 10 °C. *Journal of Food Research*. **1**(1):308-319.
- Tuyen T.T., Truong, V., Fukai, S. y Bhandari B. 2009. Effects of High-Temperature Fluidized Bed Drying and Tempering on Kernel Cracking and Milling Quality of Vietnamese Rice Varieties. *Journal of Drying Technology*. **27**: 486-494.
- USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 27. Version Current: August 2014.
- Varming, C., Beck, T.K., Petersen, M.A. y Ardo, Y. 2011. Impact of processing steps on the composition of volatile compounds in cheese powders. *Journal of Dairy Technology*. **64**: 197-206.

- Vignolles, M.L., Jeantet, R., Lopez, C. y Schuck, P. 2007. Free fat, surface fat and dairy powders: interactions between process and product. A review. *Lait*. **87**: 187-236.
- Villegas-Santiago, J., Calderon-Santoyo, M., Ragazzo-Sánchez, A., Salgado-Cervantes, M.A. y Luna-Solano, G. 2011. Fluidized bed and tray drying of thinly sliced mango (*Mangifera indica*) pretreated with ascorbic and citric acid. *Journal of Food Science and Technology*. **46**: 1296-1302.
- Welti C., J. y Vergara, B.1997. Actividad de agua: conceptos y aplicaciones en alimentos con alto contenido de humedad. *Temas en tecnología de alimentos*. Instituto Politecnico Nacional. México, D. F.