



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS CÓRDOBA

POSGRADO EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE

EVALUACIÓN DE LA COENZIMA Q₁₀ MICROENCAPSULADA COMO ANTIOXIDANTE EN CARNE DE POLLO

XOCHITL DAMIÁN HERNÁNDEZ

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS

AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ, MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el (la) que suscribe Xochitl Damián Hernández, Alumno(a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del profesor(a) Dra. Alicia S. Hernández C., por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Evaluación de la Coenzima Q10 microencapsulada como agente antioxidante en carne de pollo.

Y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Profesor Consejero(a) o Director(a) de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Amatlán de los Reyes, Veracruz a 11 de diciembre de 2018


Firma


Vo.Bo. del Profesor Consejero o Director de Tesis

La presente tesis, titulada: **“Evaluación de la Coenzima Q₁₀ microencapsulada como antioxidante en carne de pollo”**, realizada por la alumna: **“Xochitl Damián Hernández”**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA Y DIRECTORA:



Dra. Aleida Selene Hernández Cázares

ASESOR:



PhD. Juan Valente Hidalgo Contreras

ASESORA:



Dra. Maricarmen Thalía Recillas Mota

Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, diciembre de 2018

EVALUACIÓN DE LA COENZIMA Q₁₀ MICROENCAPSULADA COMO ANTIOXIDANTE EN CARNE DE POLLO

Xochitl Damián Hernández, M en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

La carne de pollo por sus características bioquímicas, entre las que destaca la cantidad de ácidos grasos poliinsaturados, la definen como un alimento altamente perecedero; el cual, tiene una vida útil de cinco días en refrigeración. Por lo que es necesario hacer uso de diferentes métodos de conservación; como la congelación, el envasado al vacío, el uso de atmósferas modificadas, los procesos térmicos, la adición de antioxidantes naturales o sintéticos, entre otros para conservarla. Además, debido al alto consumo de esta proteína animal, la industria avícola requiere de la investigación sobre nuevos procesos innovadores que permitan alargar su vida útil y conservar sus propiedades funcionales. En este sentido, este estudio tuvo por objetivo evaluar la acción antioxidante de la coenzima Q₁₀ microencapsulada en *patties* de pechuga de pollo (*Pectoralis major*) molidas, cocidas y almacenadas en refrigeración a 4 °C. En el Capítulo 1 se identificó como diferentes pro-oxidantes en carne de pollo determinan su calidad, al tener mayor o menor efecto en su estabilidad lipídica y proteica de acuerdo a diferentes niveles de inclusión. Los procesos térmicos confieren mayor acción pro-oxidante con cambios que se reflejan en el color (luminosidad), mayores pérdidas de peso durante el almacenamiento en refrigeración y mayor oxidación lipídica (TBARS) y proteica. En el Capítulo 2, se elaboró y caracterizó microesferas (ME) de alginato con coenzima Q₁₀ (CoQ₁₀), por coacervación simple, donde se obtuvo una eficiencia de encapsulamiento del 61% y buena estabilidad al procesamiento y a tratamientos térmicos (80 y 120 °C durante 15 min). Además de obtener microesferas con ingredientes comestibles que pueden ser utilizados en la industria de los alimentos. Así, en el Capítulo 3, se realizó la aplicación de estas microesferas de CoQ₁₀, en una matriz cárnica a tres niveles de inclusión (100, 200 y 300 mg 100 g⁻¹ de carne) en *patties* de pechuga de pollo cocida. Se evidenció la capacidad antioxidante de la CoQ₁₀ en su forma ubiquinona cuando menos en un 39 %, lo que representa una alternativa viable de conservación para la industria avícola, al utilizar las microesferas como aditivo antioxidante para su uso en productos cárnicos cocidos.

Palabras clave: Carne, coacervación simple, CoQ₁₀, antioxidante.

EVALUACIÓN DE LA COENZIMA Q₁₀ MICROENCAPSULADA COMO ANTIOXIDANTE EN CARNE DE POLLO.

Xochitl Damián Hernández, M en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Chicken meat, due to its biochemical characteristics, highlighting the amount of polyunsaturated fatty acids stands out, defines it as a highly perishable food; which has a five-day shelf life in refrigeration. Therefore it is necessary to use different conservation methods; such as freezing, vacuum packaging, the use of modified atmospheres, thermal processes, the addition of natural or synthetic antioxidants, among others, to conserve it. In addition, due to the high consumption of this animal protein, the poultry industry requires research on new innovative processes that allow to extend its useful life and preserve its functional properties. In this sense, this study aimed to evaluate the antioxidant action of coenzyme Q₁₀ microencapsulated in patties of chicken breast (*Pectoralis major*) ground, cooked and stored under refrigeration at 4 ° C. In Chapter 1, it was identified that different pro-oxidants in chicken meat determine its quality, having a greater or lesser effect on their lipid and protein stability according to different levels of inclusion. The thermal processes confer greater pro-oxidant action with changes that are reflected in color (luminosity), greater weight losses during storage in refrigeration and greater lipid oxidation (TBARS) and protein. In Chapter 2, microspheres (ME) of alginate with coenzyme Q₁₀ (CoQ₁₀) were elaborated and characterized by simple coacervation, where an encapsulation efficiency of 61 % and good stability to processing and thermal treatments (80 and 120 ° C). for 15 min) was obtained. In addition to obtaining microspheres with edible ingredients that can be used in the food industry. Thus, in Chapter 3, the application of these CoQ₁₀ microspheres was carried out in a meat matrix at three inclusion levels (100, 200 and 300 mg 100 g⁻¹ of meat) in chicken breast patties. The capacity antioxidant of CoQ₁₀ in its ubiquinone form was demonstrated at least 39%, which represents a viable conservation alternative for the poultry industry, using the microspheres as an antioxidant additive alternative for use in cooked meat products.

Keywords: Meat, simple coacervation, CoQ₁₀, antioxidant.

Quiero dedicar esta tesis y todo el esfuerzo que involucró el conseguirla primeramente a
Dios

Gracias *Jesús* por ser mi fortaleza en todo momento, por llenarme de amor y no dejarme sola en este camino que estoy recorriendo.

A mi madre, que ha sido mi ejemplo de mujer, esfuerzo y constancia para conseguir mis sueños.

A mi esposo, amigo y compañero por creer siempre en mí. Gracias Greg.

A mis hermanos, que han sido mis compañeros y amigos en este camino.

Marcela

María del Carmen

José Antonio

Lauro

Julio

Eduardo

A mis asesores que caminaron conmigo en este camino de aprendizajes, muchas gracias:

Dra. Aleida Selene Hernández Cázares

PhD. Juan Valente Hidalgo Contreras

Dra. Maricarmen Thalía Recillas Mota

A la Dra. María Antonieta Ríos Corripio, por su amistad y apoyo, con mucha experiencia.

A todos ustedes...

¡Muchas gracias!

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento para realizar mis estudios de posgrado con la beca No. 291249 y con ello esta investigación.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba, por el financiamiento para realizar dicha investigación.

A la Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable y a la LGAC 2.

Innovación y Desarrollo de Procesos Agroalimentarios para el Bienestar Social

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), por el apoyo en esta investigación.

A mis asesores:

Dra. Aleida Selene Hernández Cázares

PhD. Juan Valente Hidalgo Contreras

Dra. Maricarmen Thalía Recillas Mota

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Planteamiento del problema	1
Objetivos	2
Hipótesis	2
MARCO TEÓRICO	3
1.1. Carne de pollo	3
1.1.1. Consumos y producción de carne de pollo	3
1.1.2. Composición bioquímica de la carne	3
1.1.3. Transformación del músculo a carne de pollo	4
1.1.4. Calidad de la carne	5
1.1.5. Reacciones de oxidación de la carne	8
1.1.5.1. Agentes pro-oxidantes	9
1.1.5.2. Oxidación lipídica	10
1.1.5.3. Oxidación proteica	11
1.2. Antioxidantes	14
1.2.1. Antioxidantes endógenos	14
1.2.1.1. Coenzima Q ₁₀	15
1.2.2. Antioxidantes exógenos	16
1.2.2.1. Antioxidantes naturales	16
1.2.2.2. Antioxidantes sintéticos	16
1.3. Procesos de encapsulación	17
1.3.1. Metodologías de encapsulamiento	19
1.3.2. Materiales utilizados en los procesos de encapsulación	21
1.3.3. Alginato de sodio	22
1.4. Estado del arte: Coenzima Q₁₀ naturaleza química, estructura y funciones de importancia en la industria de los alimentos.	24

1.4.1.	Introducción	24
1.4.2.	Funciones de la coenzima Q₁₀	25
1.4.3.	Métodos de análisis de la coenzima Q₁₀	26
1.4.4.	Usos de la coenzima Q₁₀	26
1.4.5.	Conclusiones	28
	Literatura citada	28

CAPÍTULO I

EVALUACIÓN DE LOS AGENTES PRO-OXIDANTES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DE LA CARNE DE POLLO

	Resumen	36
1.1.	Introducción	37
1.2.	Materiales y métodos	39
1.2.1.	Químicos	39
1.2.2.	Materia prima	39
1.2.3.	Preparación de las muestras	39
1.2.4.	Pérdidas de peso	39
1.2.5.	Color	40
1.2.6.	pH	40
1.2.7.	Acidez titulable	40
1.2.8.	Sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS)	40
1.2.9.	Análisis estadístico	41
1.3.	Resultados y discusión	41
1.3.1.	Pérdidas de peso por efecto del tratamiento	41
1.3.2.	Color	42
1.3.3.	pH	45
1.3.4.	Acidez titulable expresada en % de ácido láctico	47

1.3.5. Oxidación lipídica (TBARS)	48
1.4. Conclusiones	50
Literatura citada	52
CAPÍTULO II	
ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROENCAPSULADOS DE COENZIMA Q₁₀ GRADO ALIMENTICIO OBTENIDOS POR COACERVACIÓN SIMPLE	57
Resumen	58
1.1. Introducción	59
1.2. Materiales y métodos	61
1.2.1. Reactivos químicos	61
1.2.2. Elaboración de las microesferas	61
1.2.3. Rendimiento en peso seco	62
1.2.4. Humedad y a_w	62
1.2.5. Microscopía óptica invertida	62
1.2.6. Extracción de la Coenzima Q₁₀	63
1.2.7. Espectroscopía UV-Vis	63
1.2.8. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	64
1.2.9. Análisis estadístico	64
1.3. Resultados y discusión	64
1.3.1. Rendimiento en peso seco	64
1.3.2. Humedad y a_w	65
1.3.3. Microscopía óptica invertida	66
1.3.4. Espectroscopia UV-Vis	71
1.3.5. Espectroscopia de infrarrojo Transformada de Fourier.	72
1.4. Conclusiones	77

Literatura citada	77
CAPÍTULO III	
MICROESFERAS DE CoQ₁₀ COMO ALTERNATIVA ANTIOXIDANTE EN <i>PATTIES</i> DE PECHUGA DE POLLO (<i>Pectoralis major</i>)	82
Resumen	83
1.1. Introducción	84
1.2. Materiales y métodos	86
1.2.1. Reactivos químicos	86
1.2.2. Preparación de la muestra	86
1.2.3. Preparación de los tratamientos	86
1.2.4. Caracterización de la materia prima	87
1.2.5. Pérdidas de peso, pH, acidez, humedad y a_w	87
1.2.6. Color	87
1.2.7. Sustancias Reactivas al Ácido Tiobarbiturico (TBARS)	87
1.2.8. Perfil de textura (TPA)	88
1.2.9. Degradación proteica por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	88
1.2.10. Análisis estadístico	88
1.3. Resultados y discusión	89
1.3.1. Caracterización de la materia prima	89
1.3.2. Pérdidas de peso, pH, acidez, humedad y a_w de la <i>patties</i>	89
1.3.3. Color	91
1.3.4. Sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS)	92
1.3.5. Perfil de textura (TPA)	95
1.3.6. Degradación proteica FTIR	96
1.4. Conclusiones	98

Literatura citada	98
CONCLUSIONES GENERALES	104
RECOMENDACIONES GENERALES	105
ANEXOS	106

LISTA DE CUADROS

MARCO TEÓRICO

- Cuadro 1.** Composición de pechuga de pollo, para 100 g de porción comestible. 4
- Cuadro 2.** Contenido total de lípidos y ácidos grasos en carne de pollo. 4
- Cuadro 3.** Aditivos antioxidantes regulados en México según el acuerdo para el uso de aditivos. 17

CAPÍTULO 1

- Cuadro 1.** Medias del efecto de diferentes agentes pro-oxidantes sobre pechuga de pollo en forma de *patties* almacenada en refrigeración a 4 °C ± SD. 51

CAPÍTULO 2

- Cuadro 1.** Caracterización fisicoquímica de las ME de alginato + CoQ₁₀, elaboradas por el método de coacervación simple. 66
- Cuadro 2.** Medias del tiempo de inmersión del T1, T2, T3, T4 y T5 para la variable hinchamiento. 69

CAPÍTULO 3

- Cuadro 1.** Medias de las características fisicoquímicas de *patties* de pechuga de pollo cocidas y almacenadas a 4 °C durante 15 d adicionada con diferentes niveles de inclusión de ME de CoQ₁₀ (0, 100, 200 y 300 mg de CoQ₁₀ en ME 100 g⁻¹ de carne). 91
- Cuadro 2.** Resultados del perfil de textura de las *patties* de pechuga de pollo cocidas y almacenadas en refrigeración a 4 °C, adicionadas con ME de CoQ₁₀. 95

LISTA DE FIGURAS

MARCO TEÓRICO

Figura 1. Principales cambios ocurridos en el proceso de transformación de músculo a carne.	6
Figura 2. Formas redox de mioglobina en carne de ave.	7
Figura 3. Reacción en cadena de oxidación de ácidos grasos.	11
Figura 4. Reacciones de oxidación proteica debidas a ROS.	13
Figura 5. Estructura química de la Coenzima Q ₁₀ (CoQ ₁₀)	16
Figura 6. Microesferas <i>versus</i> microcápsulas.	18
Figura 7. Morfología de diferentes tipos de microcápsulas.	18
Figura 8. Esquema de diferentes procesos de encapsulación de compuestos bioactivos.	20
Figura 9. Estructura química de la coenzima Q ₁₀ .	25

CAPÍTULO 1

Figura 1. Análisis de la pérdida de peso final de la <i>patties</i> de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a 4 °C.	43
Figura 2. Análisis de valores de pH de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a 4 °C.	46
Figura 3. Análisis de valores del % de acidez titulable, expresada en ácido láctico de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a 4 °C.	47
Figura 4. Comportamiento de las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico, expresada en mg kg ⁻¹ de malondialdehído de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a 4 °C.	50

CAPÍTULO 2

Figura 1. Microesfera húmeda de alginato + CoQ ₁₀ [2 g L ⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol – T5 (A) [Resolución 10X], microesfera secas del T5 (B) [Resolución 4X] y microesferas de alginato -T1 (C).	66
Figura 2. Comportamiento de la microesfera seca del T5 [Alginato + CoQ ₁₀ (2 g L ⁻¹) + 50 mL de etanol] impregnada con tampón citrato pH 6.2, a los 0, 3, 6, 9, 12, 15 min, observada al microscopio en una resolución de 4X.	67

- Figura 3.** Poder de hinchamiento de las microesferas de alginato y CoQ10 elaboradas por coacervación simple. 69
- Figura 4.** Frecuencia del rango de tamaño de partícula de las esferas obtenidas por coacervación simple. 71
- Figura 5.** Espectros FTIR de: (a) CoQ₁₀ grado reactivo (Sigma Aldrich) y (b) CoQ₁₀ grado alimenticio; en la región de 1750 a 750 cm⁻¹. 74
- Figura 6.** Espectros FTIR de: (a) alginato grado reactivo, (b) coenzima Q₁₀ grado alimenticio, (c) esfera de alginato sin principio activo y (d) esfera cargadas con Coenzima Q₁₀ T5 (2 g L⁻¹); en la región de 3750 a 500 cm⁻¹. 74
- Figura 7.** Espectros FTIR de la estabilidad de la Coenzima Q₁₀ durante el proceso de encapsulamiento: a) CoQ₁₀ grado alimenticio, b) CoQ₁₀ extraída de ME del T5 (2 g L⁻¹); en la región de 3500 a 500 cm⁻¹. 75
- Figura 8.** Espectros FTIR de: a) coenzima Q₁₀ grado alimenticio, b) Extracción de CoQ₁₀ expuesta a 120°C durante 10 min, c) Extracción de CoQ₁₀ expuesta a 80°C durante 10 min y d) Extracción de CoQ₁₀ del T5 (2 g L⁻¹), en la región de 1800 a 700 cm⁻¹. 76

CAPÍTULO 3

- Figura 1.** Superficie de respuesta para oxidación lipídica expresada en mg de MDA kg⁻¹ para a los 0, 3, 6, 9, 12 y 15 d de almacenamiento en refrigeración a 4 °C de *patties* de pechuga de pollo cocida, de **T1**, 0 mg de CoQ₁₀, **T2**, 100 mg de ME de CoQ₁₀, **T3**, 200 mg de ME de CoQ₁₀ y **T4**, 300 mg de ME de CoQ₁₀ por 100 g de carne. 93
- Figura 2.** Espectros FTIR de *patties* de pechuga de pollo cocida y almacenada en refrigeración a 4 °C, analizada a los 0, 3, 6 9, 12 y 15 d en diferentes niveles de inclusión de esferas de CoQ₁₀. 97

INTRODUCCIÓN GENERAL

Planteamiento del problema

Al paso de los años la carne de pollo ha mostrado un incremento en el consumo a nivel mundial, ocupando México el séptimo lugar en su producción para el año 2014 (UNA, 2015) y el quinto lugar en consumo para el año 2016 (FIRA, 2016). Actualmente se le considera la proteína preferible de los mexicanos debido a su aumento en producción y consumo y a sus precios asequibles. La carne de pollo es rica en aminoácidos esenciales, la mitad de las grasas que contiene son mono insaturadas y solo un tercio de ellas son grasas saturadas, no contienen grasas *trans* y provee de ácidos grasos poliinsaturados como omega-3; 100 g de carne de pollo provee la cantidad recomendada de niacina, vitamina B3 (FAO, 2013). No obstante, la degradación de sus características sensoriales durante el almacenamiento en refrigeración es un problema que aún se encuentra en estudio. Por lo anterior, en los últimos años la industria cárnica utiliza antioxidantes sintéticos y naturales para reducir los efectos de la oxidación; sin embargo, los antioxidantes naturales más utilizados, no son hidrosolubles y tienen limitada actividad antioxidante y los sintéticos tienen posible efecto tóxico en el consumidor. Debido a lo anterior el presente estudio propone el uso de la CoQ₁₀, fuerte antioxidante de naturaleza liposoluble, sintetizado endógenamente y presente en las mitocondrias de las células, microencapsulada por coacervación simple en alginato de sodio -polímero natural obtenido a partir de algas; con el objetivo de mejorar la manipulación y empleo de la CoQ₁₀, así como controlar su liberación una vez incluida en carne de pollo. De esta manera contribuir con la industria avícola de la zona centro del estado de Veracruz, al ofrecer una alternativa de aditivo antioxidante en la conservación de la calidad de la carne de pollo molida, cocinada y almacenada en refrigeración.

