



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**Comportamiento de propiedades fisicoquímicas de papa pretratada  
con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol previo y posterior a la  
congelación.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERIA EN ALIMENTOS**

**SUSTENTANTE:  
MAGALI PANTOJA SALCEDO**

**ASESORES:  
DRA. MARÍA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA  
I.A. ALFREDO ALVÁREZ CÁRDENAS**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

**Comportamiento de propiedades fisicoquímicas de papa pretratada con nanocápsulas de a-tocoferol previo y posterior a la congelación.**

Que presenta la pasante: **Magali Pantoja Salcedo**

Con número de cuenta: **307663661** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 22 de Septiembre de 2016.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	I.B.Q. José Jaime Flores Minutti	
<b>VOCAL</b>	Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza	
<b>SECRETARIO</b>	M. en C. Julieta González Sánchez	
<b>1er. SUPLENTE</b>	M. en C. Enrique Fuentes Prado	
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Alma Adela Lira Vargas	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

Este trabajo fue desarrollado gracias al apoyo financiero de los proyectos:

El proyecto PAPIIT, IT200814: “Desarrollo de sistemas nanoparticulados alimenticios para incrementar la vida útil y nutraceútica de frutas frescas cortadas y bebidas de frutas” de la Dirección General de Asuntos de Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM).

El proyecto PAPIIME: PE206614 “Implementación y métodos de enseñanza para la aplicación de nanotecnología en la conservación de alimentos a bajas temperaturas sometidas a procesos térmicos y de transferencia de masa”, de la DGAPA-UNAM.

El Proyecto PAPIIME: PE103915 “Diseño y Construcción de Equipo Didáctico para Mejorar la Enseñanza de los Procesos y Sistemas Frigoríficos”. De la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS...**

*Por haberme puesto en este camino, por guiarme, por cuidarme, por darme sabiduría, fortaleza y fe para concluir esta etapa importante en mi vida. Por darme la maravillosa familia que tengo y las bendiciones que he recibido para formarme como la persona que soy.*

### **A MIS PADRES HUGO Y ALICIA...**

*No tengo palabras para describir lo agradecida que estoy con ustedes, ustedes que han dado todo y hasta lo que no tienen, por darme lo mejor de la vida, por educarme, llenarme de valores, darme toda la felicidad que una persona pudiera pedir, gracias por apoyarme, ya que sin ustedes no hubiera empezado ni culminado esta etapa de mi vida, gracias por la convicción con la han luchado día a día por sacarme adelante, le pido a DIOS que me alcance la vida y me dé tiempo para regresar aunque sea un poco de lo mucho que me dan. Soy la persona más orgullosa de ustedes, son el mayor ejemplo que tengo, los admiro muchísimo.*

### **MI HERMANO HUGUITO...**

*Es maravilloso haber crecido con alguien como tú, porque sé que siempre estás ahí para apoyarme y para contar contigo, y yo estaré siempre detrás de ti, a la retaguardia. Quiero que sepas que eres mi motivación para seguir, para superarme, porque quiero que seas mejor que yo, servirte de un ejemplo a seguir. TE AMO CON TODO MI CORAZÓN.*

### **A MI FAMILIA...**

*Gracias a mis abuelos: papá Javier, mamá Pachita, papa Bruno y a mi mamita Petrita, ustedes han sido una clave importante en mi educación, gracias por confiar en mí y darme puro amor. A mis tíos incondicionales Javier Pantoja, Mary, Pedro, Ángel, Javier Salcedo y Lupita, gracias por su cariño y apoyo, por siempre estar presentes y al pendiente de mí. A mis primos que quiero tanto y que hemos compartido demasiadas experiencias, en especial a Francisco, Carla, Alejandra, Eduardo, Brenda, Javi Salcedo, Alex y Jesús.*

### **A URIEL...**

*Quiero agradecerte tanto, por apoyarme en los momentos difíciles y por estar impulsándome y motivándome siempre, por dejarme apoyar en tu hombro y por ser incondicional en todo momento, gracias a DIOS por ponerte en mi camino, TE AMO URIEL.*

### **A MIS AMIGOS...**

*Por ser parte de los mejores momentos de mi vida, por tan solo hacer la diferencia con una sonrisa.*

### **A MIS ASESORES...**

*Dra. Luz Zambrano e I.A. Alfredo Cárdenas, con todo mi corazón les expreso mi gratitud, ya que con su ejemplo, paciencia, consejos y dedicación, han hecho un sueño realidad.*

### **A MI UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO...**

*Es un orgullo pertenecer a la máxima casa de estudios, agradezco inmensamente por darme la oportunidad de estudiar y formarme como Ingeniera en Alimentos.*

# ÍNDICE

## RESUMEN

## INTRODUCCIÓN

## I.MARCO TEÓRICO

1.1 Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> L.)	1
1.1.1 Producción y usos de papa en México	3
1.1.2 Composición química de la papa	4
1.1.3 Propiedades físicas de la papa	5
1.2 Conservación de Alimentos	7
1.2.1 Congelación de alimentos	9
1.2.2 Cambios de calidad en alimentos congelados	17
1.2.3 Cambios de calidad en papa congelada	19
1.3 Recubrimientos Comestibles	20
1.3.1 Agentes formadores de recubrimientos comestibles	21
1.3.1.1 Goma CMC	21
1.3.2 Caracterización de recubrimientos comestibles	22
1.3.2.1 A-tocoferol	24
1.3.2.2 Ácido Cítrico	25
1.3.3 Aplicación de recubrimiento y su función en papa congelada	26
1.3.4 Recubrimientos como antioxidantes	27
1.4 Nanotecnología	28
1.4.1 Nanocápsulas	29
1.4.2 Nanoemulsión	30
1.4.3 Sistemas Coloidales	31
1.5 Pre-tratamientos	32
1.5.1 Pre-tratamientos de la papa	33
1.5.2 Escaldado de alimentos	34
1.5.2.1 Efectos del escaldado en la papa	35
1.5.2.2 Factores de calidad	36
1.5.3 Enzimas responsables del deterioro de calidad en la papa	39

1.5.4	Mecanismos de deterioro de la papa	41
1.5.5	Características de las enzimas	42
1.5.6	Enzimas indicadoras	42
1.5.7	Oxidoreductasas	43
1.5.8	Oscurecimiento enzimático	45
1.6	Efecto de la congelación sobre las propiedades del freído	45
<b>II.</b>	<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL</b>	<b>48</b>
2.1	Problema	48
2.2	Objetivo General	48
2.2.1	Objetivos Particulares	49
2.3	Selección de Variables y Análisis Estadístico	50
2.4	Actividades Preliminares	52
2.4.1	Caracterización del congelador vertical	52
2.4.2	Elaboración de Diagrama de Proceso	54
2.4.3	Acondicionamiento de la Muestra	55
2.4.4	Elaboración de Dispersiones	57
2.4.5	Escaldado de las Muestras	57
2.4.6	Congelación de las Muestras	58
2.4.7	Almacenamiento	59
2.4.8	Freído de papa tipo francesa	59
2.4.9	Color	60
2.4.10	Textura	61
2.4.11	Análisis de Imagen	62
2.4.12	Evaluación de pH	63
2.4.13	Evaluación de absorción de aceite	63
<b>III.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>65</b>
3.1	Actividades Preliminares	65
3.2	Velocidad de congelación	65
3.3	Color	68
3.3.1	Luminosidad (L*)	68
3.3.1.1	Luminosidad de papa escaldada	69

3.3.1.2 Luminosidad de papa congelada	72
3.3.1.3 Luminosidad de papa después del freído	76
3.3.2 Ángulo de tonalidad (°Hue)	80
3.3.2.1 Ángulo de tonalidad de papa escaldada	80
3.3.2.2 Ángulo de tonalidad de papa congelada	81
3.3.2.3 Ángulo de tonalidad de papa después del freído	82
3.3.3 Cromaticidad (Croma)	83
3.3.3.1 Cromaticidad de papa escaldada	83
3.3.3.2 Cromaticidad de papa congelada	85
3.3.3.3 Cromaticidad de papa después del freído	86
3.3.4 Diferencia total de color ( $\Delta E$ )	87
3.3.4.1 Diferencia total de color de papa escaldada	88
3.3.4.2 Diferencia total de color de papa congelada	91
3.3.4.3 Diferencia total de color de papa después del freído	92
3.4 Textura	93
3.4.1 Firmeza de papa después del escaldado	93
3.4.2 Firmeza de la papa después de la congelación	97
3.4.3 Firmeza de la papa después del freído	101
3.5 Análisis de Imagen	103
3.6 Evaluación de pH	107
3.7 Absorción de Aceite en papa frita tipo francesa	108
<b>CONCLUSIONES</b>	111
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Morfología de una planta de papa. (infoagronomo).	2
Figura 2	Composición química del tubérculo de papa (FAO, 2008)	4
Figura 3	Micrografía del tejido papa fresca (A: cámara de aire; S: gránulo de almidón; W: pared celular) y estructura de la membrana (Sun & Li, 2003)	7
Figura 4	Papas cortadas tipo francesa.	10
Figura 5	Curva de congelación de una solución y del agua (Zaritzky, 2010)	15
Figura 6	Propiedades funcionales de un recubrimiento comestible sobre las frutas y verduras frescas (Lin & Zhao, 2007)	23
Figura 7	Formación esquemática de nanocápsulas (Esmaili & Gholami, 2015)	30
Figura 8	Representación de un sistema en equilibrio termodinámico y en desestabilización en una emulsión (Solé & Solans, 2012)	32
Figura 9	Pre-tratamiento de alimentos	33
Figura 10	Papa desde su estado natural, pasando por el proceso de pelado, cortado, hasta el freído	37
Figura 11	a) Congelador vertical; b) Termohigrómetro	53
Figura 12	Diagrama de proceso para la papa frita tipo francesa	54
Figura 13	Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> L.) utilizada en experimentación	55
Figura 14	Cortador de papa en forma prisma rectangular (tipo francesa)	56
Figura 15	Acondicionamiento de la muestra en la solución de NaCl y CaCl <sub>2</sub>	56
Figura 16	Escaldo de cada corrida según el diseño experimental	57

Figura 17	Acomodo de la papa escaldada dentro del congelador vertical	58
Figura 18	(a) Sellado de cada muestra en bolsas de HPDE; (b) Almacenamiento de papa tipo francesa envasada	59
Figura 19	(a) Aceite vegetal comestible; (b) Freidora	60
Figura 20	Caja oscura para técnica de colorimetría por el método de Briones y Aguilera (2005)	60
Figura 21	Texturómetro Brookfield penetrando papa escaldada y congelada	62
Figura 22	Análisis de imagen en la papa con Microscopio óptico digital	63
Figura 23	(a) Extractor de alimentos; (b) Potenciómetro Hanna	63
Figura 24	Absorción de aceite en la papa tipo francesa con prueba TPA	64
Figura 25	Curva de congelación de la papa sometida al proceso de escaldado a diferentes pre-tratamientos a 75 °C	66
Figura 26	Curva de congelación de la papa sometida al proceso de escaldado a diferentes pre-tratamientos a 85 °C	66
Figura 28	Luminosidad de la papa después del escaldado a) escaldado durante 6 minutos. b) escaldado durante 9 minutos	70
Figura 28	Medias de los tratamientos para los efectos principales	72
Figura 29	Interacciones de las variables	72
Figura 30	Luminosidad de la papa después de la congelación a) escaldado durante 6 minutos. b) escaldado durante 9 minutos	73
Figura 31	Comportamiento de las medias de tratamientos para los efectos principales en luminosidad después de la congelación	75
Figura 32	Interacciones entre los factores considerados en el diseño. AC= ácido cítrico, Todo= CMC+ NCs+ AC; NCs= nanocápsulas de $\alpha$ -tocoferol; CMC= carboximetil celulosa	76

Figura 33	Luminosidad de la papa después del freído a) escaldado durante 6 minutos. b) escaldado durante 9 minutos	77
Figura 34	Comportamiento de las medias de tratamientos para los efectos principales para muestras de papa freída después de la estabilización en congelación	79
Figura 35	Interacciones entre los factores considerados en el diseño. AC= ácido cítrico, Todo= CMC+ NCs+ AC; NCs= nanocápsulas de $\alpha$ -tocoferol; CMC= carboximetil celulosa	79
Figura 36	Cambio en el ángulo de tono (Hue) para papa escaldada en función a los pre-tratamientos. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetilcelulosa, N+ AC+ C= nanocápsulas+ ácido cítrico+ carboximetilcelulosa, NCS= nanocápsulas	81
Figura 37	Cambios en el ángulo de tono (Hue) asociados al pre-tratamiento, tiempo y temperatura de escaldado para papa cortada a la francesa después de la congelación. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa, NCS= nanocápsulas, N+A+C= nanocápsulas + ácido cítrico + carboximetilcelulosa	82
Figura 38	Cambios en ángulo de tono (Hue) para papa después del freído. AC = ácido cítrico, CMC = carboximetil celulosa, NCS = nanocápsulas, N + AC + C = nanocápsulas + ácido cítrico + carboximetilcelulosa	83
Figura 39	Cambios de cromaticidad en papa cortada a la francesa después del escaldado durante 6 y 9 min. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas	84
Figura 40	Cambios de cromaticidad para papa cortada a la francesa, después de congelarse AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas	85
Figura 41	Cromaticidad de la papa después del freído. a) papa escaldada durante 6 min. b) escaldado durante 9 min	86
Figura 42	Gráfico de efectos principales de Cromaticidad (Chroma) de la papa después del freído con diferentes pre-tratamientos	87
Figura 43	Diferencias de color total ( $\Delta E$ ) de la papa después del	88

escaldado

Figura 44	Interacciones de las medias en función a los factores considerados en el diseño de diferencias de color total ( $\Delta E$ ) de la papa después del escaldado	90
Figura 45	Comportamiento de la media de los tratamientos en función a los factores considerados en el diseño para diferencias de color total ( $\Delta E$ ) de la papa después del escaldado	91
Figura 46	Gráfico de efectos principales de cambio total de color $\Delta E$ de la papa después de la congelación	92
Figura 47	Gráfico de efectos principales de Cambio total de color ( $\Delta E$ ) de la papa después del freído	93
Figura 48	Cambios de firmeza en papa cortada a la francesa después del escaldado a 75 y 85 °C, durante 6 y 9 min. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas	94
Figura 49	Interacción de las variables tratamiento-tiempo-temperatura con la firmeza de la papa escaldada	96
Figura 50	Medias de los tratamientos para los efectos principales en la firmeza de la papa escalda	97
Figura 51	Cambios de firmeza en la papa cortada a la francesa después del proceso de congelación a diferentes tratamientos. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas	98
Figura 52	Interacción de las variables tratamiento-tiempo-temperatura con la firmeza de la papa congelada	100
Figura 53	Medias de los tratamientos para los efectos principales en la firmeza de la papa congelada	100
Figura 54	Interacción de las variables tratamiento-tiempo-temperatura con la firmeza de la papa tipo francesa después del proceso de freído	102
Figura 55	Medias de los tratamientos para los efectos principales en la firmeza de la papa tipo francesa después del proceso de freído	103

Figura 56	Micrografía de papa tipo francesa escaldada con diferentes pre-tratamientos a)Agua, b) CMC, C) Ácido Cítrico, d) NC's $\alpha$ -tocoferol, e) CMC, Ácido Cítrico y NC's $\alpha$ -tocoferol	104
Figura 57	Papa congelada después del proceso de escaldado en agua	105
Figura 58	Micrografía de papa tipo francesa congelada durante 24 horas a diferentes pre-tratamientos a)Agua, b) CMC, C) Ácido Cítrico, d) NC's $\alpha$ -tocoferol, e) CMC, Ácido Cítrico y NC's $\alpha$ -tocoferol	106
Figura 59	Gráfico de pH de la papa escaldada con diferentes pre-tratamientos	107
Figura 60	Cambios en absorción de aceite en papa tipo francesa, después de la congelación y freído	109
Figura 61	Apariencia del aceite después del freído de las papas tipo francesa con diferentes pre-tratamientos de escaldado	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Producción de papa en México en el año 2013 (Mora, 2014).	3
Tabla 2	Características físicas de la papa (Buitrago et al., 2004).	6
Tabla 3	Información general de las reacciones que afectan la calidad de alimentos (Kong & Sing, 2011)	40
Tabla 4	Selección de variables	50
Tabla 5	Diseño estadístico factorial 3 <sup>3</sup> y cada corrida y sus variables	51
Tabla 6	Velocidad de congelación y PIC de la papa tipo francesa sometida a diferentes pre-tratamientos	67
Tabla 7	ANOVA para los factores, pre-tratamientos, Temperatura y tiempo de escaldado	71
Tabla 8	ANOVA para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, en papa congelada	74
Tabla 9	ANOVA para los factores del diseño factorial de luminosidad en papa freída	78
Tabla 10	ANOVA para $\Delta E$ para los efectos del diseño factorial en papa congelada.	89
Tabla 11	ANOVA para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, empleando como covariantes los resultados de firmeza obtenidos de las muestras de papa escaldada	95
Tabla 12	ANOVA para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, empleando como covariantes los resultados obtenidos de las muestras de papa congelada	98
Tabla 13	ANOVA para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, empleando como covariantes los resultados obtenidos de las muestras de papa freída	101

## RESUMEN

La papa (*Solanum tuberosum*) ha sido reconocida como un producto alimenticio saludable y económico. En respuesta a la creciente demanda de los consumidores, procesadores de papa están buscando constantemente nuevas e innovadoras formas de utilizar las papas por tanto la papa tipo francesa proporciona un producto rentable, bueno y uniforme. En este trabajo se presenta un estudio sobre los cambios de calidad que afectan a las papas después de los procesos térmicos (escaldado y freído) y no térmicos (congelación) que esta tiene que pasar para evitar el deterioro enzimático. El escaldado se realizó con diferentes pre-tratamientos como con ácido cítrico, carboxil metil celulosa(CMC), nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol y todo en conjunto, en comparación con el escaldado de agua convencional, a diferentes temperaturas (75 y 85°C) y diferentes tiempos de escaldado (6 y 9 min). Se analizaron los cambios de textura, color, pH, microestructura de la papa después del escaldado, congelación y freído, con diferentes pre-tratamientos. Las nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol durante el escaldado, la congelación y el freído contribuyeron a tener una mejor firmeza e índices de color que pueden ser aceptables para el consumidor y en el caso del freído disminuyó el porcentaje de aceite que la papa obtiene después de la inmersión en aceite a una temperatura de 170 °C.

**Palabras clave:** Escaldado, congelación, freído, nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, papa (*Solanum tuberosum*).

## INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) tiene gran importancia comercial y es cultivada en todo el mundo, se ha pronosticado que la tendencia a largo plazo se incrementará a un consumo per cápita anual de 20 kg por habitante (Sabbagh et al., 2011). La papa se puede consumir en diferentes formas, ya sea natural o transformada en diversos productos, tales como papas fritas, puré de papas y gránulos deshidratados. Durante el procesamiento industrial, las papas se someten a diferentes tratamientos térmicos que afectan la calidad final del producto. Para los consumidores, los principales atributos de calidad en la papa procesada, son el color y la textura (Bordoloi et al., 2012). Los cambios de textura que ocurren durante el procesamiento térmico de las papas se han asociado con el comportamiento de gelatinización y retrogradación del almidón (Alvarez & Canet, 1998) y la descomposición de la célula. Así mismo durante su procesamiento y posterior almacenamiento presenta cambios de color característico y ruptura de la corteza, ya sea por tratamientos térmicos excesivos o deficientes, que generan rechazo por parte del consumidor. Su procesamiento consta de las etapas de lavado, selección, escaldado, enfriado, congelación, empaque y almacenamiento (Mendoza & Herrera, 2012).

El almidón es el componente principal de la materia seca de las papas. Por lo tanto, su organización molecular y las interacciones con los polisacáridos no amiláceos y azúcares son factores importantes que influyen en los atributos sensoriales de papas procesadas (Kita et al., 2007). Una mejor comprensión de las propiedades fisicoquímicas y estructurales del almidón durante el procesamiento de la papa, ofrecerá la posibilidad de controlar su calidad, como el proceso de pre-tratamiento como en el caso del escaldado que tiene un efecto significativo en los gránulos de almidón y sustancias pécticas en papas congeladas y esto se asocia al reblandecimiento de los tejidos (Alvarez & Canet, 1998), sin embargo, el empleo de sustancias como crio protectores contribuyen a

reducir el daño a los tejidos, siendo estos los parámetros investigados en conjunto con los pre-tratamientos para productos congelados (Sacchetti & Neri, 2014).

El propósito de la congelación durante el procesamiento de la papa es estabilizar los gránulos de almidón, manteniendo sus propiedades funcionales mientras se extrae el calor sensible y latente. El escaldado en el caso de la papa se realiza para obtener un color más uniforme después de procesos como la congelación y la fritura, para inactivar las enzimas y para formar una capa de almidón gelatinizado que limita la absorción de aceite y mejorar la textura (Mestdagh et al., 2008). En este sentido y con la finalidad de mejorar las características texturales y de color post-congelación el empleo de nanopartículas en el procesamiento de alimentos tiene potencialidades ya que la nanotecnología permite la manipulación de los sistemas a tallas de entre 10 a 500 nm con lo que se logra modificar las propiedades que presentan los materiales a tallas superiores (Zambrano et al., 2011). Los efectos negativos del pre tratamiento en la papa tipo francesa en color y textura deberán reducirse al mínimo las cuales son alteraciones debidas a las fracturas del tejido (Fortuny & Belloso, 2003).

Freír en aceite es un proceso altamente versátil (Mestdagh et al., 2008), como en el caso de papa frita tipo francesa, ya que más del 30 % de la cosecha de papa se utiliza para hacer papas fritas en todo el mundo (Ullah et al., 2014) y esto podría atribuirse a sus características organolépticas únicas de la papa.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Papa (*Solanum tuberosum* L.)

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es una herbácea anual que alcanza una altura de un metro y produce un tubérculo, la papa tiene abundante contenido de almidón, esta ocupa el cuarto lugar mundial en importancia como alimento, después del maíz, el trigo y el arroz (FAO, 2008). Es originaria de América, específicamente de la región sur, en donde se ubica la zona andina, que comprende los países de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile, aunque también se ha podido demostrar, que algunas variedades silvestres son originarias de México (CONPAPA, 2007).

La papa constituye un importante alimento para la dieta diaria. Soporta pH de entre 5.5 a 6, ésta circunstancia se suele dar más en los terrenos arenosos. Es considerada como una planta tolerante a la salinidad. Es una planta poco exigente a las condiciones edáficas, sólo le afectan los terrenos compactados y pedregosos, ya que los órganos subterráneos no pueden desarrollarse libremente al encontrar un obstáculo mecánico en el suelo.

La papa es una hortaliza de diversas formas de usos y consumos, como consumo doméstico, consumo animal (para elaboración de forrajes y abonos), industria química (para extraer alcohol y fabricar licores, aromas, cosméticos, medicinas, entre otros) (CONPAPA, 2007).

## a) Morfología y Taxonomía

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es conocido como un cultivo que es muy sensible a la sequía del suelo, incluso un período muy corto de la escasez de agua tiene un efecto negativo sobre la calidad de consumo y en las propiedades tecnológicas de los tubérculos de papa (Boguszewska et al., 2010). A continuación se mencionan características específicas de la morfología de la planta de papa.

**Familia:** *Solanáceas*

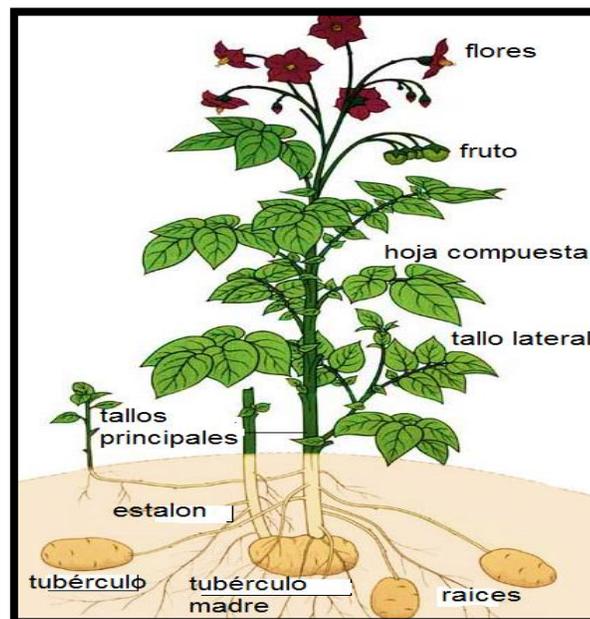
**Género:** *Solanum*

**Nombre científico:** *Solanum tuberosum*

**Tubérculos:** Están formados por tejido parenquimatoso, donde se acumulan las reservas de almidón. En las axilas del tubérculo se sitúan las yemas de crecimiento llamadas “ojos”, dispuestas en espiral sobre la superficie del tubérculo.

**Hojas:** son compuestas y con folíolos primarios, secundarios e intercalares.

**Frutos:** en forma de baya redondeada de color verde de 1 a 3 cm de diámetro, que se tornan amarillos al madurar como se observa en la **Figura 1**.



**Figura 1.** Morfología de una planta de papa. (infoagronomo).

### 1.1.1 Producción y usos de papa en México

La presencia de papas silvestres en México indica que este país se encuentra en el ámbito de origen de este tubérculo. En México, la papa ocupa el lugar 14 en orden de importancia por superficie sembrada, el lugar 17 por su producción y en cuanto al consumo anual México ocupa el 6° lugar. Se cultiva en 24 de los 32 estados de la República, distribuidos en diferentes regiones del país. Los principales estados productores son: Sonora, Sinaloa, Veracruz, Puebla, Nuevo León y Estado de México (Mora, 2014).

Existen bajos niveles de consumo de papa en México, aun y cuando la papa se produce casi todo el año, el consumo per cápita en México es muy bajo: en 2007 alcanzo 17 kg por habitante (Sabbagh et al., 2011). En la **Tabla 1** se muestra la producción de papa en México en el año 2013.

**Tabla 1.** Producción de papa en México en el año 2013 (Mora, 2014).

<b>Área cosechada</b>	60,875 ha
<b>Cantidad</b>	1 629 938 Ton
<b>Rendimiento</b>	26,8 Ton/ha

El consumo de papa en México se distribuye de la siguiente manera (CONPAPA, 2007): 56 % consumo de papa fresca, 29 % proceso industrial y 15 % para semilla que se utilizara en el siguiente ciclo.

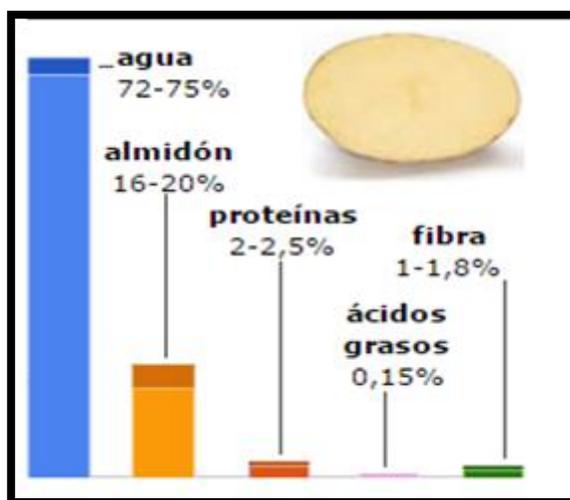
La papa (*Solanum tuberosum L.*) es utilizada principalmente para consumo familiar o para venta en los mercados locales. El almidón generado a partir de la papa, se utiliza para la elaboración de papel, textiles, pegamentos, bebidas alcoholicas y alimentos. Se cocina de diversas formas de acuerdo a las costumbres de cada región, puede comerse al horno, hervida, frita, deshidratada, y en bebida es utilizada para la producción de vodka después de un proceso de destilación (Sinarefi, 2015). El consumo de papas fritas creció más que el consumo de papa

fresca. Otra forma de consumir la papa sin que represente un alto grado de transformación es papa congelada (Mora, 2014).

### 1.1.2 Composición química de la papa

La composición química de la papa varía sustancialmente en función a la variedad, condiciones de cultivo (calidad de la semilla, tipo de suelo, fertilizantes, temperatura, humedad, luz), grado de madurez y condiciones de almacenamiento. En cuanto a las características de calidad determinantes para el procesamiento de papa, es necesario hacer una distinción entre la calidad externa del tubérculo y la calidad interna. La calidad interna de la papa está definida por parámetros físico-químicos como el color de la pulpa, el contenido de materia seca, la susceptibilidad al pardeamiento enzimático y a la decoloración después del cocido o escaldado (Hasbún et al., 2009).

El valor nutrimental de la papa depende mucho de su estado óptimo de madurez y de la forma de consumo. La papa está constituida en 25 % de materia seca y el 75 % restante es agua, en la **Figura 2** se observa la composición química de la papa.



**Figura 2.** Composición química del tubérculo de papa (FAO, 2008).

Esta tiene un alto valor nutritivo para el ser humano y una de sus principales características es el contenido de carbohidratos (en forma de almidones), hierro, magnesio, potasio, fósforo, fibra dietética, vitamina A, C y complejo B. El contenido de sólidos en la papa es una de las características más importantes para el procesamiento industrial, ya que en la mayoría de los procesos, contenidos altos de sólidos son sinónimos de alto rendimiento. Los sólidos totales están relacionados principalmente con un alto porcentaje de almidón, es por este carbohidrato que las papas son consideradas una fuente de energía. Después del agua, el almidón es el segundo componente más abundante en la papa, con alrededor de 60-80 % de la materia seca. Otros de los componentes con gran influencia sobre la calidad de los productos procesados de papa son los azúcares reductores (Hasbún et al., 2009). El almidón es un polisacárido que se hidroliza por la acción de amilasas y mediante otros sistemas enzimáticos, los productos formados por la degradación del almidón son la sacarosa y la fructuosa que se encuentran cuando llega a la plena maduración. El almidón es una mezcla de dos polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina; el almidón de la papa contiene aproximadamente entre 73-77 % de amilopectina y de 18-27 % de amilosa. El almidón está organizado en forma de gránulos y tiene una temperatura de gelatinización entre 58-67 °C; tanto la amilosa como la amilopectina influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización (Badui, 2006).

### **1.1.3 Propiedades físicas de la papa**

Las características físicas de la papa son importantes para el análisis de su comportamiento por el paso de diversos procesos (Buitrago et al., 2004). Algunas características físicas sobresalientes de la papa (*Solanum tuberosum L.*) se muestran en la **Tabla 2**.

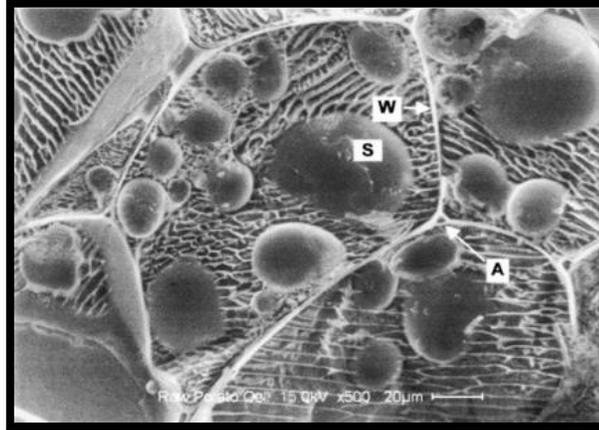
**Tabla 2.** Características físicas de la papa (Buitrago et al., 2004).

Característica	Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> L.)
Peso	46.33 g
Densidad real	1114,27 kg m <sup>-3</sup>
Densidad Aparente	534,95 kg m <sup>-3</sup>
Esfericidad	0.82
Redondez	0.83
Porosidad (%)	51.85 %

La estructura rígida de la papa cruda se debe principalmente a las sustancias pécticas, celulosas y hemicelulosas. Las sustancias pécticas, que son principalmente constituyentes de la lamela media, desempeñan un papel importante en la adhesión intercelular y también contribuyen a la resistencia mecánica de la pared celular. Durante su procesamiento, las sustancias pécticas contribuyen a la degradación de la textura de la papa (Ghannam & Crowley, 2006).

En la microestructura de la papa fresca se puede observar que las células del tejido están en contacto perfecto aunque existen algunos pequeños huecos intercelulares. Estos huecos son espacios de aire intercelulares que son comunes en el tejido parenquimatoso. Los volúmenes intercelulares en las papas se estiman en 1 % del volumen total de las papas y son insignificantes, mientras que el volumen de las manzanas esta entre 20-25 % y en el melocotón el 15 % de volumen de aire (Sun & Li, 2003). La **Figura 3** muestra una micrografía con la estructura general de la papa, observándose que las células de la papa están separadas por una estructura semi-rígida constituidas por la membrana celular. La estructura de la pared celular y la membrana es importante para mantener el metabolismo de las células, sin embargo, carece de flexibilidad y resistencia a las tensiones mecánicas procedentes del crecimiento de hielo cuando la papa pasa por un proceso de congelación. Por lo tanto, los daños a los tejidos de las frutas y

verduras durante la congelación se pueden atribuir principalmente a alteraciones de la lámina media, membranas celulares y las paredes celulares.



**Figura 3.** Micrografía del tejido papa fresca (A: cámara de aire; S: gránulo de almidón; W: pared celular) y estructura de la membrana (Sun & Li, 2003).

## 1.2 Conservación de alimentos

El término conservación de manera breve se define como "Modo de mantener algo sin que sufra merma o alteración" (Berk, 2013). El objetivo principal del procesamiento de los alimentos es preservar la calidad del mismo, de tal manera que con ello se logra incrementar el periodo de almacenamiento y comercialización, conocido como vida útil. Los diferentes tipos de deterioro de los alimentos incluyen:

- Deterioro microbiano: deterioro debido a la actividad y/o presencia de microorganismos.
- Deterioro enzimático: Cambios indeseables debido a la enzima que cataliza la reacción.

- Descomposición química: Cambios indeseables debido a reacciones químicas no enzimáticas entre los componentes de los alimentos (ejemplo: pardeamiento de Maillard), y su entorno (ejemplo: la oxidación de lípidos).
- Deterioro físico: Cambios indeseables en la estructura física de los alimentos (ejemplo: la cristalización de azúcar en conservas, separación de emulsiones y geles).

Las principales tecnologías de conservación son el tratamiento térmico, refrigeración y congelación, la concentración, el secado, la radiación ionizante, la preservación química, alta presión hidrostática, campo eléctrico pulsado y la luz intensa.

- Preservación de calor (procesos térmicos). Los microorganismos y enzimas se destruyen a altas temperaturas. El grado de destrucción depende de la temperatura, el tiempo de exposición y, por supuesto, la resistencia al calor de los microorganismos o enzimas presentes en el alimento. La exposición a altas temperaturas también acelera una gran cantidad de reacciones químicas que conducen a cambios en la textura, sabor, apariencia, color, digestibilidad y valor nutricional en los alimentos. Estos cambios pueden ser benéficos o perjudiciales.
- Preservación con procesos de baja temperatura. La actividad de los microorganismos y enzimas, así como la velocidad de las reacciones químicas están deprimidas a bajas temperaturas. La desaceleración de las reacciones de deterioro es posible sólo mientras se mantiene la temperatura baja y por ende estas se acelerarán al incrementarse la temperatura. Resultado que, a diferencia del tratamiento térmico, el efecto de preservación por frío no será tan prolongada, de ahí la importancia de mantener la cadena de frío durante toda la vida útil del producto alimenticio (Berk, 2013).