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar la acción antioxidante de la Coenzima Q₁₀ (CoQ₁₀) microencapsulada adicionada en carne de pollo.

Objetivos específicos

- Evaluar los principales agentes pro-oxidantes que influyen en la calidad de la pechuga de pollo (*Pectoralis major*).
- Elaborar y caracterizar los microencapsulados de CoQ₁₀, mediante coacervación simple.
- Evaluar la acción antioxidante de los microencapsulados de CoQ₁₀ a diferentes niveles de inclusión en carne de pechuga de pollo molida, cocida y almacenada en refrigeración.

Hipótesis

El uso de la Coenzima Q₁₀ microencapsulada, favorece la estabilidad lipídica y proteica de la carne de pechuga (*Pectoralis major*) de pollo molida, cocida y almacenada en refrigeración para alargar su vida útil.

MARCO TEÓRICO

1.1. Carne de pollo

1.1.1. Consumos y producción de carne de pollo

La producción de carne de pollo a nivel mundial aumenta cada año, para 2018 se superará los 90 millones de ton (USDA, 2018). En México, este crecimiento ha evolucionado 1.4 a 3.4 millones de ton del año 1994 al 2017, con un pronóstico de consumo per cápita de 28.42 kg y un consumo aparente de 23 kg para el año 2018 (UNA, 2018); razón por la cual se considera como la proteína preferida por los mexicanos. El SIAP, (2017) reportó a México como el quinto productor de carne de pollo a nivel mundial, y a los estados de Jalisco, Veracruz, Aguascalientes, Querétaro y Durango como los proveedores del 51.5 % de la producción nacional. Esta producción de carne es de gran importancia debido a la alta participación en el mercado nacional, aportando para el año 2017 el 0.737 % del producto interno bruto (PIB) total, el 23.18% del PIB agropecuario y el 37.22% en el PIB pecuario (UNA, 2018). Con una participación en la producción pecuaria de 34.7 %, por arriba del huevo de 29%, la carne de cerdo de 14.8% y la de res de 19.8 % (UNA, 2018).

Su alto consumo ha sido atribuido a sus precios asequibles y a sus características nutricionales, ya que contiene al aminoácido esencial triptófano el cual actúa como antidepresivo; acompañado de la tirosina, la cual trabaja con serotonina un neurotransmisor que genera una sensación de felicidad y tranquilidad al ser consumido (SIAP, 2017). Colocándola en el puesto número uno en venta y consumo en México (UNA, 2018). No obstante, la carne de pollo es altamente perecedera, debido a la cantidad de agua, las grasas poliinsaturadas y demás componentes que posee, siendo una de las tantas razones por las cuales la industria avícola aplica diversas metodologías de conservación o transformación incluyendo el empaque y embalaje, así como la adición de ingredientes no cárnicos como aditivos naturales o sintéticos para contrarrestar los efectos del deterioro en esta.

1.1.2. Composición bioquímica de la carne

Según la norma NOM-194-SSA1-2004, se le denomina carne, a la estructura muscular estriada esquelética, acompañada o no de tejido conectivo, hueso y grasa; además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos, proveniente de los animales para abasto, que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas; se incluyen las refrigeradas o congeladas. Bioquímicamente, la carne es el resultado de una serie de

transformaciones del tejido muscular por procesos físicos, químicos, bioquímicos y biológicos, posterior al proceso de matanza del animal (Toldrá and Reig, 2006).

El porcentaje promedio de músculo en relación al peso del animal, está en función de la especie, la gordura y su método de obtención, siendo para la pechuga de pollo de un 39 % (Toldrá and Reig, 2006). Del 75 al 92 % del volumen del músculo está formado por fibras musculares, el resto está conformado por tejido, fibras nerviosas y fluido extracelular (Guerrero-Legarreta, 2010).

La carne de pollo es rica en proteínas, no tiene un alto contenido de grasas (Cuadro 1) y más de la mitad de sus ácidos grasos son mono y poliinsaturados (Cuadro 2). Características de la carne de pollo que la hacen muy apreciada por los consumidores (Mozdziak, 2014).

Cuadro 1. Composición de pechuga de pollo, para 100 g de porción comestible

Pieza de pollo	Proteína (g)	Grasa (g)	Colesterol (mg)	Hierro (mg)
Pechuga de pollo, cruda y sin piel	21	3	64	0.4
Pechuga de pollo cruda con piel	21	9	64	0.7
Pierna de pollo, cruda	19	4	91	0.8

Fuente: Mozdziak (2014).

Cuadro 2. Contenido total de lípidos y ácidos grasos en carne de pollo

Pieza cárnica	Lípidos totales (%)	ácidos grasos saturados (%)	ácidos grasos monoinsaturados (%)	ácidos grasos poliinsaturados (%)
Pechuga	0.9	33.5	34.5	32.0
Muslo	2.2	32.2	39.4	28.5
Piel	30.3	30.7	47.8	21.4

Fuente: Tomado de Guerrero-Legarreta (2010), modificado de: Ratnayake *et al.* (1989); Barroleta y Cortinas (2002).

1.1.3. Transformación del músculo a carne de pollo

Los procesos bioquímicos que se generan en el músculo del animal inmediatamente después del proceso de matanza, son críticos para definir la calidad de la carne (Toldrá and Reig, 2006). Estos procesos en conjunto con el manejo previo del animal en granja, el transporte y el acondicionamiento de la canal, definirán la calidad de la carne.

El proceso de transformación de músculo a carne (Figura 1) se lleva a cabo en tres etapas conocidas como *pre-rigor*, *rigor mortis* y *post-rigor*. Previo al proceso de *rigor mortis*, se iniciará el proceso de apoptosis (muerte celular) y con ello diversos cambios bioquímicos, que se verán frenados por cambios de pH, fuerzas iónicas, baja disponibilidad de energía entre otras (Ouali *et al.*, 2006). Según la especie animal, el proceso de matanza contempla un periodo que puede durar de horas a días. En el pollo dicho proceso dura de 2 a 4 h, donde, la canal es sometida a temperaturas de escaldado y refrigeración; y presenta un decremento de pH (Dunn *et al.*, 2000; Mozdziak, 2014); el cual en conjunto con la temperatura de refrigeración tienen una influencia negativa sobre la ternura de la carne (Dunn *et al.*, 2000).

La etapa de *pre-rigor*, ocurre debido al corte de la circulación sanguínea, se produce acidificación (descenso del pH), se gastan las reservas de glucógeno y las fibras pierden su capacidad de contraerse y extenderse; por lo tanto, el tamaño de los sarcómeros disminuye e inicia la instauración del *rigor mortis*. El *rigor mortis* es el resultado de la falla de los mecanismos de la síntesis de ATP, se disminuye el glucógeno y la elasticidad muscular se pierde hasta formar una contracción sostenida, formando el complejo actomiosina, siendo la resolución de la rigidez cadavérica. Así una bajada de pH rápida cuando la temperatura corporal aun es elevada, provoca desnaturalización y disminución de la solubilidad de proteínas y disminución de la CRA. Promueve la condición de calidad conocida como carne pálida suave y exudativa (PSE), el fenómeno opuesto cuando el pH no disminuye, debido a bajo contenido de reserva de glucógeno se genera una condición de carne dura, firme y seca (DFD), con elevada CRA (Hui, Guerrero y Rosmini, 2006). La etapa de *post-rigor* o maduración ocurren cambios bioquímicos y estructurales, resultado de la acción de enzimas que degradan proteínas como la miosina y actina (Hui, *et al.*, 2006). Ouali *et al.* (2006), indican que el ablandamiento de carne se da gracias a la acción de peptidasas endógenas, principalmente de la calpaína, considerada como la principal enzima proteolítica.

1.1.4. Calidad de la carne

La carne debe cumplir con ciertas características de calidad que le permitan ser elegidas por el consumidor, entre estas se encuentra la ternura, el color y la oxidación por mencionar algunas (O'Sullivan, 2017). En carne de pollo, debido a la cantidad de ácidos grasos insaturados y al

contenido de agua la hacen muy susceptible a la oxidación (O’Sullivan, 2017), siendo esto uno de los principales parámetros para determinar la calidad y definir la compra del consumidor. La oxidación de los ácidos grasos poliinsaturados desarrolla rancidez, afecta el color, la calidad nutricional y la textura de la carne (O’Sullivan, 2017).

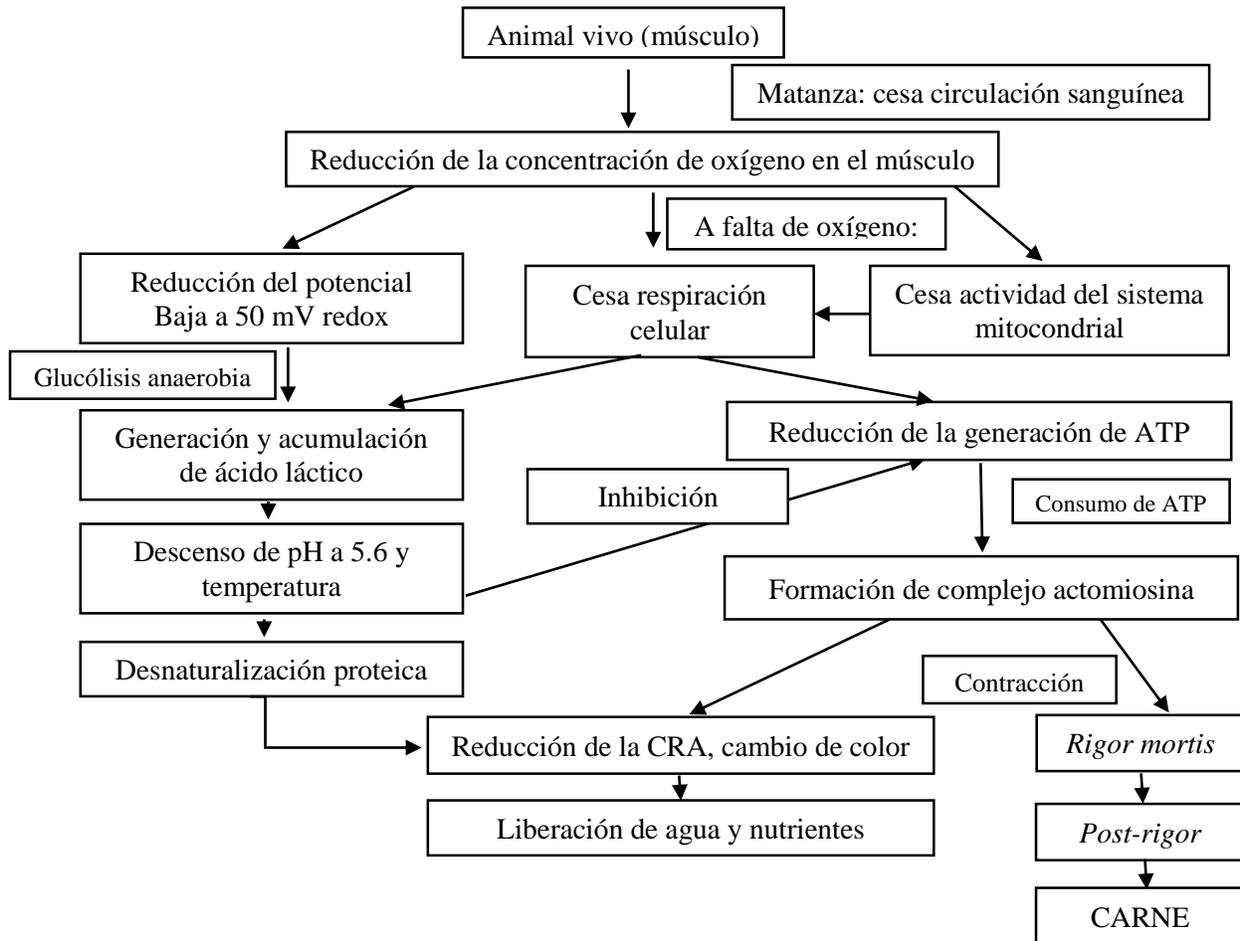


Figura 1. Principales cambios ocurridos en el proceso de transformación de músculo a carne
Fuente: Modificado de Toldrá y Reig (2006)

El color, está influenciado por la oxidación de la carne puede variar con respecto al tiempo, condiciones de almacenaje y procesos para su conservación -debido a los cambios ocurridos en la concentración y estado de la mioglobina (Mb), gracias al grupo hemo, el cual, tiene la capacidad de absorber luz visible, cuando une el oxígeno con enlaces conjugados (Carvalho *et al.*, 2017). La mioglobina, es el principal pigmento de la carne, puede estar presente en sus cuatro estados: oximioglobina, desoximioglobina, carboximioglobina y metmioglobina asociada a la decoloración

de la carne de ave por la oxidación de sus formas ferrosas (Figura 2). Por su parte, los carotenoides (pigmentos amarillos) de la carne de ave están influenciados por factores genéticos, pigmentos suministrados en la alimentación, la salud y procesamiento de la misma (Fletcher, 2002).

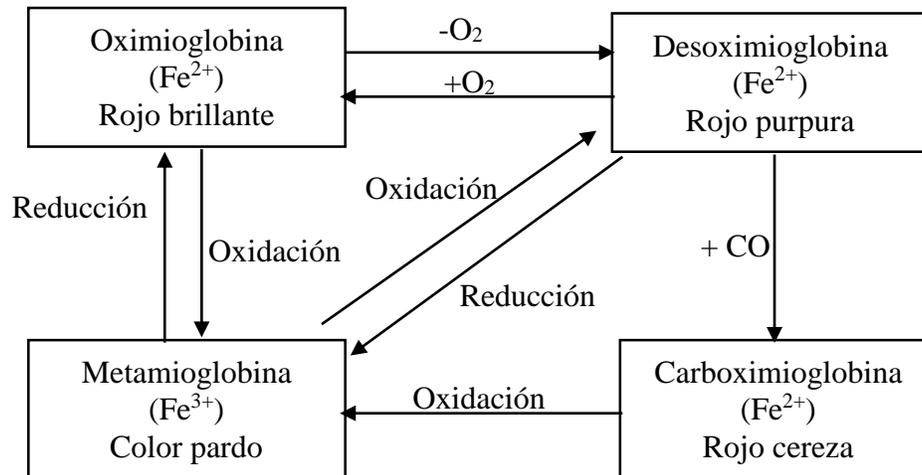


Figura 2. Formas redox de mioglobina en carne de ave

Fuente: Adaptado por Carvalho *et al.* (2017) de Mancini, R.A., Hunt, M.C., 2005.

Los factores que afectan la decoloración y el estrés oxidativo de la carne de ave son el transporte a altas temperaturas, alimentos oxidados, desnutrición y genética del animal; dando carnes en condición PSE y DFD. A la par de la genética del ave como principal factor a considerar en el estrés oxidativo, los climas cálidos y alimentación oxidada (aceites) empeoran este fenómeno, dando lugar a productos con mayores niveles de oxidación (Delles *et al.*, 2014). Durante el faenado las carnes se ven afectadas por la exposición al oxígeno, la reducción de tamaño por despiece, la molienda o deshuesado mecánico, el tipo de empaque, la irradiación y durante su transformación por el uso de altas temperaturas de cocción, el salado, el recalentado y almacenamiento (Estévez, 2015).

Como se mencionó en el apartado 1.1.3., la reducción del pH *post-mortem*, es determinante en la calidad, ya que el tiempo en el que se alcanza el pH final puede ser propiciados por el consumo de glucógeno muscular previo al proceso de matanza, generando problemas en la calidad. Las carnes PSE, se obtienen de bajos valores de pH y se reflejan en una pobre capacidad de retención de agua (CRA), disminución de color y pérdida de firmeza, expresada en la textura de la carne. La condición PSE aparte de generar defectos visuales, ocurre pérdida de funcionalidad proteica y

palatabilidad; además, al perder gran cantidad de agua la producción se ve afectada en rendimiento con disminución de ganancias económicas. La carne con características PSE ha sido descrita en carne de pollo, sin embargo su base biológica no se tiene tan clara, como sucede con la carne de cerdo (Mozdziak, 2014). Barbut (1997) reporta la presencia de carne PSE en siete camadas en un porcentaje de 0 a 28 %, en pollo de engorda, indicando su alta presencia de este defecto de calidad en esta especie.

1.1.5. Reacciones de oxidación de la carne

La rancidez oxidativa o enranciamiento en los alimentos, es una alteración que consiste en una pérdida de calidad alimentaria por la exposición del producto al oxígeno atmosférico, luz o indicios metálicos, entre otros (Andersen *et al.*, 1988; Davies, 2005; Estévez, 2011). Dicha rancidez puede afectar la aceptación del consumidor debido a tres características principalmente; calidad sensorial, nutritiva e higiénica (Estévez, 2017).

La carne de pollo es la más susceptible a los procesos de oxidación, por encima de la carne de res y cerdo, debido no solo a la cantidad de ácidos grasos insaturados, sino también de las enzimas endógenas y la cantidad de hierro hemo y no hemo (Estévez, 2015). Además, el ave es vulnerable al estrés oxidativo debido a la presión de crecimiento rápido a la que es sometido. Por lo tanto, la rancidez oxidativa es uno de los principales factores que limitan la calidad y aceptabilidad de productos cárnicos obtenidos de aves de corral, ya que esta afecta los atributos sensoriales como el sabor y olor (Argyri *et al.*, 2012).

Los diferentes tipos de oxidación que se pueden presentar en los alimentos son hidrólisis química o enzimática, autooxidación, reversión y polimerización, de los cuales la autooxidación es uno de los más problemáticos por las consecuencias degradativas de los lípidos (Cubero *et al.*, 2002) y principal reacción que produce el deterioro de ellos (Guerrero-Legarreta, 2010).

Tanto la oxidación lipídica como proteica juegan un rol esencial en definir la calidad de la carne de pollo, las cuales pueden ser desencadenadas por factores internos y externos, lo cuales son llamados factores pro-oxidantes, pero también pueden ser retardados debido al efecto de antioxidantes igualmente internos o externos, lo cual será explicado en los siguientes apartados.

1.1.5.1. Agentes pro-oxidantes

Los pro-oxidantes internos o externos son aquellas condiciones que aceleran en la carne y sus productos, la oxidación lipídica y proteica, entre ellos se encuentran el procesamiento, almacenamiento, ingredientes añadidos (algunas sales), su concentración, la presión del oxígeno, el calor, la luz, en especial la ultravioleta, las radiaciones, los pigmentos y grado de insaturación de la molécula, algunas enzimas como las lipasas y lipoxigenasas, para finalizar con los metales pesados, principalmente el cobre y el hierro, los cuales facilitan el enranciamiento de los alimentos (Andersen *et al.*, 1988; Davies, 2005; Estévez, 2011; Ladikos and Lougovois, 1990).

Altas concentraciones de oxígeno presente en los empaques de productos cárnicos especialmente molidos o troceados promueven la oxidación de lípidos de manera marcada, debido a que en dichas carnes se ha roto su estructura, exponiendo los lípidos, enzimas, hemo pigmentos e iones metálicos, para dichos procesos de oxidación (Argyri *et al.*, 2012). Los compuestos hemo actúan como pro-oxidantes en el tejido muscular. El hierro es un fuerte catalizador de rancidez oxidativa en carne; en el cocinado de éstas, el calor destruye el hierro hemo incrementando el hierro no hemo el cual es considerado el mayor catalizador (Han *et al.*, 2012).

Además, el calor como método de conservación en la carne tiene en consecuencia una serie de cambios deseables en los atributos sensoriales como: el color, aroma y textura; genera coagulación proteica e inactivación enzimática. Pero el exceso de temperatura puede generar olores y sabores desagradables, debido a la reacción de las proteínas con compuestos de azufre, generado rechazo del consumidor (Guerrero-Legarreta, 2010). Compuestos intermedios de la oxidación lipídica combinada con otros constituyentes generan el sabor de la carne cocida (Ladikos and Lougovois, 1990). La irradiación de la carne provoca reducción del color rojo de la carne de res hacia colores verdes o cafés, que se relacionan con la edad de la carne (Ahn and Nam, 2004). En carne de pollo o cerdo, se relaciona con cambios de color a rosados o grises, olor y oxidación lipídica; pero tiene la ventaja de reducir la carga microbiana, principalmente en productos molidos y la aplicación de ácidos orgánicos, como el ascórbico, reduce su efecto, gracias a que inhibe la oxidación de la mioglobina (Ahn and Nam, 2004).

La oxidación proteica y lipídica provee sustancias pro-oxidantes que generan el cambio de estado de la oximioglobina a metamioglobina (Carvalho *et al.*, 2017). Sin embargo, es de importancia mencionar que la carne de pollo presenta alta capacidad antioxidante, comparada con la carne de res, debido a su baja capacidad para reducir el ion férrico (Min *et al.*, 2010).

1.1.5.2. Oxidación lipídica

Los ácidos grasos insaturados tienen un proceso de oxidación que consta de tres etapas: iniciación, propagación y terminación (Figura 3.), en estas la reacción en cadena de los radicales libres se lleva a cabo hasta formar compuestos no radicales (O'Sullivan, 2017).

Como primer paso, las sustancias reactivas al oxígeno extraen un átomo de hidrógeno de un ácido graso insaturado (RH) para formar un lípido de radical libre (radical alquilo, R•). Especies de radicales, tales como los radicales peroxilo (ROO•) se forman posteriormente por reacción de R• con oxígeno molecular. Estos radicales propagan la reacción a un RH vecino produciendo un hidroperóxido (ROOH) y un nuevo R•. Eventualmente, las especies radicales encuentran estabilidad en los pasos de degradación sucesivos que conducen a la formación de compuestos de peso molecular no radicales (Carvalho *et al.*, 2017).

Por tanto, el fenómeno de rancidez oxidativa (por autooxidación) inicia debido a la presencia de radicales libres y termina donde el material graso oxidable ha sido consumido en su totalidad, y provoca en el alimento, cambios en el flavor, desarrollo de aromas y sabores rancios; cambios de coloración, textura, pérdida de nutrientes, vitaminas A, D, E, ácidos grasos esenciales y generación de residuos con potencial tóxico (Cubero *et al.*, 2002). Esta reacción inicia con un activador o pro-oxidante el cual genera radicales libres, los cuales en un primer momento no tienen sabor ni olor, pero son muy inestables, reaccionando rápidamente para dar lugar a reacción en cadena o fase de propagación (Cubero *et al.*, 2002). Entre los principales ácidos insaturados presentes en los lípidos de los tejidos animales se encuentran el ácido oleico, linoleico, linolénico y araquidónico, su autooxidación da lugar a una serie de hidroperóxidos, los cuales por diferentes vías de descomposición da lugar a compuestos volátiles (Ladikos and Lougovois, 1990).

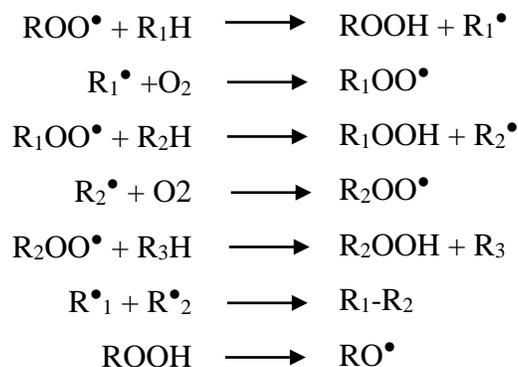


Figura 3. Reacción en cadena de oxidación de ácidos grasos
Fuente: Tomado de Carvalho *et al.* (2017)

La oxidación de lípidos es un proceso complejo mediante el cual los ácidos grasos insaturados reaccionan con el O₂ molecular a través de radicales libres y forman peróxidos u otros productos primarios de oxidación (Argyri *et al.*, 2012). Los productos de oxidación secundarios, como los aldehídos, las cetonas y los ésteres, son responsables del mayor deterioro y del sabor rancio durante el almacenamiento congelado (Pérez-Chabela, 2007). Lin *et al.* (1989) encontraron que la carne de ave alimentada con dietas ricas en ácidos grasos poliinsaturados es más propensa a la oxidación, y se desarrolla más rápidamente según a la pieza cárnica, ya que en el estudio se observó que la pierna presentó mayor oxidación que la pechuga.

Diversos compuestos volátiles como alcoholes y carbonilos, resultan de la oxidación lipídica, de manera abundante en aves. Donde los aldehídos como el hexanal, el malondialdehído (MDA) y el 4-hidroxi-2-trans-nonenal (4-HNE) se usan comúnmente como indicadores de oxidación lipídica (Ladikos and Lougovois, 1990). Siendo la técnica más usada para medir la degradación lipídica la detección de malondialdehído (Ladikos and Lougovois, 1990).

1.1.5.3. Oxidación proteica

Las proteínas son el resultado de la conformación de sus estructuras secundarias y terciarias. Agentes externos como soluciones salinas, solventes orgánicos, calor y frío, pueden resultar en modificaciones de estas estructuras, afectando la solubilidad, la capacidad de unión de agua, pérdida de actividad biológica, principalmente enzimática, exposición de enlaces pépticos susceptibles a afectación por proteasas (Guerrero-Legarreta, 2010).

Tanto lípidos como proteínas son susceptibles a oxidación por ROS y RNS, sin embargo, su cinética y química son distintas (Davies, 2005).

El radical hidroxilo generado en el sacrificio del animal reacciona primero con aminoácidos de poca importancia biológica como una forma de protección de lípidos insaturados y biomoléculas (Davies, 2005). Una forma de antioxidante. Una vez consumidos estos aminoácidos se puede dar inicio a la degradación lipídica y proteica. La oxidación proteica se desencadena a partir del ataque de radicales e hidroperóxidos formados en la oxidación de ácidos grasos (Figura 3) a cadenas de aminoácidos susceptibles (Carvalho *et al.*, 2017; Ladikos and Lougois, 1990). Se inicia por reacciones del radical hidroxilo (OH^\bullet); sin embargo, el curso del proceso de oxidación está determinado por la disponibilidad del oxígeno (O_2) y del radical anión superóxido (O_2^\bullet) o de su forma protonada (HO_2^\bullet) (Figura 4). En la cual, los PH (AA susceptibles, grupos funcionales), reacciona con OH^\bullet , para formar radicales de proteínas (P^\bullet) que se convierte consecutivamente en radical peróxido (POO^\bullet) en presencia de oxígeno y en un peróxido de alquilo (POOH), por extracción de átomos de hidrógeno de otra molécula susceptible (PH) (Figura 4., reacciones 1, 2, 3). Reacciones como el radical HO_2^\bullet o con formas reducidas de metales de transición (M^{n+1}) como Fe^{2+} o Cu^+ conducen a la formación de un radical alcoxilo (PO^\bullet) (Figura 4., reacciones 4 y 5) y su derivado hidroxilo (POH) (Figura 4., reacciones 6 y 7). Como ejemplo, la metionina da lugar a la formación de sulfóxido de metionina, el triptófano a cinurenina y la oxidación de aminoácidos alcalinos como lisina, arginina y prolina a formación de carbonilos proteicos (Stadtman, 1992). La pérdida de triptófano (TRP) y tioles, se considera el primer evento que indica oxidación proteica de la carne y la formación de enlaces cruzados y presencia de carbonilos como etapas más avanzadas (Soladoye *et al.*, 2015). Esta formación de enlaces cruzados (Disulfuro y ditrosinas) se consideran resultantes de la oxidación de cisteína y tirosina (Stadtman, 1992). La degradación oxidativa del triptófano ha sido atribuida a la acción de radicales libres hidroxilo, la reacción con otros radicales y el anillo pirrol, esto también se ha atribuido al estrés oxidativo y se considera una pérdida importante de nutrientes (Villaverde *et al.*, 2014).

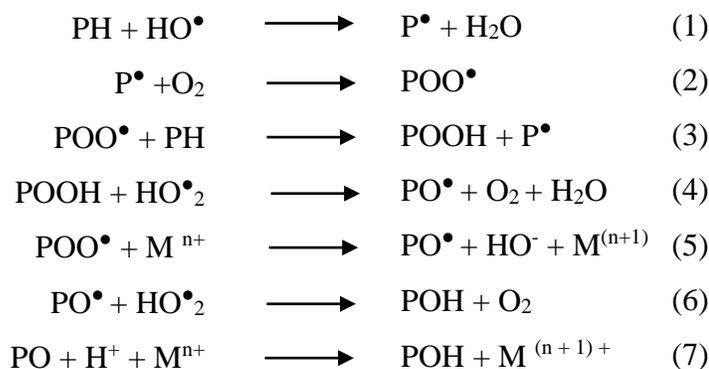


Figura 4. Reacciones de oxidación proteica debidas a ROS
Fuente: Tomado de Estévez (2011)

La depleción de componentes proteicos, tales como tioles y TRP residuos, implica la degradación de aminoácidos esenciales y la pérdida de valor nutricional. La carbonilación de proteínas se ha descrito como una de las expresiones más notables del daño oxidativo de las proteínas en los sistemas biológicos y alimentarios (Estévez, 2011). Se han observado carbonilos de proteínas y enlaces cruzados vinculados a la pérdida de funcionalidad en las proteínas miofibrilares, la digestibilidad alterada de las proteínas cárnicas, y una mayor dureza en el caso de carne de cerdo y de vacuno. Sin embargo, en un entorno pro-oxidativo, el nitrito puede producir especies de nitrógeno reactivo (RNS), como óxido nítrico y peroxinitrito, que pueden iniciar tanto la oxidación como la nitración de proteínas. El estrés nitrosativo en las proteínas conduce a la formación de productos específicos, como 3-nitrotirosina (Villaverde *et al.*, 2014).

En pechuga de pollo, cambios bioquímicos ocurridos durante la oxidación proteica son medidos por la cuantificación de grupos carbonilo y sulfidrilo, indicando oxidación proteica cuando se encuentran altos los contenidos de grupos carbonilo y baja la concentración de los grupos sulfidrilo (Park *et al.*, 2006). Una forma de medir esta carbonilación, es mediante la cuantificación de dinitrofenilhidracina (DNPH), método más común para medir la oxidación proteica en sistemas cárnicos (Estévez, 2011). Metodologías instrumentales que permiten dar información acerca de la estructura terciaria de las proteínas son la cristalografía de rayos X y la espectroscopia de Resonancia Magnética Nuclear (RMN). Así como la Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), siendo esta técnica relativamente sencilla en aplicación, dando información de la estructura secundaria de las proteínas (Doglia *et al.*, 2008).

1.2. Antioxidantes

Según el acuerdo para el uso de aditivos publicado en el Diario de la Federación y de cumplimiento obligatorio en México, se denomina agente antioxidante a aquellas sustancias que prolongan la vida de almacén de los productos, protegiéndolos del deterioro ocasionado por la oxidación. O'Sullivan (2017) define a los antioxidantes como aquellos compuestos que retardan la generación de radicales libres mediante la donación de electrones los cuales dan lugar a la oxidación lipídica y proteica. Son aditivos que se usan para frenar la alteración de los alimentos (Cubero *et al.*, 2002). La aplicación de compuestos antioxidantes en la carne, contribuyen a mantener su calidad durante su almacenamiento y en el procesamiento de los productos cárnicos; son una alternativa para mantener por mayor periodo de tiempo en condiciones óptimas para su consumo y con las características de calidad y sensoriales adecuadas para su venta. Existen antioxidantes de tipo sintético y natural y de naturaleza hidrosoluble y liposoluble; que contribuyen a definir su uso y las condiciones de operación de los productos cárnicos. Compuestos antioxidantes de origen natural se emplean en los alimentos, como la carne de pollo, con la restricción de no superar el 0.02% de su peso graso (Nieto *et al.*, 2013).

Los antioxidantes actuar por mecanismos de detención de la reacción en cadena de oxidación de las grasas, eliminando el oxígeno, en el producto o envase que lo contiene y eliminando trazas de diferentes metales como el cobre y el hierro; esto lo logran a costo de inactivarse ellos mismos, por lo que funcionan retrasando la oxidación, pero no evitándola en forma definitiva (Cubero *et al.*, 2002). La elección del antioxidante estará en función de factores como el potencial antioxidante, el cual generalmente se completa con el uso de antioxidantes sinérgicos; el coeficiente de reparto, cuando coexisten la fase grasa y la fase acuosa reduciendo la actividad del antioxidante; el tipo de aplicación, ya sea directa por disociación previa, pre-dilución previa del producto, mediante dosificador, pulverización, o aplicándolo en el material de embalaje; aquellos antioxidantes con tendencia a la decoloración de productos, en función de la acidez y alcalinidad del producto; así como la humedad y temperatura (Cubero *et al.*, 2002).