### 1.2.1 Congelación de alimentos

La conservación de los alimentos por congelación se ha convertido en una industria importante en México, así como en otras partes del mundo. La congelación juega un papel importante en la extensión de la vida útil y la preservación de los atributos de calidad de muchos alimentos. La baja temperatura reduce eficazmente las actividades microbianas, enzimáticas, debilita la oxidación y la respiración de frutas cosechadas y hortalizas, debido a las necesidades de consumo de las zonas urbanas en relación a su crecimiento poblacional, se incrementa el consumo de frutas y vegetales congelados, principalmente por comodidad, ahorro de tiempo y otras razones prácticas (Xin et al., 2015).

La conservación de un alimento por congelación se produce por varios mecanismos, a temperaturas inferiores a 0 °C hay una reducción significativa en las tasas de crecimiento para microorganismos y en el correspondiente deterioro del producto debido a la actividad microbiana. La misma influencia de la temperatura se aplica a la mayoría de las otras reacciones que podrían ocurrir normalmente en el producto, tales como las reacciones enzimáticas y oxidativas. Además, la formación de cristales de hielo dentro del producto cambia la disponibilidad de agua para participar en las reacciones, a medida que la temperatura se reduce y más agua se convierte a un estado sólido, hay menos agua disponible para soportar reacciones de deterioro (Singh, 2014).

En la **Figura 4** se muestra a la papa después del proceso de congelación, cortada en tipo francesa.



**Figura 4.** Papas cortadas tipo francesa congeladas.

El tiempo en el que se lleva a cabo el proceso de congelación es un factor que tendrá influencia directa en la calidad de producto a comercializar. Para algunos productos se requiere de una congelación rápida (tiempo corto de congelación) para asegurar la formación de pequeños cristales de hielo dentro de la estructura del producto y un daño mínimo a su textura, sin embargo, existen productos que tienen configuraciones geométricas y tamaños que no permiten una congelación rápida (Singh, 2014).

La congelación implica la reducción de la temperatura de un sistema por debajo de su punto inicial de congelación, después de este el agua se convierte en hielo a través de la pérdida de calor latente asociados con el cambio de fase. Las células vivas, materiales biológicos (tejidos de plantas y animales) y alimentos derivados de ellos contienen una gran proporción de agua. Cuando el alimento se congela, el agua se elimina de la matriz del alimento a través de la formación de cristales de hielo, aumenta la concentración de sustancias disueltas en las regiones no congeladas y reduce la actividad de agua ( $a_w$ ) del producto (Zaritzky, 2010).

### **a) Propiedades del agua y el hielo**

El agua es una sustancia considerablemente abundante en la naturaleza que resulta esencial para los procesos de los seres vivos debido a sus diversas funciones que desempeña. Además, es un componente mayoritario en la mayoría de los alimentos, donde contribuye en forma determinante a características como textura, apariencia, sabor, etc. Igualmente 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 (Fennema, 1976).

La molécula de agua está constituida por dos átomos de hidrógeno unidos en forma covalente a uno de oxígeno, es altamente polar, no es lineal y crea estructuras tridimensionales. En los tejidos animal y vegetal, el agua no está distribuida de forma uniforme, debido a los complejos hidratados que se producen con proteínas, a los hidratos de carbono y a las diversas estructuras internas propias de cada tejido; el citoplasma de las células presenta un alto porcentaje de polipéptidos capaces de retener más agua que los organelos que carecen de macromoléculas semejantes. Esta situación de heterogeneidad de la distribución del agua también se presenta en productos procesados debido a que sus componentes se encuentran en distintas formas de dispersión (Badui, 2006). 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 fácilmente por las diversas temperaturas de congelamiento.

En un alimento, las variables que influyen en su estabilidad son: la actividad de agua, temperatura, pH, disponibilidad de nutrimentos y reactivos, potencial de óxido-reducción, presión y presencia de conservadores. En general, mientras más alta sea la actividad de agua de un alimento y más se acerque a 1.0, que es la del agua pura, mayor será su inestabilidad (Badui, 2006). Una de las anomalías importantes del agua es la expansión del volumen de hielo en la congelación;

cuando el agua se congela a 0 °C a la presión atmosférica, su volumen aumenta en un 9 % (Zaritzky, 2010) y los cristales de hielo modifican la textura en frutas, hortalizas y cárnicos.

### **b) Punto inicial de congelación en los productos alimenticios**

El comportamiento fisicoquímico de los sistemas alimenticios que contienen agua y solutos se puede comparar con la de una solución acuosa, donde el punto de congelación inicial o la temperatura de equilibrio entre una solución y la fase de hielo son inferiores en presencia de un soluto que para disolvente puro (agua). Cuando el hielo se forma se separa de los solutos del alimento, haciendo que la solución líquida restante sea más concentrada y el punto inicial de congelación sea menor, por lo tanto el calor latente se libera gradualmente en un rango de temperatura. La depresión del punto de congelación en soluciones es una propiedad coligativa y depende de la concentración de partículas de soluto, que reducen el número de moléculas de disolvente que puede someterse a la transición de fase de líquido a sólido. Los valores típicos del punto inicial de congelación para los vegetales es de -0.8 a -2.8 °C (Zaritzky, 2010; Pham, 2014).

El punto inicial de congelación varía en cada producto alimenticio entre -1 a -3 °C dependiendo de su naturaleza y la concentración de solutos presentes. Por debajo del punto inicial de congelación los cristales de hielo comienzan a separarse, o en ausencia de la nucleación, el líquido se vuelve sobreenfriado. A medida que la temperatura se reduce, más agua se convierte en hielo, la concentración de solutos se eleva gradualmente en la porción de agua sin congelar. Este fenómeno continúa hasta que alcanza el punto eutéctico que es la temperatura máxima a la que puede producir la mayor cristalización del solvente y soluto, y la solución restante se solidifica por completo. En alimentos como carne y pescado la temperatura de congelación máxima es de -50 hasta -70 °C y en frutas y vegetales entre -16 hasta -20 °C (Chattopadhyay, 2014).

### **c) Proceso de congelación: formación de hielo**

Hay tres tipos de procesos de congelación: congelación ultrarrápida (congelación criogénica) en el que la temperatura de los alimentos baja, alrededor de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dentro de 5 a 10 min; congelación rápida (chorro de aire o congelador por contacto de placas) en el que el tiempo es de 30 min para la misma reducción de temperatura; y congelación lenta (congelación en almacén frigorífico o aire quieto), que toma de 3 a 72 h para alcanzar la temperatura de alrededor de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Chattopadhyay, 2014).

La congelación involucra factores termodinámicos que definen las características del sistema en condiciones de equilibrio, y factores cinéticos que describen las tasas a las que el equilibrio. El proceso de congelación incluye dos etapas sucesivas: la formación de cristales de hielo (nucleación), y el posterior aumento de tamaño de cristal (crecimiento). Cuando el alimento es enfriado por debajo de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el hielo comienza a formarse a la temperatura crioscópica, que es la temperatura a la que comienza la congelación, que es también la temperatura de fusión. La cristalización del hielo, en el curso de la congelación, se produce después de una cierta sobrefusión y el proceso de congelación se acompaña de una elevación de temperatura cercana a la temperatura crioscópica (Villanueva, 1990).

- **Nucleación**

La nucleación es la disposición de moléculas en una partícula ordenada de un tamaño suficiente para sobrevivir y servir como un sitio para su posterior cristalización. Una barrera de energía (energía de activación) debe ser superada antes de que ocurra la nucleación. La velocidad de nucleación es altamente dependiente de la temperatura del medio de congelación, la viscosidad del sistema y el volumen de la muestra (Zaritzky, 2010).

- **Crecimiento de cristales**

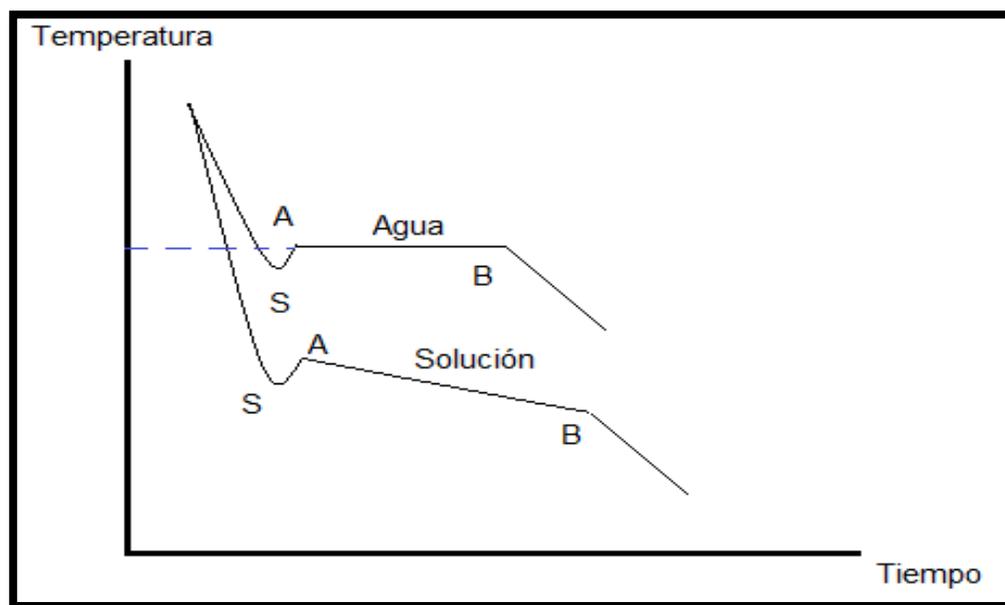
La calidad de los alimentos congelados se determina fuertemente por el tamaño de los cristales de hielo que crecen en ellos. El crecimiento de cristales no es instantáneo y es controlado por la velocidad de eliminación del calor latente liberado durante el cambio de fase, así como por la tasa de transferencia de masa en el caso de soluciones. La transferencia de calor no es el único factor que regula el crecimiento de cristales o la velocidad de propagación de hielo. Si el hielo está cristalizando a partir de una solución, las moléculas de agua se difunden desde la solución circundante a la superficie de los cristales de hielo y se incorporan en la fase sólida en crecimiento. Al mismo tiempo, las moléculas de soluto deben ser rechazadas de región ocupada por los cristales de hielo puros y se difunden fuera de la superficie sólida (Van et al., 2013). Además, la formación de cristales de hielo dentro del producto cambia la disponibilidad de agua para participar en las reacciones, cuanto más se reduce la temperatura y más agua se convierte en estado sólido, menos agua disponible para soportar reacciones de deterioro.

La tasa de crecimiento de los cristales es más grave cuando se aplican procesos de congelación lenta, debido a la migración de líquido desde el interior de los fluidos celulares al espacio extracelular, la ruptura de las membranas y la interrupción de la ultra estructura de las células y tejidos. Una tasa de congelación rápida minimiza la migración de agua en el espacio extracelular y, por consiguiente, promueve la formación de hielo intracelular más pequeño (Kong & Sing, 2011).

#### **d) Duración de congelación**

Es el tiempo transcurrido desde el principio de la fase de pre-congelación hasta la obtención de la temperatura final. Esta duración depende de la temperatura inicial y final, de la cantidad de calor a extraer, de las dimensiones y de la forma del producto, así como de los parámetros de transmisión térmica (Villanueva, 1990).

En la **Figura 5** se muestra esquemáticamente el tiempo y temperatura para la congelación de agua pura y una solución acuosa que representa un modelo de sistema simplificado de alimentos. La primera etapa es el enfriamiento de agua pura (línea superior) consiste en la eliminación del calor sensible. Es necesaria la nucleación para iniciar la congelación y la temperatura quede por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$  sin la formación de cristales de hielo. El punto "S" indica el sobre enfriamiento del agua antes de la cristalización, una vez que se alcanza la masa crítica de los núcleos, se libera el calor latente de solidificación más rápido (Villanueva, 1990; Zaritzky, 2010).



**Figura 5.** Curva de congelación de una solución y del agua (Zaritzky, 2010).

El aumento de la temperatura (punto "S" al punto "A") debido a la liberación del calor latente de solidificación después del sobre enfriamiento inicial representa el inicio de la cristalización del hielo. Una vez que comienza la cristalización, la temperatura alcanza el punto "A", el punto de agua pura (congelación  $T_f = 0^{\circ}\text{C}$ ). Mientras el hielo y agua están en equilibrio, la temperatura se mantiene en el punto de congelación hasta que toda el agua pasa a estado sólido (punto "B"). En el agua pura, la meseta de "A" a "B" representa el tiempo durante el cual se

produce el crecimiento de cristales. Una vez que la solidificación se ha completado, la eliminación adicional de los resultados de calor en una disminución de la temperatura hacia la temperatura del medio de congelación.

La congelación de un sistema alimentario se analiza de manera simplificada, considerando el comportamiento de una solución acuosa. El gráfico muestra en el punto "S" el sobre enfriamiento y la nucleación. Del punto "S" al punto "A" se eleva la temperatura, siendo un efecto del calor liberado. El punto "A" representa el punto de congelación inicial de la solución, que es inferior al punto de congelación del agua pura. En soluciones acuosas, el grado de sobre enfriamiento es generalmente menor que en agua pura, ya que el soluto añadido promueve la nucleación heterogénea, acelerando el proceso de nucleación.

En las soluciones muy concentradas, a veces es difícil observar el sobre enfriamiento. El punto de congelación en declive (pendiente negativa de "A" a "B") refleja el aumento gradual en la concentración de soluto y el agua se separa en forma de cristales de hielo (Villanueva, 1990).

#### **e) Velocidad de congelación**

Para algunos alimentos, ya sea porque lo requiere la producción o por calidad del alimento se requiere una congelación rápida (tiempo de congelación corto) para asegurar la formación de pequeños cristales de hielo dentro de la estructura del producto y el mínimo daño a la textura del producto, como ejemplo el helado. Sin embargo, otros productos, por ejemplo los que tienen altas concentraciones de sólidos, tienen configuraciones geométricas y tamaños que no permiten una rápida congelación (Singh, 2014; Millan et al., 2007).

La velocidad de congelación para un producto, es el cociente de la diferencia entre temperatura inicial y temperatura final por la duración de la congelación (Villanueva, 1990), y valores de velocidad superiores a 5 °C/min suponen una

congelación rápida; valores inferiores a 1 °C/min una congelación lenta. La velocidad de congelación viene expresada por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{t_i - t_f}{\theta}$$

V= velocidad de congelación (°C/s).

t<sub>i</sub>= temperatura inicial del alimento (°C).

t<sub>f</sub>= temperatura final del alimento (°C).

θ= tiempo en que tarda el centro térmico del alimento en pasar de la temperatura inicial a la temperatura final (s).

La velocidad de congelación es uno de los principales factores que afecta la calidad de los alimentos, ya que determina tamaños de los cristales de hielo y durante el almacenamiento, estos cristales de hielo crecen y causan daño en las células por alteración de las membranas, paredes celulares, y la estructura interna de los alimentos, de modo que cuando se descongela, el producto es diferente del original en textura y sabor. Cuando mayor sea la velocidad de congelación, mayor es la nucleación, y por lo tanto mayor es el número de cristales más pequeños (Chattopadhyay, 2014).

La velocidad de congelación también tiene un efecto directo sobre la textura del producto. El tamaño y la ubicación de los cristales de hielo formados durante la congelación afecta a la textura de los vegetales (Carbonell et al., 2006).

### **1.2.2 Cambios de calidad en alimentos congelados**

Los cambios texturales se deben esencialmente a los cambios estructurales que suceden en los diferentes alimentos por el cambio de estado, la fracción de agua congelada, el rompimiento celular y las características particulares de cada alimento. Por ejemplo, Machado y Vélez (2008) mencionan en un estudio que los cambios por congelación son reducidos si se incorporan gomas en la formulación

de alimentos líquidos; y por otra parte que las velocidades de congelamiento y descongelación tuvieron más influencia en la textura de nueces, que la temperatura de almacenamiento; así en cada alimento hay una causa específica.

La formación de hielo afecta la calidad de los alimentos a través de diversas modificaciones físico-químicas durante la congelación, almacenamiento y descongelación-congelado. Los cambios físicos provocados por la congelación son: cambios en volumen celular, la dislocación del agua durante la congelación, daños mecánicos, agrietamiento, la migración de humedad durante el almacenamiento, las quemaduras por congelación, la re-cristalización de hielo y exudado. La disminución de la temperatura inhibe los procesos metabólicos que se producen en los vegetales después de la cosecha, así como disminuye la tasa de crecimiento microbiológico que compromete la calidad del material (Ali et al., 2016).

Durante la congelación, el agua pura se expande y en la mayoría de los alimentos también tienden a expandirse al congelarse, pero en menor medida que el agua pura, debido a los demás constituyentes que conforman a los alimentos y el cambio de volumen no es uniforme en todo el sistema. Los espacios intercelulares de aire, que son comunes en el tejido vegetal, pueden acomodar el crecimiento de cristales de hielo y minimizar los cambios en las dimensiones externas de la muestra. Cuando se producen cristales de hielo extracelular, la deshidratación y la contracción de las células pueden causar la ruptura o plegado de las membranas celulares por mecanismos de estrés en los tejidos vegetales, debido a varios factores tales como el cambio volumétrico de agua convertida en hielo, el tamaño de cristales de hielo, y mientras los cristales de hielo continúan creciendo en tamaño, ejercen presión adicional sobre las estructuras celulares frágiles. Estos mecanismos de estrés pueden deteriorar los productos congelados que influyen en la calidad del vegetal en textura y estructura (Paciulli et al., 2015).

La temperatura y la concentración de los reactivos en la fase sin congelar (efectos de concentración por congelación) son los principales factores responsables de los cambios en la cinética de las reacciones enzimáticas y no enzimáticas durante la congelación. El aumento de la concentración de solutos en la matriz no congelada aumenta la fuerza iónica y puede producir cambios que afectan a las estructuras de biopolímeros. Estos mecanismos de estrés pueden deteriorar los productos congelados que influyen en la textura y estructura vegetal en términos de su calidad. El oscurecimiento de los tejidos es causado por la oxidación enzimática de los compuestos fenólicos en presencia de oxígeno, ya que la enzima PPO cataliza la oxidación de sustratos fenólicos por el oxígeno molecular para dar el color altamente reactivo que puede sufrir auto-polimerización o reacción no enzimática irreversible con otros fenoles, aminoácidos o proteínas para producir pigmentos marrones (Ali, et al., 2016).

### **1.2.3 Cambios de calidad en papa congelada**

Los tejidos de frutas y vegetales tienen una estructura celular semi-rígida, presentan menos resistencia a la expansión de los cristales de hielo en el volumen, por lo que son propensos a ser sometidos a los daños de congelación irreversible (Sun & Li, 2003), con respecto a los daños en los vegetales por mecanismos de congelación, el daño por frío es el resultado de la exposición del tejido a baja temperatura. El daño mecánico se produce como resultado de la formación de cristales de hielo. Estos daños en los tejidos vegetales se traducirán en la pérdida de función en la membrana celular, la alteración de los sistemas metabólicos, la desnaturalización de las proteínas, transferencia permanente de agua intracelular al medio extracelular, la inactivación de la enzima, y la ruptura celular.

Los pre-tratamientos de la papa antes de la congelación, pueden tener un gran efecto, especialmente en la textura del producto final, sin embargo, persisten los daños en la calidad del producto y una forma de minimizar el daño de la

congelación y descongelación es incorporar crio-protectores para alterar formas de cristal (Fernández et al., 2006). En las papas fritas congeladas, las condiciones de procesamiento tales como escaldado, además de recubrimientos superficiales, pueden causar diferencias en la formación de costras en comparación con otros tratamientos (Oner & Walker, 2011).

### **1.3 Recubrimientos comestibles**

La tecnología de recubrimientos comestibles ha aumentado, ya que la demanda en la industria alimenticia busca nuevas estrategias para aumentar la capacidad de almacenamiento, la vida útil y mejorar la seguridad microbiana de los productos, así como mejorar la calidad de los mismos.

Un recubrimiento es una capa delgada de un material que cubre la superficie de un alimento y para ello, un recubrimiento comestible se ha utilizado para preservar la calidad, preservando la textura de las frutas y hortalizas, para reducir la respiración y por lo tanto aumentar la vida útil de un producto, para controlar el oscurecimiento, conservar el sabor (Ciolacu et al., 2014), disminuir la respiración, así como controlar la liberación de nutraceuticos y sustancias antioxidantes (Zambrano et al., 2014).

Lin y Zhao (2007) mencionan que una de las ventajas de los recubrimientos comestibles en frutas y vegetales procesadas es mejorar la integridad estructural, después de ser sometidos al proceso de congelación y la prevención de la absorción de humedad y la oxidación de frutas y vegetales liofilizadas. Además, los recubrimientos comestibles pueden llevar ingredientes funcionales tales como antioxidantes, antimicrobianos, nutrientes y sabores para mejorar aún más la estabilidad del alimento, la calidad, la funcionalidad y la seguridad.

Los productos alimenticios suelen recubrirse por inmersión o aspersión, para formar una película delgada sobre la superficie del alimento que actúe como una

membrana semi-permeable para la supresión de la respiración, el control de la pérdida de humedad, y proporcionar otras funciones. Actualmente, la inmersión es el método más común para la aplicación de recubrimientos a las frutas y vegetales (Ciolacu et al., 2014).

### **1.3.1 Agentes formadores de recubrimientos comestibles**

Es obligatorio que los materiales de embalaje bioactivos mantengan compuestos, tales como prebióticos, vitaminas encapsuladas o flavonoides biodisponibles, en las mejores condiciones hasta que se liberan en el producto alimenticio de una manera controlable (Montanheiro et al., 2014). La selección de los materiales de los recubrimientos se basa generalmente en su solubilidad en agua, la naturaleza hidrófila e hidrófoba, fácil formación de revestimientos, y las propiedades sensoriales.

Los polisacáridos que se han evaluado y utilizado para la formación de películas y recubrimientos incluyen derivados de almidón, derivados de la celulosa, alginatos, carragenano, quitosano y pectinatos. Debido a la naturaleza hidrófila de los polisacáridos, las ventajas de utilizar estos materiales son las de modificar la atmósfera interna, reduciendo de este modo la respiración de frutas y verduras (Lin & Zhao, 2007).

#### **1.3.1.1 Goma CMC**

Es una sustancia usada como recubrimiento comestible y se caracteriza por tener excelentes propiedades de barrera al oxígeno, mantener buen aroma, buenas propiedades mecánicas, y la barrera de humedad no es eficaz debido a su naturaleza hidrofílica (Ciolacu et al., 2014).

Las películas de polímero comestibles comprenden polisacáridos, lípidos, proteínas o una mezcla de estas macromoléculas. Celulosa compuesta de

cadenas lineales de (1-4- $\beta$ -glicosídicos), es uno de los polisacáridos más abundantes y renovables en la tierra (Montanheiro et al., 2014). Los materiales a base de celulosa como carboximetilcelulosa son no iónicos y compatibles con tensoactivos, otros polisacáridos solubles en agua y sal, y se pueden disolver en soluciones acuosas o acuoso-etanol, produciendo películas que son solubles en agua y resistentes a las grasas y aceites. Las soluciones de metilcelulosa solubles en agua pueden formar hidrogeles termorreversibles en agua por calentamiento debido principalmente a una reducción de la asociación hidrófoba entre las cadenas de metilcelulosa y agua a temperaturas entre 50 y 70 °C (Tavera et al., 2012).

Lin y Zhao (2007) mencionan que los recubrimientos a base de CMC han demostrado las capacidades para ayudar a retener la firmeza original y crujiente de manzanas, fresas, apio, lechuga y zanahorias cuando se utiliza en un proceso de recubrimiento seco, la preservación de los componentes importantes del sabor de algunas frutas y vegetales, y la reducción de la absorción de oxígeno.

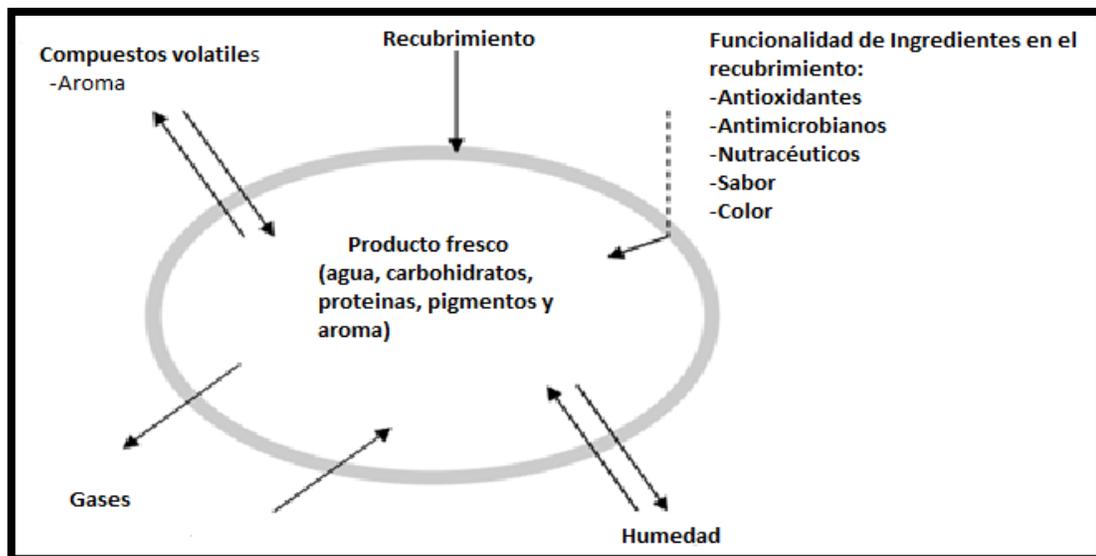
### **1.3.2 Caracterización de recubrimientos comestibles**

Los recubrimientos comestibles ofrecen una posibilidad para ampliar la vida útil de los productos recién cortados, a partir de fuentes renovables, incluyendo lípidos, polisacáridos y proteínas, proporcionando una barrera semipermeable a los gases, vapor de agua y otros solutos, y también como portadores de muchos ingredientes funcionales, tales como agentes antimicrobianos y antioxidantes (Lin & Zhao, 2007), y por lo tanto la reducción de la respiración, el oscurecimiento enzimático, y la pérdida de agua. Y su función de protección puede mejorar con la adición de antioxidantes. El desarrollo de recubrimientos comestibles se ha centrado en las barreras que contienen proteínas, polisacáridos y lípidos (Perez et al., 2006).

Las soluciones de recubrimiento tienen que tener la capacidad para extenderse sobre la superficie y se puede hacer teniendo en cuenta tres parámetros: la

humectabilidad, la adhesión, y los coeficientes de cohesión, es necesario un adecuado equilibrio entre estas fuerzas. La humectabilidad es una de las propiedades más importantes en la evaluación de la capacidad de una solución para recubrir una superficie designada (Lima et al., 2010).

Recubrimientos comestibles formulados apropiadamente pueden ser utilizados para la mayoría de los alimentos y satisfacer los desafíos asociados a la calidad estable, la seguridad del mercado, valor nutricional, algunos beneficios potenciales del uso de recubrimientos comestibles se observan en la **Figura 6**.



**Figura 6.** Propiedades funcionales de un recubrimiento comestible sobre las frutas y vegetales (Lin & Zhao, 2007).

Pueden estar constituidos por tres tipos de materiales biológicos: polisacáridos, proteínas y lípidos. En general debido a su naturaleza hidrofílica, las películas de polisacáridos son incoloras, tienen aspecto brillante y bajo contenido de calorías, generalmente exhiben poca capacidad de barrera de vapor de agua, sin embargo, ciertos polisacáridos, aplicados en forma de recubrimientos viscosos de alta humedad, pueden retardar la pérdida de humedad de los alimentos recubiertos al funcionar como agentes de barrera contra la humedad (Carneiro et al., 2009).

Los recubrimientos comestibles actúan como barreras semipermeables que pueden ser capaces de mantener la calidad de los alimentos. Al ser biodegradables, ofrecen sistemas de envasado alternativo que causan daños ambientales reducidos, la atmósfera modificada creada por el recubrimiento genera una captura física de CO<sub>2</sub> dentro de la fruta o verdura y un sellado parcial de los poros, reduciendo el intercambio gaseoso y la reducción de las tasas de transferencia de gas. La función de la barrera de gas podría retardar la oxidación enzimática y proteger los productos de la decoloración y la textura de ablandamiento durante su almacenamiento (Lima et al., 2010).

Las propiedades mecánicas pueden dar una buena información sobre la compatibilidad de las mezclas de polímeros. Normalmente, las interacciones positivas entre los componentes conducen a una mejora significativa de las propiedades mecánicas. Los recubrimientos comestibles protegen al producto de los daños físicos del manejo o producción, causada por un impacto mecánico, presión, vibraciones, entre otros (Lin & Zhao, 2007). Los recubrimientos poseen propiedades como una mejor estabilidad mecánica y la oxidación, disminución de la captación, el comportamiento disolvente auto-extinguible y, en muchos casos, una mejor biodegradabilidad (Gorrasi & Bugatti, 2016).

La adición de nanopartículas activas en matrices poliméricas aporta una doble ventaja, o más bien la mejora del rendimiento de los materiales de envasado de alimentos y el suministro de un antimicrobiano adicional, antioxidante (Montanheiro et al., 2014).

### **1.3.2.1 $\alpha$ -tocoferol**

El  $\alpha$ -tocoferol forma parte de los tocoferoles y tocotrienoles presentes en la Vitamina E, es liposoluble y es ampliamente utilizado como suplemento y como antioxidante en alimentos con alto contenido lipídico (Zambrano et al., 2014). El

papel fisiológico de la vitamina E es eliminar los radicales libres de las membranas celulares y otros entornos de lípidos, evitando de este modo que los ácidos grasos poliinsaturados sean dañados por la oxidación de lípidos (Bramley et al., 2000). La formulación de este compuesto en suspensiones de tamaño nanométrico es particularmente atractiva, ya que se sabe que las nanopartículas de  $\alpha$ -tocoferol aumentan la velocidad de disolución (Campardelli & Reverchon, 2015).

Recientemente ha habido un interés creciente en la encapsulación de tocoferol debido a su labilidad al calor, la luz y el oxígeno. Además, el tocoferol encapsulado permite una liberación controlada y una mejor solubilidad en matrices hidrófilas del compuesto lipófilo (Montanheiro et al., 2014).

### **1.3.2.2 Ácido Cítrico**

El ácido ascórbico o vitamina C es un ácido débil soluble en agua y un antioxidante natural que puede ser utilizado para la conservación de alimentos y farmacéutica, la suplementación nutricional.

El oscurecimiento no enzimático procede cuando la concentración de ácido ascórbico decae, ya que los productos de las reacciones siguen 2- ceto Lácido-gulonico y forman parte de la cadena de reacción de oscurecimiento, este hecho modifica el color y aspecto de los productos que contienen ácido ascórbico; La combinación en una película comestibles no sólo puede contribuir a estabilizar ácido ascórbico sino también para superar las interacciones negativas entre los conservantes utilizados en un sistema farmacéutico o alimenticio (De'Nobili et al., 2015). Es importante mencionar que el uso de ácido cítrico o ácido ascórbico, junto con envasado y almacenamiento a bajas temperaturas, actúan como agentes anti-oscuramiento y aumentan la vida útil de hortalizas y frutas recién cortadas (Perez et al., 2006; Limbo & Piergiovanni, 2006). Además los ácidos orgánicos desactivan la enzima mediante la reducción de pH (Ali et al., 2016).

El escaldado en soluciones acuosas cítricas y L ácido ascórbico o láctico antes de la congelación reducen cambios desfavorables en la textura durante la congelación y posterior almacenamiento en condiciones de congelación (Xin et al., 2015). El uso de ácidos orgánicos como el ácido cítrico actúa como sustancia antimicrobiana y se puede incorporar en recubrimientos comestibles y en especial son usadas para recubrimientos de frutas y hortalizas recién cortadas (Ciolacu et al., 2014).

### **1.3.3 Aplicación de recubrimiento y su función en papa congelada**

Las papas no se consumen en estado fresco, sin embargo, es un producto perecedero que necesita ser preservado del oscurecimiento enzimático y el crecimiento microbiano antes de su procesamiento posterior. Ya que estos productos siguen siendo metabólicamente activos, un procesamiento mínimo aumenta la producción de etileno, y la síntesis de metabolitos secundarios y como resultado de la reacción interfiere en la vida útil más corta debido al cambio de color, textura, y de sabor, así como el aumento de las poblaciones microbianas en la superficie de corte. De las estrategias para minimizar los efectos indeseables de procesamiento mínimo es la aplicación de recubrimientos comestibles, proporcionando una protección adicional para los vegetales recién cortados. Esta estrategia puede reducir las pérdidas de agua y tipos de cambios de gas y actuar como un portador para aditivos que pueden controlar las reacciones indeseables, el crecimiento microbiano (Baldwin et al., 1996).

Durante el procesamiento mínimo, las papas cambian de su color natural a un color dorado, éste es un problema particular en los vegetales de color blanco o amarillo en el interior. El método común para controlar el oscurecimiento de alimentos es el tratamiento de superficie que implica la inmersión de vegetales frescos cortados en antioxidantes que contiene la solución acuosa (Ojeda et al., 2014). Estudios preliminares, basados en formulaciones de celulosa (CMC) sin aditivos provoca un retraso de oscurecimiento en papa, sin embargo, una

combinación de CMC con aditivos (antioxidantes, acidulantes, conservantes) retrasa el oscurecimiento más eficazmente que solo los aditivos en una solución acuosa (Baldwin et al., 1996).

Las propiedades funcionales de los polímeros celulósicos, tales como la solubilidad, gelación térmica, y la actividad de la superficie, se pueden utilizar para proporcionar estabilización de emulsiones o dispersantes, para actuar como aglutinantes de formulación, y para diseñar una barrera de protección, estabilización, y la entrega controlada de compuestos nutricionales activos durante la formulación y procesamiento de alimentos. Como ejemplo, la gelación térmica de los éteres celulósicos genera un gel hidrófilo, que contiene agua y cuando se aplica como un recubrimiento de alimentos limita la penetración de aceite durante la fritura de alimentos tales como las papas, ya que la película dificulta la absorción de aceite (Wallick, 2014; Tavera et al., 2012).

#### **1.3.4 Recubrimientos como antioxidantes**

Los antioxidantes naturales son muy deseables, la integración de  $\alpha$ -tocoferol o vitamina E para película de polímero se ha sugerido recientemente debido a sus efectos antioxidantes,  $\alpha$ -tocoferol es un antioxidante soluble en lípidos que se ha utilizado como aditivo alimentario, ya que se ha reconocido una sustancia segura en productos alimenticios (Montanheiro et al., 2014).

La oxidación es un proceso químico, más lento que el deterioro microbiano, que se encuentra en un factor de calidad primaria que limita la vida útil de una amplia variedad de alimentos, sobre todo los alimentos secos y/o grasos. Con el objetivo de evitar el daño de la oxidación, las películas y recubrimientos comestibles pueden ser utilizados como capa de barrera de oxígeno y el vehículo para la entrega antioxidante (Moreno et al., 2015).