1.2.1. Antioxidantes endógenos

Los antioxidantes endógenos son aquellos que se encuentran naturalmente en la carne, entre los cuales se puede mencionar al α -tocoferol, L-carnitina, carnosina, anserina, enzimas (superóxido dismutasa, catalasa, glutatión peroxidasa), las proteínas de transporte y almacenamiento

(transferrina, lactoferrina y ceruloplasmina), la coenzima Q₁₀, entre otros. Antioxidantes como la vitamina C, E, polifenoles y carotenoides son insolubles en sistemas acuosos y tiene baja capacidad antioxidante por lo que el uso de péptidos antioxidantes se encuentra en estudio (Nieto *et al.*, 2013). L-carnitina es un péptido antioxidante, disminuye la aparición de ácido láctico y acelera la degradación de grasas al aumentar la función mitocondrial. La carnosina y anserina abundantes en la carne protege frente al estrés oxidativo tienen función quelante y actúan cediendo un electrón a los radicales libres más rápido que otras moléculas. La anserina es particularmente abundante en la carne de pollo (Nieto *et al.*, 2013). El glutatión, por su parte, es un péptido antioxidante que se encuentra en productos cárnicos, tiene efecto reductor, protege a las células de procesos toxicológicos y patológicos, previniendo enfermedades crónicas, se cree que es el responsable de aumentar la absorción de hierro no hemo de otros alimentos a la carne (Nieto *et al.*, 2013).

1.2.1.1. Coenzima Q₁₀

La CoQ₁₀, participa en la cadena de transporte de electrones en la síntesis de ATP, se encuentra en las células principalmente en las mitocondrias (Purchas *et al.*, 2004), es de naturaleza liposoluble y la única en su clase, sintetizada endógenamente. En la naturaleza se presenta en dos formas ubiquinol y ubiquinona. Está formada por una cola lipídica de unidades isoprenoides, haciéndola extraordinariamente hidrófoba y una cabeza quinona que participa en los procesos de óxido-reducción (Stefely and Pagliarini, 2017) (Figura 5). En la industria cosmética y médica se ha utilizado ampliamente, ya que atrapa radicales libres retardando el estrés oxidativo (Crane, 2001). El contenido de CoQ₁₀ en humanos disminuye al paso del tiempo (Crane, 2001); siendo su principal fuente a través del consumo de carne de aves (Weber *et al.*, 1997). Sin embargo, el contenido de ésta en la carne de pollo (pierna) es relativamente baja de 17 µg g⁻¹ (Weber *et al.*, 1997). Su consumo en humanos está recomendado en una dosis de 100-200 mg al día (Tobin *et al.*, 2014), pero se ha probado en dosis de 2400 mg/día sin efectos dañinos en la salud (Hyson and Shoulson, 2010).

Petillo y Hultin (2008) indican que la función antioxidante es posible en la forma oxidada de la CoQ₁₀, como eliminador de radicales libres. Asimismo, Bracco *et al.* (1993) indicó que la CoQ₁₀, en su forma ubiquinona, es más efectiva retardando la oxidación de ácidos grasos que contienen más de dos dobles enlaces. Entre las funciones de la ubiquinona está el transporte de protones a

través de la membrana durante el ciclo de óxido-reducción (Cabrini *et al.*, 1986), tiene función antioxidante tanto en su forma reducida, como oxidada.

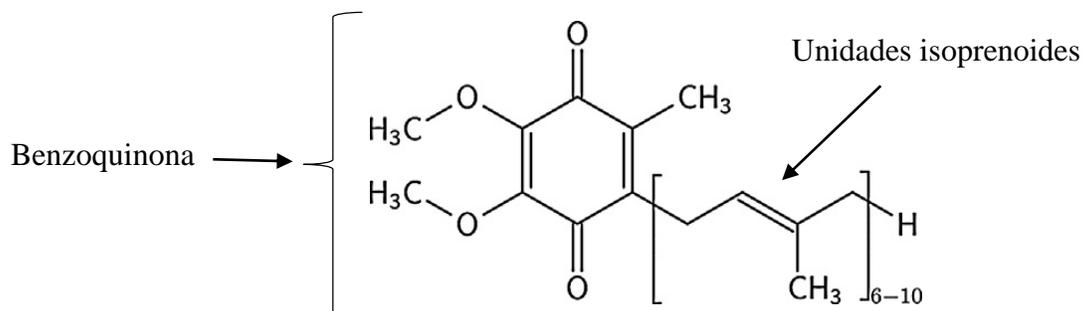


Figura 5. Estructura química de la Coenzima Q₁₀ (CoQ₁₀)

La ubiquinona actúa como antioxidante endógeno al proteger membranas y ADN mitocondrial contra daño oxidativo (Lucangioli *et al.*, 2016) y protege lipoproteínas contra el daño causado por radicales libres (Mattila and Kumpulainen, 2001).

1.2.2. Antioxidantes exógenos

1.2.2.1. Antioxidantes naturales

Entre los antioxidantes naturales que se han utilizado en productos cárnicos se encuentra el ácido ascórbico, tocoferoles, ácido eritorbico, eritorbato de sodio, vitamina E (O'Neill *et al.*, 1999), y una amplia gama de productos de naturaleza orgánica que se han probado y obtenido compuestos activos del romero, sabio, soja, cáscara de cítricos, aceitunas, uvas (Namiki, 1990); así como pimentón y ajo (Aguirrezábal *et al.*, 2000), catequinas (Tang *et al.*, 2001), carnosina (Djenane *et al.*, 2004; Hipkiss, 2009) y muchos otros. Los cuales han sido una alternativa para antioxidantes sintéticos, debido a su efecto de inhibición en la oxidación lipídica. En donde la coenzima Q₁₀, antioxidante natural liposoluble y la única en su clase sintetizada endógenamente, ha tenido pocos estudios acerca de su aplicación en alimentos.

1.2.2.2. Antioxidantes sintéticos

Entre los antioxidantes sintéticos podemos mencionar al BHA (Butilhidroxianisol), el cual se presenta como una mezcla de dos isómeros 3-terbutil-hidroxianisol y 2-terbutil-hidroxianisol, este antioxidante se funde de 48 a 65 °C, es ligeramente volátil, insoluble en agua, y soluble en

propilenglicol, aceites vegetales y parafina. Su acción antioxidante se da en una concentración de 0.02% y se usa preferiblemente en grasas animales. El antioxidante más utilizado gracias a su alta eficacia y resistencia a cambios de pH, además de su sinergismo con otros antioxidantes. El Butil hidroxitoluol (BHT), se le considera más efectivo en grasas animales que aceites vegetales; actúa mayormente en grasas con mayor contenido de ácidos grasos de cadena corta y tiene actividad microbiana contra *C. botulinum* y *S. aureus*. Sin embargo, estos antioxidantes han sido cuestionados en relación a sus posibles efectos tóxicos en los seres humanos (Moure *et al.*, 2001) Los antioxidantes añadidos a los productos cárnicos son regulados por organismos nacionales e internacionales, en México la aplicación de estos está regulada por el acuerdo para el uso de aditivos el cual indica los límites permisibles para su aplicación, en el Cuadro 3 se enlista los aditivos regulados.

Cuadro 3. Aditivos antioxidantes regulados en México según el acuerdo para el uso de aditivos

Antioxidante	Producto	Límite máximo	Observaciones
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Butilhidroquinona terciaria ▪ Butilhidroxianisol 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Producto cárnico cocido ▪ Producto cárnico curado y madurado ▪ Productos cárnicos secos, desecados 	100 mg kg ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niveles en relación con el contenido de grasa ▪ Únicamente en la cubierta ▪ Niveles en relación con el contenido de grasa ▪ Niveles en relación con el contenido de grasa
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tartratos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Producto cárnico cocido ▪ Producto cárnico curado crudo ▪ Producto cárnico curado y madurado ▪ Productos cárnicos secos o desecados ▪ Productos cárnicos marinados o en salmuera 	2,400 mg kg ⁻¹	

Fuente: Basada en el acuerdo para el uso de aditivos publicado en el Diario Oficial de la federación el 16 de julio de 2012

1.3. Procesos de encapsulación

La microencapsulación de compuestos como tecnología, es el proceso de recubrimiento de compuestos bajo la forma de moléculas, partículas sólidas o glóbulos líquidos, con materiales de distinta naturaleza para obtener partículas sólidas de tamaño micrométrico (Gharsallaoui *et al.*, 2007; Gibbs *et al.*, 1999). El cual recibe el nombre de microesfera o microcápsula (Figura 6).

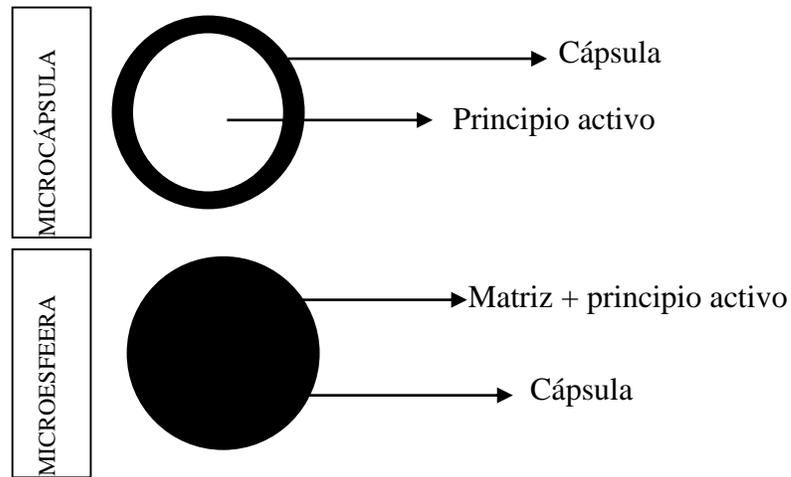


Figura 6. Microesferas versus microcápsulas

La microcápsula da como resultado cápsulas con una especie de reservorio cubierto por una fina capa de material; mientras que las ME el principio activo se encuentra altamente disperso bajo la forma de diminutas partículas o moléculas en un matriz del material que puede ser el mismo que el del recubrimiento (Lupo-Pasin *et al.*, 2012). Obtener una u otra depende del material, del principio activo y de la metodología elegida para su elaboración (Gharsallaoui *et al.*, 2007). Según Gibbs, Kermasha, Alli, y Mulligan (1999), las microcápsulas pueden ser esféricas o irregulares en estructura, tener una o múltiples membranas o incluso núcleos, la matriz puede ser el mismo material de encapsulación o una combinación de varios (Figura 7).

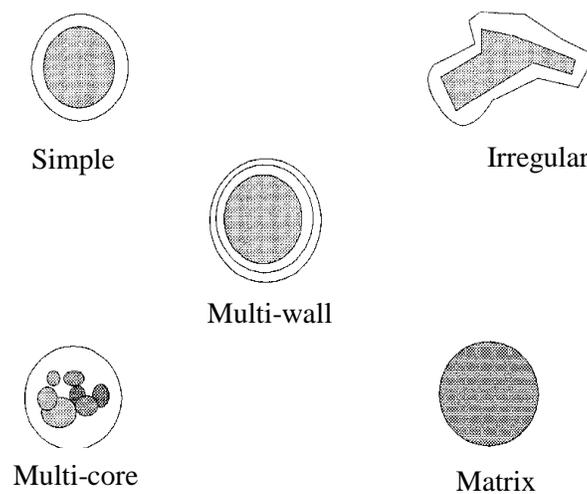


Figura 7. Morfología de diferentes tipos de microcápsulas
Fuente: Tomado de Gibbs *et al.* (1999).

Existen muchas técnicas de microencapsulación pero sus funciones se centran en la formación de una pared alrededor del componente activo, asegurar que no existan fugas y asegurar una separación con los componentes no deseados del exterior (Gibbs *et al.*, 1999).

1.3.1. Metodologías de encapsulamiento

Existen muchas metodologías para microencapsular compuestos, siendo su objetivo principal el de mejorar la viabilidad de los compuestos, solubilidad y aplicabilidad (Gómez *et al.*, 2018). El estudio de ellas se ha enfocado en proteger compuestos funcionales de daños del medio circundante, mejorar su biodisponibilidad, como herramienta para una mejor manipulación, almacenamiento y transporte de los compuestos núcleos (Yáñez *et al.*, 2005). El compuesto encapsulado puede ser llamado fase central, de relleno, activa, interna o de carga útil, mientras que el encapsulante, generalmente se llama capa, membrana, carcasa, cápsula, material de soporte, fase externa o matriz (Devi *et al.*, 2017).

La industria alimentaria, buscan mantener o mejorar las características de los alimentos, mediante el uso de aditivos con miras hacia nuevos productos naturales, funcionales e innovadores, con mayores periodos de vida útil y características nutricionales potencializadas. Debido a ello las técnicas de encapsulamiento como lo son liposomas, nanoliposomas, coacervación simple y compleja, secado por aspersion, extrusión, recubrimiento por aspersion, polimerización interfacial e inclusión molecular, han sido probadas (Madene *et al.*, 2006; Yáñez *et al.*, 2005). La metodología elegida, en cada proceso, es la respuesta hacia los requerimientos del componente activo, tamaño de partícula, propiedades del agente encapsulante, aplicación del encapsulado, mecanismo de liberación, costos, entre otros (Yáñez *et al.*, 2005). (Madene *et al.*, 2006) generaron un esquema de algunos de estos procesos de encapsulación y se ilustran en la Figura 8.

Diferentes ingredientes naturales y funcionales han sido encapsulados, mediante el empleo de diversas metodologías o polímeros con capacidad de formar recubrimientos. Entre las razones para generar este proceso es precisamente mantener el compuesto viable y estable por un mayor periodo de tiempo, hacerlo más biodisponible y mantenerlo hasta que es añadido a los alimentos para realizar su función. Se han encapsulado diferentes compuestos entre los cuales los que presentan capacidad antioxidante han sido de los más probados. Por otro lado, la técnica de

espectrofotometría FTIR es ampliamente utilizada para determinar el grado de interacción entre el polímero y los componentes del coacervado y encapsulado (Devi *et al.*, 2017).

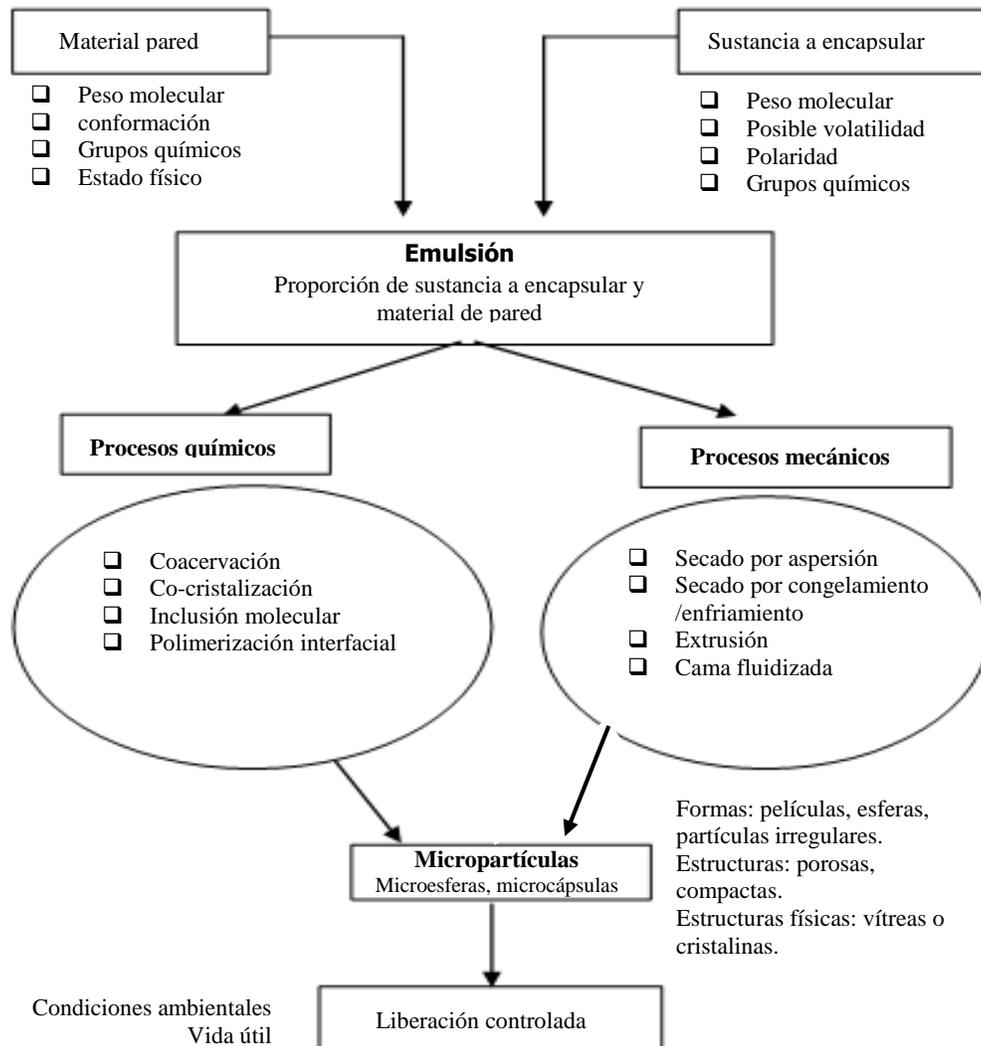


Figura 8. Esquema de diferentes procesos de encapsulación de compuestos bioactivo
Fuente: Tomado de Madene *et al.* (2006)

Liposomas

La encapsulación por liposomas hace posible inmovilizar compuestos de naturaleza hidrofílica, pero también hidrofóbica; sin embargo, se presenta mayor eficiencia de encapsulación en las primeras y cuando se utilizan solventes orgánicos el uso de estas cápsulas es limitado en el área de alimentos (Yáñez *et al.*, 2005).

Coacervación

La coacervación es la metodología de encapsulamiento conocida como la metodología madre, es una solución coloidal a la cual se le ha realizado un cambio de pH, temperatura o la adición de una sal iónica (Madene *et al.*, 2006). Las soluciones coloidales se forman por biopolímeros como pueden ser alginatos, carrageninas, algunas gomas, grenetina, etc., .En soluciones acuosas, se depositan como recubrimiento o pared de ingredientes activos para formar microencapsulados, que proporcionan una cobertura que puede ser solidificada, ya sea por temperatura o por entrecruzamiento molecular (Yáñez *et al.*, 2005).

Coacervación compleja

Para la coacervación compleja involucra dos polímeros con carga opuesta, para generar el coacervado que formará la pared del material a encapsular (Yáñez *et al.*, 2005). Se ha usado la gelatina y la goma arábiga juntas, ya que a un pH bajo, cada una tiene una carga opuesta, lo que provoca la atracción y la formación de un complejo insoluble (Gibbs *et al.*, 1999).

Coacervación simple

La coacervación simple involucra solo a un polímero (Madene *et al.*, 2006) que genera entrecruzamiento molecular o solidificación por un cambio en el ambiente de la solución (Yáñez *et al.*, 2005), como lo sería la adición de una sal de calcio. Por lo tanto, implica la adición de agentes fuertemente hidrofílicos (Madene *et al.*, 2006), ya que el material pared o coacervado se depositará alrededor de la partículas dispersas insolubles, dispersas en algún líquido y formará las cápsulas, por medio de una gelificación (Madene *et al.*, 2006).

1.3.2. Materiales utilizados en los procesos de encapsulación

Los procesos de encapsulación utilizan polímeros del griego *Polys* (muchos) + *meros* (parte). Molécula muy grande repetida de muchas unidades moleculares pequeñas (monómeros), generalmente orgánicas, unidas entre sí por enlaces covalentes y que se forman por reacciones de polimerización. Se pueden clasificar según su origen principalmente en sintéticos y naturales.

Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos son aquellos que se obtienen industrialmente, mediante polimerización; entre los más utilizados se encuentra el poliuretano, poliurea, poliamidas, resinas fenol-formaldehído, resinas melanina-formaldehído (Lopretti *et al.*, 2007).

Los poliésteres han sido atractivos para aplicaciones biomédicas debido a su facilidad de degradación por la hidrólisis principalmente no enzimática de los enlaces éster a lo largo del esqueleto (Hacker *et al.*, 2019). En alimentos se ofertan polímeros como ésteres de brea, bajo el nombre comercial de AMBERYL GR – 720, la cual es una resina fabricada a base de brea, esterificada con glicerina para grado alimenticio. Se caracteriza por ser termoplástica; por tener menor acidez, así como un punto de ablandamiento mayor al de la brea, para la elaboración de gomas, chicles masticables o hinchables. Según su ficha técnica.

Polímeros naturales

Los hidrocoloides engloban a sustancias naturales poliméricas que son solubles o dispersantes en agua, considerándose como fibras solubles. El término hidrocoloide se aplica principalmente a sustancias de composición polisacárida, pero también incluye almidones y algunas proteínas como la gelatina, coloquialmente conocidas como gomas (Cubero *et al.*, 2002; (Madene *et al.*, 2006) Algunos polímeros naturales empleados en la elaboración de cápsulas, son los carragenatos, alginatos, la quitosana, gomas como la arábica y xantana, pectinas, celulosa y gelatinas (Gibbs *et al.*, 1999; Madene *et al.*, 2006; Parra, 2010), los cuales son usados en función de las características del proceso empleado y del compuesto que se desea encapsular.

1.3.3. Alginato de sodio

El alginato en su forma sódica, es un hidrocoloide que es extraído de algas, y el cual en soluciones coloidales generan entrecruzamiento molecular con iones de calcio (Yáñez *et al.*, 2005), en un arreglo que es conocido como “modelo de la caja de huevo”. La gelificación se lleva a cabo en condiciones controladas y en presencia de iones divalentes, donde el Ca^{2+} es capaz de combinarse con dos grupos funcionales COO^- , que se encuentran libres en la molécula de alginato. También es posible la unión del calcio con grupos hidroxilos (OH), siendo estas uniones de carácter secundario (Cubero *et al.*, 2002). Provee una efectiva, segura y barata forma de atrapar compuestos funcionales de uso en la industria cosmética, médica y de alimentos (Durante *et al.*, 2012). Al encapsular compuestos lipídicos retarda su oxidación, con mayor eficiencia cuando además se conservan a la oscuridad y en refrigeración (Durante *et al.*, 2012).

Factores que determinan a estabilidad del gel de alginato

Los mecanismos de liberación del componente activo pueden ser relativamente controlados por cuestiones como la permeabilidad de la membrana, que funciona como pared, por la concentración de la misma y su solubilidad en el medio circundante, los esfuerzos de cizalla, las temperaturas a las que son expuestos, las reacciones tanto químicas como enzimáticas y los cambios de presión osmótica (Yáñez *et al.*, 2005).

La formación de geles por alginato es compleja, debido a ello se deben tener ciertas consideraciones como conocer la relación entre alginato, sal cálcica y en su caso secuestrante, los cuales controlan el proceso de gelificación y solubilidad (Cubero *et al.*, 2002). A mayor concentración de alginato, se obtienen geles más firmes, pero con la posible presencia de texturas extrañas; si el alginato es de alta viscosidad se aumenta la fuerza del gel y se reduce la sinéresis (Cubero *et al.*, 2002). Para la sal cálcica a mayor concentración dará lugar a geles más firmes y granulados, si es baja, el gel será más débil o no habrá formación o provocará un aumento de viscosidad, si la proporción es estequiometría, se obtendrán geles con tendencia a la sinéresis (Cubero *et al.*, 2002).

Estequiometricamente se requiere de 7.2 % de calcio (basado en el peso del alginato de sodio) para una sustitución completa; sin embargo, con 2.2 % de calcio se logra la formación del gel. Para los secuestrantes, si se añaden en concentraciones altas, se propicia un retardo en la formación del gel o si la concentración es muy baja, la interacción ocurrirá rápidamente, dificultando la óptima solubilización del alginato (Cubero *et al.*, 2002). Por lo que de manera general se deben considerar a los siguientes factores ya que afectan el comportamiento del gel: temperatura; a altas temperaturas la energía es tanta, que se dificulta la alineación de la molécula para la formación del gel. La viscosidad es directamente proporcional a la temperatura, 5 °C reducen 12 % de esta (Cubero *et al.*, 2002). Al disminuir la temperatura la viscosidad aumenta y tras un proceso de congelación y descongelación se mantiene la viscosidad inicial. Un pH ácido aumenta la viscosidad, llegando a gelificar en un valor de 5 dependiendo de la concentración de iones de calcio. A pH de 3 y 3.5 el alginato es insoluble y precipita en forma de ácido algínico (Cubero *et al.*, 2002). Un pH superior a 10, da lugar a una bajada de viscosidad por despolimerización ya que se rompe el enlace beta. Presencia de proteínas, a un pH ácido y temperatura suave los alginatos

pueden desnaturalizar proteínas. Y azúcares, ya que altos niveles de azúcares solubles debilitan el gel (Cubero *et al.*, 2002).

1.4. Estado del arte: Coenzima Q₁₀ naturaleza química, estructura y funciones de importancia en la industria de los alimentos.

Resumen

La coenzima Q₁₀ ha sido utilizada en los últimos años debido a su capacidad para transportar electrones, controlando el incremento de sustancias reactivas al oxígeno (ROS), las cuales son responsables del estrés oxidativo. La coenzima Q₁₀ se encuentra presente en las células eucariotas de animales, plantas y en levaduras, y se ha estudiado su efecto como compuesto funcional en productos de la industria de cosmética, médica y de alimentos. Químicamente la Q₁₀ es de naturaleza liposoluble producido endógenamente, presenta baja solubilidad y gran capacidad antioxidante, contribuye además en la regeneración del α -tocoferol. Diversos estudios demuestran cómo mejorar su solubilidad y biodisponibilidad, evitando su degradación o pérdida al pasar por el tracto gastrointestinal, por lo que algunos métodos de microencapsulación se han evaluado para la adición de la coenzima a matrices alimentarias, mejorando la estabilidad oxidativa, reduciendo la oxidación por exposición al oxígeno, evitando grandes pérdidas por degradación en la digestión y exposición a tratamientos térmicos.

Palabras clave: Coenzima Q₁₀, compuesto funcional, antioxidante.

1.4.1. Introducción

Las coenzimas son moléculas orgánicas no proteicas responsables de transferir grupos químicos entre enzimas y generar energía en el cuerpo. Existen diversas coenzimas, algunas son consideradas vitaminas y derivados y otras no vitaminas, entre las que se encuentra la Q₁₀, la cual es responsable de transportar electrones (Stefely and Pagliarini, 2017).

La actividad antioxidante de la coenzima Q₁₀ en su estado reducido es bien conocido en la cadena de transporte de electrones y fosforilación oxidativa al contribuir en la síntesis de ATP, reacción que se lleva a cabo en las mitocondrias de las células animales (eucariotas), en mayor medida en carnes rojas de metabolismo oxidativo (Purchas and Busboom, 2005); así como en algunas células vegetales y levaduras (Turunen *et al.*, 2004). Siendo la carne de res una de las fuentes principales en el consumo humano de la Q₁₀ (8-203 $\mu\text{g g}^{-1}$), el pescado (4-27 $\mu\text{g g}^{-1}$) y la carne de ave (17 $\mu\text{g g}^{-1}$).

g⁻¹) (Weber *et al.*, 1997). La coenzima Q₁₀ es conocida como ubiquinona (en su forma oxidada) o ubiquinol (en su forma reducida), se encuentra omnipresente en las células (Reig *et al.*, 2015), es de naturaleza liposoluble y la única en su clase producida endógenamente (Balakrishnan *et al.*, 2009; Miles *et al.*, 2002) , protege el ADN mitocondrial contra daños oxidativos e inhibe la peroxidación lipídica (Lucangioli *et al.*, 2016), su nomenclatura química es 2,3-dimetoxi-5-metil-6-decaprenil-1,4-benzoquinona. La Q₁₀ se sintetiza a partir de la tirosina y la cadena de isoprenoides a partir del Acetil-CoA, tiene un peso molecular de 863.34 g mol⁻¹ en su forma oxidada y una solubilidad en agua menor a 0.0001 mg L⁻¹ (Balakrishnan *et al.*, 2009; Xia y Xu, 2006) y de 865.36 g mol⁻¹ en su forma reducida, su fórmula molecular es C₅₆H₉₀O₄ y C₅₆H₉₂O₄ respectivamente. La Q₁₀ se presenta en color amarillo y blanco para ubiquinona y ubiquinol, respectivamente y su estructura química se encuentra presentada en la Figura 9.

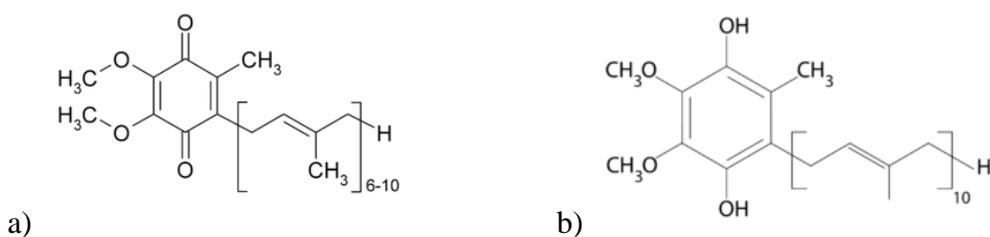


Figura 9. Estructura química de la coenzima Q₁₀. La Q corresponde al grupo quinona y el 10 al número de unidades isoprenoides. a) ubiquinona (en forma oxidada) y b) ubiquinol (en forma reducida)

La forma reducida de la Q₁₀ presenta oxidación rápida al exponerla al aire, debido a esto la encapsulación es un proceso tecnológico que ha sido utilizado para protegerla de estos cambios y mejorar su biodisponibilidad.

1.4.2. Funciones de la coenzima Q₁₀

Entre las funciones principales de la coenzima Q₁₀ se encuentra el transporte de electrones en la membrana mitocondrial para la síntesis de ATP, transporta electrones extra-mitocondrial (membranas plasmáticas y lisosomas), se sintetiza endógenamente y es de naturaleza liposoluble (Jazbec *et al.*, 2009), interviene en la permeabilidad (regulación de los poros) mitocondrial, activa proteínas de desacoplamiento mitocondrial, regula propiedades fisicoquímicas de las membranas, mejora el desequilibrio de la biodisponibilidad de sustancias activas de origen endotelial

(disfunción endotelial), introduce enlaces disulfuro (en bacterias), oxida sulfuro (en levaduras) (Turunen *et al.*, 2004). La coenzima Q₁₀ contribuye a la generación de α -tocoferol, mantiene las características de las lipoproteínas de baja densidad (Bentinger *et al.*, 2007) y ayuda en casos de migrañas, fatiga y envejecimiento. Xu *et al.* (2015) han reportado el uso de la coenzima Q₁₀ en tratamientos contra el cáncer de mama, enfermedades cardiovasculares, desordenes degenerativos: como Alzheimer y Parkinson y otros daños generados por la edad, debido que se sintetiza en menor cantidad y su suplementación es requerida (Ratnam *et al.*, 2006). Por otro lado, Hyson *et al.* (2010) demostraron que suplementaciones con dosis de 1200 y 3600 mg día⁻¹, por 20 semanas presentan reacciones secundarias, tales como malestares estomacales, pero no así en dosis de 2400 mg día⁻¹; sin embargo, hasta el momento no se ha establecido una dosis óptima para su consumo, y solo es suministrada como suplemento alimenticio en dosis que pueden alcanzar los 300 mg día⁻¹ de consumo. Por lo anterior, Lucangioli *et al.*, (2016) menciona que el análisis clínico de la coenzima Q₁₀, es cada vez más importante, sobre todo en observar las concentraciones de la coenzima Q₁₀ presentes en el cuerpo humano y la relación que tiene con el desarrollo de diversas enfermedades.

1.4.3. Métodos de análisis de la coenzima Q₁₀

El método de análisis utilizado para la determinación de la coenzima Q₁₀ es la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) (Purchas *et al.*, 2004; Reig *et al.*, 2015; Weber *et al.*, 1997); sin embargo, éste método es costoso e involucra solventes orgánicos que dañan el medio ambiente, por lo que se han probado otros métodos alternativos como la cromatografía en capa fina (Jazbec *et al.*, 2009), y el uso de la espectroscopia UV. Este último método ha mostrado correlaciones favorables entre HPLC vs UV mayores a 0.999 cuando se utiliza Tween 80 o etanol como solvente (Xia and Xu, 2006).

1.4.4. Usos de la coenzima Q₁₀

La coenzima Q₁₀ ha sido incorporada actualmente en productos de la industria farmacéutica, para el cuidado personal, como cremas principalmente, y en la industria alimentaria para el desarrollo de bebidas y suplementos alimenticios, disponible comercialmente en forma de cápsulas, pastillas y en suspensiones en aceite, y como suplemento alimenticio en dietas de animales. Sin embargo, su uso como aditivo en productos alimenticios no ha sido ampliamente investigado (Tobin *et al.*, 2014). Así, en el intento de observar la biodisponibilidad de la coenzima Q₁₀, Jazbec *et al.* (2009)

demostrarón que suministrando coenzima Q₁₀ en la dieta de pollos de engorda (5 mg día⁻¹), y al evaluar los diferentes músculos del pollo después del proceso de matanza, se encontró un aumento del 30% del contenido de la coenzima Q₁₀ en la pechuga (*Pectoralis major*), lo que la hace estar más biodisponible para el consumo humano.

La biodisponibilidad de la coenzima Q₁₀ se ha estudiado también mediante la incorporación de ésta por medio de métodos como la encapsulación (Jazbec *et al.*, 2009), utilizando liposomas (Xia and Xu, 2006), nanoliposomas (Xu *et al.*, 2015), nanopartículas de naturaleza lipídica, secado en fase líquida (Kanaya *et al.*, 2013) y dispersión de sólidos (Chan *et al.*, 2016). La emulsión de agua y aceite, técnica empleada en la encapsulación de componentes activos de naturaleza lipídica, ha sido otra metodología prometedora para proporcionar la biodisponibilidad y protección de la coenzima Q₁₀ en el medio (McClements *et al.*, 2007). Pegoraro *et al.* (2017) probaron su incorporación en nanosuspensiones para su adición en cremas para el cuidado de la piel. Como se ha mencionado anteriormente la coenzima Q₁₀ tiene actividad antioxidante de gran importancia en el organismo (Crane, 2001), debido a ello, se han incorporado en aceites comestibles como el de linaza para evitar la peroxidación, especialmente en presencia de ácidos grasos poliinsaturados, los cuales, son propensos al ataque de los ROS (Stratulat *et al.*, 2013).