La oxidación de los lípidos de aceites, grasas y alimentos que contienen lípidos insaturados se puede evitar por los antioxidantes que son ampliamente utilizados como aditivos alimentarios para prolongar la vida útil y para prevenir la formación de malos sabores y texturas de alimentos indeseables (Montanheiro et al., 2014). Los antioxidantes también se pueden incorporar en las películas comestibles para la estabilización de polímeros, protegerlos de la degradación y controlar la oxidación de los productos alimenticios, además, la liberación antioxidante debe ser abundante para asegurar la protección antioxidante eficiente.

#### **1.4 Nanotecnología**

La nanotecnología es la manipulación intencionada o ingeniería de átomos y moléculas en nano-escala para que los materiales conocidos tengan nuevas y únicas propiedades y rasgos de comportamiento que pueden utilizarse en nuevas aplicaciones (Buzby, 2010). El término "nanotecnología" abarca una gama de tecnologías que operan a escala nanométrica. La nanotecnología ha sido definida como la tecnología de manipulación y producción de materiales, y de conducción de sistemas y procesos, que opera a la escala de 100 nanómetros (nm) o menos, lo que correspondería entonces con tamaños  $\leq 1 \times 10^{-9}$  metros (Cartelle & Zurita, 2015).

En los sistemas industriales de alimentos, la ciencia de la nanotecnología abarca muchos aspectos, tales como la seguridad alimentaria, materiales de embalaje, nanosensores, sistema de suministro de nutrientes, biodisponibilidad, nuevos materiales para la detección de patógenos y otros. Es posible proteger los alimentos contra los patógenos utilizando envases o películas comestibles con propiedades antimicrobianas (Durán & Marcato, 2013).

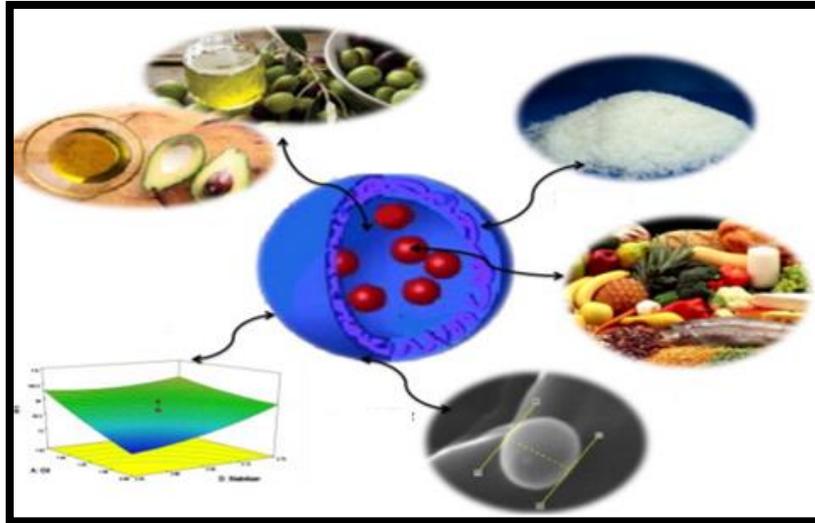
Entre las aplicaciones que tiene la ciencia de la nanotecnología está el empaquetado y envasado de alimentos, el empleo de polímeros como material de envasado de alimentos ha sustituido a los sistemas convencionales de empaquetado, en vista que

se pueden obtener mejores cualidades de preservación del alimento; el desarrollo de nuevas materias primas; desarrollo de complementos alimenticios, como la incorporación de nanotransportadores que sirven para mejorar la absorción y biodisponibilidad de sustancias nutritivas agregadas al alimento, como vitaminas, nutrientes y minerales; desarrollo de materiales inteligentes de contacto con los alimentos, algunos nano-compuestos son usados como material de embalaje y/o recubrimiento de los alimentos para controlar la difusión de gases y prolongar así el tiempo de conservación de los mismos (Cartelle & Zurita , 2015).

Las películas comestibles se pueden utilizar en aplicaciones prolongadas, por ejemplo, para proteger frutas, verduras, carnes, dulces, productos horneados y papas fritas, ya que estas películas actúan como envase activo que mejora la protección de barrera a los gases tales como el oxígeno y el etileno, y la preservación de la apariencia física del producto.

#### **1.4.1 Nanocápsulas**

Están definidas como sistema nano vesicular en las que una sustancia activa esta confinada en una cavidad rodeada por una membrana polimérica o recubrimiento; la cavidad puede contener la sustancia en fase líquida o sólida, o como una dispersión molecular, compuesta por un centro oleoso o acuoso el cual puede ser la sustancia que se desee liberar (Real, 2013), en la **Figura 7** se muestra la formación esquemática de nanocápsulas. Esmaeili y Gholami (2015) mencionan que las nanocápsulas con fase oleosa de calidad alimenticia, sirve para mejorar la seguridad de los alimentos, protegiendolos contra las toxinas y otros peligros externos. Tambien puede resultar útil en la formación de los productos alimenticios con atractivos colores y texturas.



**Figura 7.** Formación esquemática de nanocápsulas (Esmaeili & Gholami, 2015).

#### 1.4.2 Nanoemulsión

El uso de emulsiones en la nanotecnología permite prolongar la conservación de los alimentos, mediante la protección de la oxidación de aceites. El uso adecuado de sustancias encapsuladas, aceites de componentes en micro cápsulas pueden proteger contra el deterioro causado por condiciones ambientales adversas tales como la luz, la humedad y el oxígeno (Ahn et al., 2008).

Las nanoemulsiones con partículas que varían entre 20 y 200 nm tienen aplicaciones en la conservación de alimentos. Ellos actúan a través de un efecto protector sobre la superficie del fruto o como sistemas para la liberación controlada de componentes lipófilos tales como antioxidantes y otros aditivos (Zambrano et al., 2014).

El método de emulsificación- difusión (EDM), desarrollado para la encapsulación de medicamentos, consiste en la formación de una emulsión de aceite en agua entre un disolvente parcialmente miscible con agua saturada que contiene la sustancia activa y el polímero en una solución acuosa saturada con disolvente que contiene un estabilizador (Zambrano et al., 2011).

### **1.4.3 Sistemas coloidales**

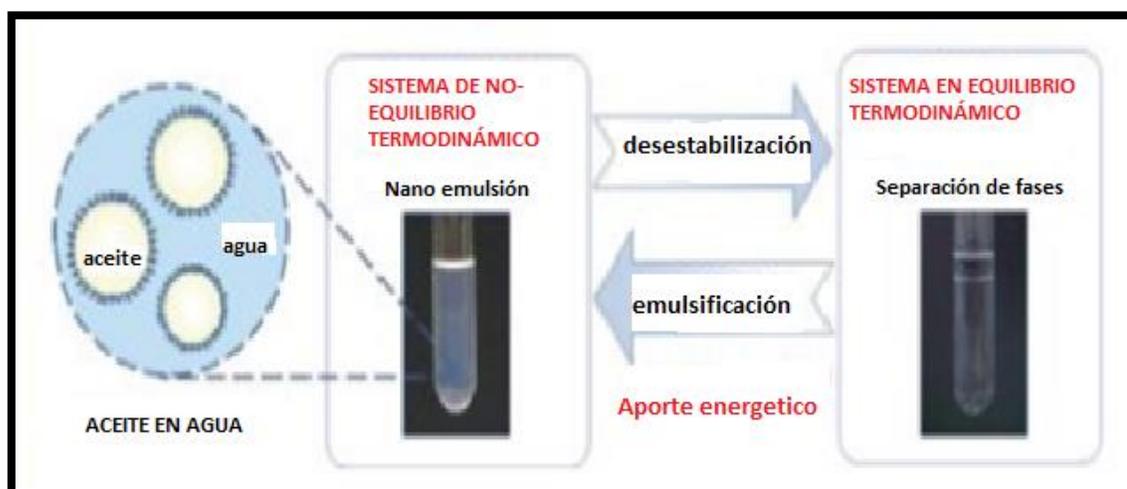
Los productos alimenticios que están procesados son sistemas multicomponentes que contienen diferentes tipos de ingredientes. Las principales estructuras son biopolímeros, proteínas y polisacáridos, y diversos tipos de entidades dispersas como gotas de la emulsión, burbujas de gas, cristales de grasa, gránulos de almidón, etc. Las propiedades del sistema en general como la textura, reología y estabilidad física se determinan por la naturaleza y la fuerza de las interacciones entre los diferentes tipos de polímeros constituyentes y entidades dispersos (Dickinson, 2013), esta descripción conceptual de la estructura de los alimentos se conoce como ciencia de los colides.

Una dispersión o coloide es un sistema multifásico no homogéneo en equilibrio. Específicamente un coloide consta de una o más fases dispersas o discontinuas, llamadas micelas, contenidas en una fase continua. Las propiedades de una dispersión son diferentes a las que presentan los componentes de cada fase por separado o en una solución verdadera. Se considera que las partículas coloidales están en un rango de tamaño de  $10^{-9}$  m (1nm) hasta  $10^{-6}$  m (1 $\mu$ m o  $\mu$ ). Otra característica importante de los coloides es que las partículas no se difunden a través de membranas semipermeables y, en consecuencia no presentan presión osmótica o bien, es de un valor muy bajo (Badui, 2006).

#### **a) Estabilidad de sistemas coloidales**

Hay una necesidad de desarrollar nuevos nuevos métodos de tecnología de encapsulación para la incorporación más eficaz de los nutraceuticos en alimentos funcionales. Estos compuestos bioactivos tienen que estar bien protegidos dentro de un sistema de entrega basado en coloide durante el procesamiento y el almacenamiento.

Se establece que si un sistema se mantiene a temperatura constante, éste tenderá a cambiar espontáneamente en la dirección que permita disminuir su energía libre de Gibbs. Las dispersiones coloidales presentan un estado de mayor energía libre que sus fases integrantes por separado; de ahí que su tendencia termodinámica sea moverse espontáneamente hacia un estado de menor energía, lo que ocasiona la coalescencia de la fase dispersa y rompe el estado coloidal (Badui, 2006). Sin embargo, esto no ocurre debido a que se presentan barreras energéticas que mantienen la interacción de las fases dispersa y dispersante sin alteración significativa. Por otro lado si se crean las condiciones apropiadas que permitan disminuir la barrera energética a un valor suficientemente pequeño, entonces el colide se vuelve inestable y sus fases se separan con facilidad. En la **Figura 8** se muestra un sistema de equilibrio termodinámico en una nano-emulsión.



**Figura 8.** Representación de un sistema en equilibrio termodinámico y en desestabilización en una emulsión (Solé & Solans, 2012).

### 1.5 Pre- tratamientos

Los pre-tratamientos se realizan durante la preparación de la materia prima y las condiciones del proceso pueden tener un efecto sobre la calidad del producto final, en cuanto a textura, color y sabor, en los tejidos vegetales para soportar tensiones

causadas por los procesos subsiguientes que son dependientes de la temperatura, tales como la cocción o congelación (Carbonell et al., 2006).

Los pre-tratamientos han demostrado disminuir la absorción de aceite y mejorar la textura del alimento frito, entre los que se destacan el escaldado, la congelación y la inmersión en soluciones azucaradas, y el secado previo, tratamientos que pueden ser aplicados independientemente o combinados entre sí (Guzmán et al., 2012). En la **Figura 9** se muestra el pre-tratamiento de escaldado en algunos alimentos como en el tomate, la papa, zanahoria, chícharo. Los vegetales en especial es necesario un pre-tratamiento de escaldado para enfatizar el atractivo del color y textura.



**Figura 9.** Pre-tratamiento de alimentos.

### 1.5.1 Pre-tratamientos de la papa

Los pre-tratamientos antes de la congelación son muy importantes para la calidad final de los productos. Durante el proceso de congelación, el uso de escaldado convencional es inadecuado y conduce a pérdida de textura, nutrientes solubles, pigmentos y aroma (Xin et al., 2015), es por ello que se buscan nuevas

alternativas para llevar a cabo el proceso de escaldado de la papa y así mejorar la calidad final del producto.

Las papas mínimamente procesadas son susceptibles a una variedad de fenómenos fisiológicos y microbiológicos durante el almacenamiento. El pardeamiento enzimático de las superficies donde se realizó el corte, implica un deterioro grave en la calidad de la papa. Las reacciones enzimáticas es el motivo que lleva a colores como rosados, grises o marrones, y estos pueden parecer dentro de minutos si los tejidos no son tratados con inhibidores del oscurecimiento enzimático (Rocculi et al., 2007). El uso de los inhibidores del oscurecimiento enzimático en las papas puede ser utilizado en el momento del proceso de escaldado, esto puede resultar aun mejor con el uso de crio-protectores para mejorar el color, textura y sabor de la papa, aun después del los procesos como la congelación, almacenamiento, freído.

### **1.5.2 Escaldado de alimentos**

El escaldado se define como un tratamiento térmico cuyo fin es la estimulación (activación y/o inactivación) de las enzimas presentes en el tejido de las plantas, responsables de reacciones de deterioro catalizadas por enzimas tales como polifenol oxidasa o peroxidasa (PO) en presencia de oxígeno. La actividad enzimática aparente se incrementa cuando aumenta la temperatura hasta alrededor de 50 °C, donde alcanza un nivel máximo conocido como la temperatura óptima para la acción enzimática. A temperaturas más altas se observa una considerable disminución en la actividad debido a la desnaturalización de su estructura proteínica. El proceso de escaldado generalmente se hace a temperaturas que oscilan entre 80 °C y 100 °C y tiempos entre 20 s y 15 min, sin embargo, se han reportado tratamientos entre 55 °C y 75 °C en los que se obtienen productos con alta firmeza debido a la menor separación celular que se genera; adicionalmente se ha propuesto que la enzima metil- pectin- esterasa juega un papel importante en este fenómeno debido a que se posibilita la

formación de redes con iones calcio y magnesio, generalmente el cambio de textura en vegetales sometidos a escaldado sigue una cinética de primer orden, suponiendo que este cambio se realiza de manera irreversible (Mendoza & Herrera, 2012).

El pre- tratamiento de escaldado en alimentos conduce a una pérdida de nutrientes y otras características de calidad en el producto como textura, sabor y color (Alvarez & Canet, 1999), sin embargo, el escaldado ha sido considerada como una de las tecnologías más importantes de pre-tratamiento en alimentos, ya que se utiliza para inactivar las enzimas responsables de la producción de mal sabor y olor desagradable, mantener el color y frescura, la estabilización de la textura y calidad nutricional, debido a lo anterior, diversos aspectos sobre el escaldado ha atraído muchas investigaciones y por lo cual se atribuye a la inactivación térmica de enzimas indeseables (peroxidasa y lipoxigenasa) y la consiguiente disminución en la tasa de deterioro enzimático de frutas y vegetales (Xin et al., 2015).

#### **1.5.2.1 Efectos del escaldado en la papa**

En el escaldado de papa se busca la inactivación de las enzimas que pueden ser perjudiciales en la calidad del producto final como la enzima polifenoloxidasa que es la responsable del pardeamiento en los tubérculos procesados, además que la temperatura de escaldado destruye oxidasas, peroxidadas, catalasas y lipoxigenasas (Petzold et al., 2014). Esta reacción se genera cuando la enzima contenida en los cloroplastos entra en contacto con el oxígeno y los sustratos fenólicos contenidos principalmente en la corteza (alrededor del 50%) y en los tejidos en donde la concentración disminuye desde la corteza hacia el centro. El contacto se genera mediante ruptura de las membranas celulares y los organelos que contienen la enzima debido a procesamientos de poscosecha deficientes como golpes, sometimiento del tubérculo a esfuerzos y a etapas del proceso como pelado, cortado, escaldado y cocción, entre otros (Mendoza & Herrera, 2012).

También es posible que mediante el escaldado se desarrolle una superficie protectora debido a la gelatinización del almidón, que puede interferir en la absorción de grasa en papa fritas (Hasbún et al., 2009), ya que el escaldado tiene el efecto de disminuir la porosidad y es por ello que reduce la absorción de aceite (Richter et al., 2008). El escaldado convencional tiene un efecto sobre los gránulos del almidón y sustancias pécticas de las papas congeladas, lo que resulta una textura suave y causando pérdidas de nutrientes (Carbonell et al., 2006), sin embargo, con las condiciones adecuadas del proceso de escaldado hace que la textura final del producto sea más firme que sin un pre-tratamiento.

Se llama gelatinización al momento en que el granulo aumenta su volumen a una cierta temperatura; si se administra más calor, el gránulo hinchado, incapacitado para retener líquido, se rompe parcialmente y la amilosa y la amilopectina, fuertemente hidratadas, se dispersan en el seno de la disolución (Arroyo & Marquez, 2006).

### **1.5.2.2 Factores de calidad**

El aumento de la conciencia y la sofisticación de los consumidores han creado la expectativa de mejorar la calidad en los productos alimenticios. Esto a su vez ha aumentado la necesidad de monitoreo de calidad de los mismos. La calidad se define como la suma de todos los atributos que pueden conducir a la producción de los productos aceptables para el consumidor (Brosnan & Sun, 2004). Características como el color y textura resultan de gran relevancia, siendo estos los parámetros de calidad más importantes en los productos procesados a partir de la papa (Hasbún et al., 2009), en los diferentes procesos que tiene la papa para llegar a la papa cortada en tipo francesa como se muestra en la **Figura 10**.

Las condiciones adecuadas en cada proceso que se lleve a cabo, es la forma para lograr calidad en el producto final, ya que existen reacciones químicas que conducen a un pardeamiento enzimático, lo que provoca pérdidas económicas a la

industria de la papa, estas reacciones también provocan cambios de sabor y malas condiciones de proceso implican una textura de producto indeseable.



**Figura 10.** Papa desde su estado natural, pasando por el proceso de pelado, cortado, hasta el freído.

#### **a) Color**

El color es uno de los parámetros más importantes evaluados por los consumidores al elegir papas tipo francesa, ya sea que estén listas para comer o que aún necesiten pasar por un proceso térmico.

Durante la producción de papas tipo francesa, las papas se pelan y cortan, que conduce rápidamente a la producción de quinionas de color marrón en la superficie del tejido a partir de fenoles de los tejidos y el oxígeno atmosférico, catalizada por la enzima polifenol oxidasa (PPO) (Richter et al., 2008). La enzima polifenoloxidasa y los sustratos fenólicos, entran en contacto generándose las reacciones de pardeamiento. A medida que aumenta la temperatura, la reacción ocurre a una tasa mayor hasta alcanzar un máximo en la temperatura en donde inicia la inactivación de la enzima por calor. Por otro lado el cambio de color disminuye debido a que la enzima se está inactivando a consecuencia de su desnaturalización térmica (Mendoza & Herrera, 2012). El deterioro de los tejidos debido al escaldado y la reducción resultante en el contenido de oxígeno también contribuyen a una mejor preservación de pigmentos (Xin et al., 2015).

## **b) Textura**

Las propiedades reológicas de los alimentos son determinados por su composición química, especialmente por los polímeros que condicionan los cambios estructurales durante el procesamiento. El estudio de la textura en productos a base de papa ha sido de mucho interés, se considera que tanto el almidón como la pectina de la pared celular son los polímeros que determinan las propiedades estructurales en la papa (Hasbún et al., 2009).

El efecto del escaldado en el cambio de la textura en el tubérculo de papa es debido a la gelatinización de almidones y solubilización de sustancias pécticas, lo que produce pérdida de firmeza en el tejido (Mendoza & Herrera, 2012). El escaldado interrumpe el hidrógeno y otros enlaces no covalentes entre los polímeros de la pared celular. Las pectinas son degradadas y solubilizan la pared celular y la lamela media entre las paredes de las células adyacentes. Esto conduce a una pérdida de adhesión entre las células y la presión de turgencia que en última instancia destruye la integridad de la membrana, por lo tanto existe la necesidad de un nuevo tratamiento de escaldado que causa solo una mínima pérdida de calidad en los alimentos congelados (Xin et al., 2015).

La falta de activación de la enzima PME puede explicar la firmeza inferior después del proceso de congelación, a pesar de la presencia de cloruro de calcio. La activación de la PME no es la única base para una mejora de la textura. De hecho una combinación de varios factores parece contribuir a este efecto reafirmante. La retrogradación del almidón y la lixiviación de la amilosa son dos de los fenómenos implicados posiblemente además de los efectos del calcio- PME, así como descomposición del almidón en azúcares. Sin embargo, estos mecanismos han demostrado ser relevante para los tiempos altos de procesamiento (mayores a 15 minutos), a bajas temperaturas (menores a 75 °C) (Carbonell et al., 2006).

### **1.5.3 Enzimas responsables del deterioro de calidad en la papa**

Muchos problemas del deterioro y la descomposición de los alimentos están relacionados con la química, bioquímica, y/o cambios físicos, tales como la oxidación de lípidos, enzimática y pardeamiento no enzimático y la absorción o pérdida de humedad. Estas reacciones cambian la apariencia de alimentos, en textura, sabor y aroma, y causa pérdida global de nutrientes tales como vitaminas. Dichas reacciones son fuertemente afectadas por condiciones ambientales; tales como la disponibilidad de oxígeno, temperatura, humedad relativa, así como composición alimenticia que incluye el contenido de agua, pH, y los ingredientes. El mayor deterioro químico de alimentos la degradación enzimática que conduce a cambios de color y textura, pardeamiento no enzimático, las reacciones inducidas por la luz catalizan la oxidación de lípidos, la hidrólisis y oxidación de proteínas (Kong & Sing, 2011).

La enzima pectinmetilesterasa (PME), presente en cantidades significativas en los vegetales como la papa, afecta a los grupos carboxilo disponibles cuando los grupos metilo son hidrolizados de cadenas de pectina. Esto hace que los cationes divalentes como  $\text{Ca}^{2+}$  reaccionen con los grupos carboxilo que aumentan la textura vegetal. La PME se inactiva a temperaturas mayores a 75 °C (Carbonell et al., 2006; Ghannam & Crowley, 2006).

Entre los daños físicos comunes está el daño mecánico de frutas y verduras durante la cosecha y manejo post cosecha, la migración de humedad que cambia la textura de los alimentos y otras propiedades físicas, el crecimiento de cristales debido a la fluctuación de la temperatura en los productos alimenticios congelados, los cambios de viscosidad y de la separación de fases en sistemas coloidales. Estos cambios pueden ocurrir simultáneamente en los sistemas de alimentación, que afecta el color, sabor, aroma y textura del producto alimenticio, dando lugar a la reducción de la vida útil de los alimentos (Kong & Sing, 2011). En

la **Tabla 3** se presenta una visión general de algunas reacciones más importantes y su influencia en la calidad de los alimentos.

**Tabla 3.** Reacciones que afectan la calidad de alimentos (Kong & Sing, 2011).

<b>Ejemplo</b>	<b>Tipo de reacción</b>	<b>Consecuencias</b>
Pardeamiento no enzimático	La reacción química (reacción de Maillard)	Color, sabor y aroma, valor nutritivo, compuestos toxicológicamente sospechoso (acrilamida)
Oxidación de las grasas	Reacción química	La pérdida de ácidos grasos esenciales, sabor rancio, formación de compuestos toxicológicamente sospechosos.
Oxidación de las grasas	Reacción bioquímica (lipoxigenasa)	Fuera de sabores, principalmente debido a la formación de aldehídos y cetonas.
Hidrólisis	Reacción química	Cambios en el sabor y contenido de vitaminas.
Proteólisis	Reacción bioquímica (proteasas)	Formación de aminoácidos y péptidos, sabor amargo, compuestos de sabor, cambios en la textura.
Pardeamiento enzimático	Reacción bioquímica de los polifenoles	Oscurecimiento
Separación	Reacción física	Sedimentación
Solidificación	Combinación de reacción química y física	Formación de gel y cambios de textura

#### **1.5.4 Mecanismos de deterioro de la papa**

Los cambios en la composición, a su vez influyen en la calidad de la textura y la apariencia de las papas. Los cambios químicos y bioquímicos son importantes no solo en la determinación de la calidad de la papa, sino también en la calidad del producto terminado. Las interrelaciones entre las características físicas y bioquímicas de la calidad de los tubérculos se han reportado entre el pH, la acidez, el color, entre la textura y el almidón (Nourian et al., 2003).

La respiración es otro factor importante que contribuye a las pérdidas post-cosecha, que convierte el azúcar almacenado a la energía en presencia de un sustrato de oxígeno, por lo tanto, el avance de la senescencia. Aunque esta función es necesaria para la continuación del crecimiento y desarrollo de las papas, incluso después de la cosecha, tiene algunos efectos indeseables sobre la calidad de las papas. La respiración aeróbica (conversión de azúcares a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  en presencia de  $\text{O}_2$ ) hace que los tubérculos de papa sean perecederos y la respiración anaeróbica (conversión de azúcares en alcohol y  $\text{CO}_2$ , en ausencia de  $\text{O}_2$ ) por lo general conduce a la producción de sabores y olores desagradables, ambos promueven la pérdida de calidad en las papas (Nourian et al., 2003).

Los cambios en los factores de calidad como resultado de tratamientos térmicos proporcionan una buena indicación acerca de la severidad del tratamiento y la extensión de los daños que ocasiona. Singh y Ramaswamy (2014) mencionan los efectos de los tratamientos térmicos en calor y textura de las papas, y que al aumentar la gravedad de los tratamientos térmicos, la textura de las papas se convertía en más suave y el aspecto se volvía más oscuro. Siendo que la transferencia de calor rápida y uniforme es la clave para lograr la calidad óptima de los productos elaborados en un proceso térmicos.

### **1.5.5 Características de las enzimas**

Una enzima es una proteína que actúa como catalizador biológico, llevando a cabo reacciones bioquímicas a muy altas velocidades, no se consume durante la reacción y en general presenta un elevado grado de especificidad. Son de primordial interés debido a que son responsables de algunos cambios químicos que sufren los alimentos, cambios que pueden resultar en beneficios (maduración de frutas) o perjuicios (oxidación de ácidos grasos y oscurecimiento enzimático) (Badui, 2006). Las enzimas tienen una estructura tridimensional globular y solo presentan actividad cuando tienen una conformación especial que permite establecer una disposición óptima de los aminoácidos de su centro activo o sitio catalítico.

Una enzima únicamente actúa para disminuir la energía de la activación para una reacción, por lo que hace que la reacción suceda más rápidamente. Es decir las enzimas usualmente son específicas en su acción. De hecho, con frecuencia una enzima únicamente catalizará una sola reacción de un único compuesto, llamado "sustrato" de la enzima. Las enzimas funcionan a través de una vía que comprende la formación inicial de un complejo enzima-sustrato E·S, una conversión química multietapa de la enzima unida al sustrato en la enzima unida al producto E·P, y la liberación del producto a partir del complejo (McMurry, 2008).

### **1.5.6 Enzimas indicadoras**

El control de calidad de ciertos alimentos se puede llevar a cabo de manera indirecta a través del análisis de la actividad de ciertas enzimas; la presencia o la ausencia de algunas enzimas en particular se relacionan con una determinada condición microbiológica o química de un producto. En los vegetales, en especial en el corte de tubérculos puede resultar en cambios de color y sabor durante el almacenamiento, debido a la acción de la enzima peroxidasa (POD) y polifenoloxidasas (PPO). El mecanismo de color dorado se intensifica después del

corte, con la ruptura celular se conduce a la interacción entre sustratos polifenólicos y enzimas en presencia de oxígeno. El PPO cataliza dos reacciones: 1) hidroxilación de monofenoles a difenoles, y 2) oxidación de difenoles a quinonas. La actividad de la enzima POD puede ser parcialmente responsable de las reacciones de oscurecimiento que se produce en los tubérculos (Lima et al., 2016).

La inactivación de las enzimas peroxidasa (POD) y polifenoloxidasas (PPO) es necesaria para mantener la calidad de los tubérculos debido a reacciones de pardeamiento enzimático en los alimentos. La inactivación de la peroxidasa puede indicar el grado de escaldado en vegetales, ya que el escaldado se utiliza para inactivar enzimas que causan el oscurecimiento de tejidos vegetales. Si la peroxidasa se inactiva totalmente, eso indicara un tratamiento excesivo que repercutiría en detrimento de la textura del vegetal (Lima et al., 2016;Badui, 2006). La activación de la enzima normalmente es debido a las interacciones entre los constituyentes de los alimentos y la liberación de enzimas y sustratos de las membranas vegetales.

Las enzimas tales como lipoxigenasa pueden catalizar la reacción entre los ácidos grasos poli-insaturados y oxígeno para producir hidroperóxidos. La inactivación por calor, por ejemplo, el escaldado de vegetales, es una estrategia utilizada para inhibir la actividad de la enzima (Kong & Sing, 2011). La presencia de agua afecta significativamente la oxidación de lípidos y la oxidación que se produce a altas tasas en las actividades de agua muy bajas. Los antioxidantes, tales como  $\alpha$ -tocoferol, ácido cítrico y vitamina C, son capaces de retrasar o prevenir la oxidación por reacción con el oxígeno radical en un producto.

### **1.5.7 Oxidoreductasas**

Las oxidoreductasas es una categoría de seis de enzimas, las cuales catalizan oxidaciones (oxidasa) y reducciones (reductasas). El oxígeno causa cambios en

los alimentos, mediante reacciones oxidativas en ocasiones catalizadas por enzimas. Las oxidasas también son responsables de la degradación de vitaminas, como el ácido ascórbico. Para evitar estos efectos, se puede desactivar con calor a las enzimas endógenas, o también se puede eliminar el oxígeno presente en el alimento (McMurry, 2008, Badui, 2006).

Uno de los efectos de un tratamiento de escaldado es la inactivación de polifenoloxidasa (PPO). La enzima polifenoloxidasa cataliza la oxidación de compuestos fenólicos para producir el pigmento marrón en la superficie de frutas y verduras cortadas. Esta enzima es termolábil, a temperaturas de más de 50 °C y el tiempo de tratamiento adecuado permiten una disminución de la actividad, mientras que está completamente destruida a 80 °C (Severini et al., 2003). La PPO contiene cobre, con un centro de cobre di-nuclear. Esta enzima cataliza dos reacciones diferentes en la presencia de oxígeno molecular la o-hidroxilación de monofenoles a o-difenoles y la oxidación de o-difenoles a o-quinonas (Ziabakhsh et al., 2016).

Las lipoxigenasas se refieren a un grupo de enzimas que llevan a cabo la oxigenación o peroxidación de diversos compuestos insaturados, como ácidos grasos libres, vitaminas y pigmentos. Se encuentran en las hojas, las semillas y en los frutos de una gran variedad de vegetales; es abundante en los alimentos ricos en grasas, también se localiza en otros con baja concentración de lípidos, tales como la papa. Las lipoxigenasas tienen una doble función en los vegetales y frutas: benéfica y dañina, en el primer caso, como parte del metabolismo normal de estos alimentos es la responsable de la síntesis de diversos alcoholes y aldehídos característicos del aroma agradable en los productos frescos. Sin embargo, después de la cosecha y durante el almacenamiento y el procesamiento es la causante de cambios indeseables, ya que oxida las grasas y genera compuestos de olores desagradables. Su acción provoca la destrucción de los ácidos grasos indispensables y la formación de peróxidos, mismos que a su vez, además de oxidar otras sustancias, se descomponen en aldehídos y cetonas de

intenso olor mediante un mecanismo semejante al descrito en la autooxidación de las grasas (Badui, 2006).

### **1.5.8 Oscurecimiento enzimático**

Las reacciones de oscurecimiento son uno de los fenómenos de mayor importancia durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos (Hasbún et al., 2009). El oscurecimiento enzimático también conduce al desarrollo de sabores desagradables y pérdidas en la calidad nutricional. Los estudios realizados para reducir el oscurecimiento enzimático se han centrado en el uso de productos químicos que actúan como inhibidores de la actividad enzimática, otros por la prestación de un medio inadecuado para el desarrollo de la reacción de oscurecimiento (eliminación de oxígeno y compuestos fenólicos), o al funcionar como sustrato evitando la formación de pigmentos oscuros (Perez et al., 2006).

El oscurecimiento enzimático requiere la presencia de oxígeno, un sustrato y una enzima que contiene cobre unido en el sitio activo (catalizador). Los factores más importantes que determinan la tasa de oxidación enzimática son la enzima polifenoloxidasa, la concentración del compuesto fenólico, el pH, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno. El oscurecimiento enzimático se puede prevenir mediante la inactivación por calor, la inhibición de la enzima, la exclusión, la eliminación o transformación de sustratos ( $O_2$  y fenoles), disminución de pH por debajo del intervalo de actividad con ácido cítrico (que actúa como un agente quelante) que inhiben la enzima PPO (Severini et al., 2003). También conduce al desarrollo de sabores desagradables y pérdidas en la calidad nutricional.

### **1.6 Efecto de la congelación sobre las propiedades del freído**

La calidad de las papas fritas tipo francesa está determinada principalmente por el color y la textura, el color va de un color crema claro a un color dorado, mientras que la textura deseable es una corteza crujiente y un interior suave harinoso. El

color de las papas fritas está determinado principalmente por la reacción de oscurecimiento de Maillard, que se produce a altas temperaturas de procesamiento entre azúcares reductores y aminoácidos libres (Agblor & Scanlon, 2000). Los procesos de las papas fritas tipo francesa se componen de una serie de operaciones unitarias, como el escaldado, congelado, freído, y cada operación juega un papel crucial en la determinación de calidad de las papas.

Agblor y Scanlon (2000) mencionan que las papas sometidas a una congelación rápida mantienen su integridad estructural, mientras que la estructura de las papas fritas procesadas por una congelación lenta se ve afectada. Por lo tanto, mientras que una condición de procesamiento podría mejorar la calidad en el color del producto, la misma condición podría ser perjudicial para la calidad textural.

La fritura es una operación unitaria que se realiza por inmersión, en aceite o grasa comestible a una temperatura superior al punto de ebullición del agua, por lo general 150 a 200 °C. Conserva los alimentos por la destrucción térmica de los microorganismos y la reducción de la actividad de agua ( $a_w$ ). Con el freído, los alimentos adquieren ciertas características agradables de color, textura y aroma que son consecuencia, de la reacción de Maillard, de la absorción por el alimento de compuestos volátiles presentes y la formación de una corteza crocante, porosa y aceitosa y un interior húmedo y cocido (Guzmán et al., 2012). A su vez es un proceso de deshidratación que implica la transferencia de calor y numerosos cambios químicos que ocurren durante la fritura, como la gelatinización del almidón, desnaturalización de las proteínas, el color dorado de la superficie, la rápida evaporación del agua, y la absorción de aceite. De hecho, el agua presente en la materia prima se evapora progresivamente durante la fritura, y parcialmente sustituido por aceite, lo que constituye hasta el 40 % del producto final, y por lo tanto afecta a sus propiedades (Bouazziz et al., 2015; Sandhu & Takhar, 2015).

La presencia de azúcares reductores es de gran importancia en la fritura, ya que los contenidos de estos azúcares se correlacionan con el grado de oscurecimiento no enzimático que se desarrolla durante el calentamiento (Hasbún et al., 2009).