Stratulat *et al.* (2013) probaron una emulsión de coenzima Q₁₀ para su adición en quesos, con el fin de evitar la oxidación de lípidos agregados, con propósitos nutraceuticos y una mejor cohesión del producto terminado, obteniendo resultados favorables en ambos casos, con una mejor retención de lípidos, ya que el efecto de la cuajada firme permite retener mejor la cantidad de compuestos agregados en el producto y al mismo tiempo evita su oxidación. Por su parte, Xu *et al.* (2015), utilizaron fosfolípidos para la formación de micelas con la coenzima Q₁₀, encontrando una eficiencia de encapsulación del 90% en soluciones supercríticas de 200 y 300 bar.

En productos cárnicos de res y cerdo se adicionó la coenzima Q₁₀ en forma de micelas anfifílicas, con el fin de fortificar los productos cárnicos y verificando su biodisponibilidad, encontrando una retención de la coenzima Q₁₀ del 70-80% después de un tratamiento térmico y un porcentaje de permanencia del 95% después de un proceso de digestión *in vitro* (Tobin *et al.*, 2014). Ercan y El (2011) observaron porcentajes de retención del 69 al 77 % de coenzima Q₁₀, después de

tratamientos térmicos como hervido y freído en diferentes músculos de carne de res, con ello demostraron la estabilidad de la coenzima Q₁₀, cuando es tratada térmicamente. Mientras que Purchas *et al.* (2006) observaron una disminución del 16% de la concentración de la coenzima Q₁₀ después de un proceso de cocción en carne de res (*Longissimus dorsi*); lo cual explican que es debido a la pérdida de jugos durante el proceso. Igualmente, estos ensayos evidencian que los encapsulados de la coenzima Q₁₀, siguen siendo estudiados para aprovechar todas sus propiedades, ya sea como compuesto funcional, o como antioxidante, con aplicaciones en el consumo humano en ámbitos de salud y cosmética, calidad de la carne y aplicación como aditivo de uso alimentario en el procesamiento de diversos productos. Además, la aplicación adecuada de esta coenzima promete al consumidor efectos benéficos en salud y calidad de procesamiento de productos.

1.4.5. Conclusiones

Todavía existe un largo camino por recorrer en las aplicaciones de la coenzima Q₁₀ en la industria de los alimentos, ya sea por sus características de componente funcional, en el control de enfermedades o en el uso de esta como aditivo antioxidante para el procesamiento de productos, con la finalidad de conservar características nutricionales, evitando la oxidación de lípidos y proteínas. Su estudio comprende la aplicación de emulsiones o microcápsulas a productos que requieran sus beneficios y procesos tecnológicos que muestren beneficios claros en su aplicación, ya sea por rentabilidad o mejoramiento marcado en las propiedades del alimento.

Literatura citada

- Aguirrezábal, M.M., J. Mateo, M.C. Domínguez, J.M. Zumalacárregui, 2000. The effect of paprika, garlic and salt on rancidity in dry sausages. *Meat Sci.* 54, 77–81.
- Ahn, D.U., K.C. Nam, 2004. Effects of ascorbic acid and antioxidants on color, lipid oxidation and volatiles of irradiated ground beef. *Radiat. Phys. Chem.* 71, 151–156.
- Andersen, H.J., G. Bertelsen, L. Boegh-Soerensen, C.K. Shek, L.H. Skibsted, 1988. Effect of light and packaging conditions on the colour stability of sliced ham. *Meat Sci.* 22, 283–292.
- Argyri, A.A., E.Z. Panagou, G.-J. Nychas, 2012. Advances in vacuum and modified atmosphere packaging of poultry products. *Adv. Meat Poult. Seaf. Packag.* 205–247.
- Balakrishnan, P., B.-J. Lee, D.H. Oh, J.O. Kim, Y.-I. Lee, D.-D. Kim, J.-P. Jee, Y.-B. Lee, J.S. Woo, C.S. Yong, H.-G. Choi, 2009. Enhanced oral bioavailability of coenzyme Q10 by self-emulsifying drug delivery systems. *Int. J. Pharm.* 374, 66–72.

- Barbut, S., 1997. Problem of pale soft exudative meat in broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 38, 355–358.
- Bentinger, M., K. Brismar, G. Dallner, 2007. The antioxidant role of coenzyme Q. *Mitochondrion, The Role of Coenzyme Q in Cellular Metabolism: Current Biological and Clinical Aspects* 7, S41–S50.
- Cabrini, L., P. Pasquali, B. Tadolini, A.M. Sechi, L. Landi, 1986. Antioxidant behaviour of Ubiquinone and β -Carotene Incorporated in model Membranes. *Free Radic. Res. Commun.* 2, 85–92.
- Carvalho, R., M. Shimokomaki, M. Estévez, 2017. Poultry Meat Color and Oxidation, in: *Poultry Quality Evaluation*. Elsevier, pp. 133–157.
- Chan, S.W., H. Mirhosseini, F.S. Taip, T.C. Ling, I.A. Nehdi, C.P. Tan, 2016. Emulsion formulation optimization and characterization of spray-dried κ -carrageenan microparticles for the encapsulation of CoQ10. *Food Sci. Biotechnol.* 25, 53–62.
- Crane, F.L., 2001. Biochemical functions of coenzyme Q₁₀. *J. Am. Coll. Nutr.* 20, 591–598.
- Cubero N., A. Monferrer yj. Villalta, 2002. *Aditivos alimentarios*. A. Madrid Vicente. Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 84-8476-088-X
- Davies, M.J., 2005. The oxidative environment and protein damage. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Proteins Proteomics, Methionine Oxidation and Methionine Sulfoxide Reductases* 1703, 93–109.
- Delles, R.M., Y.L. Xiong, A.D. True, T. Ao, K.A. Dawson, 2014. Dietary antioxidant supplementation enhances lipid and protein oxidative stability of chicken broiler meat through promotion of antioxidant enzyme activity. *Poult. Sci.* 93, 1561–1570.
- Devi, N., M. Sarmah, B. Khatun, T.K. Maji, 2017. Encapsulation of active ingredients in polysaccharide–protein complex coacervates. *Adv. Colloid Interface Sci.* 239, 136–145.
- Djenane, D., L. Martínez, A. Sánchez-Escalante, J.A. Beltrán, P. Roncalés, 2004. Antioxidant effect of carnosine and carnitine in fresh beef steaks stored under modified atmosphere. *Food Chem.* 85, 453–459.
- Doglia, S.M., D. Ami, A. Natalello, P. Gatti-Lafranconi, M. Lotti, 2008. Fourier transform infrared spectroscopy analysis of the conformational quality of recombinant proteins within inclusion bodies. *Biotechnol. J.* 3, 193–201.

- Dunn, A.A., E.L. C. Tolland, D.J. Kilpatrick, N.F.S. Gault, 2000. Relationship between early post-mortem muscle pH and shortening-induced toughness in the Pectoralis major muscle of processed broilers air-chilled at 0°C and -12°C. *Br. Poult. Sci.* 41, 53–60.
- Durante, M., M.S. Lenucci, B. Laddomada, G. Mita, S. Caretto, 2012. Effects of sodium alginate bead encapsulation on the storage stability of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) bran oil extracted by supercritical CO₂. *J. Agric. Food Chem.* 60, 10689–10695.
- Ercan, P., S.N. El, 2011. Changes in content of coenzyme Q10 in beef muscle, beef liver and beef heart with cooking and in vitro digestion. *J. Food Compos. Anal.* 24, 1136–1140.
- Estévez, M., 2017. What's new in meat oxidation?, in: *New Aspects of Meat Quality*. Elsevier, pp. 91–109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100593-4.00006-0>
- Estévez, M., 2015. Oxidative damage to poultry: from farm to fork. *Poult. Sci.* 94, 1368–1378.
- Estévez, M., 2011. Protein carbonyls in meat systems: A review. *Meat Sci.* 89, 259–279.
- Fletcher, D.L., 2002. Poultry meat quality. *Worlds Poult. Sci. J.* 58, 131–145.
- Gharsallaoui, A., G. Roudaut, O. Chambin, A. Voilley, R. Saurel, 2007. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Res. Int.* 40, 1107–1121.
- Gibbs, B.F., S. Kermasha, I. Alli, C.N. Mulligan, 1999. Encapsulation in the food industry: a review. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 50, 213–224.
- Gómez, B., F.J. Barba, R. Domínguez, P. Putnik, D. Bursać Kovačević, M. Pateiro, F. Toldrá, J.M. Lorenzo, 2018. Microencapsulation of antioxidant compounds through innovative technologies and its specific application in meat processing. *Trends Food Sci. Technol.* 82, 135–147.
- Guerrero-Legarreta, I. (Ed.), 2010. *Handbook of poultry science and technology*. John Wiley, Hoboken, N.J.
- Hacker, M.C., J. Krieghoff, A.G. Mikos, 2019. Synthetic Polymers, in: *Principles of Regenerative Medicine*. Elsevier, pp. 559–590.
- Han, L., L.-B. Du, A. Kumar, H.-Y. Jia, X.-J. Liang, Q. Tian, G.-J. Nie, Y. Liu, 2012. Inhibitory effects of trolox-encapsulated chitosan nanoparticles on tert-butylhydroperoxide induced RAW264.7 apoptosis. *Biomaterials* 33, 8517–8528.
- Hipkiss, A.R., 2009. Chapter 3 Carnosine and Its Possible Roles in Nutrition and Health, in: *Advances in Food and Nutrition Research*. Elsevier, pp. 87–154.

- Hyson, H.C., I. Shoulson, 2010. Safety and tolerability of high-dosage coenzyme Q10 in Huntington's disease and healthy subjects. *Mov. Disord.* 25, 1924–1928.
- Jazbec, P., A. Šmidovnik, M. Puklavec, M. Križman, J. Šribar, L. Milivojević, M. Prošek, 2009. HPTLC and HPLC-MS quantification of coenzyme Q10 and cholesterol in fractionated chicken-breast tissue. *J. Planar Chromatogr. - Mod. TLC* 22, 395–398.
- Kanaya, K., S. Akao, R. Misumi, K. Nishi, M. Kaminoyama, 2013. Development of method for estimating drop diameter in the manufacturing process of functional O/W microcapsules. *Chem. Eng. Res. Des.* 91, 2098–2105.
- Ladikos, D., V. Lougovois, 1990. Lipid oxidation in muscle foods: A review. *Food Chem.* 35, 295–314.
- Lopretti, M., F. Barreiro, I. Fernandes, A. Damboriarena, C. Ottati, A. Olivera, 2007. Microencapsulación de compuestos de actividad biológica. *INN TEC* 2, 19–23.
- Lucangioli, S., M. Martinefski, V. Tripodi, 2016. Coenzyme Q10 analytical determination in biological matrices and pharmaceuticals. *Front. Biosci. Sch. Ed.* 8, 321–330.
- Lupo-Pasin, B., C. González-Azón, A. Maestro-Garriga, 2012. Microencapsulación con alginato en alimentos. *Técnicas y aplicaciones. Rev. Venez. Cienc. Tecnol. Aliment.* 3, 130–151.
- Madene, A., M. Jacquot, J. Scher, S. Desobry, 2006. Flavour encapsulation and controlled release - a review. *Int. J. Food Sci. Technol.* 41, 1–21.
- Mattila, P., J. Kumpulainen, 2001. Coenzymes Q9 and Q10: Contents in Foods and Dietary Intake 9.
- McClements, D.J., E.A. Decker, J. Weiss, 2007. Emulsion-based delivery systems for lipophilic bioactive components. *J. Food Sci.* 72, R109–R124.
- Miles, M.V., P. Horn, L. Miles, P. Tang, P. Steele, T. DeGrauw, 2002. Bioequivalence of coenzyme Q10 from over-the-counter supplements. *Nutr. Res.* 22, 919–929.
- Min, B., J.C. Cordray, D.U. Ahn, 2010. Effect of NaCl, myoglobin, Fe(II), and Fe(III) on lipid oxidation of raw and cooked chicken breast and beef loin. *J. Agric. Food Chem.* 58, 600–605.
- Moure, A., J.M. Cruz, D. Franco, J.M. Domínguez, J. Sineiro, H. Domínguez, M. José Núñez, J.C. Parajó, 2001. Natural antioxidants from residual sources. *Food Chem.* 72, 145–171.
- Mozdziak, P., 2014. SPECIES OF MEAT ANIMALS | Poultry, in: *Encyclopedia of Meat Sciences*. Elsevier, pp. 369–373.

- Namiki, M., 1990. Antioxidants/antimutagens in food. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 29, 273–300.
- Nieto, G., G. García, G. Ros, 2013. Péptidos bioactivos procedentes de proteínas de pollo con propiedades antioxidantes. *E Monogr. Cárnicos* 56–63.
- O’Neill, L.M., K. Galvin, P.A. Morrissey, D.J., Buckley, 1999. Effect of carnosine, salt and dietary vitamin E on the oxidative stability of chicken meat. *Meat Sci.* 52, 89–94.
- O’Sullivan, M.G., 2017. Sensory Properties Affecting Meat and Poultry Quality, in: *A Handbook for Sensory and Consumer-Driven New Product Development*. Elsevier, pp. 225–257.
- Ouali, A., C.H. Herrera-Mendez, G. Coulis, S. Becila, A. Boudjellal, L. Aubry, M.A. Sentandreu, 2006. Revisiting the conversion of muscle into meat and the underlying mechanisms. *Meat Sci.*, 52nd International Congress of Meat Science and Technology (52nd ICoMST) 13-18 August 2006 Dublin, Ireland 74, 44–58.
- Park, D., Y.L. Xiong, A.L. Alderton, T. Ooizumi, 2006. Biochemical Changes in Myofibrillar Protein Isolates Exposed to Three Oxidizing Systems. *J. Agric. Food Chem.* 54, 4445–4451.
- Parra, R.A., 2010. Revisión: Microencapsulación de alimentos. *Rev. Fac. Nac. Agron.* 63, 5669–5684.
- Pegoraro, N.S., A.V. Barbieri, C. Camponogara, J. Mattiazzi, E.S. Brum, M.C.L. Marchiori, S.M. Oliveira, L. Cruz, 2017. Nanoencapsulation of coenzyme Q10 and vitamin E acetate protects against UVB radiation-induced skin injury in mice. *Colloids Surf. B Biointerfaces* 150, 32–40.
- Pérez-Chabela, M.D.L., 2007. Shelf Life of Fresh and Frozen Poultry, in: Nolle, L.M.L. (Ed.), *Handbook of Meat, Poultry and Seafood Quality*. Blackwell Publishing, Ames, Iowa, USA, pp. 467–474.
- Petillo, D., H.O. Hultin, 2008. Ubiquinone-10 as an Antioxidant*. *J. Food Biochem.* 32, 173–181.
- Purchas, R.W., J.R. Busboom, 2005. The effect of production system and age on levels of iron, taurine, carnosine, coenzyme Q10, and creatine in beef muscles and liver. *Meat Sci.* 70, 589–596.
- Purchas, R.W., J.R. Busboom, B.H.P. Wilkinson, 2006. Changes in the forms of iron and in concentrations of taurine, carnosine, coenzyme Q10, and creatine in beef longissimus muscle with cooking and simulated stomach and duodenal digestion. *Meat Sci.* 74, 443–449.

- Purchas, R.W., S.M. Rutherford, P.D. Pearce, R. Vather, B.H.P. Wilkinson, 2004. Concentrations in beef and lamb of taurine, carnosine, coenzyme Q10, and creatine. *Meat Sci.* 66, 629–637.
- Ratnam, D.V., V. Bhardwaj, M.N.V.R. Kumar, 2006. Simultaneous analysis of ellagic acid and coenzyme Q10 by derivative spectroscopy and HPLC. *Talanta* 70, 387–391.
- Ratnayake, W.M.N., R.G. Ackman, H.W. Hulan, 1989. Effect of redfish meal enriched diets on the taste and n-3 pufa of 42-day-old broiler chickens. *J. Sci. Food Agric.* 49, 59–74.
- Reig, M., M.-C. Aristoy, F. Toldrá, 2015. Sources of variability in the analysis of meat nutrient coenzyme Q10 for food composition databases. *Food Control* 48, 151–154.
- SIAP, 2017. Producción de carne de ave en canal coloca a México como quinto productor a nivel mundial.
- Soladoye, O.P., M.L. Juárez, J.L. Aalhus, P. Shand, M. Estévez, 2015. Protein Oxidation in Processed Meat: Mechanisms and Potential Implications on Human Health. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 14, 106–122.
- Stadtman, E.R., 1992. Protein Oxidation and Aging. *Science* 257, 1220–1224.
- Stefely, J.A., D.J. Pagliarini, 2017. Biochemistry of mitochondrial coenzyme Q biosynthesis. *Trends Biochem. Sci.* 42, 824–843.
- Stratulat, I., M. Britten, S. Salmieri, D. St-Gelais, C.P. Champagne, P. Fustier, M. Lacroix, 2013. Encapsulation of coenzyme Q 10 in a simple emulsion-based nutraceutical formulation and application in cheese manufacturing. *Food Chem.* 141, 2707–2712.
- Tang, S., J.P. Kerry, D. Sheehan, D.J. Buckley, P.A. Morrissey, 2001. Antioxidative effect of added tea catechins on susceptibility of cooked red meat, poultry and fish patties to lipid oxidation. *Food Res. Int.* 34, 651–657.
- Tobin, B.D., M.G. O’Sullivan, R. Hamill, J.P. Kerry, 2014. Effect of cooking and in vitro digestion on the stability of co-enzyme Q10 in processed meat products. *Food Chem.* 150, 187–192.
- Toldrá, F., M. Reig, 2006. Biochemistry of Raw Meat and Poultry, in: Hui, Y.H. (Ed.), *Food Biochemistry and Food Processing*. Blackwell Publishing, Ames, Iowa, USA, pp. 293–314.
- Turunen, M., J. Olsson, G. Dallner, 2004. Metabolism and function of coenzyme Q. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Biomembr.* 1660, 171–199.