En el caso de las papas fritas, las reacciones de oscurecimiento no enzimático determinan en gran medida el color de los productos. Durante tratamientos térmicos como la fritura, se forman diferentes compuestos mediante reacciones de Maillard (Hasbún et al., 2009). La absorción de aceite se ve afectada por diversos factores tales como la temperatura de fritura y el tiempo, la composición del alimento, porosidad, pre-tratamiento (escaldado y secado), y la calidad del aceite (Bouazziz et al., 2015).

## **CÁPITULO II**

### **METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL**

#### **2.1 Problema**

El oscurecimiento enzimático es una problemática que presentan los vegetales como la papa al pasar por inadecuados pre-tratamientos y la pérdida de textura al pasar por un proceso de congelación, así mismo la absorción de aceite en el freído de papas tipo francesas, por lo tanto continuamente se buscan alternativas y nuevos métodos de pre-tratamiento que logren mejorar las características de los productos congelados que posteriormente se someterán a un freído como sucede en el caso de las papas cortadas a la francesa, una de estas alternativas incluye el uso de sistemas nanoparticulados y el uso de antioxidantes tales como  $\alpha$ -tocoferol; en particular el uso de nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol en CMC en el pre-tratamiento de escaldado de papa tipo francesa como recubrimiento ha sido una alternativa para evaluar su efectividad de textura y color en la papa tipo francesa después de ser escaldada, congelada y frita.

#### **2.2 Objetivo general**

Analizar el efecto de la incorporación de una dispersión con base de CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, sobre las propiedades físicas y químicas en papas cortadas tipo francesa, previo y posterior al proceso de congelación, evaluando los cambios de color, texturales, de superficie y absorción de aceite.

## **2.2.1 Objetivos particulares**

### **Objetivo particular 1**

Correlacionar el efecto de la aplicación de un recubrimiento con base en CMC y con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol durante el pre-tratamiento de escaldado sobre la velocidad de congelación.

#### **Variables**

Factor de variación: pre-tratamiento de escaldado.

Factor dependiente: tiempo de congelación.

Factor de respuesta: velocidad de congelación.

### **Objetivo particular 2**

Establecer el efecto del pre-tratamiento de escaldado con la aplicación de un recubrimiento con base en CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol sobre los cambios de superficie y textura mediante pruebas de microscopia digital y análisis de perfil de textura.

#### **Variables**

Factor de variación: pre-tratamiento de escaldo.

Factor dependiente: temperatura y tiempos del pre-tratamiento.

Factor de respuesta: Firmeza y estructura superficial de la papa.

### **Objetivo particular 3**

Analizar la influencia de la aplicación de un recubrimiento con base en nanocápsulas con  $\alpha$ -tocoferol, sobre el cambio de índice de oscurecimiento de papas tipo francesa previo y posterior a la congelación, mediante análisis de imagen.

#### **Variables**

Factor de variación: pre-tratamiento de escaldado.

Factor dependiente:  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ .

Factor de respuesta:  $\Delta E$ , Croma,  $^{\circ}$ Hue.

#### Objetivo particular 4

Determinar la absorción de aceite durante el freído de papa tipo francesa por efecto del pre-tratamiento de escaldado con base en CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol y de la congelación.

#### Variables

Factor de variación: Pre-tratamiento de escaldado.

Factor dependiente: temperatura y tiempo de escaldado.

Factor de respuesta: absorción de aceite y cambios de color en la papa frita tipo francesa.

#### 2.3 Selección de variables y análisis estadístico

Tabla 4. Selección de variables

Factor de Variación	Nivel de variación	Factor dependiente	Factor de respuesta	Técnica / Instrumento
Pre-tratamiento (escaldado)	Agua; CMC; Ac. Cítrico; NC's $\alpha$ -tocoferol; NC's, CMC y Ac. Cítrico.	Tiempo de congelación.	Velocidad de congelación	Termopar USB
Temperatura de escaldado	1) 75°C 2) 85°C	L*, a*, b* Textura	$\Delta E$ , Chroma, °Hue. Firmeza	Cámara oscura Texturómetro Brookfield CT3
Tiempo de escaldado	1) 6 minutos 2) 9 minutos	Estructura superficial	Formación de cristales	Microscopio digital

La **Tabla 4** muestra los factores y niveles de variación considerados para la realización del estudio en relación a los parámetros importantes en el procesamiento de papa cortada a la francesa congelada.

### Análisis estadístico

**Tabla 5.** Diseño estadístico factorial 3<sup>2</sup> y cada corrida y sus variables.

Pre tratamiento (Escaldado)		Temperatura de escaldado (°C)	Tiempo de escaldado (minutos)
1	Agua	75	6
2	Agua	75	9
3	Agua	85	6
4	Agua	85	9
5	CMC 0.44 %	75	6
6	CMC 0.44 %	75	9
7	CMC 0.44 %	85	6
8	CMC 0.44 %	85	9
9	Ácido Cítrico 1 %	75	6
10	Ácido Cítrico 1 %	75	9
11	Ácido Cítrico 1 %	85	6
12	Ácido Cítrico 1 %	85	9
13	NC's α-tocoferol 0.025 %	75	6
14	NC's α-tocoferol 0.025 %	75	9
15	NC's α-tocoferol 0.025 %	85	6
16	NC's α-tocoferol 0.025 %	85	9
17	CMC, Ácido Cítrico y NC's	75	6
18	CMC, Ácido Cítrico y NC's	75	9
19	CMC, Ácido Cítrico y NC's	85	6
20	CMC, Ácido Cítrico y NC's	85	9

Para analizar la influencia de los factores sobre las variables de respuesta seleccionadas se empleó un factorial completo  $3^2$  con tres puntos centrales, en la **Tabla 5** se muestran las corridas experimentales de acuerdo al diseño experimental propuesto. Se realizaron 3 réplicas por cada corrida experimental.

El análisis estadístico se realizó con un ANOVA en el programa de Minitab 15. Los datos se dan como las medias para cada tratamiento y las pruebas de grado múltiple de Duncan determinaron las diferencias significativas  $P < 0.05$ . Se analizaron juntos en un modelo estadístico completo con factores: el tipo de tratamiento, el tiempo de escaldado y la temperatura de escaldado. Teniendo en cuenta las interacciones dobles (Tratamiento con temperatura de escaldado y Tratamiento con tiempo de escaldado) y la interacción triple (Tratamiento con temperatura de escaldado y tiempo de escaldado).

## **2.4 Actividades preliminares**

### **2.4.1 Caracterización del congelador vertical**

Antes de llevar a cabo la congelación de la papa cortada a la francesa, se caracterizó el congelador vertical donde se llevó a cabo la congelación de las muestras, ubicada en el Laboratorio de Transformación y Tecnologías Emergentes en Alimentos de la UIM dentro de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán campo 4, con la finalidad de conocer las condiciones de trabajo y tener el control de los parámetros de congelación y almacenamiento congelado mediante el monitoreo de la temperatura.

El termohigrómetro que se ocupó durante la experimentación fue un termopar digital (termohigrómetro) marca THERMOCOUPLE DATA LOGGER, modelo EL-USB-TC-LCD como el que se muestra en la **Figura 11 (b)**, para el acomodo se verificó que en cualquier punto del congelador marcara la misma temperatura, por tanto, siempre se mantuvo a un costado de las papas.

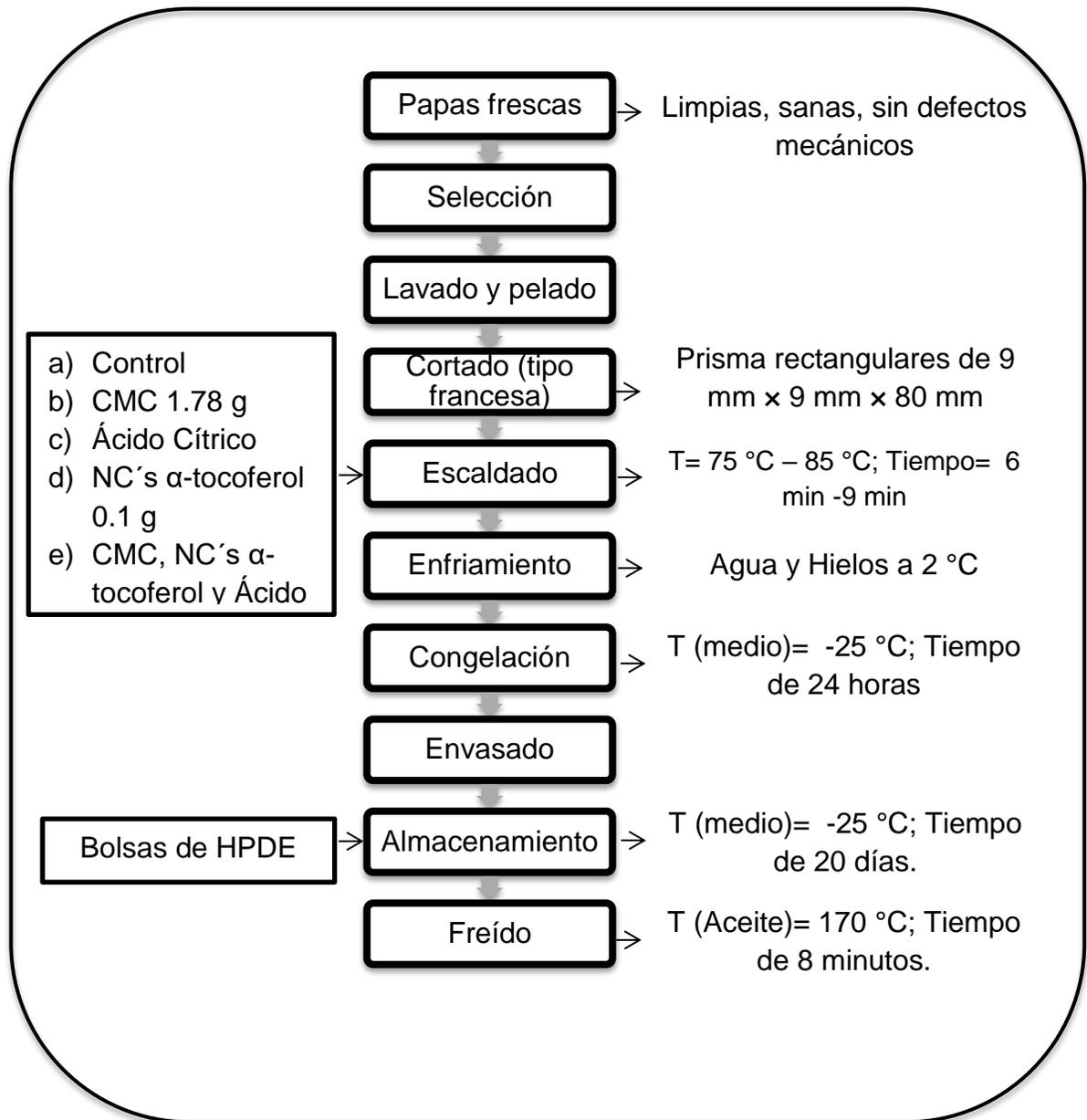


**Figura 11.** a) Congelador vertical; b) Termohigrómetro.

Después de la congelación (**Figura 11 a**), las papas se colocaron en un recipiente que indicaba que estaban en almacenamiento, dentro del mismo congelador vertical pero una vez que las papas cortadas y congeladas fueron envasadas y se mantuvieron durante 20 días en almacenamiento, ordenadas por el tipo de pre-tratamiento que obtuvieron en el escaldado.

## 2.4.2 Elaboración de diagrama de proceso

En la **Figura 12** se muestra el diagrama de proceso para la elaboración de papas fritas tipo francesa y las condiciones óptimas de operación de manera simplificada desde la selección de materia prima hasta el freído de las papas.

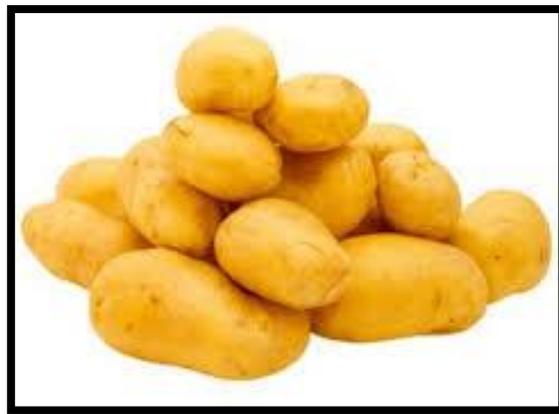


**Figura 12.** Diagrama de proceso para la papa frita tipo francesa

### 2.4.3 Acondicionamiento de la muestra

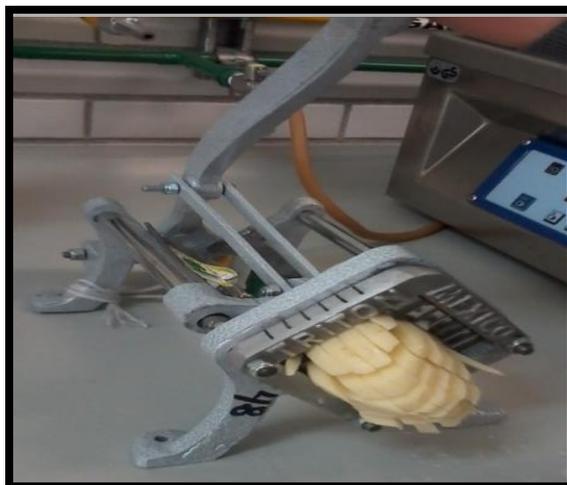
Durante el acondicionamiento de la muestra se tuvo un control de las condiciones iniciales de la papa seleccionada de acuerdo a los parámetros de calidad marcado en la norma CODEX STAN 114-1981 en la cual se especifican los lineamientos de papas fritas congeladas rápidamente, de acuerdo a su forma, color, tipo de corte y nos señala que tienen que ser preparadas con tubérculos de la especie *Solanum tuberosum L.* las papas deben encontrarse limpias, sanas y no ser excesivamente duras ni blandas o pastosas, respecto al color no tiene que tener una decoloración oscura o intensa, ojos o piel oscura.

Se utilizó 1 kg de papa (*Solanum tuberosum L.*) para cada corrida experimental y fueron adquiridas en un mercado local; la **Figura 13** muestra las características visuales de la papa que se utilizó para cada corrida.



**Figura 13.** Papa (*Solanum tuberosum L.*) utilizada en experimentación

Después de obtener una papa lavada y desinfectada, se llevó a cabo el cortado de la papa en forma prisma rectangular con el cortador de papa de la marca TRITON MÉXICO como se muestra en la **Figura 14**, para obtener una papa tipo francesa. Las dimensiones de las papas cortadas fueron de 9mm x 9mm x 80mm.



**Figura 14.** Cortador de papa en forma prisma rectangular (tipo francesa).

Inmediatamente después, para evitar su oxidación, la papa se sumergió en una solución de 8g de NaCl y 2g de CaCl<sub>2</sub> en 400 ml de agua durante 5 min, como lo muestra la **Figura 15** esto se realizó para detener el oscurecimiento enzimático de la papa antes de someterla al pre-tratamiento de escaldado. Ya que el calcio es capaz, hasta cierto punto, para estabilizar la estructura del tejido contra el daño mecánico al que se someterá el alimento (Khalil, 1999), y con NaCl para disminuir la concentración de agua en la papa. El cloruro de calcio se puede añadir en el escaldado de agua o utilizando un método de infusión al vacío antes del escaldado. Una combinación de productos en el escaldado, puede mejorar la textura de los productos frescos (Carbonell et al., 2006).



**Figura 15.** Acondicionamiento de la muestra en la solución de NaCl y CaCl<sub>2</sub>

#### 2.4.4 Elaboración de dispersiones

Se realizaron las dispersiones a base de CMC, mezclando 1.78 g de goma CMC en 400 mL de agua en un agitador de propela. Para las corridas experimentales con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol se utilizó la misma proporción de dispersión CMC y 44 ml de dispersión de nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol.

#### 2.4.5 Escaldado de las muestras

La papa cortada en forma tipo francesa fue sumergida a diferentes condiciones experimentales en un medio de calentamiento dependiendo el tratamiento: escaldado en agua, escaldado con CMC, escaldado con ácido cítrico, escaldado con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol y escaldado con ácido cítrico, CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol. En un tiempo de 6 y 9 minutos con una temperatura de 75 °C y 85 °C, a las mismas concentraciones de ácido cítrico, CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, después se dejó escurrir por 3 minutos para posteriormente determinar las propiedades colorimétricas, texturales y microscópicas para los lotes de cada corrida experimental. En la **Figura 16** se muestra el modo que se utilizó para escaldar las muestras.



**Figura 16.** Escaldo de cada corrida según el diseño experimental.

#### 2.4.6 Congelación de las muestras

Después de someter las muestras a escaldado, se sumergieron en 500 mL de agua con hielo para provocar un choque térmico y eliminar el calor que obtuvo la papa en el escaldado, y someterla al proceso de congelación que se llevó a cabo durante 24 horas, las condiciones del proceso de congelación fueron constantes y se llevaron a cabo en un congelador vertical, obteniendo ahí las historias térmicas correspondientes de cada corrida, en la **Figura 17** se muestra el acomodo de cada corrida experimental dentro del congelador vertical.

Las curvas de congelación se obtuvieron midiendo el cambio de temperatura en función del tiempo, iniciando el monitoreo desde la temperatura ambiente, las mediciones de temperatura se realizaron por triplicado utilizando termopares de penetración de caratula, el cual se colocó penetrando la papa durante las 24 horas del proceso de congelación, en un congelador horizontal a temperaturas menores a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se graficaron los datos obtenidos, y mediante un análisis de curvas se determinó el punto de congelación, siendo este el punto donde la temperatura se mantiene constante, formando una meseta, u ocasionando una pendiente en la gráfica. Este punto es donde los cristales de hielo y el agua líquida coexisten. (Machado & Vélez, 2008).



**Figura 17.** Acomodo de la papa escaldada dentro del congelador vertical.

### 2.4.7 Almacenamiento

Después de las 24 horas del proceso de congelación, las muestras de cada lote se envasaron en bolsas de HDPE (polietileno de alta densidad), se utilizó este material por la permeabilidad que tiene con gases y líquidos, se sellaron como se muestra en la **Figura 18 (a)**, y su almacenamiento fue en el mismo congelador vertical donde las condiciones de temperatura fueron constantes y se almacenaron durante 20 días, el almacenamiento fue de la manera como lo muestra la **Figura 18 (b)**.



**Figura 18.** (a) Sellado de cada muestra en bolsas de HPDE; (b) Almacenamiento de papa tipo francesa envasada

### 2.4.8 Freído de papa tipo francesa

El freído de las muestras de cada corrida se sometió en un volumen de 1 L de aceite vegetal comestible **Figura 19 (a)**, durante un tiempo de 8 minutos a una temperatura de 170 °C en una freidora domestica como se observa en la **Figura 19 (b)**. Estudios anteriores demostraron que no hay ningún efecto significativo del tiempo de fritura en la absorción de aceite en las papa fritas (Richter et al., 2008),

es por ello que las condiciones de freído fueron las mismas para todas las corridas.



**Figura 19.** (a) Aceite vegetal comestible; (b) Freidora

#### 2.4.9 Color

El color de la papa fue evaluado mediante un sistema de iluminación normalizado para reducir la reflexión y sombras en una caja impermeable a la luz y que tiene superficies negras internas como lo muestra en la **Figura 20**, esto con la metodología de Briones y Aguilera (2005), se utilizó una cámara digital Fujifilm® (12 megapíxeles, sin zoom, sin flash, con un temporizador de 2 segundos), la cámara se coloca dentro de la caja que tiene dos focos de 10 watts inclinados con un ángulo de 45°, uno en la esquina superior y otro en la esquina contraria inferior, el ángulo entre la cámara y la muestra fue de 90° para reducir el brillo.



**Figura 20.** Caja oscura para técnica de colorimetría por el método de Briones y Aguilera (2005).

La prueba de color fue realizada después del proceso de escaldado, congelación y freído de la papa para cada corrida experimental. Los parámetros que se utilizan para la evaluación del color son  $L^*$ ,  $h^\circ$  y Croma. El valor  $L^*$  indica el grado de luminosidad, a medida que el valor aumenta se tiene un producto más claro, mientras que un  $L^*=0$  representa el color negro. El valor  $h^\circ$  indica el tono del producto, es un parámetro cualitativo en relación con la longitud de onda de los colores espectrales (Richter et al., 2008), un  $h^\circ=90^\circ$  corresponde al color amarillo, valores cercanos a  $0^\circ$  corresponden al color rojo (Hasbún et al., 2009). Las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se obtuvieron por medio del programa Adobe photoshop CS5. Para cada condición del diseño experimental se realizó la prueba por triplicado. A partir de los datos obtenidos y en base a la ecuación descrita por Palou (1999).

$$^\circ Hue = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad Ec. (1)$$

$$Croma = ((a)^2 + (b)^2)^{1/2} \quad Ec. (2)$$

$$\Delta E^* = ((\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2)^{1/2} \quad Ec. (3)$$

#### 2.4.10 Textura

La evaluación de la textura se realizó en un texturómetro Brookfield (Modelo CT3, EUA). Se utilizó un punzón TA42 (3 mm), una mesa estándar TA-BT-KIT, con una celda de carga de 25000 g, a una velocidad de 1 mm/s y una muestra de 9 mm x 9 mm x 80 mm. Para la medición se realizó una punción a 4 mm de profundidad de penetración. Esta prueba de punción se realizó a las muestras escaldadas y congeladas como se muestra en la **Figura 21**.



**Figura 21.** Texturómetro Brookfield penetrando papa escaldada y congelada.

#### 2.4.11 Análisis de imagen

Se observaron los cambios superficiales de la papa después del proceso de escaldado y congelación como se muestra en la **Figura 22**, en un microscopio óptico USB Digi Microscope.



**Figura 22.** Análisis de imagen en la papa con Microscopio óptico digital.

#### 2.4.12 Evaluación de pH

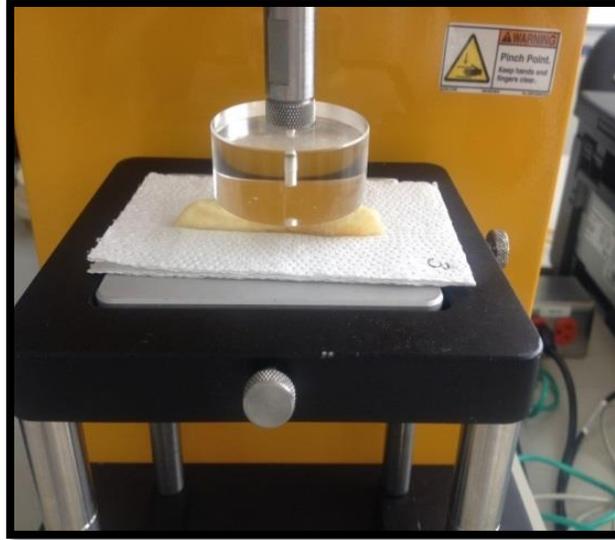
Antes de determinar pH de las corridas experimentales de papa escaldada, fue necesario llevar a cabo la reducción de tamaño de la papa empleando un sistema de molienda de 600 watts como el que se observa en la **Figura 23 (a)**, Se determinó pH por medio de un potenciómetro digital marca Hanna como se muestra en la **Figura 23 (b)**, el potenciómetro se calibró antes del uso para cada corrida con soluciones buffer de pH 4.



**Figura 23.** (a) Extractor de alimentos; (b) Potenciómetro Hanna.

#### 2.4.13 Evaluación de absorción de aceite

Se evaluó la absorción de aceite en la papa con diferentes pre-tratamientos después del freído con el texturómetro Brookfield con la prueba de ATP con 2 ciclos de compresión con una sonda TA 25/ 1000 a una velocidad de 1 mm/s y una profundidad de 4 mm, como se muestra en la **Figura 24**. Colocando un papel absorbente previamente pesado y realizando el pesado del papel después de la prueba de TPA. Realizando la evaluación de absorción de aceite por diferencia de peso del papel absorbente.



**Figura 24.** Absorción de aceite en la papa tipo francesa con prueba TPA.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS**

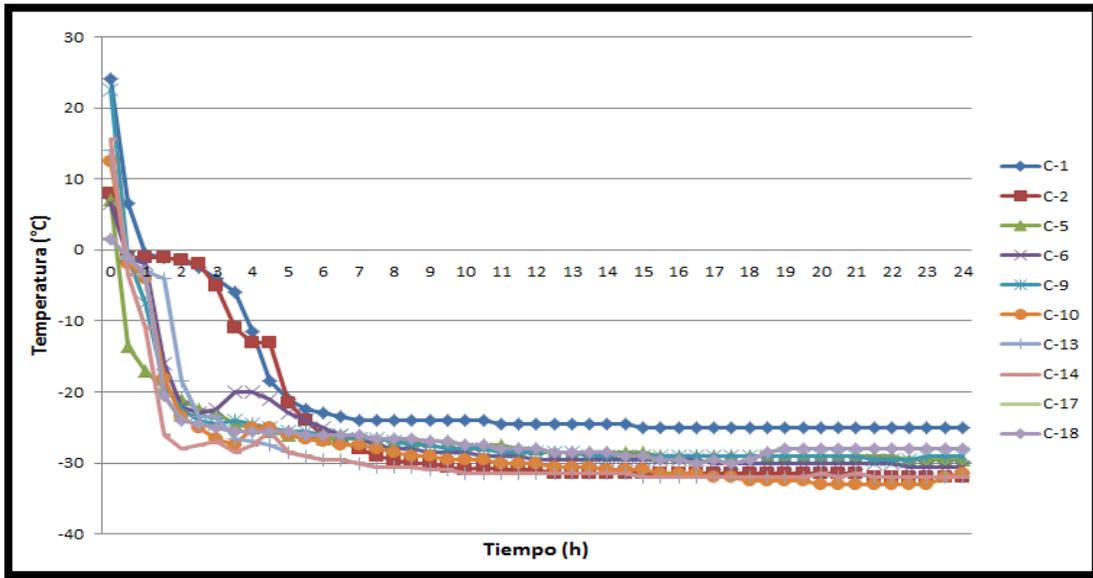
#### **3.1 Actividades preliminares**

##### **a) Caracterización del congelador vertical**

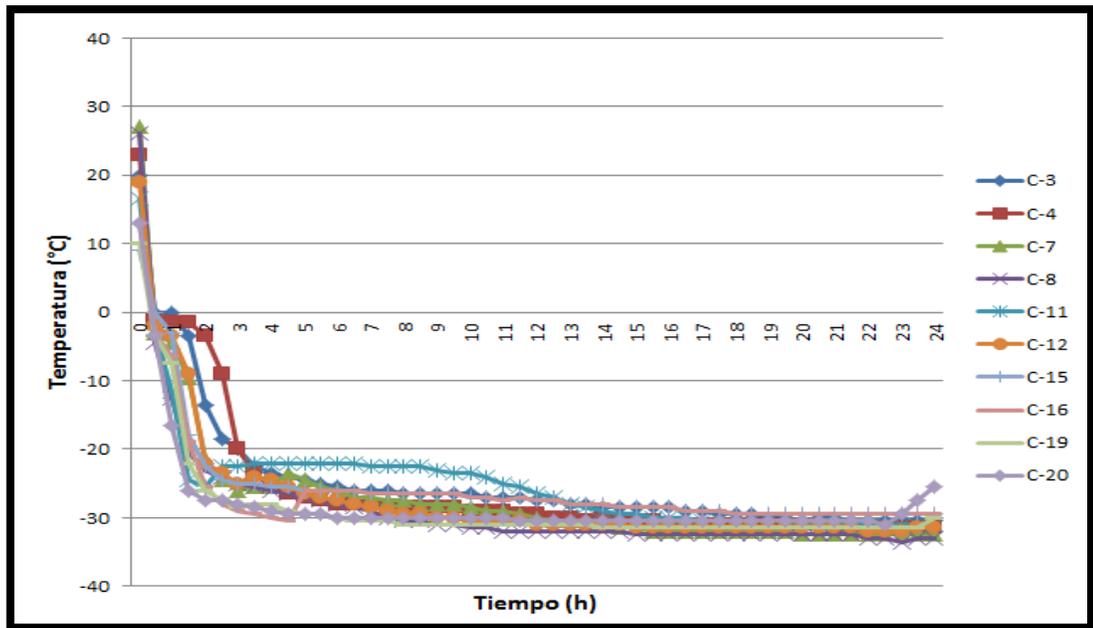
Las temperaturas del aire y del producto se controlaron mediante termopares de tipo T. El software permite en tiempo real obtener los datos de temperatura en grados Celsius (°C) del medio refrigerante, así como la temperatura y la velocidad de congelación de las muestras. El congelador vertical tuvo una distribución de temperatura máxima de -11 °C y una temperatura mínima de -30 °C.

#### **3.2 Velocidad de Congelación**

La velocidad de congelación determina el tamaño de los cristales de hielo y a su vez determina el grado de daño estructural, lo que provoca un cambio en los parámetros reológicas del tejido (Alvarez & Canet, 1997). En las **Figuras 25 y 26** se muestran las curvas de congelación de la papa sometida a diferentes pre-tratamientos de escaldado. En la **Figura 25**, la curva de congelación de la corrida 1 (C-1) y corrida 2 (C-2) y en la **Figura 26** la curva de la corrida 3 (C-3) y corrida 4 (C-4) de la papa sometida al pre-tratamiento control (agua), se puede observar el PIC (punto inicial de congelación) que fue de -0.5 y a -1 °C, 0 y -1 °C sucesivamente y debido a la gran cantidad de solutos que se encuentran en las demás corridas el punto inicial de congelación disminuye, a diferencia de las corridas sometidas a un pre-tratamiento con agua (Cuibus et al., 2014).



**Figura 25.** Curva de congelación de la papa sometida al proceso de escaldado a diferentes pre-tratamientos a 75 °C.



**Figura 26.** Curva de congelación de la papa sometida al proceso de escaldado a diferentes pre-tratamientos a 85 °C.

**Tabla 6.** Velocidad de congelación y PIC de la papa tipo francesa sometida a diferentes pre-tratamientos

No. Corrida	Tratamiento	Velocidad de Congelación (°C/h)	PIC (°C)
1	Agua/ 75 °C/ 6 min	2.0	-0.5
2	Agua/ 75 °C/ 9 min	1.6	-1
3	Agua/ 85 °C/ 6 min	2.1	0
4	Agua/ 85 °C/ 9 min	2.2	-1
5	CMC/ 75 °C/ 6 min	1.5	-17
6	CMC/ 75 °C/ 9 min	1.5	-21
7	CMC/ 85 °C/ 6 min	2.4	-16
8	CMC/ 85 °C/ 9 min	2.4	-20.5
9	Ácido cítrico/ 75 °C/ 6 min	2.1	-22.5
10	Ácido cítrico/ 75 °C/ 9 min	1.8	-18
11	Ácido cítrico/ 85 °C/ 6 min	1.9	-24.5
12	Ácido cítrico/ 85 °C/ 9 min	2.1	-22
13	NC's $\alpha$ -tocoferol/ 75 °C/ 6 min	1.9	-22.5
14	NC's $\alpha$ -tocoferol/ 75 °C/ 9 min	1.9	-26
15	NC's $\alpha$ -tocoferol/ 85 °C/ 6 min	1.6	-23.5
16	NC's $\alpha$ -tocoferol/ 85 °C/ 9 min	1.7	-25.5
17	CMC-ácido cítrico-NC's $\alpha$ -tocoferol/ 75 °C/ 6 min	1.2	-24
18	CMC-ácido cítrico-NC's $\alpha$ -tocoferol/ 75 °C/ 9 min	1.2	-24
19	CMC-ácido cítrico-NC's $\alpha$ -tocoferol/ 85 °C/ 6 min	1.6	-26
20	CMC-ácido cítrico-NC's $\alpha$ -tocoferol/ 85 °C/ 9 min	1.6	-26

En la **Tabla 6** se muestra el punto inicial de congelación y la velocidad de congelación para cada corrida con diferentes pre-tratamientos, en la que se observa que no hay diferencia en la velocidad de congelación para cada corrida con diferentes pre-tratamientos y se observa que el rango de velocidad muestra que se llevó a cabo una congelación lenta. La diferencia que se puede observar en las curvas de congelación, es que las corridas con más solutos, es decir las que tienen pre-tratamiento tienen un menor punto inicial de congelación entre -16 a -26 °C, mientras que las muestras control están entre 0 a -1 °C.

### **3.3 Color**

El color de la superficie de los alimentos es el primer parámetro de calidad evaluada por los consumidores en el momento de la compra y es crítica para la aceptación del producto. De acuerdo con Richter et al. (2008), las mediciones de color podrían considerarse como un índice indirecto de la actividad de la enzima PPO, y las muestras que no muestran oscurecimiento u otros colores anómalos son razonablemente libre de PPO. Por lo tanto, se requiere diferentes índices de color para llevar a cabo una caracterización detallada de este atributo de calidad visual. Entre las aplicaciones de los espacios de color para la clasificación de productos alimenticios, la mayoría de ellos se basan en el espacio RGB, HSI (tono, saturación e intensidad) y coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  que es el sistema que se sugiere como el mejor espacio de color para la cuantificación de los alimentos (Mendoza et al., 2006).

#### **3.3.1 Luminosidad ( $L^*$ )**

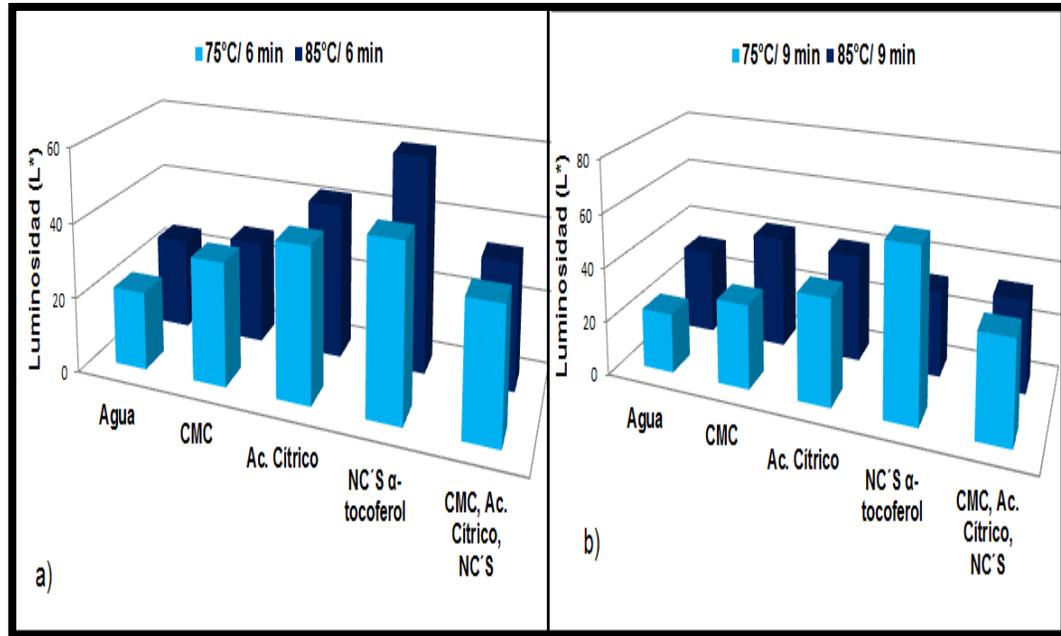
La luminosidad representa la dispersión de la luz en un alimento, ya que es el componente de luminancia y ligereza (Mendoza et al., 2006), considerando la presencia de color blanco ( $L=100$ ) o bien color negro ( $L=0$ ), y representa el brillo de un color específico, mientras el  $L^*$  aumenta, el color correspondiente se vuelve

más brillante (Du & Sun, 2005), siendo este parámetro importante en la percepción de color dado por el consumidor.

### 3.3.1.1 Luminosidad de papa escaldada

La **figura 27 (a y b)** muestra los cambios de luminosidad ( $L^*$ ) de las muestras de papa una vez sometida al proceso de escaldado en función de los diferentes pre-tratamientos: nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, dispersión de CMC, ácido cítrico y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol con CMC y ácido cítrico. La **figura 27 (a)** muestra los resultados obtenidos después del pre-tratamiento a una temperatura de 75 y 85 °C durante 6 min, está muestra que la menor luminosidad la representaron las muestras control sin que existiera diferencia estadísticamente significativa ( $\alpha=0.05$ ) por la temperatura a la que se llevó a cabo el escaldado, de esta figura resalta que las muestra tratadas solo con nanocápsulas son las que presentaron la mayor luminosidad, la muestra que corresponde al tratamiento con los tres componentes del sistema no mostro diferencia estadísticamente significativa respecto a las que contienen ácido cítrico en relación a este parámetro.

La **figura 27 (b)** muestra el comportamiento de la luminosidad para la papa escaldada a 75 y 85 °C durante 9 min, mostrando que existió diferencia estadísticamente significativa ( $p \leq 0.00$ ) entre el tratamiento a 75 y 85 °C para este parámetro. Además, en promedio, la luminosidad fue menor para aquellas papas tratadas a 85 °C/ 9 min, también se muestra que la mayor luminosidad la presentaron las muestras tratadas con nanocápsulas con  $\alpha$ -tocoferol y escaldadas a 75 °C con un valor promedio de **53.4** entre los dos tiempos (6 y 9 min), mostrándose además que las muestras escaldadas a 75 °C/ 9 min son las que tuvieron la mejor luminosidad de todas, sin embargo, cabe resaltar que esto no implico diferencia estadísticamente significativa en relación a las papas escaldadas por 6 min en el que no se mostró influencia de la temperatura de escaldado.



**Figura 28.** Luminosidad de la papa después del escaldado a) escaldado durante 6 minutos. b) escaldado durante 9 minutos

Los valores de luminosity reportados para la papa a 75 °C/ 9 min son similares a los reportados por Vasconcelos et al., (2015) reportaron valores de entre 77.38 a 73.57 para papa escaldada e inmersa en diferentes soluciones de NaCl y CaCl<sub>2</sub>. Por otro lado, Heredia et al., (2014) reportaron valores de L= 52 para papa escaldada a 90 °C/ 1 min, valores que son similares a los resultados obtenidos en este trabajo para los tratamientos ya que en el caso de la papa escaldada por 6 min independientemente de la temperatura empleada estos valores son los alcanzados y de igual manera para aquellos escaldados por 9 min lo que implica que la aplicación de un recubrimiento como pre-tratamiento durante el escaldado no afecta las características de la papa en comparación con otros tratamientos.

Con la finalidad de reforzar el análisis del comportamiento de la luminosity y los demás factores considerados en el estudio, en la **Tabla 7** se muestran los resultados del análisis de varianza para el diseño factorial propuesto, en éste se observa con excepción del parámetro lineal para temperatura y tiempo, todas las interacciones mostraron un efecto significativo sobre la luminosity.

**Tabla 7. ANOVA para los factores, pre-tratamientos, temperatura y tiempo de escaldado**

Fuente	F- Value	p- Value
Modelo	46.05	
Lineal	90.05	0.000*
Tratamiento	134.60	0.000+
Temperatura	1.82	0.180 <sup>NS</sup>
Tiempo	0.08	0.778 <sup>NS</sup>
2- interacciones	11.52	0.000*
Tratamiento *Temperatura	14.93	0.000*
Tratamiento *tiempo	8.63	0.000*
Temperatura *tiempo	9.28	0.003
3- interacciones	57.73	0.000*
Tratamiento *tiempo *temperatura	57.73	0.000*

R<sup>2</sup>- adj= 82.70

\*Términos estadísticamente significativos con  $\alpha= 0.05$

NS= no significativo estadísticamente

Las **Figuras 28 y 29** muestran el comportamiento de las medias de los tratamientos y las interacciones para el comportamiento de la luminosidad después del escaldado de papa cortada a la francesa, incluidos los pre-tratamientos realizados y que contribuye a reafirmar lo analizado en párrafos anteriores a este respecto. Rojas et al. (2007) menciona que el ácido cítrico ha sido aplicado en frutas y vegetales minimamente procesados para evitar el oscurecimiento enzimático, lo que comprueba los altos valores de luminosidad en las muestras con ácido cítrico en esta etapa y mostrando que no existió influencia de los términos lineales tiempo-temperatura. La **Figura 29** muestra las interacciones entre los factores en función al tiempo y temperatura para cada tratamiento.

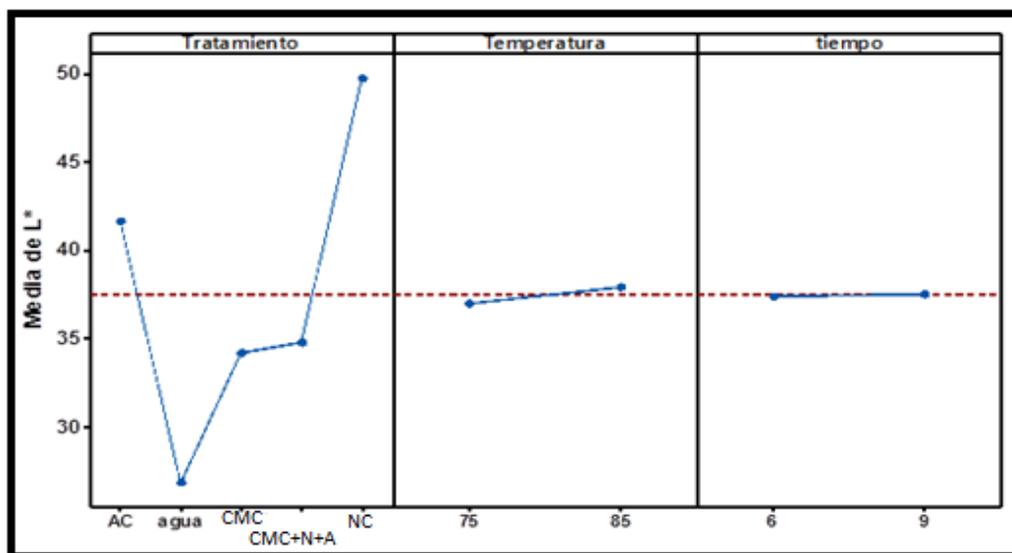


Figura 28. Medias de los tratamientos para los efectos principales.

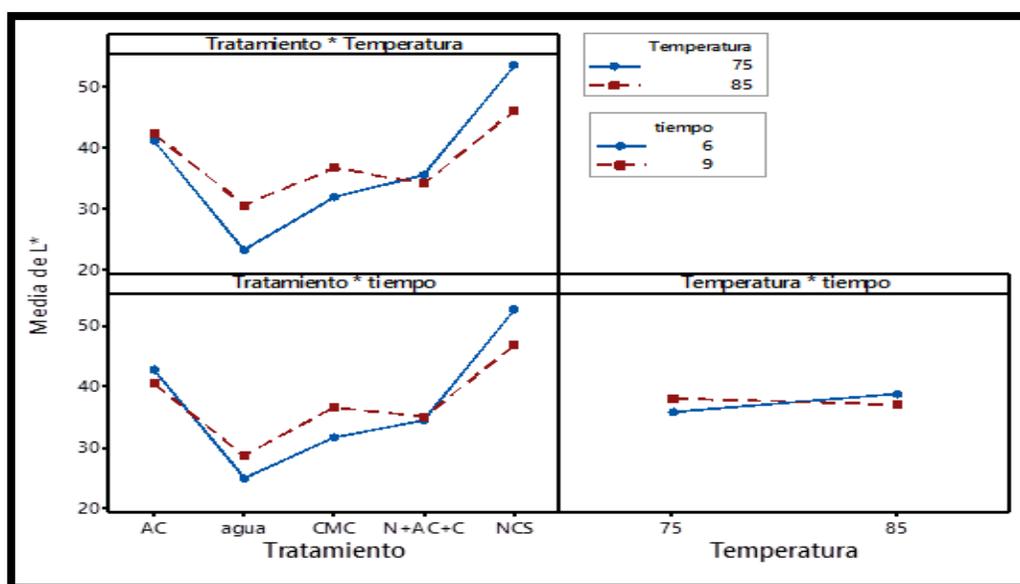
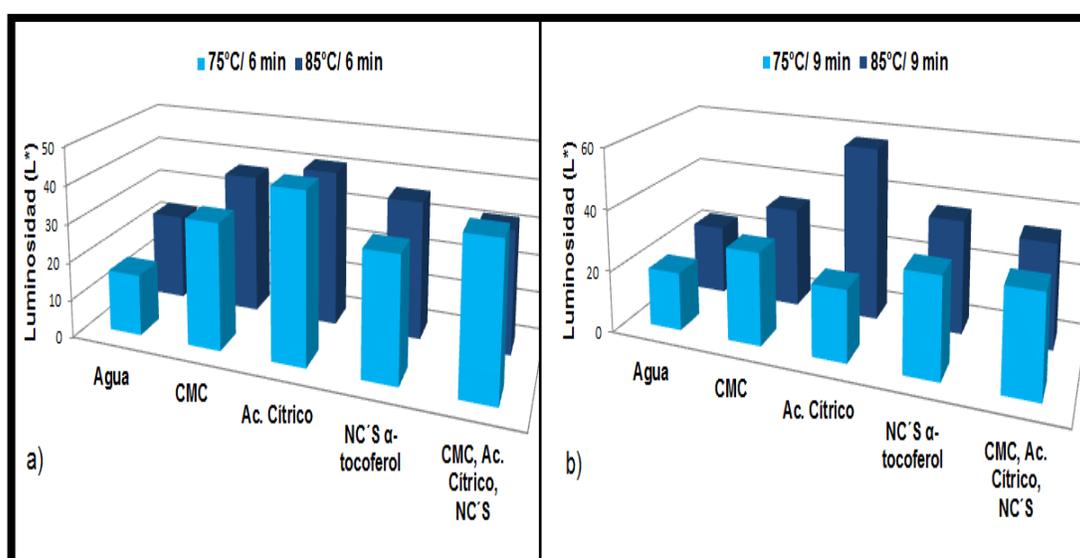


Figura 29. Interacciones de las variables.

### 3.3.1.2 Luminosidad de papa congelada

La **Figura 30 (a y b)** muestra la luminosidad ( $L^*$ ) de las papas después de haberse sometido al proceso de congelación en función de diferentes tratamientos con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol y sin nanocápsulas y de igual manera se muestran ambas gráficas con diferente tiempo de pre-tratamiento y temperaturas.

La **Figura 30 (a)** muestra que existió diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes tratamientos ( $\alpha= 0.05$ ), resaltando que el incremento del tiempo y temperatura para la aplicación de ácido cítrico modifica considerablemente la luminosidad, sin embargo, en el tratamiento a 6 min se muestra una mayor luminosidad para las muestras con ácido cítrico, nanocápsulas y la mezcla de los componentes, no mostrando diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos.



**Figura 30.** Luminosidad de la papa después de la congelación a) escaldado durante 6 minutos. b) escaldado durante 9 minutos.

La luminosidad después de 24 h mostró una disminución en las muestras escaldadas con agua, es preciso comentar que el análisis estadístico muestra que el factor con mayor efecto significativo fue el tipo de pre-tratamiento, sin embargo, también muestra que el tiempo ( $P > 0.66$ ) y la temperatura de escaldado ( $P > 0.09$ ) también tuvieron influencia significativa. También se observa que los valores más altos de luminosidad después de la congelación fueron con el pre-tratamiento con ácido cítrico, estos resultados se pueden atribuir a la formación de cristales muy pequeños de hielo que reflejan la luz de forma diferente por el ácido cítrico (Agnelli & Mascheroni, 2002), además de que el ácido cítrico es un agente anti-

pardeamiento, lo que impide la acción de la enzima polifenoloxidasas y por lo tanto inhibe el oscurecimiento enzimático, o que se ve reflejado en el aumento de luminosidad después de la congelación. Abd (2014) reportó valores de luminosidad entre 35-40 en fresas congeladas previamente tratadas en ácido cítrico. También Heredia et al., (2014) reportaron incrementos en la luminosidad por efecto de la congelación en papa congelada mostrando un incremento en la luminosidad del 27% entre la papa escaldada y la congelada.

**Tabla 8. ANOVA para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, en papa congelada**

Fuente	F- Value	p- Value
Modelo	47.53	0.000*
Covariantes (L* escaldado)	1.82	0.179 <sup>NS</sup>
Lineal	68.86	0.000*
Tratamiento	83.40	0.000*
Temperatura	85.02	0.000*
Tiempo	3.93	0.049*
2-interacciones	18.30	0.000*
Tratamiento *temperatura	23.89	0.000*
Tratamiento *tiempo	1.92	0.110*
Temperatura *tiempo	61.05	0.000*
3-interacciones	37.32	0.000*
Tratamiento * tiempo *temperatura	37.32	0.000*
Bondad de ajuste	0.95	0.594 <sup>NS</sup>

$R^2$ -adj= 85.67

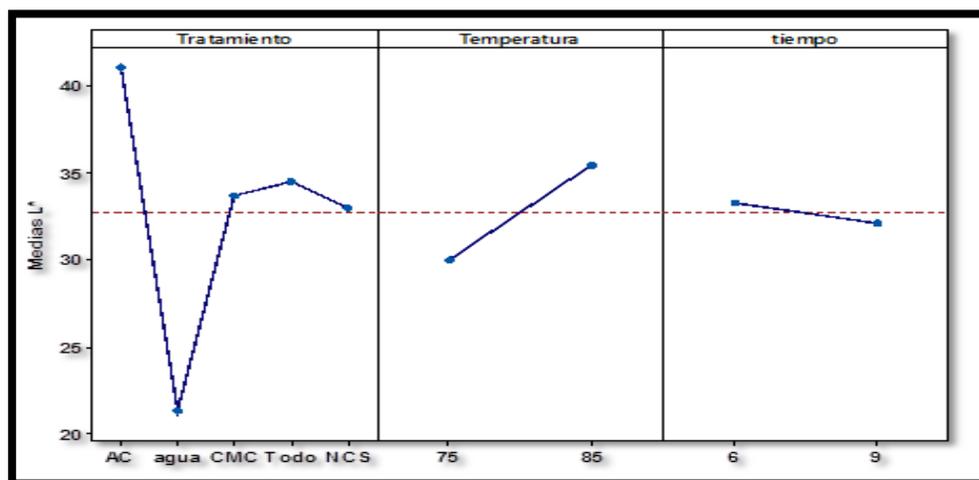
\*Terminos estadísticamente significativos con  $\alpha = 0.05$

NS= no significativo estadísticamente

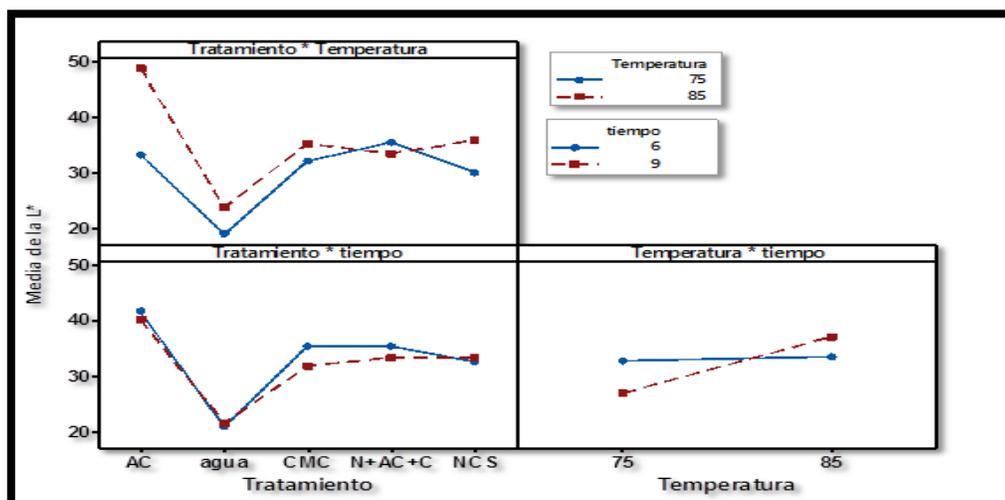
La **Tabla 8** muestra términos significativos y no significativos para el modelo lineal obtenido del ANOVA para el diseño factorial propuesto, en este análisis se emplearon como covariantes los resultados obtenidos para las muestras escaldadas, resultados mostrados en el punto 3.3.1.1. Observándose que las variaciones con respecto a los covariantes y el valor de L\* de las muestras

escaldadas no mostraron efecto significativo sobre el comportamiento general de los valores de luminosidad, sin embargo, el resto de los factores analizados tuvieron un efecto significativo en el comportamiento de la luminosidad una vez llevado a cabo el proceso de congelación.

En la **Figura 31** se observa de manera gráfica el efecto de los factores considerados en el diseño experimental después de la congelación, la mayor disminución de luminosidad estuvo en las papas escaldadas con agua, mientras que en las tratadas con CMC, nanocápsulas y mezcla de todos los componentes (CMC, nanocápsulas y ácido cítrico) no mostraron diferencia estadísticamente significativa respecto a este parámetro. En relación a la temperatura, tuvo efecto significativo para el factor, desarrollando menor luminosidad aquellas papas con pre-tratamiento de escaldado a 75 °C, atribuido esto a la pre-gelatinización del almidón contenido en la papa, ya que a medida de que incrementa la temperatura, se retiene más agua y los gránulos de almidón comienzan a hincharse y a aumentar su volumen. Al llegar a temperatura, en este caso a 85 °C, los gránulos comienzan a alcanzar su volumen máximo (Singh et al., 2009). El tiempo de escaldado fue el factor que tuvo menor efecto en el comportamiento de las papas después de la congelación. La **figura 32** muestra que existió una interacción entre los parámetros tiempo-temperatura en relación al pre-tratamiento realizado.



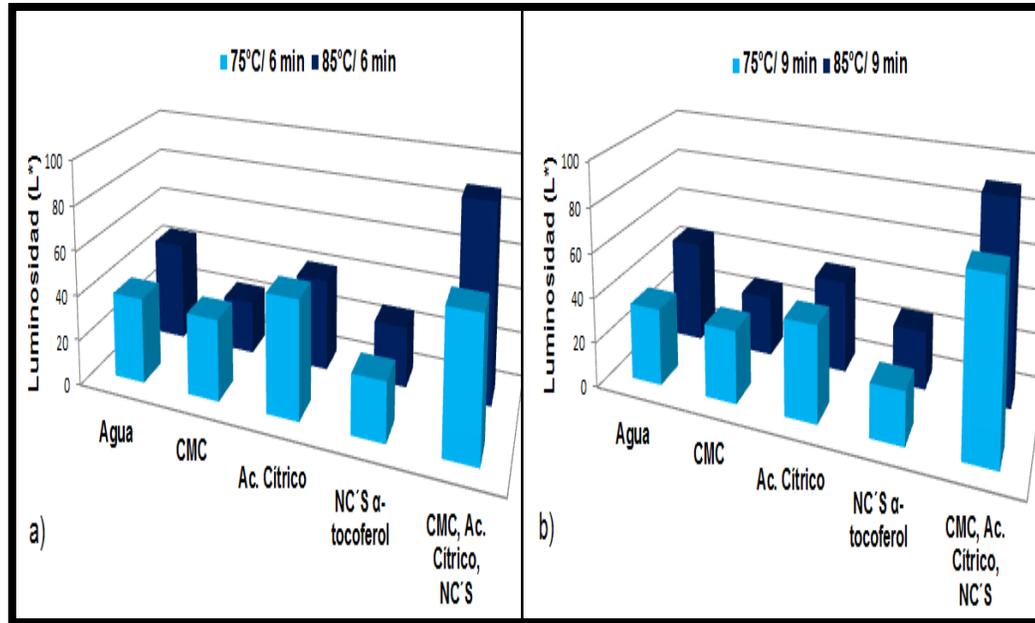
**Figura 31.** Comportamiento de las medias de tratamientos para los efectos principales en luminosidad después de la congelación.



**Figura 32.** Interacciones entre los factores considerados en el diseño. AC= ácido cítrico, Todo= CMC+ NCs+ AC; NCs= nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol; CMC= carboximetil celulosa.

### 3.3.1.3 Luminosidad de papa después del freído

La **Figura 33 (a y b)** muestra los cambios de luminosidad ( $L^*$ ) de las muestras después de haberse sometido al proceso de freído en función de diferentes tratamientos con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol y sin nanocápsulas. La **Figura 33 (a)** muestra el comportamiento para las muestras, escaldadas por 6 min a las dos condiciones de temperatura y en función al pre-tratamiento realizado. Observándose que la mayor luminosidad la mostraron las muestras pre-tratadas con la mezcla de todos los componentes CMC+ NCs+ ácido cítrico y que fueron escaldadas a 85 °C, independientemente del tiempo en el que se llevó a cabo este pre-tratamiento, dando valores entre 70 a 90. Romani et al. (2009) menciona que los parámetros que se pueden considerar para luminosidad de papa frita son mayores a 60, lo demuestra en un estudio de freído de papa.



**Figura 33.** Luminosidad de la papa después del freído a) escaldado durante 6 minutos. b) escaldado durante 9 minutos.

La **Tabla 9** muestra el ANOVA correspondiente a las papas cortadas a la francesa y que una vez concluido el proceso de congelación, fueron freídas para evaluar su funcionalidad una vez concluido el periodo de estabilización en congelación. En esta se observa que la papa y su luminosidad no se vieron influenciadas por la temperatura a la que se llevó a cabo el proceso de escaldado, sin embargo, el tiempo en el que se llevó a cabo el escaldado si fue un parámetro con efecto estadísticamente significativo. Además de que las interacciones entre los factores tuvieron un efecto significativo en el comportamiento de la luminosidad a excepción de la interacción tratamiento-tiempo. El ANOVA muestra como resultado un valor de  $R^2 = 86\%$ , lo que implica que el modelo de regresión obtenido puede predecir el comportamiento de los factores y predecir el comportamiento de la luminosidad con un error aceptable para sistemas como la papa donde dependiendo del corte, distribución de temperatura durante el escaldado y absorción del componente disperso en agua puede dar las modificaciones esperadas para la papa empleada en el estudio.

**Tabla 9. ANOVA para los factores del diseño factorial de luminosidad en papa freída.**

Fuente	F- Value	p-Value
Modelo	58.99	0.000*
Lineal	165.59	0.000*
Tratamiento	244.78	0.005*
Temperatura	8.13	0.566 <sup>NS</sup>
Tiempo	0.33	0.000*
2-interacciones	12.79	0.000*
Tratamiento *temperatura	23.55	0.001*
Tratamiento *tiempo	5.22	0.830 <sup>NS</sup>
Temperatura *tiempo	0.05	0.002*
3-interacciones	4.54	0.002*
Tratamiento *tiempo *temperatura	4.54	

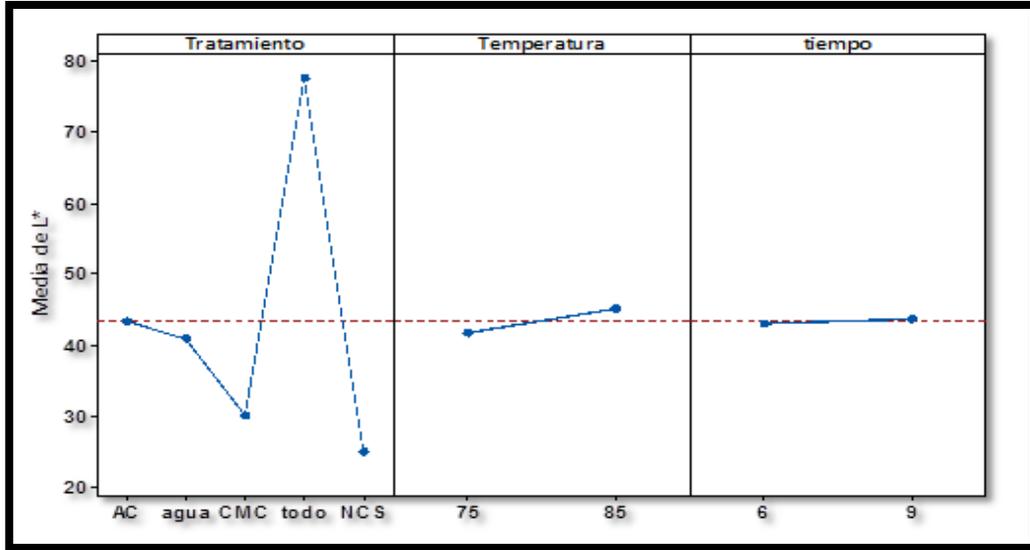
R<sup>2</sup>-adj= 86.02

\*Terminos estadísticamente significativos con  $\alpha= 0.05$

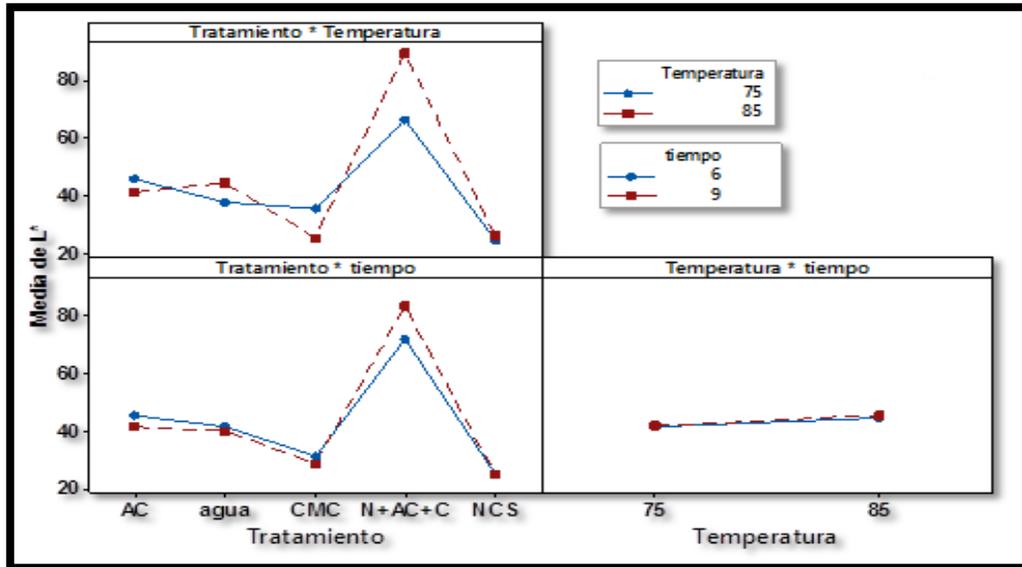
NS= no significativo estadísticamente

Las **Figuras 34 y 35** muestran el comportamiento de las medias de los tratamientos y sus interacciones para los pre-tratamientos realizados a papas cortadas a la francesa y una vez probado su comportamiento durante el freído.

En la **Figura 34**, se aprecia que las muestras que contenían todos los componentes (CMC+ NCs+ ácido cítrico) son las que mostraron la mayor luminosidad, siendo importante resaltar que para el resto de los tratamientos la luminosidad se encuentra por debajo de L= 40 lo que implica que existió sinergia entre los componentes propiciando el desarrollo de un freído más brillante.



**Figura 34.** Comportamiento de las medias de tratamientos para los efectos principales para muestras de papa freída después de la estabilización en congelación.



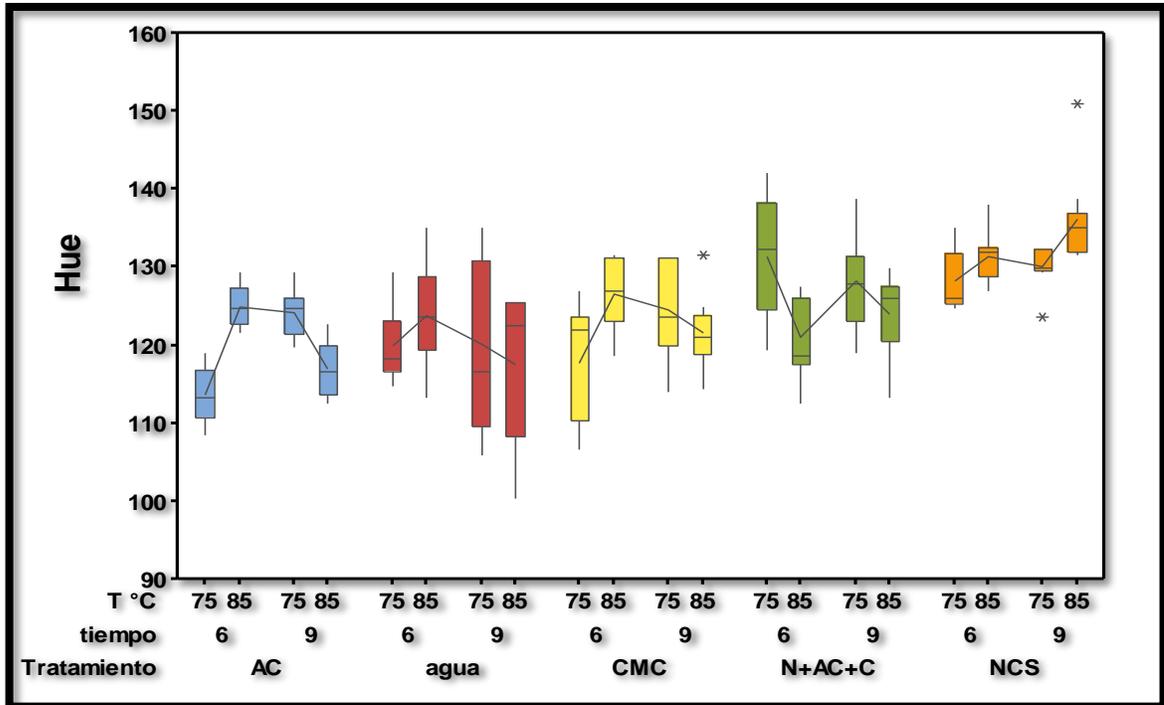
**Figura 35.** Interacciones entre los factores considerados en el diseño. AC= ácido cítrico, Todo= CMC+ NCs+ AC; NCs= nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol; CMC= carboximetil celulosa.

### 3.3.2 Ángulo de tonalidad (°Hue)

El ángulo de Tonalidad (°Hue) es un parámetro cualitativo en relación con la onda de los colores espectrales, que se utiliza para expresar la diferencia entre el rojo y el azul, violeta y amarillo, etc. (Richter et al., 2008). Se consideró según los siguientes valores, en el cual en el círculo de color se representa 360°, donde 0°= rojo, 90°= amarillo, 180°= verde, 270°= azul y 360°=0°. Valores negativos de °Hue significa que la superficie de la papa tiende a un color marrón (Limbo & Piergiovanni, 2006), siendo que los valores negativos de  $a^*$  corresponden a colores rojos y valores negativos a un color verde, mientras que los valores positivos de  $b^*$  corresponden al colores de tonalidades amarillas y los valores negativos a tonos azules.

#### 3.3.2.1 Ángulo de tonalidad de papa escaldada

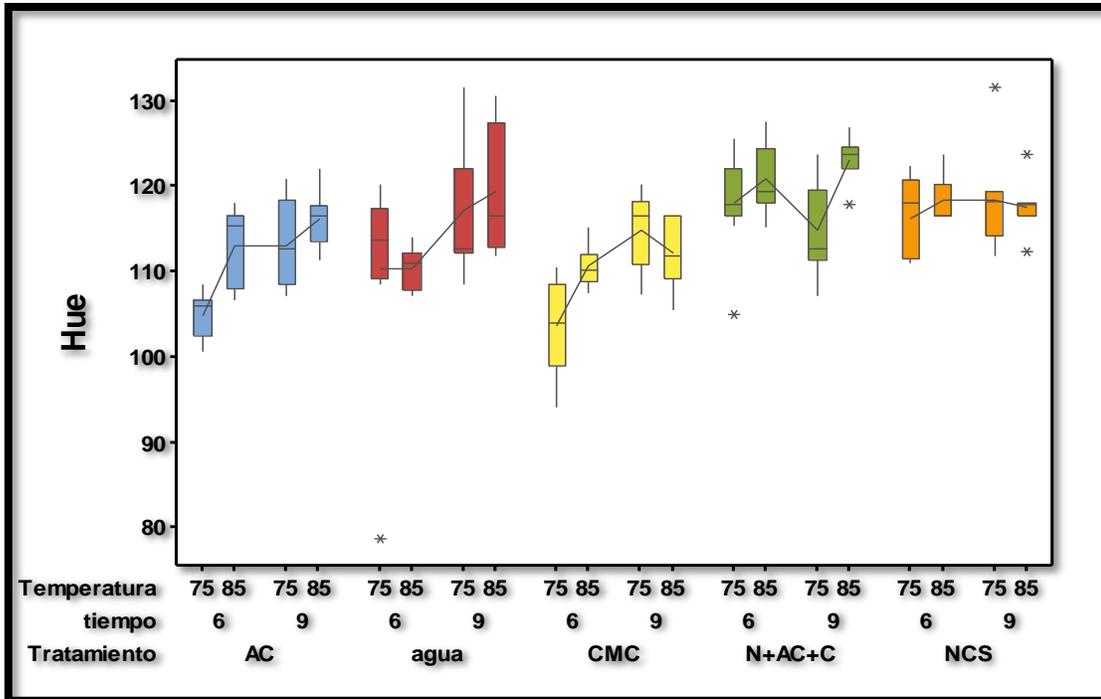
La **Figura 36** muestra el comportamiento en relación al ángulo de tono (Hue) para papa después del proceso de escaldado, mostrándose valores promedio entre 56.6 y 57 para este ángulo lo que implica que todas las papas escaldadas tuvieron un ligero desarrollo de colores marrón, sin que por ello existiera diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ( $\alpha= 0.05$ ), y resaltándose que las muestras tratadas solo con NCs y escaldadas por 9 min independientemente de la temperatura fueron las que tuvieron el menor ángulo de tono, sin embargo, las diferencias son menores al 0.7 % entre las muestras, razón por la que no es posible establecer una diferencia en relación al ángulo de tono en función al pre-tratamiento realizado a las papas cortadas a la francesa. Richter et al. (2008) presenta valores de Hue de papa escalda de  $\pm 80$ , sin embargo, las condiciones de escaldado, tiempo y temperatura tienen influencia significativa en el oscurecimiento.



**Figura 36.** Cambio en el ángulo de tono (Hue) para papa escaldada en función a los pre-tratamientos. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetilcelulosa, N+ AC+ C= nanocápsulas+ ácido cítrico+ carboximetilcelulosa, NCS= nanocápsulas.