- UNA, 2018. Situación de la Avicultura Mexicana [WWW Document]. URL <http://www.una.org.mx/index.php/panorama/situacion-de-la-avicultura-mexicana>
- Villaverde, A., V. Parra, M. Estévez, 2014. Oxidative and Nitrosative Stress Induced in Myofibrillar Proteins by a Hydroxyl-Radical-Generating System: Impact of Nitrite and Ascorbate. *J. Agric. Food Chem.* 62, 2158–2164.
- Weber, C., A. Bysted, G. Hølmer, 1997. Coenzyme Q10 in the diet-daily intake and relative bioavailability. *Mol. Aspects Med., Biomedical and clinical aspects of coenzyme Q 18*, 251–254.
- Xia, S., S. Xu, 2006. Improved assay of coenzyme Q10 from liposomes by Tween 80 solubilisation and UV spectrophotometry. *J. Sci. Food Agric.* 86, 2119–2127.
- Xu, S., B. Zhao, D. He, 2015. Synthesis of highly dispersed nanoscaled CoQ10 liposome by supercritical fluid. *Mater. Lett.* 142, 283–286.
- Yáñez, J., J.A. Salazar, L. Chaires, J. Jiménez, M. Márquez, E.G. Ramos, 2005. Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. *Mundo Aliment.*

CAPÍTULO I

EVALUACIÓN DE LOS AGENTES PRO-OXIDANTES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DE LA CARNE DE POLLO

ENVIADO A LA REVISTA:
INGENIERÍA AGRÍCOLA Y BIOSISTEMAS (INAGBI)



CAPÍTULO I

EVALUACIÓN DE LOS AGENTES PRO-OXIDANTES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DE LA CARNE DE POLLO

Xochitl., Damián-Hernández¹

Aleida. S., Hernández-Cázares^{1*}

Juan V., Hidalgo-Contreras¹

Maricarmen T., Recillas-Mota²

¹Colegio de Postgraduados - Campus Córdoba. Programa de Innovación Agroalimentaria Sustentable. Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Amatlán de los Reyes, Veracruz, C.P. 94946, México.

aleyse@colpos.mx, tel.: 271 716 6000 (*Autor de correspondencia)

²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Carretera a La Victoria Km. 0.6, Hermosillo, Sonora, C.P. 83304, México

Resumen

La oxidación de la carne de pollo es una de las principales características que definen su calidad. En este estudio se analizó los principales agentes pro-oxidantes exógenos en carne de pollo, identificando el efecto de cada uno de ellos en el fenómeno oxidativo. Pechuga de pollo (*Pectoralis major*) en forma de *patties* de 25 g se utilizó para establecer los diferentes tratamientos: T1 - pechuga de pollo molida, T2 - ciclo de congelación y descongelación, T3 - envasadas al vacío, T4 - deshidratado, T5 - cocción en baño maría, T6 - adición de NaCl, T7 - cocción a la parrilla y T8 - exposición a luz LED. Posterior al tratamiento se almacenaron a 4 °C 15 d y se analizaron a 0, 3, 6, 9, 12 y 15 d. Las variables analizadas fueron pérdida de peso, color, pH, acidez titulable y TBARS, mediante un diseño completamente al azar (DCA) y la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Aunque solo se incluyó un nivel de acción en cada tratamiento, se logró caracterizar el fenómeno oxidativo indicando por la correlación de cada variable. Se confirmó que la carne de pollo molida, sometida a tratamiento térmico (cocción a la parrilla-T7 y baño maría-T5) y almacenada en refrigeración a 4 °C, presentó mayor acción pro-oxidante reflejado en las mayores pérdidas de peso, luminosidad y TBARS.

Palabras clave: Tratamientos térmicos, oxidación lipídica, productos cárnicos.

1.1. Introducción

Las características físicas y químicas de la carne, la hacen un sistema complejo y muy susceptible a la oxidación (Wood *et al.*, 2008). Durante este proceso ocurren tanto de oxidación lipídica y como proteica, fenómenos que resultan de una gran cantidad de reacciones químicas, que generan cambios de color, cambios de textura y producen compuestos volátiles responsables del sabor y aroma, condiciones determinantes en la aceptación de la carne por el consumidor (Estévez, 2017). Así, el nivel de oxidación en la carne depende de varios factores intrínsecos y extrínsecos, entre los que destacan la especie, el tipo de músculo, la edad y la dieta del animal, mismos que determinan la cantidad y calidad de los ácidos grasos (Hernández, Zomeño, Ariño, & Blasco, 2004); además de las condiciones de matanza, el contenido de humedad de la carne y la cantidad de grasa intramuscular (Carvalho, Shimokomaki, & Estévez, 2017).

A la par de ello, factores pro-oxidantes endógenos como el hierro (Fe), la mioglobina (Mb), el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y pro-oxidantes externos como el oxígeno circundante (Andersen, Bertelsen, Boegh-Soerensen, Shek, & Skibsted, 1988) tienen también un efecto en la oxidación generando radicales libres denominados especies reactivas al oxígeno (ROS) (Estévez, 2011). Los fenómenos de fotooxidación (Andersen *et al.*, 1988; C. A. Lázaro *et al.*, 2014) generados por irradiación gamma o la luz a la que se expone la carne en el proceso de matanza y acondicionamiento o en los centros de distribución y venta; los métodos de conservación, vistos en los ciclos de congelación y descongelación (Ali *et al.*, 2015), ya sea en los supermercados, en los restaurantes o en las cocinas de los hogares; los empaques permeables a la luz y al oxígeno (Tang, Kerry, Sheehan, Buckley, & Morrissey, 2001) pueden propiciar cambios de estado de la Mb; y los métodos de preparación de los alimentos por cocción, ya sea a nivel industrial, comercial o casero, que en conjunto con los factores intrínsecos deterioran la calidad sensorial y nutritiva de la carne y de los productos cárnicos (Estévez, 2015; B Min & Ahn, 2005).

Además la presencia de sales de sodio provocan oxidación de la carne, las cuales podrían liberar el ion de hierro de la mioglobina, proveyendo de hierro libre para catálisis de oxidación lipídica (Tang *et al.*, 2001).

La carne de pollo contiene 1.30 mg g⁻¹ de ácidos grasos monoinsaturados y 0.70 mg g⁻¹ de poliinsaturados (Tang *et al.*, 2001), característica que la hace susceptible a la oxidación. Por lo que su estabilidad oxidativa depende no solo de la presencia de varios agentes pro-oxidantes durante su manejo, sino también de compuestos antioxidantes naturales presentes en la carne, como péptidos bioactivos (anserina y carnosina), glutatión, vitamina E y coenzimas como la Q₁₀ (Mattila & Kumpulainen, 2001), enzimas como la superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa (Beltran, Pla, Yuste, & Mor-Mur, 2003; Shahidi, 2016), polifenoles, o los añadidos de naturaleza sintética con posible potencial cancerígeno, como el butilhidroxitolueno (BHT), butilhidroxianisol (BHA), propil galato (PG), terbutil hidroquinona (TBHQ), trihidroxibutrofenona (THBP) y Ácido nordihidroguaiarético (NDGA) y etoxiquina (Shahidi, Rubin, & Wood, 1987).

Experimentalmente se han empleado diferentes técnicas y herramientas para la detección de la oxidación de la carne; no obstante, el malondialdehído es el compuesto comúnmente usado como indicador de oxidación lipídica (Ladikos & Lougovois, 1990); mientras la determinación del radical 2,2- difenil-1-picrilhidrazilo (DNPH) es comúnmente empleado para evaluar la oxidación proteica (Armenteros, Heinonen, Ollilainen, Toldrá, & Estévez, 2009).

Debido a lo anterior, la oxidación lipídica y proteica de los productos cárnicos ha sido atribuida a la manipulación, que incluye el transporte y almacenamiento, pero se considera que son los procesos de cocción los que mayor efecto produce en la pérdida de nutrientes y promoción de la oxidación (Kingston, Monahan, Buckley, & Lynch, 1998; O'Neill, Galvin, Morrissey, & Buckley, 1999), debido a que durante la cocción se pueden generar compuestos volátiles que se oxidan produciendo olores y sabores desagradables (Coma, 2012).

En este contexto, la presente investigación se enfocó a evaluar los principales pro-oxidantes que afectan la calidad de la carne de pollo; como el oxígeno (Clariana *et al.*, 2012; Gertzou *et al.*, 2017; Lund *et al.*, 2007), tratamientos térmicos (Tang *et al.*, 2001), adición de NaCl, (Min, Cordray, & Ahn, 2010; Tang *et al.*, 2001), exposición a la luz (Tang *et al.*, 2001), ciclos de congelado y descongelado (Ali *et al.*, 2015), así como la humedad de la carne, con el fin de identificar que agente o interacción de ellos con el tiempo de almacenamiento generan efectos marcados sobre la oxidación lipídica de la carne de pollo, almacenada en refrigeración.

1.2. Materiales y métodos

1.2.1. Químicos

Se utilizó NaCl marca Fermont® CAS 7647-14-5, NaOH valorado al 0.1 N marca Hycl® CAT 1406, Fenolftaleína al 1 % en solución alcohólica, buffer 4.01 y 7.00 marca Thermo Scientific®, EDTA marca J.T. Baker® CAS 6381-92-6, Propil Galato (PG) marca Sigma-Aldrich® CAS 121-79-9 Ácido Tiobarbitúrico marca J.T. Baker® CAS 504-17-6 y HCl marca J.T. Baker® CAS.7647-01-0, para la preparación de las soluciones se trabajó con agua bidestilada marca J.T Baker®.

1.2.2. Materia prima

La evaluación de los agentes pro-oxidantes se realizó en carne de pechuga de pollo (*Pectoralis major*), obtenidas del mismo lote con 6 h *postmortem*, tratada térmicamente (4 °C) para su conversión de músculo a carne. Para ello se retiró la piel, el hueso y grasa visible de la pechuga de pollo, se trituroó en molino marca Torrey® Modelo M-22RW con cedazo TORREY CI-22 3/8 F y se moldeó en forma de *patties* de 25 g con un diámetro de 40 mm.

1.2.3. Preparación de las muestras

Para el estudio se sometió la carne de pollo en forma de *patties* a diferentes agentes pro-oxidantes, de la siguiente manera: T1 - *patties* de pechuga de pollo molida, T2: *patties* sometidas a congelación (-20 °C) y descongelación (hasta 6 °C durante 8 h), T3: *patties* envasadas al vacío (98 %), T4: *patties* sometidas a deshidratación a 70 °C durante 18 h en estufa de aire, T5: *patties* sometidas a cocción por inmersión en baño maría (BM) hasta alcanzar una temperatura interna de 75 °C, T6: *patties* adicionadas con 2 g 100 g⁻¹ de NaCl, T7: *patties* cocinadas a la parrilla a 280 °C, 3 min por cada lado, T8: *patties* expuestas a la luz LED (900 lúmenes) durante 15 d. Todas las *patties* fueron envasadas en bolsas de cierre hermético, almacenadas en refrigeraron a 4 °C y analizadas fisicoquímicamente a los 0, 3, 6, 9, 12, 15 d, por triplicado.

1.2.4. Pérdidas de peso

Las pérdidas de peso se graficaron como el peso final expresado en gramos. El cálculo del porcentaje de pérdidas de peso se obtuvo al multiplicar la diferencia del peso inicial y el peso final, por cien y dividirlo entre el peso inicial (Rahman *et al.*, 2015). Para ello se pesó la muestra antes y después del proceso de cocción o almacenamiento y después de atemperar al ambiente, según lo describe Lee y Bae (2017), con las modificaciones de cocción de cada tratamiento.

1.2.5. Color

La determinación del color se realizó con un colorímetro marca Konica Minolta®, Modelo CR 400, en la escala CIELAB (L* a* b*), L*(luminosidad de negro a blanco), a* (- verde a + rojo) b*(- Azul a + amarillo), en cada tiempo de almacenamiento por triplicado.

1.2.6. pH

La determinación del pH se realizó con base en la metodología propuesta por Guerrero *et al.* (2002) con un potenciómetro marca Thermo Scientific®, modelo Orion 3 Star, 10 g de muestra cárnica se homogenizó durante 1 min con 90 mL de agua bidestilada, se filtró para eliminar tejidos y se procedió a la lectura por triplicado.

1.2.7. Acidez titulable

La determinación de la acidez titulable se realizó con base en el método 947.05 de la AOAC, (1990). 10 g de muestra se homogeneizó con 20 mL de agua bidestilada por 1 min, la disolución resultante se filtró y aforó a 250 mL, 25 mL del filtrado se añadió con 75 mL de agua bidestilada, 2 gotas de fenolftaleína y se tituló con NaOH valorado al 0.1 N. Se tomó como blanco agua bidestilada, se reportó como % de ácido láctico mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de ácido láctico} = \frac{(V-Vb) \times (N \text{ NaOH}) \times (\text{meq}) \times (fd)}{\text{peso de la muestra}} \times 100 \quad (1)$$

donde, V, corresponde al volumen de NaOH gastado; Vb, volumen de NaOH gastado en el blanco; N, NaOH, normalidad del hidróxido de sodio; meq, miliequivalentes del ácido láctico y fd, factor de dilución.

1.2.8. Sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS)

La determinación de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico se realizó por el método de destilación, descrito por Tarladgis *et al.* (1960) con algunas modificaciones. Los TBARS se calcularon al multiplicar la absorbancia por el factor 7.8 y se reportó como mg de malondialdehído kg⁻¹. 10 g de muestra se homogenizó con 10 mL de agua a 50 °C y 5 mL de una solución de PG y EDTA, al 0.5 % cada una, por un lapso de 2 min, la disolución se colocó en un matraz Kjendahl previamente impregnado con silicón grado alimenticio y seis perlas de ebullición, se añadió 77.5 mL de agua a 50 °C y 2.5 mL de HCl 4 N, se procedió a la destilación hasta obtener un volumen

de 50 mL de destilado. Se tomó 5 mL del destilado y se depositó en un tubo cónico, se añadió 5 mL de ácido tiobarbitúrico al 0.02 M y se colocó en baño de agua a ebullición por un lapso de 35 min, se dejó enfriar a ambiente y se leyó en espectrofotómetro a una longitud de onda 530 nm, se tomó como blanco agua bidestilada.

1.2.9. Análisis estadístico

En la presente investigación se diseñaron ocho tratamientos bajo un diseño estadístico completamente al Azar (DCA) con tres repeticiones. El modelo estadístico fue el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + tiempo_j + (\tau * tiempo)_{ij} + e_{ijk} \text{ con } i = 1,2,3,4,5,6,7,8 \text{ } j = 1,2,3,4,5,6 \text{ y } k = 1,2,3, \quad (2)$$

donde: y_{ijk} es la variable respuesta del i -ésimo tratamiento en el j -ésimo tiempo y la k -ésima repetición; μ es la media global; τ_i es el efecto fijo del i -ésimo tratamiento; $tiempo_j$ es el efecto fijo del j -ésimo tiempo; $(\tau * tiempo)_{ij}$ es el efecto combinado de la interacción del i -ésimo tratamiento con el j -ésimo tiempo; e_{ijk} es el error experimental aleatorio el cual se asume independiente e idénticamente distribuido normal con media cero y varianza σ^2 . El análisis se realizó con el procedimiento GLIMMIX del paquete estadístico SAS® versión 9.4. Las comparaciones de las medias fue a través de la prueba de TUKEY, con una $P\text{-value} \leq 0.05$. Asimismo, se realizó la prueba de correlación de Pearson, para identificar el grado de correlación entre las variables.

1.3. Resultados y discusión

1.3.1. Pérdidas de peso por efecto del tratamiento

Los resultados de pérdida de peso mostraron al T4-*patties* deshidratadas, como aquellas *patties* que mayor peso perdieron por efecto del tratamiento, el cual redujo el 70.18 %, del peso de la muestra, pero durante el almacenamiento en refrigeración esas pérdidas se mantuvieron constantes (1.12 %) (Figura 1). No así para el T7 y el T5 que exhibieron una pérdida del 2.58 % y 1.97 % tras aplicar el tratamiento de cocción, pero también durante el periodo de almacenamiento en refrigeración, como se observa en el Cuadro 1 del 10.44 % y 6.92 % respectivamente. Esto es debido a que durante el calentamiento de la carne se producen cambios físicos tales como la contracción del tejido, la liberación de líquidos, decoloración de la carne y reducción de sustratos

(Guerrero-Legarreta, 2010). Además, la capacidad de retención de agua (CRA) de la carne depende de las estructuras miofibrilares, particularmente la miosina (Ali *et al.*, 2015); y estas a su vez de fuerzas iónicas, el pH y la oxidación, que explica porque el tratamiento 5 y 7 perdieron peso, durante su almacenamiento en refrigeración, datos que coinciden con los valores más altos de oxidación obtenidos en TBARS, como se muestra en el Cuadro 1.