### 3.3.2.2 Ángulo de tonalidad de papa congelada

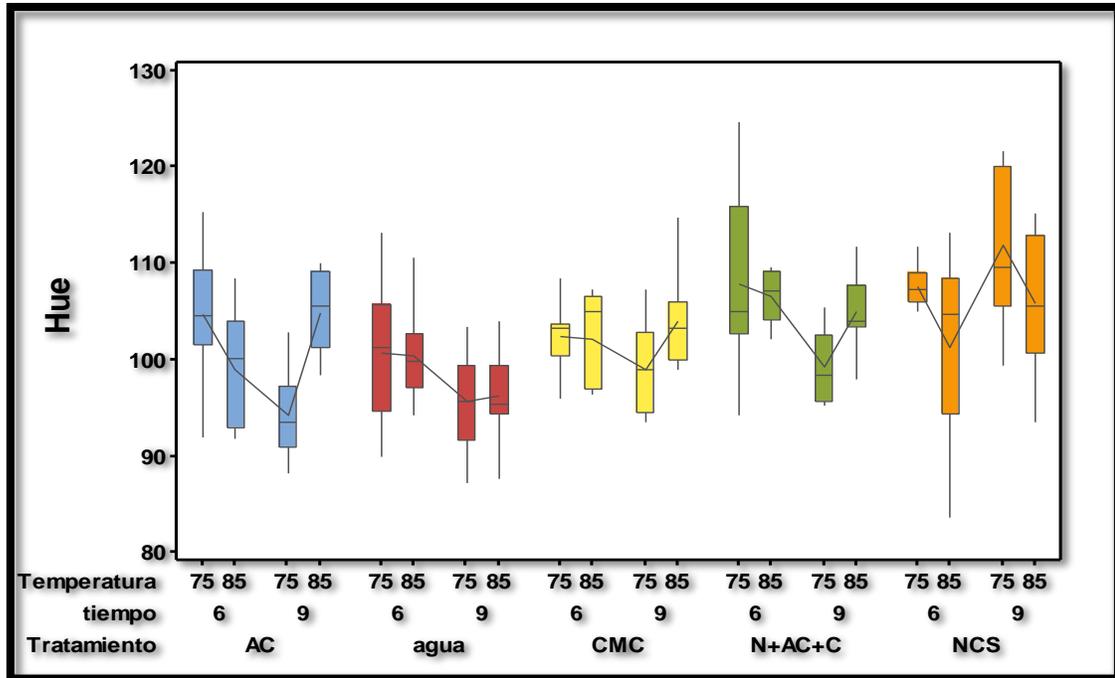
La **Figura 37** muestra los cambios en el ángulo de tono, después del proceso de congelación y estabilización del producto. En esta figura se observa que al igual que para el caso de las muestras escaldadas no existió diferencia estadísticamente significativa para ese parámetro en función a los pre-tratamientos y condiciones a las que se llevó a cabo el escaldado. Al igual que en el caso anterior las variaciones fueron menores al 0.7 %, presentando valores ligeramente mayores aquellas muestras pre-tratadas con CMC.



**Figura 37.** Cambios en el ángulo de tono (Hue) asociados al pre-tratamiento, tiempo y temperatura de escaldado para papa cortada a la francesa después de la congelación. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa, NCS= nanocápsulas, N+A+C= nanocápsulas + ácido cítrico + carboximetilcelulosa.

### 3.3.2.3 Ángulo de tonalidad de papa después del freído

La **Figura 38** muestra los cambios en el ángulo de tono en función a las condiciones de los pre-tratamientos después del freído. En esta se observa que al igual que en los casos anteriores no existió diferencia estadísticamente significativa en este parámetro, sin embargo es importante resaltar que la mayor variabilidad en el comportamiento de las muestras las presentaron aquellas pre-tratadas con nanocápsulas, sin embargo, la variación en los resultados no fue mayor al 0.87 % lo que implica variaciones más bien atribuidas a la homogeneidad de color desarrollada debido al proceso de freído por inmersión en aceite a 170 °C durante 9 min. Por otra parte, Romani et al. (2009) menciona que los valores de ángulo de tonalidad se consideran sobre 85, en las papas fritas.



**Figura 38.** Cambios en ángulo de tono (Hue) para papa después del freído. AC = ácido cítrico, CMC = carboximetil celulosa, NCS = nanocápsulas, N + AC + C = nanocápsulas + ácido cítrico + carboximetilcelulosa.

### 3.3.3 Cromaticidad (croma)

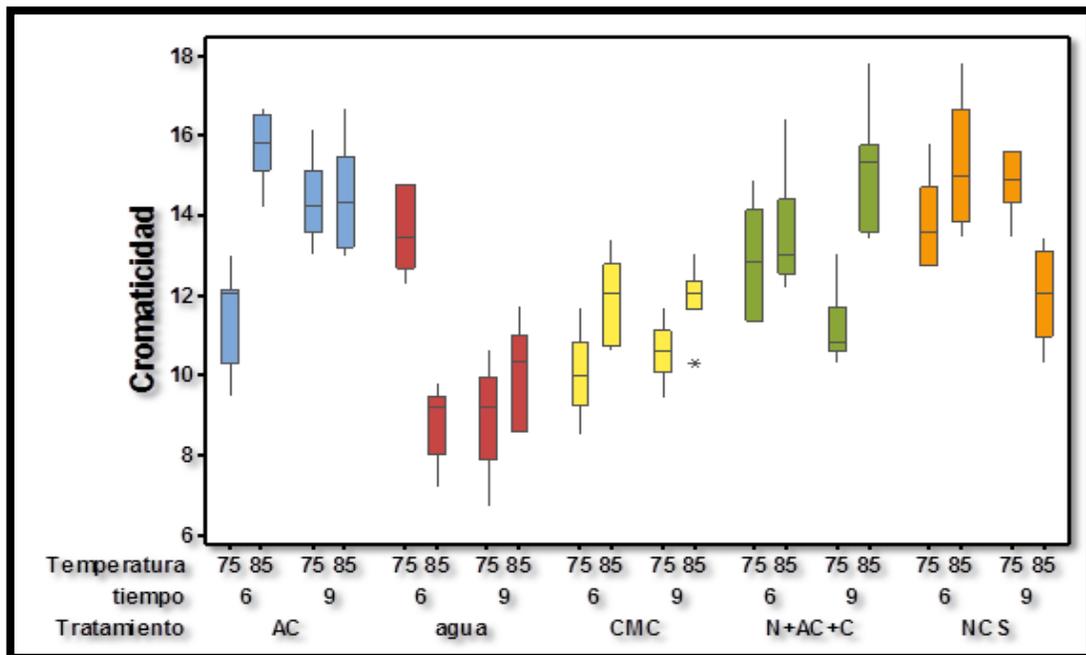
Cromaticidad (Croma) es la cuantificación del color de un objeto, siendo una medida de la intensidad del color o la saturación, que varía de mate (valor bajo) a color viva (valor alto) (Goyeneche et al., 2014). A continuación se presentan los cambios de cromaticidad en la papa después del pre-tratamiento de escaldado a diferentes condiciones de temperatura, tiempo y tratamiento, después de la congelación por 24 horas y después del freído a 170 °C durante 8 min.

#### 3.3.3.1 Cromaticidad de papa escaldada

La **Figura 39** muestra los cambios en cromaticidad para las papas cortadas a la francesa después del escaldado, observándose que existió diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes tratamientos y condiciones de escaldado, siendo las muestras escaldadas en agua las que mostraron la menor cromaticidad es decir menor intensidad en el color amarillo-marrón mostrado por

las papas después de los tratamientos, este comportamiento fue más evidente para muestras a 85 °C/6 min y aquellas escaldadas por 9 min independientemente de la temperatura, siendo estas las de mayor valor en cromaticidad.

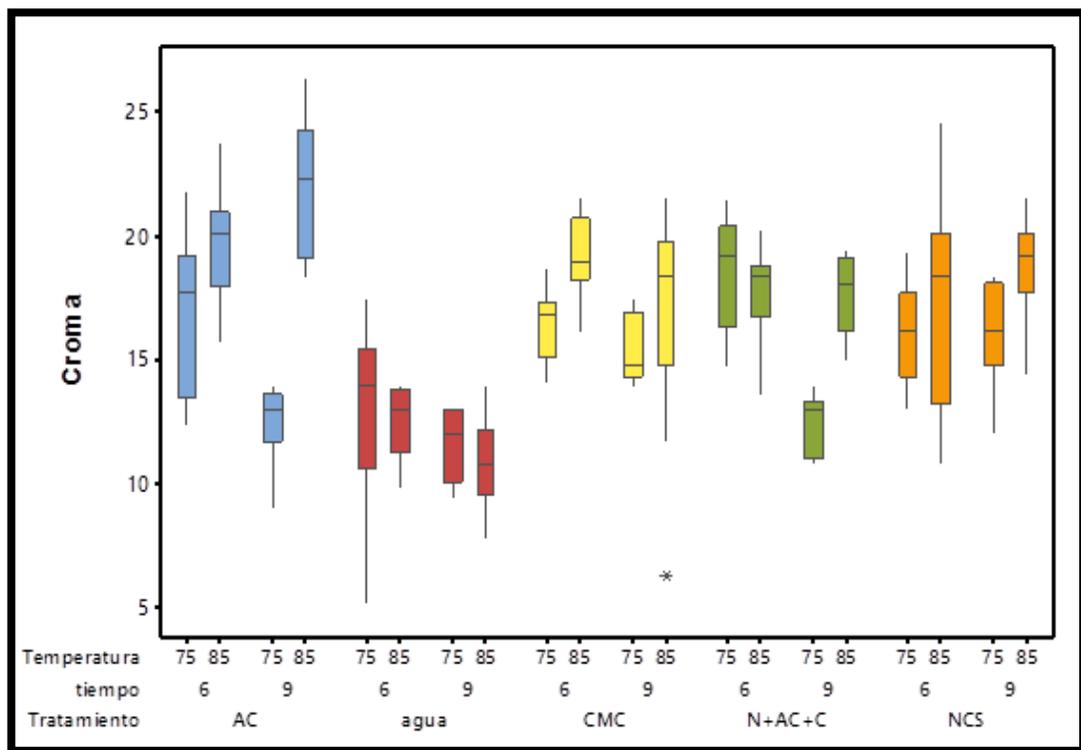
Las muestras que alcanzaron valores más altos de cromaticidad fueron las tratadas con ácido cítrico y las muestras tratadas con CMC/ácido cítrico/NC's, a 85 °C, independientemente de la condición del tiempo de escaldado, obteniendo valores de 16 a 19. Este resultado se esperaba, ya que las altas temperaturas son necesarias para inactivar la actividad fenolasa en la papa, que es la responsable de la oxidación enzimática. Resultados similares fueron observados por Richter et al. (2008), en el cual, el escaldado lo realizaron con ácido áscorbico, obteniendo valores mayores de cromaticidad aquellas muestras con ácido ascorbico, lo que sugiere que el ácido tuvo efecto sinérgico en la prevención del oscurecimiento enzimático de la papa.



**Figura 39.** Cambios de cromaticidad en papa cortada a la francesa después del escaldado durante 6 y 9 min. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas.

### 3.3.3.2 Cromaticidad de papa congelada

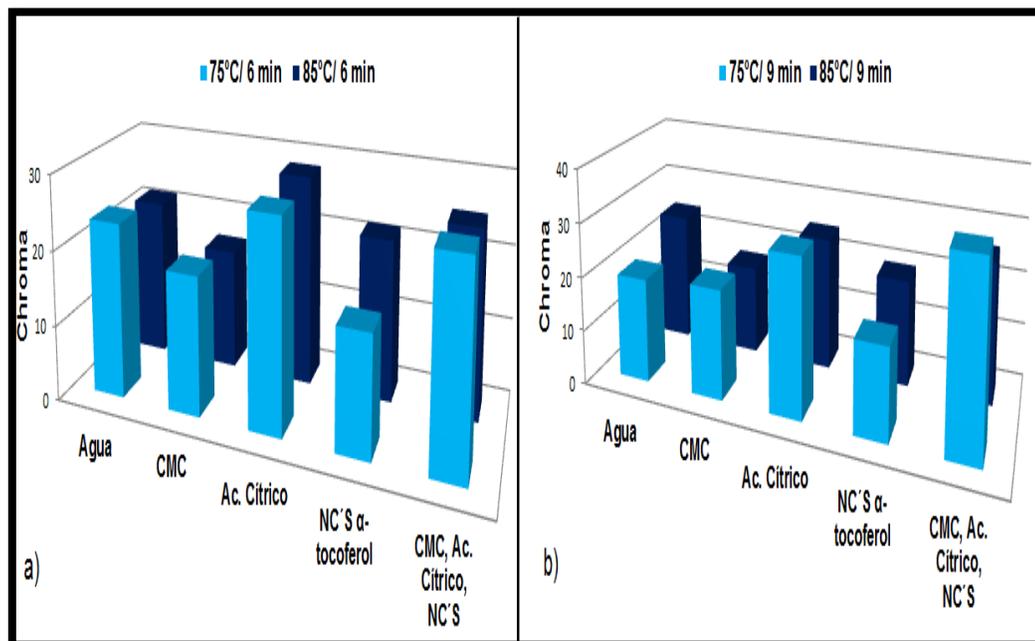
En la **Figura 40** se muestran las diferencias entre los pre-tratamientos escaldados a 75 y 85 °C, y 6 y 9 min, observándose que existen valores de saturación de color más bajos en las papas control, mientras que en el pre-tratamiento de ácido cítrico a 85 °C durante 9 min tiene los valores más altos, siendo la variable del pre-tratamiento de ácido cítrico la que mayor influencia tiene sobre los cambios de saturación de color, mientras que en el mismo grafico pero a 75 °C durante 9 min el valor más bajo lo obtuvo el pre-tratamiento con ácido cítrico, dando lugar a que después de la congelación ( $P \geq 0.014$ ), la temperatura de escaldado tuvo efecto sobre los cambios en saturación de color.



**Figura 40.** Cambios de cromaticidad para papa cortada a la francesa, después de congelarse. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas.

### 3.3.3.3 Cromaticidad de papa después del freído

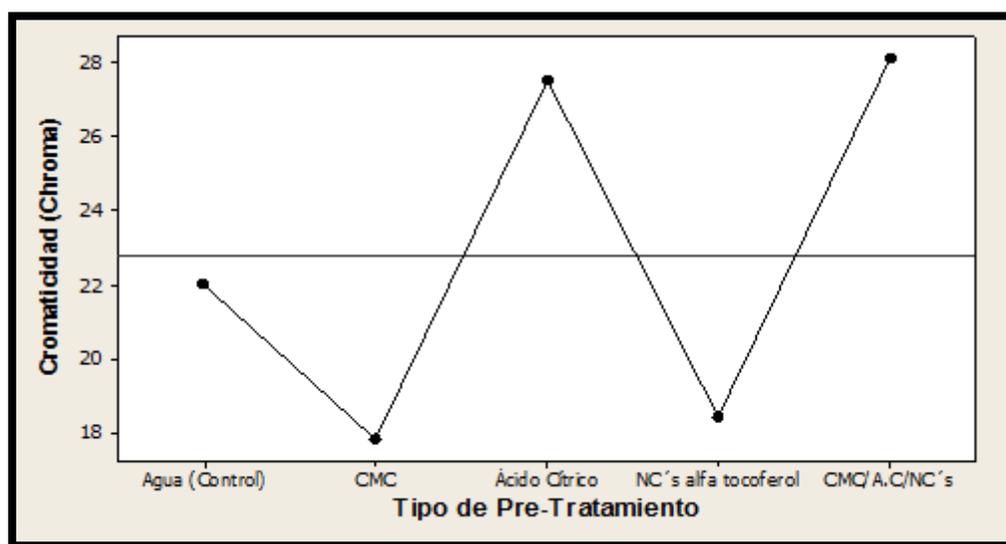
La **Figura 41 (a y b)**, muestran los cambios en cromaticidad después del freído de las papas, observándose que existieron diferencias estadísticamente significativas en función al tipo de pre-tratamiento ( $P > 0.05$ ), y en ambos gráficos se aprecia que los valores con mayor significancia son los pre-tratamientos con ácido cítrico y en conjunto CMC, ácido cítrico y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol.



**Figura 41.** Cromaticidad de la papa después del freído. a) papa escaldada durante 6 min. b) escaldado durante 9 min.

En la **Figura 42** se muestra el comportamiento para los efectos principales del diseño después del freído, observándose que los pre-tratamientos de ácido cítrico y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol tienen un efecto significativo sobre los valores de saturación de color. Esto está relacionado con las reacciones de oscurecimiento observadas en las muestras control que hace que exista diferencia con respecto a aquellas escaldadas con diferentes pre-tratamientos. Las quinonas formadas por medio de reacciones de PPO podrían participar en reacciones secundarias provocando la formación de productos secundarios oscuros. Estos resultados

comparables fueron reportados por Goyeneche et al. (2014) en el que se trabajó con rábano rallado durante el almacenamiento a 5 ° C. En la gráfica, se aprecia que después del freído de las papas los pre-tratamientos con ácido cítrico y en conjunto con CMC, ácido cítrico y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol tienen efecto importante sobre la saturación de color en las papas, lo que nos indica que el ácido cítrico contribuyó directamente en contrarrestar el oscurecimiento de la papa y está al final sea atractiva para el consumidor.



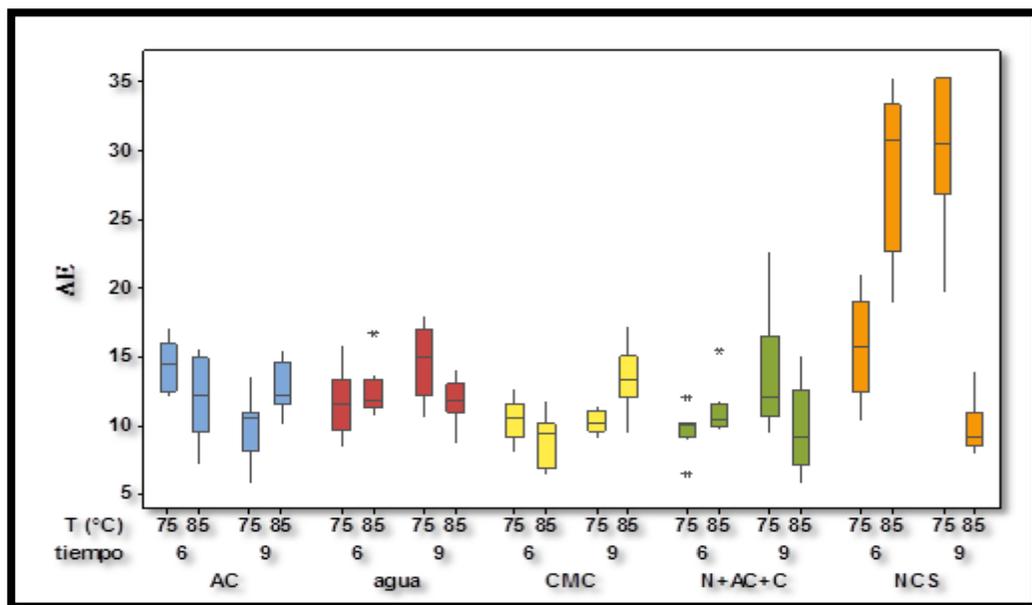
**Figura 42.** Gráfico de efectos principales de Cromaticidad (Chroma) de la papa después del freído con diferentes pre-tratamientos.

### 3.3.4 Diferencia total de color ( $\Delta E$ )

El cambio de color total ( $\Delta E$ ) se utiliza generalmente para reconocer la diferencia entre dos colores de acuerdo a la siguiente escala: diferencia de nivel  $\Delta E= 0-0.5$ , ligera diferencia  $\Delta E= 0.5-1.5$ , notable diferencia  $\Delta E= 1.5-3.0$ , diferencia apreciable  $\Delta E=3.0-6.0$ , gran diferencia  $\Delta E= 6.0-12.0$ , diferencia muy evidente  $\Delta E= >12.0$  (Goyeneche et al., 2014). A continuación se observan los cambios totales de color de la papa tipo francesa después de haber sido escaldada con diferentes pre-tratamientos, congelada y freída.

### 3.3.4.1 Diferencia total de color de papa escaldada

La **Figura 43**, muestra las diferencias totales de color para las muestras sometidas a diferentes pre-tratamientos durante el proceso de escaldado, observándose que las mayores diferencias las mostraron las papas tratadas solo con nanocápsulas, sin que exista diferencia estadísticamente significativa en relación a los demás pre-tratamientos, las  $\Delta E$  fueron menores a 15 para estos tratamientos, sin embargo, es importante resaltar que la diferencia en las muestras con nanocápsulas es atribuido a la efectividad de estas en la inhibición del desarrollo de oscurecimiento en las papas.



**Figura 43.** Diferencias de color total ( $\Delta E$ ) de la papa después del escaldado.

En la **Figura 43** se observan valores altos en las diferencias de color después del escaldado en agua y teniendo diferencia significativa respecto al tipo de pre-tratamiento ( $P \geq 0.029$ ), los cambios de diferencia de color también son relevantes para las corridas con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, esto se puede explicar que después del escaldado las nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol tuvieron el efecto protector esperado. El cambio de color es una respuesta a las reacciones enzimáticas, se

han reportado tiempos de inactivación de la enzima polifenoloxidasa entre 10 minutos y 11 minutos para papas de 70 g a 80 g (Mendoza & Herrera, 2012), sin embargo en este caso las papas se encontraban cortadas en tiras lo que implicó que estas tuvieran una mayor área de contacto para llevar a cabo el escaldado.

La **Tabla 10** muestra el análisis de varianza para los factores del diseño en papa después del escaldado observando que con excepción del tiempo de escaldado todos los factores tuvieron un efecto significativo en la diferencia total de color de las muestras. El ANOVA también dio como resultado un valor de  $R^2 = 86.02\%$ , lo que implica que el modelo de regresión obtenido puede predecir el comportamiento de los factores y predecir el comportamiento de la diferencia de color con un error aceptable para sistemas como la papa donde dependiendo del corte, distribución de temperatura durante el escaldado, tiempo de escaldado y absorción del componente disperso en agua puede dar las modificaciones esperadas para la papa empleada en el estudio.

**Tabla 10. ANOVA para  $\Delta E$  para los efectos del diseño factorial en papa congelada**

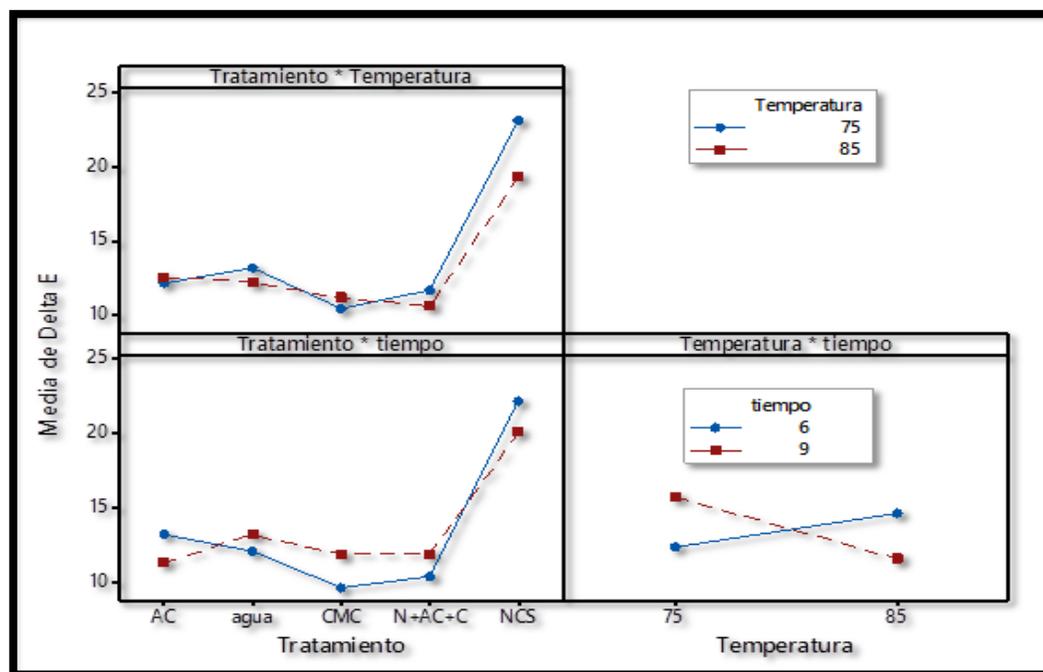
Fuente	F-Valor	p-Valor
Modelo	36.09	0.000
Lineal	54.81	0.000
Tratamiento	80.95	0.000
Temperatura	4.88	0.029
Tiempo	0.17	0.679
2-interacciones	9.78	0.000
Tratamiento*temperatura	3.54	0.008
Tratamiento*tiempo	4.56	0.002
Temperatura*tiempo	55.64	0.000
3-interacciones	67.21	0.000
Tratamiento*tiempo*temperatura	67.21	0.000

$R^2$ -adj= 86.02

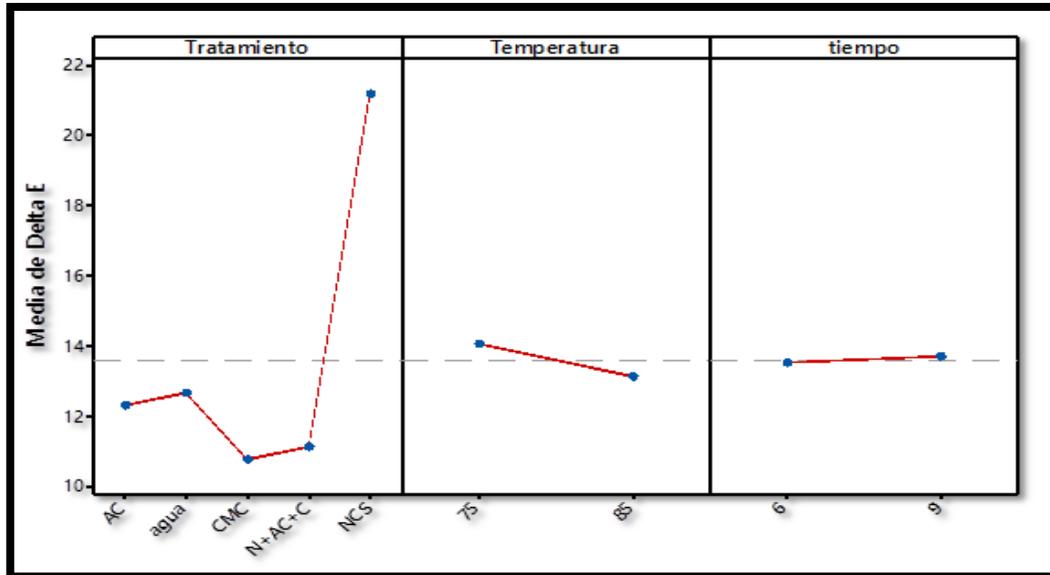
\*Términos estadísticamente significativos con  $\alpha = 0.05$

NS= no significativo estadísticamente

Las **Figuras 44 y 45** muestran el comportamiento de las medias de los tratamientos y sus interacciones para los pre-tratamientos realizados a papas cortadas a la francesa y una vez probado su comportamiento durante el escaldado. En el caso del efecto que tuvo el tipo de tratamiento, en la **Figura 44**, se aprecia que las muestras tratadas con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol son las que mostraron la mayor diferencia de color, el cual fue positivo, Zambrano et al. (2014) en un estudio del efecto del recubrimiento sobre la actividad de la enzima polifenol oxidasa en manzanas recién cortadas, menciona que el uso de  $\alpha$ -tocoferol como antioxidante ayuda a disminuir o retardar el oscurecimiento enzimático. Por otro lado, se observa que la temperatura de escaldado también tuvo efecto significativo sobre la diferencia de color, sin embargo, se observa que esta diferencia se aprecia aún más en las muestras con nanocápsulas que en las tratadas con otros tratamientos, siendo la temperatura de 85 °C la que mayor diferencia significativa tiene en los demás pre-tratamientos, y las altas temperaturas son las que se reportan para la inactivación de la enzima polifenol oxidasa.



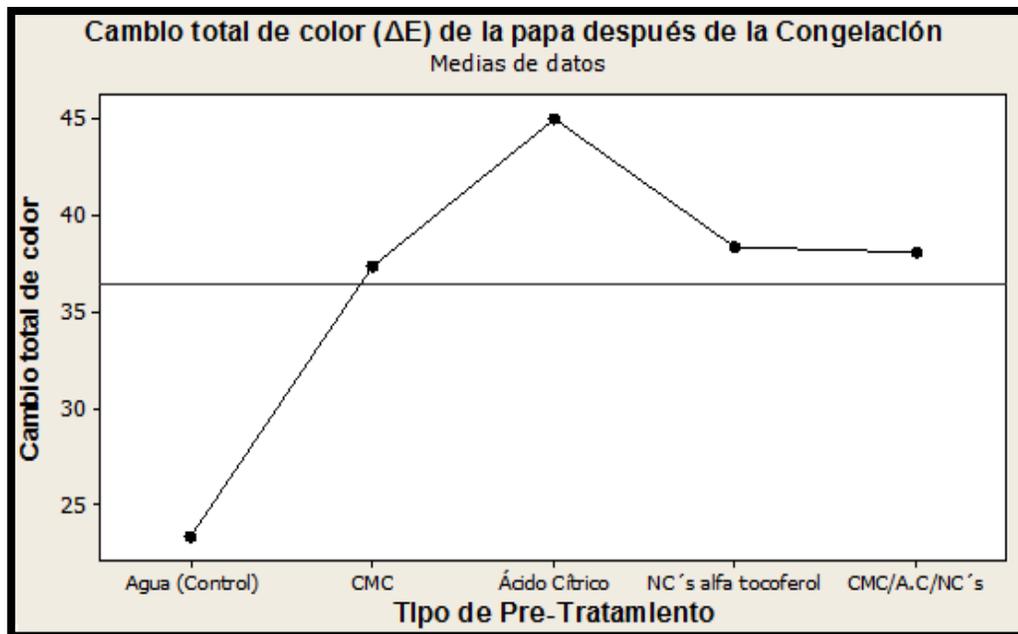
**Figura 44.** Interacciones de las medias en función a los factores considerados en el diseño de diferencias de color total ( $\Delta E$ ) de la papa después del escaldado.



**Figura 45.** Comportamiento de la media de los tratamientos en función a los factores considerados en el diseño para diferencias de color total ( $\Delta E$ ) de la papa después del escaldado.

### 3.3.4.2 Diferencia total de color de papa congelada

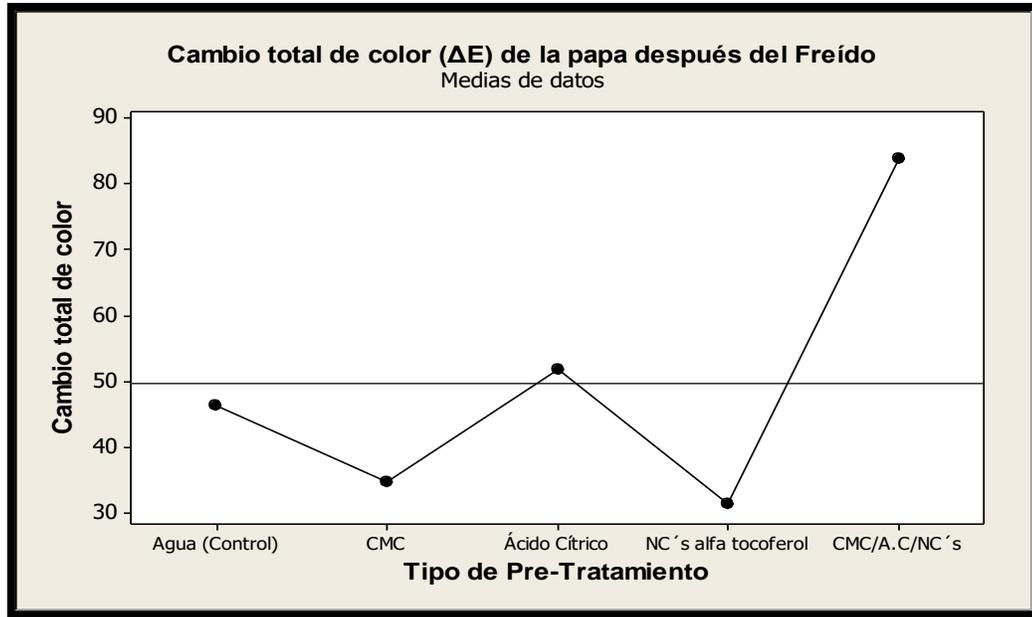
La **Figura 46** nos muestra que el conjunto de ácido cítrico, CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol tuvo un efecto significativo y positivo después de la congelación en  $\Delta E$ , para ambas temperaturas de escaldado 75 y 85 °C, y los tiempo de escaldado 6 y 9 min, también se observa que los parámetros de  $\Delta E$  con ácido cítrico aumentan en comparación con CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol. Se observa el aumento de  $\Delta E$  en las muestras tratadas con ácido cítrico, esto se puede explicar ya que al añadir el agente acidulante (ácido cítrico) a la solución de inmersión, mantiene el pH superficial por debajo o igual a 4 y así las reacciones de oscurecimiento disminuyen (Limbo & Piergiorganni, 2006).



**Figura 46.** Gráfico de efectos principales de cambio total de color  $\Delta E$  de la papa después de la congelación.

### 3.3.4.3 Diferencia total de color de papa después del freído

En la **Figura 47** de efectos principales se aprecia que los pre-tratamientos con ácido cítrico y en conjunto de CMC, ácido cítrico y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, tienen un efecto positivo en el  $\Delta E$  después del freído de las papas. Independientemente de la temperatura y el tiempo de escaldado, ya que estos factores no tuvieron diferencia estadísticamente significativa después del proceso de freído, en cambio el pre-tratamiento si lo obtuvo. Esto significa que las papas en el parámetro de  $\Delta E$  después del freído dependen significativamente de la presencia de ácido cítrico. El efecto beneficioso del ácido cítrico fue evidente después del proceso de freído. El aumento significativo del cambio de color se podría atribuir a las reacciones de Maillard, que se producen de forma natural entre azúcares reductores y compuestos que contienen grupos amino (aminoácidos, péptidos y proteínas), lo que resulta en la formación de melanoidinas de color (Bouazziz et al., 2015).



**Figura 47.** Gráfico de efectos principales de Cambio total de color ( $\Delta E$ ) de la papa después del freído.

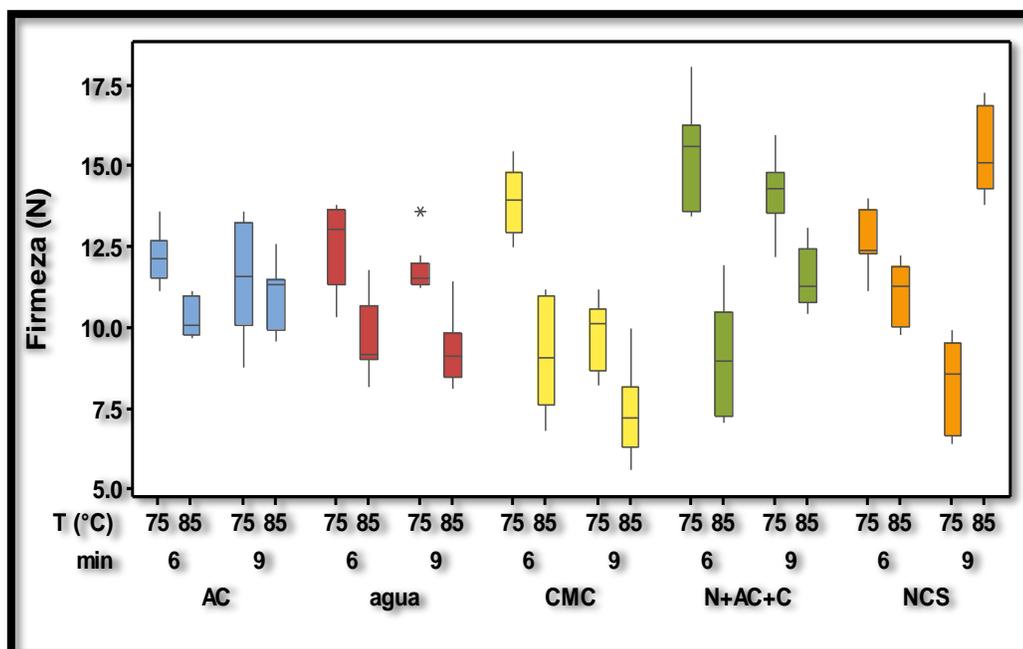
### 3.4 Textura

La textura de los vegetales se atribuye principalmente a la integridad estructural de la pared celular y la lamela media, así como a la presión de turgencia generada dentro de las células (Paciulli et al., 2015). A continuación se presenta una descripción cuantitativa de los cambios de textura en términos de propiedades mecánicas de las papas cortadas en tipo francesa afectadas por las condiciones de escaldado (temperatura, tiempo y tipo de pre-tratamiento), congelación y freído.

#### 3.4.1 Firmeza de la papa después del escaldado

La **Figura 48** muestra los cambios de textura en la papa, expresados en Newton y después del proceso de escaldado en función de los diferentes pre-tratamientos, a una temperatura de 75 °C y 85 °C durante 6 y 9 min, los valores de menor firmeza los tienen las muestras escaldadas a una temperatura de 85 °C. Este efecto se puede explicar, ya que la estructura de la pared celular y separación celular

contribuyen a la reducción de la resistencia del tejido de la papa escaldada, a través de la disolución de gel de calcio péptico en la matriz de la pared. Por lo tanto hay una caída significativa de firmeza en la papa a la temperatura de 85 °C, esto nos indica una pérdida de la presión de turgencia causado por la ruptura de las membranas, y la integridad de la pared celular (Bourne, 2002). También resalta que las muestras tratadas con los tres componentes del sistema (CMC, ácido cítrico y NC's) y las muestras tratadas solo con NC's, mostraron la mayor firmeza en comparación con los demás pre-tratamientos, esto nos indica que los componentes tuvieron sinergia, lo que contribuyó a tener una mejor firmeza después del escaldado. Zambrano et al. (2014) menciona que  $\alpha$ -tocoferol es un factor en la reducción de la pérdida de la firmeza en manzana Red Delicious y que eso se atribuye a una distribución de un sistema mejorado en la superficie de la manzana. El mismo efecto lo tuvo en la papa escaldada teniendo una diferencia de 13.62 % entre la papa control con la papa escaldada solo con NC's y 20.8 % entre el control con la papa escaldada con todos los componentes.



**Figura 48.** Cambios de firmeza en papa cortada a la francesa después del escaldado a 75 y 85 °C, durante 6 y 9 min. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas.

De acuerdo al análisis estadístico de firmeza de la papa después del escaldado, en la **Tabla 11** se muestra el análisis de varianza para el diseño factorial propuesto, donde se observa que todos los parámetros tienen efecto significativo en la firmeza de la papa escaldada.

**Tabla 11. Anova para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, empleando como covariantes los resultados de firmeza obtenidos de las muestras de papa escaldada**

Fuente	F-Value	p-Value
Modelo	30.70	0.000*
Lineal	32.72	0.000*
Tratamiento	21.20	0.000*
Temperatura	101.36	0.000*
Tiempo	10.12	0.002*
2-interacciones	35.23	0.000*
Tratamiento*temperatura	46.38	0.000*
Tratamiento*tiempo	12.54	0.000*
Temperatura*tiempo	81.35	0.000*
3-interacciones	17.47	0.000*
Tratamiento*tiempo*temperatura	17.47	0.000*

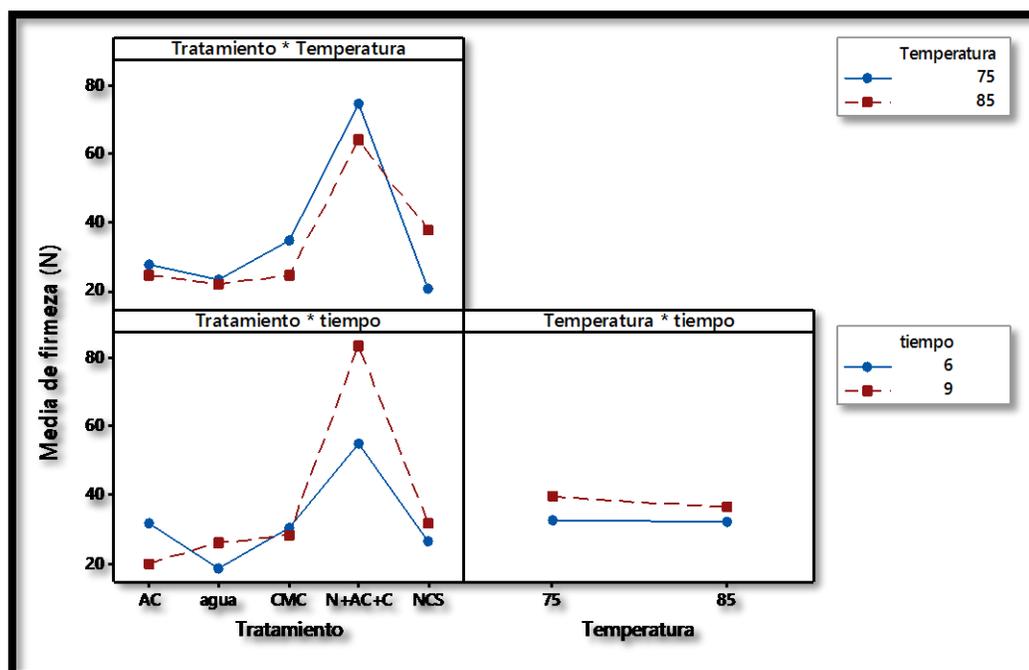
$R^2$  adj= 78.47

\*Términos estadísticamente significativos con  $\alpha=0.005$

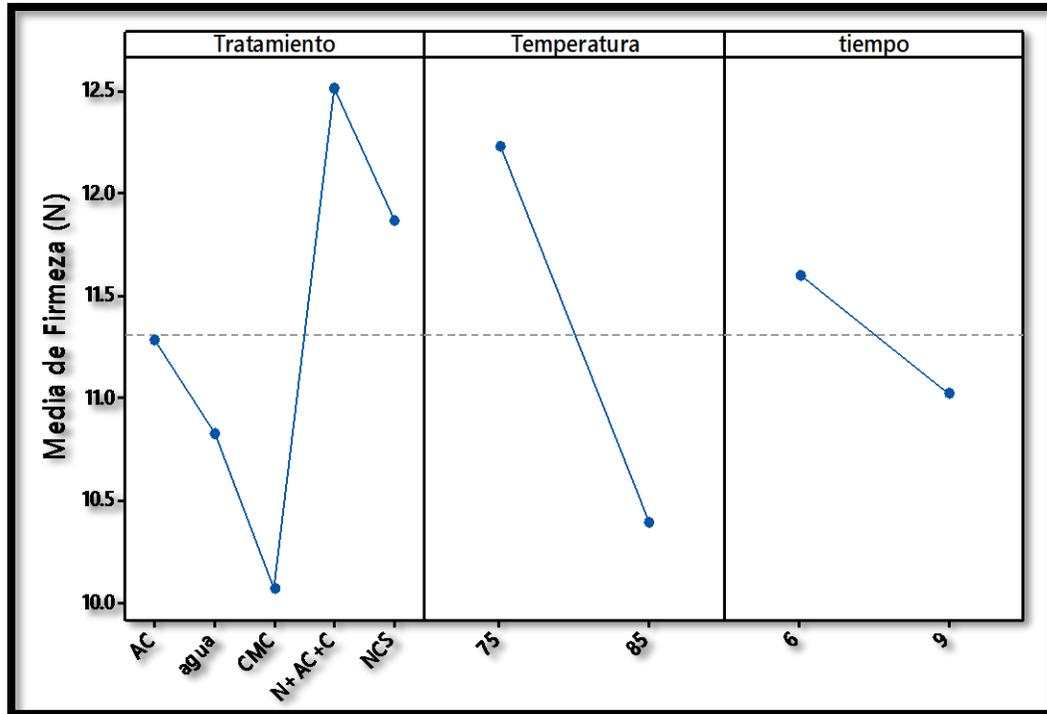
NS= no significativo estadísticamente

En las **Figuras 49 y 50** muestran el comportamiento de las medias de los tratamientos y las interacciones para el comportamiento de la firmeza de la papa después del escaldado. Anteriormente se mencionó, por medio del análisis estadístico que todos los parámetros tuvieron efecto significativo sobre la firmeza, sin embargo, en la **Figura 49** se observa que la interacción de tratamiento-tiempo y tratamiento- temperatura, se obtuvo mayor firmeza con el pre-tratamiento NC's y en conjunto CMC/ácido cítrico/NC's, con una temperatura de 75 °C a un tiempo de 6 min. Zhiqiang y Scanlon (2007) en un estudio del escaldado de la papa a

diferentes temperaturas, mencionan que el escaldado a baja temperatura (es decir 55-75 °C) conduce a una textura firme, como resultado del fortalecimiento de la actividad de la pectina esterasa de metilo en la pared celular y la reducción de la desintegración de sustancias intercelulares. Por el contrario el escaldado a altas temperaturas (es decir 80-100 °C) durante tiempos largos conduce a una pérdida de firmeza. El hecho de que las papas escaldadas a 75 °C tengan una mayor firmeza que las papas escaldadas a 85 °C está relacionado con la inactivación de la enzima PME. Ghannam y Crowley (2006) mencionan que hay relación entre la actividad PME y la mejora en la firmeza después del procesamiento de escaldado en la papa.



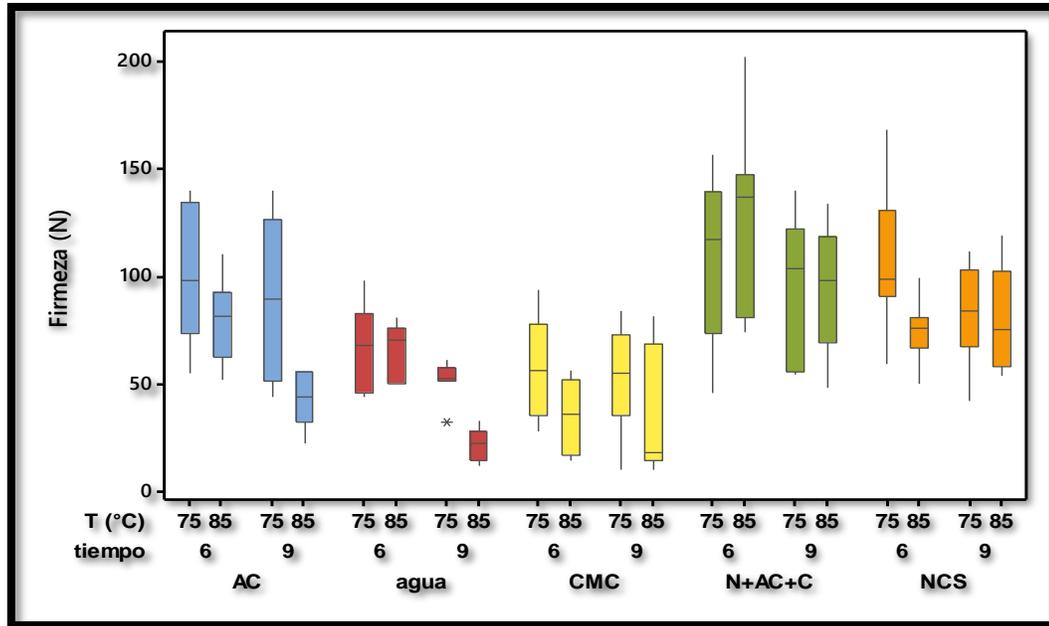
**Figura 49.** Interacción de las variables tratamiento-tiempo-temperatura con la firmeza de la papa escaldada



**Figura 50.** Medias de los tratamientos para los efectos principales en la firmeza de la papa escalda

### 3.4.2 Firmeza de la papa después de la congelación

La **Figura 51** muestra los cambios de firmeza de las papas después de haberse sometido al proceso de congelación en función de diferentes tratamientos con y sin nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, a diferentes temperaturas y tiempos. Se observa que las muestras tratadas solo con nanocápsulas y en conjunto CMC/ácido cítrico / NC's tienen mayor firmeza en comparación con los demás tratamientos, teniendo una diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes tratamientos, tiempos y temperaturas ( $\alpha=0.05$ ), resaltando que las temperaturas de 75 °C y 6 min tuvieron mejor firmeza en la papa que a 85 °C y 9 min.



**Figura 51.** Cambios de firmeza en la papa cortada a la francesa después del proceso de congelación a diferentes tratamientos. AC= ácido cítrico, CMC= carboximetil celulosa; N+AC+C= nanocápsulas + ácido cítrico + CMC; NCS= nanocápsulas.

**Tabla 12.** ANOVA para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, empleando como covariantes los resultados obtenidos de las muestras de papa congelada

Fuente	F-Value	p-Value
Modelo	10.75	0.000*
Lineal	29.39	0.000*
Tratamiento	34.62	0.000*
Temperatura	16.53	0.000*
Tiempo	21.30	0.000*
2-interacciones	2.22	0.024*
Tratamiento*temperatura	3.14	0.016*
Tratamiento*tiempo	1.63	0.170
Temperatura*tiempo	0.88	0.349
3-interacciones	1.98	0.100
Tratamiento*tiempo*temperatura	1.98	0.100

$R^2$  adj= 56.7

\*Términos estadísticamente significativos con  $\alpha=0.005$

NS= no significativo estadísticamente

La **Tabla 12** muestra términos significativos y no significativos obtenidos del ANOVA para el diseño factorial propuesto, los resultados estadísticos de la firmeza de la papa congelada posterior al escaldado a diferentes condiciones y con diferentes pre-tratamientos, se observa que todos los parámetros a excepción de las interacciones tratamiento-tiempo, temperatura-tiempo, tuvieron diferencia estadísticamente significativa en el comportamiento de la firmeza.

Las **Figuras 52 y 53** muestran de manera gráfica el efecto de los factores considerados en el diseño experimental, mostrando que después de la congelación la mayor firmeza la obtuvieron las muestras que tuvieron un pre-tratamiento con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol y en conjunto CMC/ácido cítrico/NC's, teniendo mayor firmeza la interacción de CMC/ácido cítrico/NC's a una temperatura de 85 °C durante 6 min de escaldado. Siendo en la **Figura 52** donde se observan los efectos principales donde nos muestra que la temperatura a 75 °C durante 6 min con un tratamiento de CMC/ácido cítrico/NC's que tiene mayor efecto para la mayor firmeza de la papa.

Un componente principal en el efecto del aumento de firmeza con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol fue el uso de CMC, ya que incorporar crio-protectores para alterar las formas de los cristales es una forma de minimizar el daño de la congelación en los tejidos de las papas. Fernández et al. (2006) en un estudio describe el efecto de los hidrocoloides en la calidad del puré de papa congelada y menciona que el crecimiento de cristales de hielo conduce a la contracción y la alteración de los gránulos de almidón, mientras que la interrupción de la pared celular conduce a una redistribución de la amilosa y la amilopectina que conduce a diferencias de concentración locales. Por lo tanto la adición de CMC con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol tuvo el efecto crio-protector esperado, teniendo una mejor firmeza en la papa congelada después del escaldado.

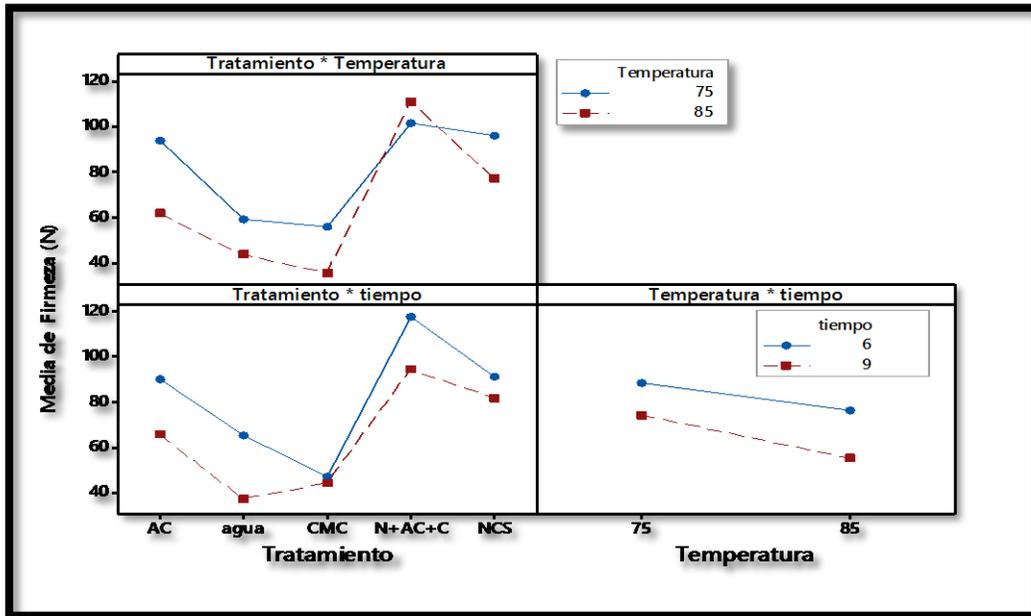


Figura 52. Interacción de las variables tratamiento-tiempo-temperatura con la firmeza de la papa congelada.

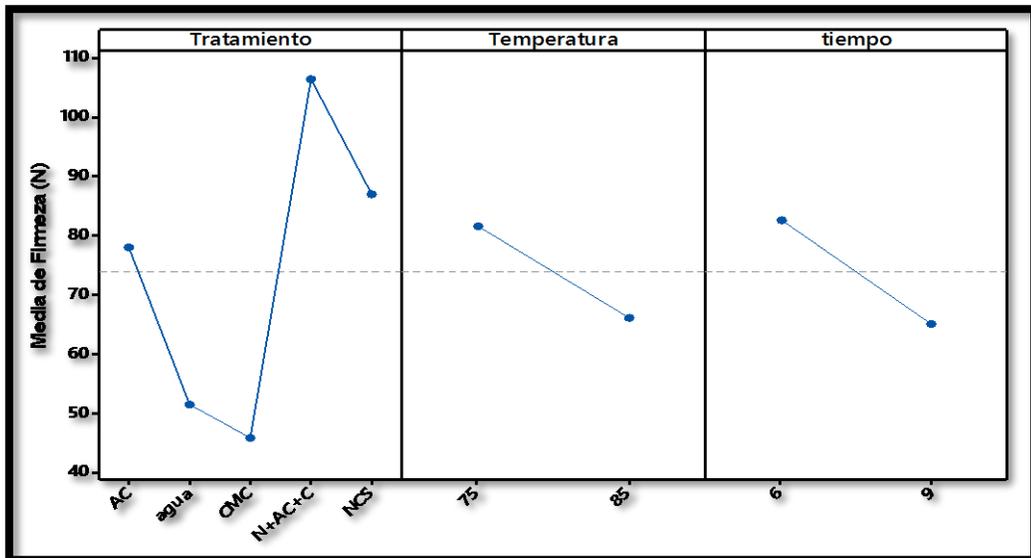


Figura 53. Medias de los tratamientos para los efectos principales en la firmeza de la papa congelada.

### 3.4.3 Firmeza de la papa después del freído

La **Tabla 13** muestra el ANOVA correspondiente a las papas cortadas a la francesa que una vez pasado el proceso de congelación, fueron freídas para evaluar su funcionalidad con respecto a la firmeza. En esta se observa que el freído de la papa no fue influenciada por la temperatura de escaldado, mientras que el tipo de tratamiento con el tiempo de escaldado si fueron parámetros con efecto estadísticamente significativo. También, las interacciones entre los factores tuvieron un efecto significativo. El ANOVA también dio como resultado un valor de  $R^2 = 83.35\%$ , lo que implica que el modelo de regresión obtenido puede predecir el comportamiento de la firmeza con un error aceptable para sistemas como la papa tipo francesa, a las condiciones descritas anteriormente, puede dar las modificaciones esperadas para la firmeza de la papa después del freído.

**Tabla 13. ANOVA para los factores pre-tratamiento, temperatura y tiempo, empleando como covariantes los resultados obtenidos de las muestras de papa freída**

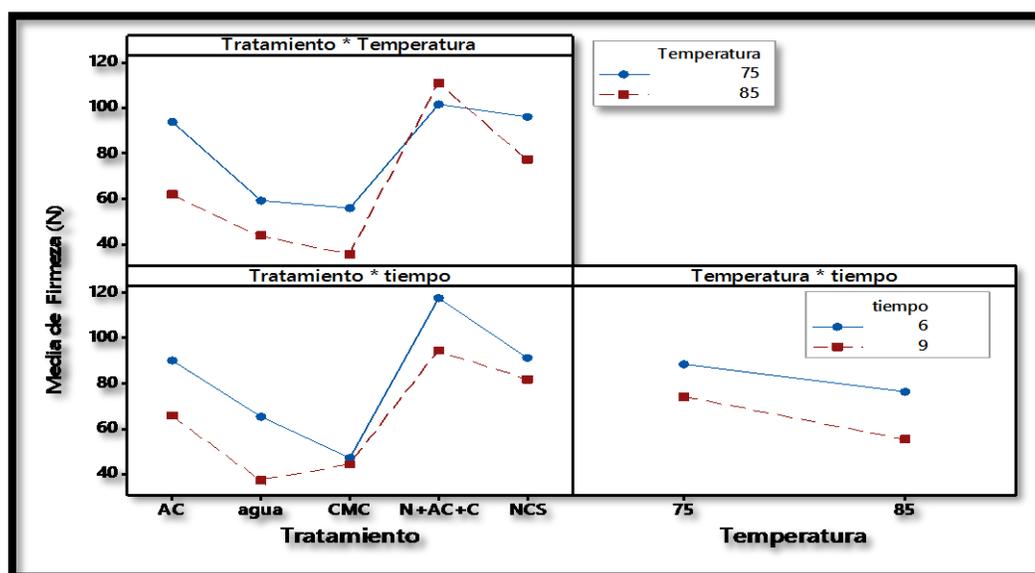
Fuente	F-Value	p-Value
Modelo	42.16	0.000*
Lineal	106.92	0.000*
Tratamiento	155.99	0.000*
Temperatura	1.58	0.211
Tiempo	15.99	0.000*
2-interacciones	16.44	0.024*
Tratamiento*temperatura	13.60	0.016*
Tratamiento*tiempo	23.18	0.170
Temperatura*tiempo	0.88	0.350
3-interacciones	2.87	0.025
Tratamiento*tiempo*temperatura	2.87	0.025

$R^2$  adj= 83.35

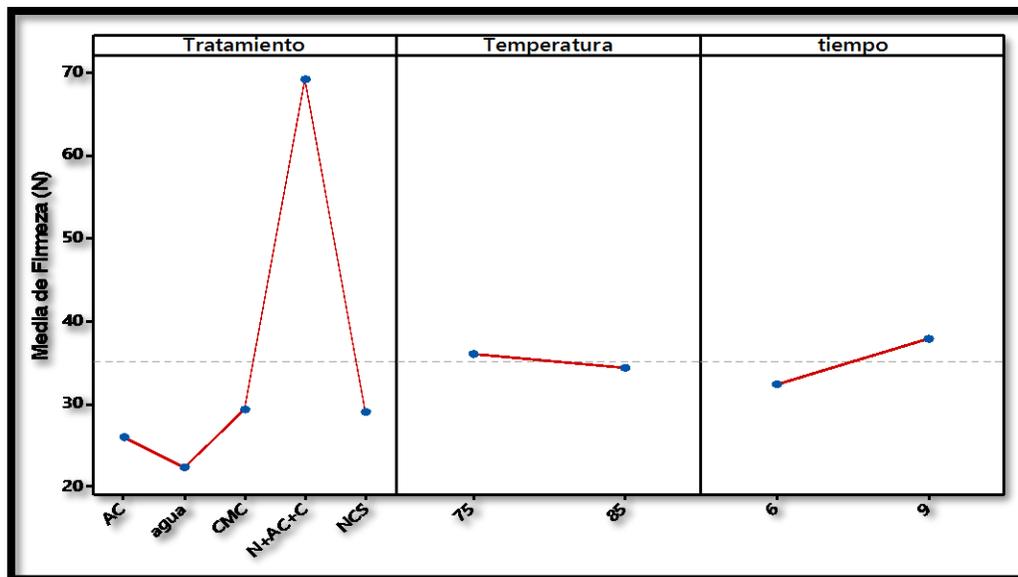
\*Términos estadísticamente significativos con  $\alpha=0.005$

NS= no significativo estadísticamente

En las **Figuras 54 y 55** muestran el comportamiento de las medias de los tratamientos y sus interacciones para los pre-tratamientos realizados a papas cortadas a la francesa y una vez probado el comportamiento de la firmeza de la papa después del freído. En la **Figura 54** se observa que a 6 min de escaldado con un tratamiento en conjunto todos los componentes, tiene una mayor firmeza en la papa frita, esto quiere decir que después del freído también se hace evidente la firmeza que se obtuvo después del escaldado. En la **Figura 55** se observa que los pre-tratamientos de todos los componentes tienen mayor firmeza en comparación con las muestras control, siendo aproximadamente 2 N la diferencia entre las muestras, después del escaldado, 60 N de diferencia después de la congelación y 50 N de diferencia después del freído. Estos resultados nos indican que el aumento en la firmeza de la papa está en función al pre-tratamiento de escaldado, ya que la corteza de la papa se vuelve más gruesa según el tratamiento (Agnelli & Mascheroni, 2002), por lo tanto la dureza de la papa está directamente relacionado con el espesor de la corteza mediante el uso de nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol.



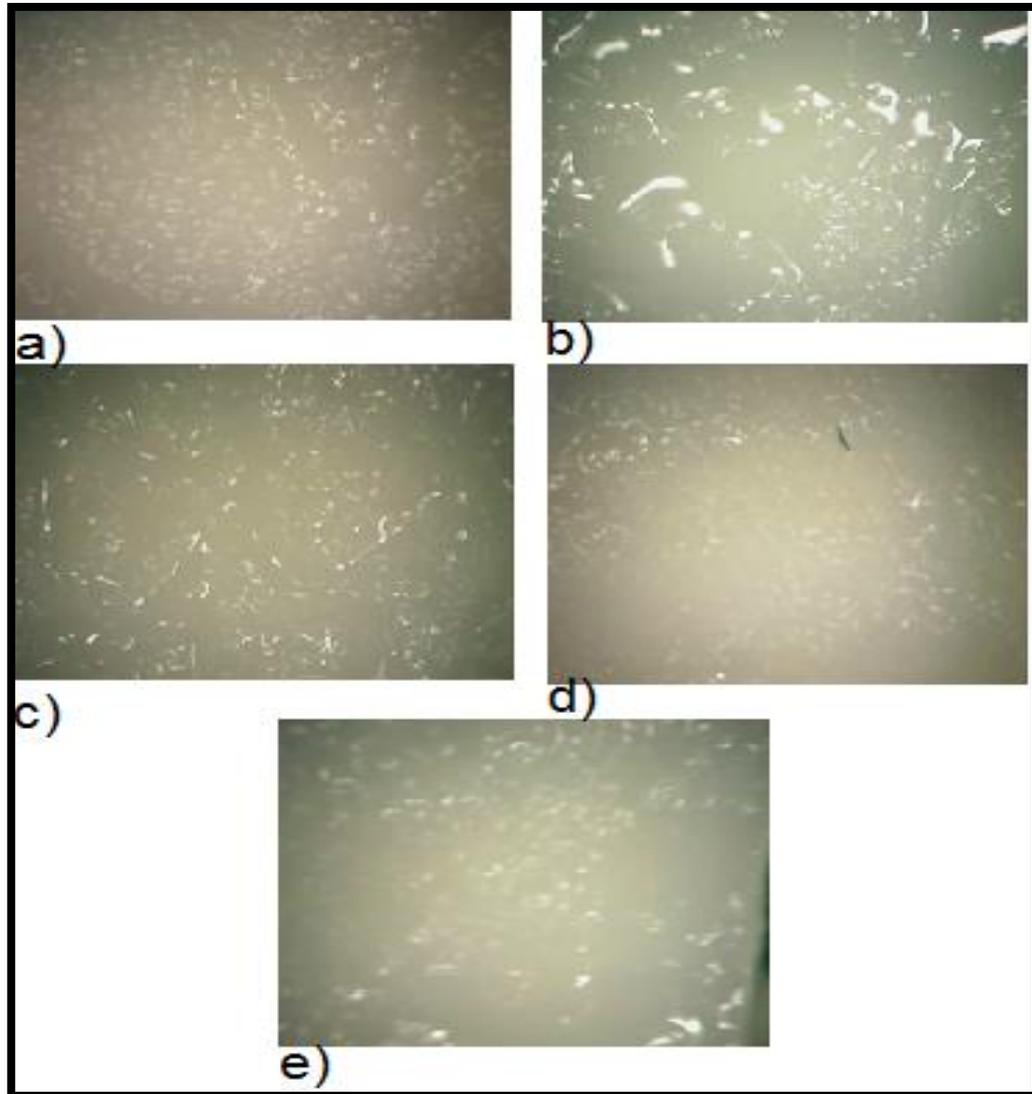
**Figura 54.** Interacción de las variables tratamiento-tiempo-temperatura con la firmeza de la papa tipo francesa después del proceso de freído.



**Figura 55.** Medias de los tratamientos para los efectos principales en la firmeza de la papa tipo francesa después del proceso de freído.

### 3.5 Análisis de Imagen

La **Figura 56** presenta las micrografías de la superficie de la papa (*Solanum tuberosum L.*) cortada en tipo francesa, escaldada con diferentes pre-tratamientos (Agua, CMC, ácido cítrico, NC's  $\alpha$ -tocoferol y en conjunto CMC, ácido cítrico y NC's  $\alpha$ -tocoferol). En la **Figura 56 (d y e)** se muestra la evidencia de las morfologías de las papas que fueron influenciados por la adición de NC's de  $\alpha$ -tocoferol. La superficie de las papas escaldada con NC's  $\alpha$ -tocoferol mostradas en la **Figura 56 (d y e)** parecen más homogéneas que las papas escaldadas con agua (**Figura 56 a**), que exhiben una superficie más rugosa y varios agujeros desiguales. De acuerdo con Montanheiro et al. (2014), el fuerte enlace químico de cada componente añadido provoca una ultra estructura compacta y lisa. Los resultados indican que la incorporación de las NC's de  $\alpha$ -tocoferol aumenta la miscibilidad y compatibilidad entre los componentes añadidos, como CMC y ácido cítrico.



**Figura 56.** Micrografía de papa tipo francesa escaldada con diferentes pre-tratamientos a) Agua, b) CMC, C) Ácido Cítrico, d) NC's  $\alpha$ -tocoferol, e) CMC, Ácido Cítrico y NC's  $\alpha$ -tocoferol.

En la **Figura 57** se observa la microscopía de la papa escaldada en agua y los daños causados por la congelación, estos daños mecánicos se pueden atribuir a que la papa en la congelación no tuvo algún componente crio-protector como es el caso de las nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol. Mientras que en la **Figura 58** que se muestran las papas congeladas con diferentes pre-tratamientos no se observan daños por el proceso de congelación en las muestras de NC's de  $\alpha$ -tocoferol. Los

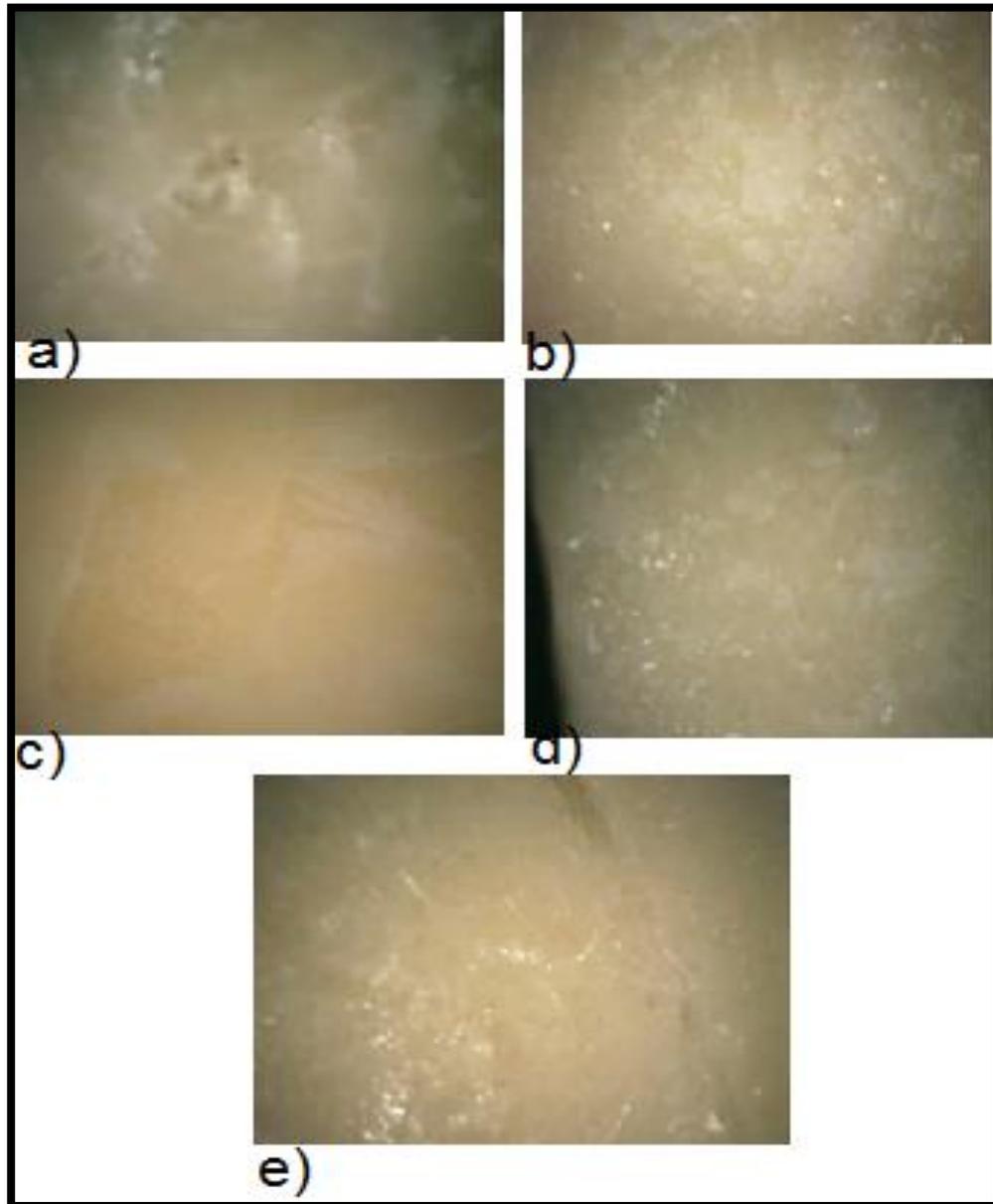
daños a los tejidos de las frutas y verduras durante la congelación según Sun y Li, (2003) se puede atribuir principalmente a alteraciones de la lámina media, membranas celulares y las paredes celulares en los tejidos. En el caso de la papa, los cristales de hielo se producen dentro de las células, provocando un aumento de volumen por congelación y por el transporte de agua interno, dando como resultado el crecimiento de la membrana y la ruptura de la lamela media (Cuibus et al., 2014).



**Figura 57.** Papa congelada después del proceso de escaldado en agua.

La **Figura 58** muestra la micrografía de la papa congelada, después de un proceso de escaldado con diferentes pre-tratamientos, la **Figura 58 (c)** esta escaldada con ácido cítrico y se observa una papa lisa y compacta, mientras que las papas escaldadas con agua, solo NC's de  $\alpha$ -tocoferol y solo CMC exhiben un alto grado de porosidad distribuida de manera uniforme en toda la papa. Los problemas, que incluyen la formación de grietas, la permeabilización celular y el daño, así como la desnaturalización de componentes de la pared celular, son generalmente responsables de la reducción de la calidad en los materiales congelados (Koch et al., 1996), siendo el uso de la mezcla de los componentes

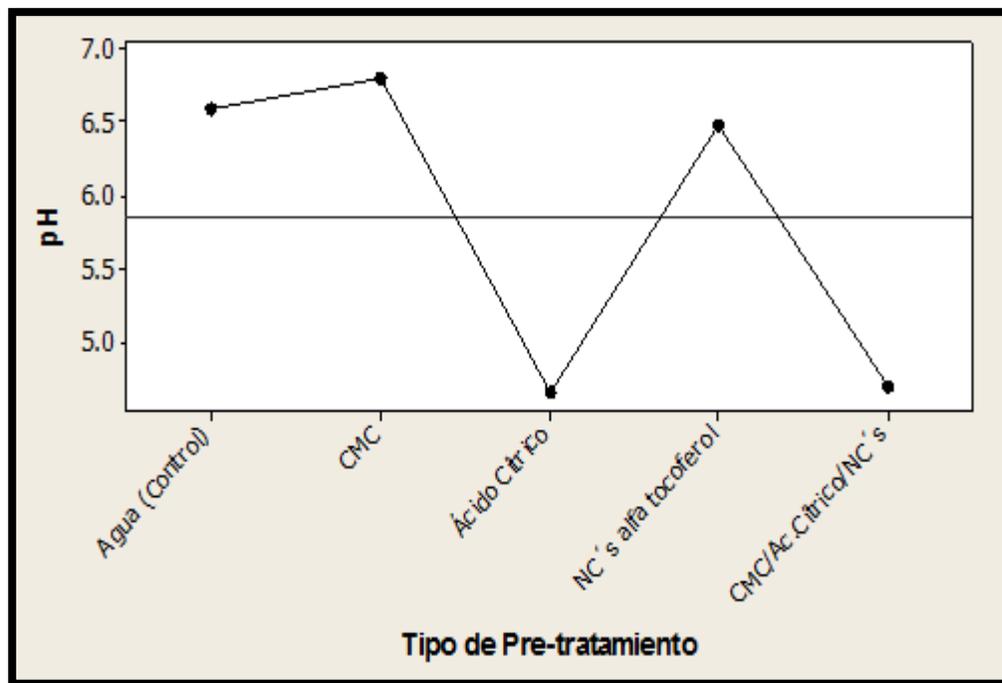
entre CMC/ácido cítrico/ NC's en el escaldado de la papa, donde se observa una papa uniforme y homogénea después de la congelación como en la **Figura 58 (e)**.



**Figura 58.** Micrografía de papa tipo francesa congelada durante 24 horas a diferentes pre-tratamientos a) Agua, b) CMC, c) Ácido Cítrico, d) NC's  $\alpha$ -tocoferol, e) CMC, Ácido Cítrico y NC's  $\alpha$ -tocoferol.

### 3.6 Evaluación de pH

El pH es la medida del grado de acidez o alcalinidad de un alimento o bebida. En el caso de frutos y verduras como en la papa es un parámetro muy importante para la calidad final del producto. En la **Figura 59** se observan los datos obtenidos de pH después del escaldado de la papa (*Solanum tuberosum L.*) cortada en tipo francesa con diferentes tipos de pre-tratamiento, se observa que el pH mostró una disminución de 6.5 p H de las papas escaldadas en agua a 4.6 de pH en las papas escaldas con ácido cítrico solo y en conjunto con CMC y nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol. El pre-tratamiento con ácido cítrico se utilizó para que tuviera un efecto en la reducción del pardeamiento de las papas después de ser cortadas y procesadas, ya que el ácido cítrico es un agente anti-pardeamiento que reduce el pH y quelatos de cobre en el sitio activo de la enzima polifenoloxidasa (Goyeneche et al., 2014), y es la razón de la reducción del pH en las papas escaldadas con ácido cítrico.



**Figura 59.** Gráfico de pH de la papa escaldada con diferentes pre-tratamientos.

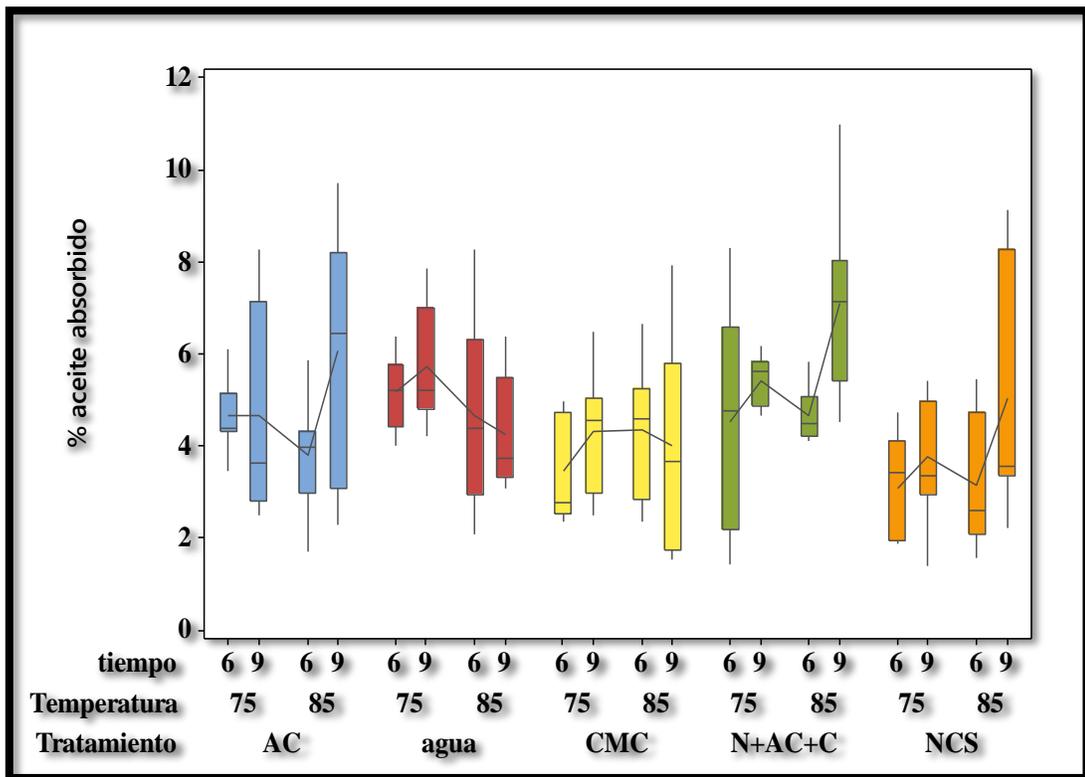
### 3.7 Absorción de aceite en papa frita tipo francesa

Uno de los usos del escaldado en las papas es para reducir la absorción de aceite por la gelatinización del almidón (Taiwo & Baik, 2007), ya que la gelatinización del almidón que se produce durante el escaldado podría formar una capa delgada firme que protege a la papa de la absorción de aceite, además de que el escaldado puede activar las enzimas de pectinesterasa que pueden hacer que las paredes celulares de la superficie se colapsen, causando una disminución en el contenido de aceite. La absorción de aceite es un fenómeno complejo que resulta de la interacción entre el aceite y los productos que se someten a numerosas transformaciones físicas, químicas y estructurales durante la fritura. Durante la fritura, la gelatinización del almidón y la inflamación, se producen muy rápido, con lo que las células de la papa capaz de soportar la deshidratación sin ruptura celular. El aceite no penetra en las células, pero entra en los huecos resultantes de la descomposición de fuerzas de adhesión entre las células cuando el agua se separa del producto (Ziaififar et al., 2008).

En la **Figura 60** se muestran el porcentaje de aceite absorbido en las papas tipo francesa después de los procesos de escaldado a diferentes pre-tratamientos y diferentes condiciones de temperatura y tiempo, congelación y freído. Cabe mencionar que los porcentajes de aceite absorbido solo es de un área pequeña de la papa, sin haber obtenido el peso de la papa, por lo tanto, no es posible relacionarlo con la masa del producto, sin embargo, se observan algunas diferencias entre las condiciones a las que fue escaldada la papa cortada en tipo francesa. Las muestras tratadas solo con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol independientemente de las condiciones de temperatura y tiempo fueron las que obtuvieron porcentajes de absorción de aceite más bajos entre 1.3 y 1.5 %, estos valores nos indican que las nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol como recubrimiento construyeron una barrera contra la absorción de aceite, por lo tanto, también disminuyó la pérdida de agua durante la fritura. Los recubrimientos son un método eficaz para reducir la absorción de aceite, algunos estudios experimentales han

demostrado que el consumo de aceite podría reducirse en un 40 % en las papas fritas utilizando recubrimientos de celulosa como es el caso de CMC antes de freír (García et al., 2002).

Por otra parte, los valores más altos de absorción de aceite en las muestras control y en las muestras con ácido cítrico, incluyendo las muestras que tienen CMC/ácido cítrico y NC's de  $\alpha$ -tocoferol, lo que nos indica que el ácido cítrico no ayudo a la retención de agua en la papa, ya que existe una relación entre el contenido de aceite y la pérdida de humedad, el escape de agua está vinculada a la absorción de aceite (Ziaiiifar et al., 2008).



**Figura 60.** Cambios en absorción de aceite en papa tipo francesa, después de la congelación y freído

La **Figura 61** nos muestra los cambios de color que tuvo el aceite después de la fritura de las papas a diferentes condiciones y pre-tratamientos de escaldado, el

resultado de las reacciones químicas complejas es una cantidad cada vez mayor de compuestos de degradación de lípidos en el baño de aceite como ácidos grasos libres, mono y diglicéridos, polímeros, compuestos de carbonilo potencialmente tóxicos, y así sucesivamente que puede ser absorbida adicionalmente por el producto (Ziaifar et al., 2008). Estos cambios en el aceite utilizado pueden ser una alternativa para un estudio posterior.



**Figura 61.** Apariencia del aceite después del freído de las papas tipo francesa con diferentes pre-tratamientos de escaldado.

## CONCLUSIONES

El efecto de la congelación de la papa pre-tratada con diferentes tratamientos tuvo efecto sobre la velocidad de congelación teniendo valores más bajos las muestras tratadas con todos los componentes de la solución (CMC/NC's/ácido cítrico), teniendo valores más altos de punto inicial de congelación las corridas escaldadas en agua.

Los recubrimientos con NC's y en conjunto con ácido cítrico y CMC a 75 °C durante 6 min, sobre los cambios de textura en la papa escaldada, congelada y en la papa freída tuvieron una mejor firmeza, dando lugar a que hubo sinergia entre los componentes y teniendo que las NC's de  $\alpha$ -tocoferol fue un factor para el aumento de la firmeza, aumentando el grosor de la corteza de la papa con el uso de NC's.

En el análisis de imagen se observó una estructura lisa y compacta en la papa escaldada con NC's y en conjunto con los demás componentes, aumentando la miscibilidad y compatibilidad en los componentes añadidos. Mientras que los daños en las papas escaldadas en agua son evidentes después de la congelación.

Respecto a la luminosidad de la papa escaldada se mostró que las muestras con NC's a 75°C entre los dos tiempos 6 y 9 min tuvieron los valores más altos. En las papas congeladas la mejor luminosidad fue para las muestras tratadas con ácido cítrico a 85 °C, de la misma forma en la papa frita, las muestras con mayor luminosidad fueron las tratadas a 85 °C independientemente del tiempo, pero con todos los componentes. En la cromaticidad y diferencia de color de las papas escaldadas, congeladas y frita, las muestras con ácido cítrico y en conjunto con los componentes fueron las mejores estadísticamente a 85 °C independientemente del tiempo de escaldado, siendo más atractivo para el consumidor.

La absorción de aceite durante el freído de la papa con NC's de  $\alpha$ -tocoferol fue evidente en las muestras, siendo las muestras con menores porcentajes de aceite en la papa, por lo tanto las NC's construyeron una barrera contra la absorción de aceite.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abd, M. (2014). Effect of citric, calcium lactate and low temperature prefreezing treatment on the quality of frozen strawberry. *Annals of Agricultural Sciences*, 59(1), 69-75.
- Agblor, A., & Scanlon, M. (2000). Processing conditions influencing the physical properties of French fried potatoes. *Potato Research*, 163-178.
- Agnelli, M., & Mascheroni, R. (2002). Quality evaluation of foodstuffs frozen in a cryomechanical freezer. *Journal of Food Engineering*, 52 (3), 257-263.
- Ahn, J., Kim, Y., Lee, Y., Seo, E., Lee, E., & Kim, H. (2008). Otimization of microencapsulation of seed oil by response surface methodology. *Food Chemistry*, 107(1), 98-105.
- Ali, H., Gizawy, A., & Saleh, M. (2016). The role of various amino acids in enzymatic browning process in potato tubers, and identifying the browning products. *Food Chemistry*, 192, 879-885.
- Alvarez, M. & Canet, W. (1999). Optimization of stepwise blanching of frozen- thawed potato tissues (cv. Monalisa). *Eur Food Res Technol.*, 210: 102-108.
- Alvarez, M., & Canet, W. (1997). Effect of pre-cooling and freezing rate on mechanical strength of potato tissues (cv Monalisa) at freezing temperatures. *Lebensm Unters Forsch* , 282-289.
- Alvarez, M., & Canet, W. (1998). Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues (CV. Monalisa). *Zeitschrift fur Lebensmitteluntersuchung undforschung A.*, 207(1), 55-65.
- Arroyo, P., & Marquez, I. (2006). *Estudio térmico y másico en la primera etapa de secado por congelación a vacío de papa y zanahoria. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos.* Cuautitlan Izcalli, Estado de México.: UNAM.
- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos.* México: Pearson Educación, 4ta Edición.
- Baldwin, E., Nisperos, M., Chen, X., & Hagenmaier, R. (1996). Improving storage life of cut apple and potato with edible coating. *Postharvest Biology and Technology*, 151-163.
- Berk, Z. (2013). Spoilage and Preservation of Foods. *Food Process Engineering and Technology*, 395-398.
- Boguszewska, D., Grudkowska, M., & Zagdanska, B. (2010). Drought- Responsive antioxidant enzymes in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Potato Research*, 53(4), 373-382.
- Bordoloi, A., Kaur, L., & Singh, J. (2012). Parenchyma cell microstructure and textural characteristics of raw and cooked potatoes. *Food Chemistry*, 133(4):1092-1100.

- Bouazziz, F., Koubaa, M., Neifar, M., Zouari, S., Besbes, S., Chaar, F., Kamon, A., & Chaabouni, M. (2015). Feasibility of using almond gum as coating agent to improve the quality of fried potato chips: Evaluation of sensorial properties. *LWT. Food Science and Technology*, 65, 800-807.
- Bourne, M. C. (2002). *Food Texture and Viscosity*. Academic Press.
- Bramley, P., Elmadfa, I., Kafatos, A., Kelly, F.J., Manios, Y., Roxborough, H.E., Schuch, W., Sheehy, P., & Wagner, K. (2000). Vitamin E. *Science of Food and Agriculture*, 80(7), 913-938.
- Briones, V., & Aguilera, J.M. (2005). Image analysis of change in surface color of chocolate. *Food Research International*, 38, 87-94.
- Brosnan, T., & Sun, D. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision- a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 3-16.
- Buitrago, G., López, A., Coronado, A., & Osorno, F. (2004). Determination of physical characteristics and mechanical properties of potatoes cultivated in Columbia. *Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(1), 1807-1929.
- Buzby, J. (2010). Nanotechnology for Food applications: More questions than answers. *Journal of consumer affairs*, 44(3), 528-545.
- Campardelli, R., & Reverchon, E. (2015).  $\alpha$ -Tocopherol nanosuspensions produced using a supercritical assisted process. *Journal of Food Engineering*, 131-136.
- Carbonell, S., Oliveira, J., & Kelly, A. (2006). Effect of pretreatments and freezing rate on the firmness of potato tissue after a freeze-thaw cycle. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(7), 757-767.
- Carneiro, M., Cerqueira, M., Souza, B., Souza, M., Teixeira, J., & Vicente, A. (2009). Physical properties of edible coatings and films made with a polysaccharide from *Anacardium occidentale* L. *Journal of Food Engineering*, 95(3), 379-385.
- Cartelle, M., & Zurita, J. (2015). La Nanotecnología en la producción y conservación de alimentos. *Revista Cubana de Alimentación y Nutrición*, 1(25), 184-207.
- Chattopadhyay, P. (2014). Freezing of foods/ Growth and Survival of Microorganisms. *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)*, 968-971.
- Ciolacu, L., Nicolau, A., & Hoorfar, J. (2014). Edible coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables. *Global Safety of Fresh Produce*, 233-244.
- CONPAPA. (2007). *Confederación Nacional de Productores de papa de la República Mexicana*. Obtenido de <http://www.conpapa.org.mx/files/pages/0000000018/ficha-tecnica-2013.pdf>

- Cuibus, L., Castro, M., Fito, P., & Fabbri, A. (2014). Application of infrared thermography and dielectric spectroscopy for controlling freezing process of raw potato. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 24, 80-87.
- De'Nobili, M., Soria, M., Martinefski, M., Tripodi, V., Fissore, E., & Roja, A. (2015). Stability of L-(+)-ascorbic acid in alginate edible films loaded with citric acid for antioxidant food preservation. *Journal of Food Engineering*, 175, 1-7.
- Della Rocca, P. R. (2013). Estudio comparativo de la congelación de papa (*Solanum tuberosum* L.) sometida a diferentes pretratamientos. *Proyecciones*, vol. 11(1), 31-45.
- Dickinson, E. (2013). Stabilising emulsion-based colloidal structures with mexed food. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(4), 710-721.
- Du, C., & Sun, D. (2005). Comparison of three methods for classification of pizza topping using different colour space transformations. *Journal of Food Engineering*, 68(3), 277-287.
- Durán, N. & Marcato, P. (2013). Nanobiotechnology perspectives. Role of nanotechnology in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(6), 1127-1134.
- Esmaeili, A. & Gholami, M. (2015). Optimization and preparation of nanocapsules for food applications using two methodologies. *Food Chemistry*, 179, 26-34.
- FAO. (2008). *Año Internacional de la papa*. Obtenido de <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/index.html>
- FAO/OMS. (2010). Analisis socioeconomicos de tiendas y seguridad en el comercio. *Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion*, 144.
- Fennema, O.R. . (1976). 'Water and ice', en *Food Chemistry*. Nueva York: O.R. Fennema, Marcel Dekker.
- Fernández, C., Alvarez, M., & Canet, W. (2006). The effect of low-temperature blanching on the quality of fresh and frozen/thawed mashed potatoes. *Food Science and Technology*, 41(5), 577-595.
- Fortuny, R., & Belloso, O. M. (2003). New advances in estendign the shelf-life of fresh cut fruit. *Trends in Food Science & Technology*, 14(9): 341-353.
- Frederic Mestdagh, T. D. (2008). Optimization of the blanching process to reduce acrylamide in fried potatoes. *LWT- Food Science and Technology*, 41, 1648-1654.
- García, M., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M., & Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(4), 391-397.

- Ghannam, N., & Crowley, H. (2006). The effect of low temperature blanching on the texture of whole processed new potatoes. *Journal of Food Engineering*, 74(3), 335-344.
- Gorrasi, G., & Bugatti, V. (2016). Edible bio-nano-hybrid coatings for food protection based on pectins and LDH-salicylate: Preparation and analysis of physical properties. *LWT- Food Science and Technology*, 69, 139-145.
- Goyeneche, R., Agüero, M.V., Roura, S., & Scala, K. (2014). Application of citric acid and mild heat shock to minimally processed sliced radish: Color evaluation. *Postharvest Biology and Technology*, 93, 106-113.
- Guzmán, L., Acevedo, D., & Granados, C. (2012). Effect of blanching, osmotic dehydration and coating on the moisture loss and oil gaining in native potato chips pieces. *Bioteología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2(10).
- Hasbún, J., Esquivel, P., Brenes, A., & Alfaro, I. (2009). Propiedades físico- químicas y parámetros de calidad para uso industrial de cuatro variedades de papa. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 77-89.
- Heredia, A., Castelló, M., Argüelles, A. & Andrés, A. (2014). Evolution of mechanical and optical properties of french fries obtained by hot air-frying. *LWT- Food Science and Technology*, 755-760.
- INFOAGRO. (2012). Obtenido de [www.infoagro.com/hortalizas/patata.htm](http://www.infoagro.com/hortalizas/patata.htm)
- infoagronomo. (s.f.). *Infoagronomo*. Obtenido de <http://infoagronomo.tripod.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/papa.pdf>
- Khalil, A. (1999). Quality of french fried potatoes as influenced by coating with hydrocolloids. *Food Chemistry*, 66(2), 201-208.
- Kim, D.H., Kim, H.S., Chung, H.S., & Moon, K.D. (2014). Browning control of fresh-cut lettuce by phytoncide treatment. *Food Chemistry*, 159, 188-192.
- Kita, A., Lisinska, G., & Golubowska, G. (2007). The effect of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps. *Food Chemistry*, 102(1): 1-5.
- Koch, H., Seyderhelm, I., Wille, P., Kalichevsky, M., & Knorr, D. (1996). Pressure-shift freezing and its influence on texture, colour, microstructure and rehydration behaviour of potato cubes. *Molecular Nutrition and Food Research*, 40(3), 125-131.
- Kong, F., Sing, R. (2011). Chemical deterioration and physical instability of foods and beverages. *Food and Beverage Stability and Shelf life*, 29-62.

- Kulen, O., Stushnoff, C., & Holm, D. (2013). Effect of cold storage on total phenolics content, antioxidant activity and vitamin C level of selected potato clones. *Science of Food and Agriculture*, 93(10), 2437-2444.
- Lima, A., Cerqueira, M., Souza, B., Santo, C., Teixeira, J., Moreira, R., & Vicente, A. (2010). New edible coatings composed of galactomannans and collagen blends to improve the postharvest quality of fruits influence on fruits gas transfer rate. *Journal of Food Engineering*, 97(1), 101-109.
- Lima, A., Leite, B., Meirelles, M., & Cristianini, M. (2016). High pressure preprocessing of cocoyam, peruvian carrot and sweet potato: Effect on oxidative enzymes and impact in the tuber color. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 302-309.
- Limbo, S. & Piergiovanni, L. (2006). Shelf life of minimally processed potatoes: Part 1. Effects of high oxygen partial pressures in combination with ascorbic and citric acids on enzymatic browning. *Postharvest Biology and Technology*, 39(3), 254-264.
- Lin, D. & Zhao, Y. (2007). Innovations in the development and application of edible coating for fresh and minimally processed fruits and vegetables. *Comprehensive reviews in Food Science and Food Safety*, 6(3), 60-75.
- Luque, E. (2013). Variedades de pap. *Centro de Validación y Transferencia de Tecnología de Sinaloa A. C.*, 29.
- Machado, K. & Vélez, J. (2008). Study of Physical properties in Mexican foods during freezing and frozen storage. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 1(7), 41-54.
- Masson, L., Muñoz, J., Romero, N., Camilo, C., Encina, C., Hernández, L., Castro, J., & Robert, P. (2002). Acrilamida en patatas fritas: Revisión actualizada. *Departamento de ciencias de los Alimentos y Tecnología Química, Centro de Investigación y Desarrollo en Grasas y Aceites (CIDGRA), Facultad de Ciencias Químicas y Farmaceuticas, Universidad de Chile.*, 6.
- McMurry, J. (2008). *Química Orgánica*. México, D.F.: Cengage Learning.
- Mendoza, F., Dejmek, P., & Aguilera, J. (2006). Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 41(3), 285-295.
- Mendoza, R. & Herrera, A. (2012). Kinetics of peroxidase enzyme inactivation, color and texture in golden potato (*Solanum tuberosum* phureja group) under three blanching conditions. *Industria Alimentaria*, 23(4): 73-82.
- Mendoza, V. (2011). *Nanoemulsión de mucilago de nopal opuntia ficus con dl-alfa-tocoferol, una nueva alternativa para preservar la manzana fresca cortada y conservada a bajas temperaturas*. Cuautitlan Izcalli, Edo. de México: Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. UNAM.

- Mestdagh, F., De Wilde, T., Fraselle, S., Govaert, Y., Ooghe, W., Degroodt, J. M., & De Meulenaer, B. (2008). Optimization of the blanching process to reduce acrylamide in fried potatoes. *LWT- Food Science and Technology*, 41(9): 1648-1654.
- Millan, E., Restrepo, L., & Narváez, C. (2007). Effect of blanching and speed of freezing and de-icing on the quality of frozen pulp of arazá (*Eugenia stipitata* Mc Vaught). *Fisiología y tecnología poscosecha*, 25(2), 333-338.
- Montanheiro, C., Matos de Carvalho, S., Calegari, R., & Manique, L. (2014). Characterization of antioxidant methylcellulose film incorporated with  $\alpha$ -tocopherol nanocapsules. *Food Chemistry*, 159, 529-535.
- Mora, R. (2014). *Consumo y mercado de la papa*. Obtenido de <https://consumoymercadedepapa.wordpress.com/2014/11/28/consumo-y-mercadeo-de-la-papa-en-mxico/>
- Moreno, O., Atarés, L., & Chiralt, A. (2015). Effect of incorporation of antimicrobial/antioxidant proteins on the properties of potato starch films. *Carbohydrate Polymers*, 133, 353-364.
- Nourian, F., Ramaswamy, H., & Kushalappa, A. (2003). Kinetics of quality change associated with potatoes stored at different temperatures. *LWT- Food Science and Technology*, 36(1), 49-65.
- Ojeda, G., Sgroppo, S., & Zaritzky, N. (2014). Application of edible coatings in minimally processed sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.) to prevent enzymatic browning. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 876-883.
- Oner, M., & Walker, P. (2011). Effect of processing and packaging conditions on quality of refrigerated potato strips. *Journal of Food Science*, 76(1), 35-40.
- Paciulli, M., Ganino, T., Pellegrini, N., Rinaldi, M., Zaup, M., Fabbri, A., & Chiavaro, E. (2015). Impact of the industrial freezing process on selected vegetables- Part I. Structure, texture and antioxidant capacity. *Food Research International*, 74, 329-337.
- Palou, E.-M. A.-C.-C. (1999). Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree. *Journal of Food Science*, vol. 64(1), 42-45.
- Paul Singh, R. (2014). Introduction to Food Engineering (Fifth Edition). *Food Science and Technology*, vol. 1, 521-563.
- Perez, M., Serra, M., & Del Río, M. (2006). Color change of fresh-cut apples coated with whey protein concentrate-based edible coatings. *Postharvest Biology and Technology*, 39(1), 84-92.

- Petzold, G., Caro, M., & Moreno, J. (2014). Influence of blanching, freezing and frozen storage on physicochemical properties of broad beans (*Vicia faba* L). *International Journal of Refrigeration*, 40, 429-434.
- Pham, Q. (2014). Freezing time formulas for foods with low moisture content, low freezing point and for cryogenic freezing. *Journal of Food Engineering*, 127, 85-92.
- Real, S. (2013). *Efecto de un recubrimiento de nanopartículas con a-tocoferol sobre la actividad de fenilalanin amonio-liasa como indicador del oscurecimiento en manzana fresca cortada. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos*. Cuautitlan Izcalli, Estado de México: UNAM.
- Richter, F., Masson, M., & Waszczynsky, N. (2008). Influence of a blanching pretreatment on color, oil uptake and water activity of potato sticks, and its optimization. *Food Process Engineering*, 31(6), 833-852.
- Robert, C., & Soliva Fortuny, M.-B. (2003). New advances in extending the shelf-life of fresh cut fruit. *Trends in Food Science and Technology*, 14, 341-353.
- Rocculi, P., Gómez, F., Mendoza, F., Wadso, L., Romani, S., Dalla, M., & Sjöholm, I. (2007). Effects of the application of anti-browning substances on the metabolic activity and sugar composition of fresh-cut potatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 43(1), 151-157.
- Rojas, M., Tapia, M., Rodríguez, F., Carmona, A., & Martín, O. (2007). Alginate and gellan-based edible coatings as carriers of antibrowning agents applied on fresh-cut Fuji apples. *Food Hydrocolloids*, 21(1), 118-127.
- Romani, S., Bacchiocca, P., & Dalla, M. (2009). Influence of frying conditions on acrylamide content and other quality characteristics of French fries. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 582-588.
- Sabbagh, A., García, J. A., Matus, J. A., Jiménez, L., & Hernández, M. (2011). Comportamiento del consumo de papa (*Solanum tuberosum* L.) fresca en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(2). p. 559-572.
- Sacchetti, G. &. (2014). Multidisciplinary approach to study the effect of water status and mobility on the activity of peroxidase in solutions. *Food Chemistry*, Vol 144, 36-43.
- Sandhu, J., & Takhar, P. (2015). Effect of frying parameters on mechanical properties and microstructure of potato disks. *Journal of Texture Studies*, 46(5), 385-397.
- Severini, C., Baiano, A., Pilli, T., & Derossi, A. (2003). Prevention of enzymatic browning in sliced potatoes by blanching in boiling saline solutions. *LWT- Food Science and Technology*, 36(7), 657-665.

- Severini, C., Derossi, A., De Pilli, T., & Baiano, A. (2004). Acidifying- blanching of 'Cicorino' leaves: effects of recycling of processing solution on product pH . *Food Science and Technology*, 39(7), 811-815.
- Sinarefi. (2015). [http://www.sinarefi.org.mx/redes/red\\_papa.html](http://www.sinarefi.org.mx/redes/red_papa.html). Obtenido de [http://www.sinarefi.org.mx/redes/red\\_papa.html](http://www.sinarefi.org.mx/redes/red_papa.html)
- Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. (2009). Chapter 10- Potato starch and its modification. *Advances in Potato Chemistry and Technology*, 273-318.
- Singh, N., & Ramaswamy, H. (2014). Quality optimization of canned potatoes during rotary autoclaving. *Journal of Food Quality*, 37(3), 168-176.
- Singh, R. P. (2014). Introduction to Food Engineering (Fifth Edition). *Food Science and Technology*, 521-563.
- Solé, I. & Solans, C. (2012). *Institute of Advanced Chemistry of Catalonia QAC*. Obtenido de [http://www.iqac.csic.es/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=136&Itemid=98&lang=en&limitstart=530](http://www.iqac.csic.es/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=136&Itemid=98&lang=en&limitstart=530)
- Sun, D., & Li, B. (2003). Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing. *Journal of Food Engineering*, 57(4), 337-345.
- Taiwo, K., & Baik, O. (2007). Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *LWT- Food Science and Technology*, 661-668.
- Tavera, M., Urriza, M., Pinotti, A, & Bertola, N. (2012). Plasticized methylcellulose coating for reducing oil uptake in potato chips. *Science of Food and Agriculture*, 92(7), 1346-1353.
- Ullah, J., Takhar, P., & Sablani, S. (2014). Effect of temperature fluctuations on ice-crystal growth in frozen potatoes during storage. *LWT- Food Science and Technology*, 59(2), 1186-1190.
- Van, R., Voda, A., Van, G., & Duijster, A. (2013). Ice crystal interspacing in frozen foods. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 622-626.
- Vargas, M., Sánchez-González, L., Cháfer, M., Chiralt, A., & González-Martínez, C. (2012). Edible chitosan coatings for fresh and minimally processed foods. *Emerging Food Packaging Technologies*, 66-95.
- Vasconcelos. N., Salgado. S., Livera. A., Andrade. S., Oliveira. M. & Stamford. T. (2015). Influence of heat treatment on the sensory and physical characteristics and carbohydrate fractions of french-fried potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Food Science and Technology*, 35(3), 561-569.

- Vázquez-Gutiérrez José L., Pérez-Gago María B, Vonasek Erica. (2014). Application of nondestructive impedance spectroscopy to determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture. *Journal of Food Engineering*, 133, 16-22.
- Villanueva, L. (1990). *Alimentos congelados Procesado y distribución*. Zaragoza, España: Acribia.
- Wallick, D. (2014). Cellulose Polymers in Microencapsulation of Food Additives. *Microencapsulation in the Food Industry*, 181-193.
- Xin, Y., Zhang, M., Xu, B., Adhikari, B., & Sun, J. (2015). Research trends in blanching pretreatments selected and quick freezing technologies as applied to fruit and vegetables: A review. *Revista Internacional de Refrigeración*, 57, 11-25.
- Zambrano, M., Gutierrez, E., Del Real, A., González, R., Galindo, J., & Quintanar, D. (2014). Fresh-cut Red Delicious apples coating using tocopherol/mucilage nanoemulsion: Effect of coating on polyphenol oxidase and pectin methylesterase activities. *Food Research International*, 62, 974-983.
- Zambrano, M., Mercado, E., Gutierrez, E., Castaño, E., & Quintanar, D. (2011). Optimization of nanocapsules preparation by the emulsion-diffusion method for food applications. *LWT- Food Science and Technology*, 1362-1368.
- Zaritzky, N.E. (2010). Chemical and physical deterioration of frozen foods. *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages.*, 561-607.
- Zhiqiang, E., & Scanlon, M. (2007). Modeling the effect of blanching conditions on the texture of potato strips. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 292-297.
- Ziabakhsh, M., Rahman, R., Tan, C., Bakar, J., & Olusegun, L. (2016). Effect of blanching on enzyme activity, color changes, anthocyanin stability and extractability of mangosteen pericarp: A kinetic study. *Journal of Food Engineering*.
- Ziaiifar, A., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I., & Trystram, G. (2008). Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *Food Science and Technology*, 43(8), 1410-1423.