O'Neill, Galvin, Morrissey, y Buckley (1999), y Tang *et al.* (2001) por otra parte, reportaron un incremento en la oxidación atribuido a la adición de NaCl y al proceso de cocción; sin embargo, el nivel de adición de NaCl en este estudio ($2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) no aceleró la oxidación lipídica ($0.3354 \pm 0.17 \text{ mg de malondialdehído kg}^{-1}$), como se observa en el Cuadro 1, reflejándose en la escasa pérdida de peso, sin diferencias significativas con las *patties* de pechuga de pollo molida (T1) y la carne expuesta a la luz LED (T8). Beltran *et al.* (2003), corroboran lo sucedido en el T1, al indicar que el procesamiento mecánico (molienda) no afectó la oxidación de la carne de pollo, la cual es una característica de calidad que promueve la pérdida de agua. Cabe destacar, que el estudio de cada tratamiento se detuvo cuando las muestras presentaron cambios en aroma por descomposición, y no se registraron mediciones posteriores a estos procesos de deterioro.

1.3.2. Color

Las mediciones de color mostraron en su análisis estadístico que la interacción del tiempo de almacenamiento en refrigeración en cada tratamiento no fue significativa, pero sí entre tratamientos. En la variable de luminosidad, los tratamientos con procesos de cocción en baño maría y a la parrilla (T5 y T7), fueron los que mayores valores presentaron, con diferencias estadísticas al resto de los tratamientos (Cuadro 1).

Ali *et al.* (2015) consideraron que un aumento en los valores de luminosidad podría ser debido a desnaturalización proteica por efecto del tratamiento térmico; en este estudio se observó que el valor de luminosidad coincide con los valores más altos de oxidación lipídica en los T7 y T5. Asimismo, se sabe que el proceso de cocción provoca en la carne cambios de color debidos principalmente a la reacción de Maillard (Guerrero-Legarreta, 2010) como se observa en el T4, *patties* deshidratadas, con valores de luminosidad bajos y con valores de a^* superiores al resto de

los tratamientos debido a un cambio visible a color marrón influenciado por el tratamiento prolongado a una temperatura de 70 °C el cual redujo su a_w a 0.4 (valores no reportados).

Shahidi, Samaranayaka y Pegg (2014) mencionan que los productos formados de las reacciones de Maillard dependen de la temperatura y tiempo de cocinado, la actividad de agua, humedad, el pH, pero también de la naturaleza y concentración de reactivos involucrados; a su vez, el color café formado depende de esta reacción y del proceso de caramelización de los azúcares. Fenómenos atribuidos al comportamiento del T4.

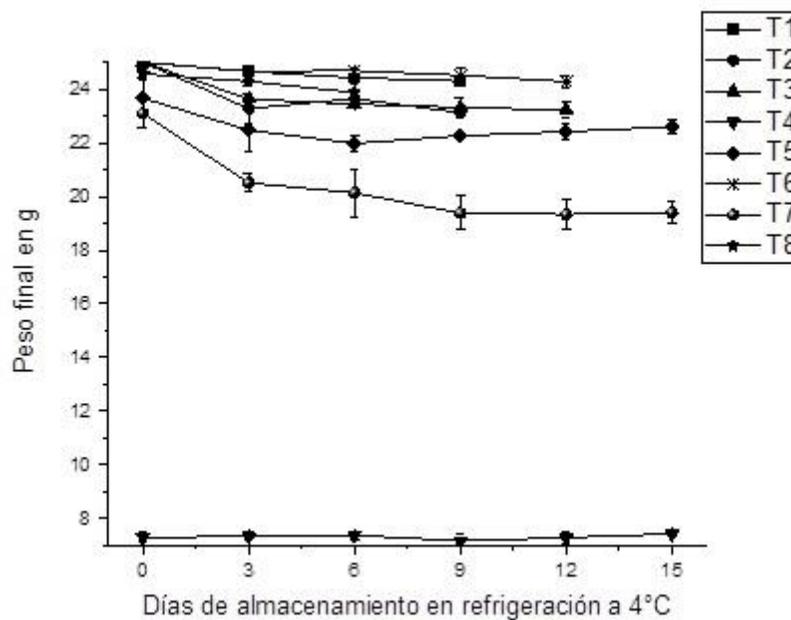


Figura 1. Análisis de la pérdida de peso final de la *patties* de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a 4 °C. T1: *patties* de pechuga de pollo molida, T2: *patties* sometidas a congelación (-20 °C) y descongelación (hasta 6 °C durante 8 h), T3: *patties* envasada al vacío, T4: *patties* sometidas a deshidratación a 70 °C durante 18 h en estufa de aire, T5: *patties* sometidas a cocción por inmersión en baño maría hasta alcanzar una temperatura interna de 75 °C; T6: *patties* adicionadas con 2 g 100 g⁻¹ de NaCl ; T7: *patties* cocinadas a la parrilla a 280 °C, 3 min por cada lado, T8: *patties* expuestas a la luz LED (900 lúmenes) durante 15 d.

Para la carne empacada al vacío (T3), los valores de L* se mantuvieron similares a los tratamientos 1, 2 y 8. La rojez (a*) permaneció ligeramente por arriba en los tratamientos antes mencionados, pero sin diferencias significativas. Veberg *et al.* (2006) reportaron valores de a* intermedios en carne de pavo, empacada al vacío, debido a la presencia de desoximioglobina; asimismo,

reportaron valores de b^* más altos en muestras expuestas al oxígeno. En este estudio las *patties* envasadas al vacío (T3), presentaron valores de b^* ligeramente por arriba de los tratamientos en crudo en presencia de oxígeno, siendo diferente estadísticamente solo con T6 adicionado con NaCl.

Por otra parte, se sabe que un pH bajo, reduce la importancia de la mioglobina en la absorción selectiva de luz verde, lo que resulta en una carne que parece menos roja y más amarilla (Castellini, Mugnai, & Dal Bosco, 2002), como se observó al comparar el T3 (pH más bajo) con el resto de los tratamientos en crudo en presencia de oxígeno. Gertzou *et al.* (2017) indicaron una reducción de luminosidad en el día 16 para piernas de pollo envasadas a vacío, reflejándose en un oscurecimiento; las *patties* elaboradas no alcanzaron este tiempo de estudio, por lo que, este hecho no pudo ser comparado; sin embargo, es posible mencionar que el color de la carne difiere de la pieza cárnica, del tiempo de almacenamiento y el tipo de tratamiento aplicado.

Chouliara, Karatapanis, Savvaidis y Kontominas (2007) mencionan que la luminosidad depende además de la concentración de antioxidantes intrínsecos de la carne y añadidos en la dieta o después del proceso de matanza del animal, mismos que pueden controlarse durante el almacenamiento mediante el adecuado uso de metodologías de aplicación de antioxidantes naturales o sintéticos. La media del valor b^* para los ocho tratamientos analizados oscilo de 19.6 a 27.0, Chouliara *et al.* (2007) obtuvieron un valor para el índice b^* de 9.17 a 14.82 en trozos de pechuga de pollo fresca empacada al vacío a 4 °C, en este estudio para el T3 – *patties* de pechuga de pollo envasa al vacío obtuvo un valor de b^* de 26.1. Sin embargo, la carne molida cambia su estructura, que pueden reflejarse en las mediciones de color. Fletcher (2002) menciona que el color de la carne depende de la concentración y estado de la mioglobina, de la hemoglobina y de las reacciones del citocromo C y sus derivados, así como de la presencia de ligandos que forman complejos con pigmentos hemo, por lo que caracterizar la calidad de la carne con la aplicación de diferentes agentes pro-oxidantes, genera parámetros fisicoquímicos fáciles de relacionar, como el color, el pH, la acidez, etc., y pueden considerarse en la conservación y procesamiento de productos cárnicos de pollo.

1.3.3. pH

En el análisis de pH, las *patties* de pechuga de pollo expuesta a luz LED (T8), a cocción en BM (T5), molidas (T1) y adicionadas con NaCl (T6) mostraron diferencias significativas con las *patties* tratadas al vacío (T3). Estas últimas presentaron los menores valores de pH con un promedio de 5.98 (Cuadro 1) y se mantuvo constante durante los 9 d, indicando buena estabilidad durante su almacenamiento en refrigeración (Figura 2). Guerrero-Legarreta (2010) indica que una atmósfera ausente de oxígeno evita el crecimiento de bacterias mesófilas y psicótrofas que podrían ser responsables, junto con otros factores, del aumento de pH.

Chouliara *et al.* (2007) reportan un descenso del valor de pH de 6.4 a 5.9 en carne de pollo tratada con atmósferas modificadas y adicionada con aceite de orégano almacenada en refrigeración durante 25 d, descenso que fue atribuido a la presencia de bacterias ácido lácticas (BAL). En este estudio, los tratamientos 3, 4, 5, y 7, alcanzaron valores de 5.9 a 6.4.; mientras que los tratamientos 1, 2, 6 y 8, alcanzaron valores superiores a 6.4 a los 9 y 12 d de almacenamiento en refrigeración. Argyri, Panagou y Nychas (2012) consideraron que valores en un rango de 5.7- 6.0 en pechuga y 6.4 - 6.7 en piernas de pollo son altos, por lo que su almacenamiento debía ser definido de acuerdo a sus características. Sin embargo, Lázaro *et al.* (2014), reportaron valores de pH en carne de pollo crudo convencional y orgánico de 5.57 y 6.0 respectivamente, y Castellini, Mugnai, y Dal Bosco, (2002) valores de pH de 5.8, en pollo orgánico, valor de pH que incrementó durante el almacenamiento en refrigeración, similar a los reportado en este estudio, donde el pH inicial de todos los tratamientos fue 5.8 a 6.1, con un incremento constante durante su almacenamiento en refrigeración en *patties* sin tratamiento térmico, expuestas al oxígeno.

Chan, Omana y Betti (2011) reportaron una interrelación del pH (24 h *postmortem*) con el color, la CRA y la susceptibilidad de las proteínas de pechuga de pavo a presentar oxidación. La carne con un valor de pH alto mostró mayor solubilidad de proteínas; pero una desnaturalización proteica similar se observó al almacenarla en congelación, sin importar el pH inicial de la carne, atribuyendo dicha desnaturalización a reacciones enzimáticas. Por lo que se consideró que la congelación afecta la oxidación de la carne. Sin embargo, en este estudio la carne con un ciclo de congelación y descongelación (T2) no se vio afectada por la oxidación, pero presentó un claro aumento de pH durante su almacenamiento, alcanzando un valor de 6.4 a los 9 d de

almacenamiento en refrigeración. En tanto, Ali *et al.* (2015) reportaron oxidación lipídica a partir del cuarto ciclo de congelación y descongelación, sustentando este estudio, donde un ciclo de congelación no afectó las características de calidad de la carne, relacionadas con la oxidación. Así, aun cuando los tratamientos 7, 5 y 4 mostraron un valor inicial alto de pH, por efecto del mismo tratamiento, este se mantuvo constante durante el almacenamiento en refrigeración, pero con mayores valores de oxidación lipídica (Cuadro 1). Castellini *et al.* (2002), expresó que el pH afecta la estructura de las miofibrillas y en consecuencia en la CRA y cambios en el color, que en conjunto caracterizan el fenómeno oxidativo.

El T8 y T1 en promedio (Cuadro 1) alcanzaron los valores de pH más altos, con diferencias estadísticas (Figura 2), indicando que, en muestras crudas, el tratamiento empleado para su almacenamiento, puede influir en el deterioro de la calidad de la carne de pollo.

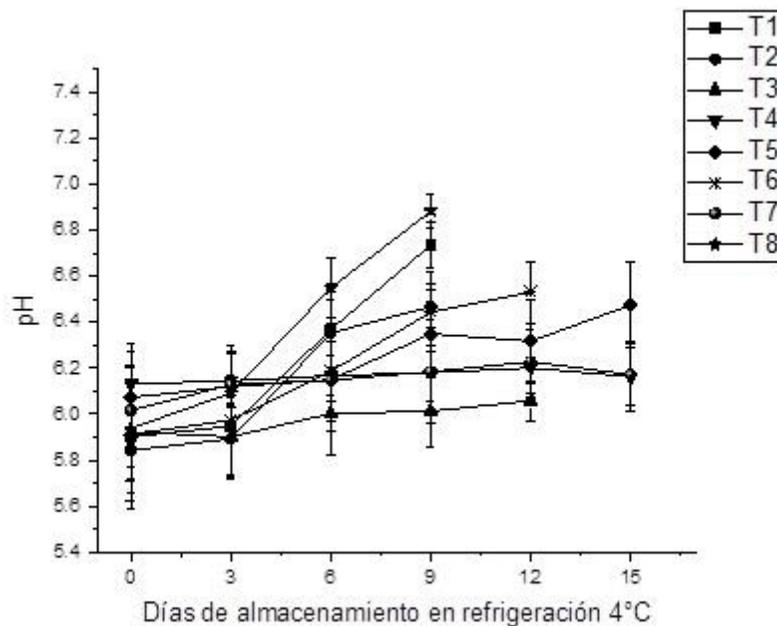


Figura 2. Análisis de valores de pH de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a 4 °C

T1: *patties* de pechuga de pollo molida, T2: *patties* sometidas a congelación (-20 °C) y descongelación (hasta 6 °C durante 8 h), T3: *patties* envasada al vacío, T4: *patties* sometidas a deshidratación a 70 °C durante 18 h en estufa de aire, T5: *patties* sometidas a cocción por inmersión en baño maría hasta alcanzar una temperatura interna de 75 °C; T6: *patties* adicionadas con 2 g 100 g⁻¹ de NaCl ; T7: *patties* cocinadas a la parrilla a 280 °C, 3 min por cada lado, T8: *patties* expuestas a la luz LED (900 lúmenes) durante 15 d.

1.3.4. Acidez titulable expresada en % de ácido láctico

En el análisis de acidez titulable, expresada en porcentaje de ácido láctico, el T3 presentó el valor promedio más alto (Cuadro 1), encontrando diferencias significativas con el T4 con los valores más bajos (Figura 3) y el resto de los tratamientos. Sin embargo, el T3 se mantuvo en refrigeración hasta el día 12 de almacenamiento, pero el T4 se mantuvo hasta el día 15, en condiciones de análisis. Esto se atribuye a la baja a_w de este tratamiento por efecto de la deshidratación y a su oposición al crecimiento microbiano. No obstante, Chouliara *et al.* (2007) contemplan que la vida útil de la carne fresca es de 5 d almacenada en refrigeración a 4 °C. En este estudio el T3 y T6 se mantuvieron por un periodo de 12 d; siendo el T3 el que mantuvo un valor constante de pH y acidez durante todo el periodo de almacenamiento, a diferencia de los tratamientos en crudo que solo alcanzaron 9 d de vida útil. Este periodo de resistencia es atribuido a la ausencia de oxígeno en el T3 y a la reducción de a_w en el T6, por las sales añadidas.

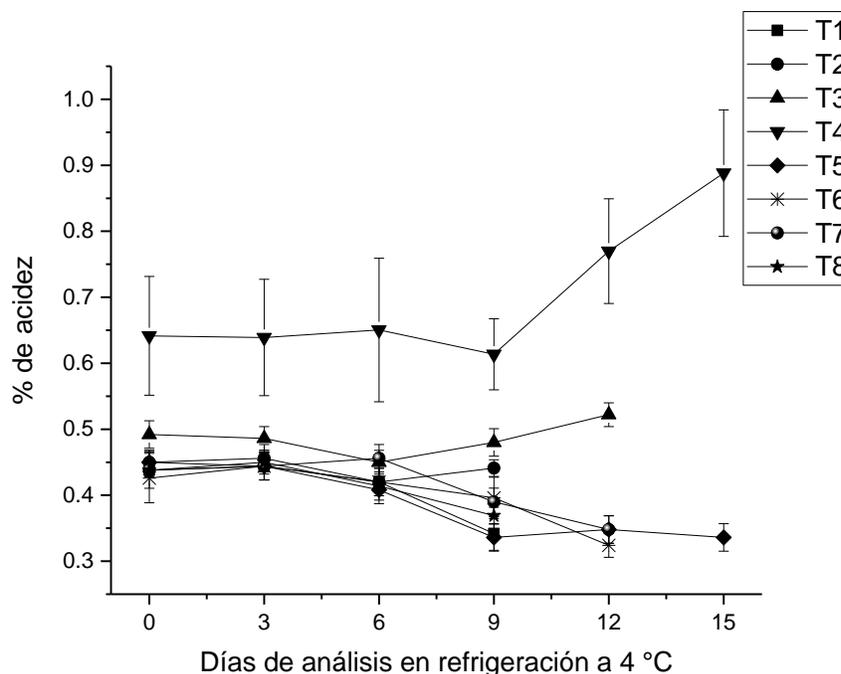


Figura 3. Análisis de valores del % de acidez titulable, expresada en ácido láctico de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a 4 °C

T1: *patties* de pechuga de pollo molida, T2: *patties* sometidas a congelación (-20 °C) y descongelación (hasta 6 °C durante 8 h), T3: *patties* envasada al vacío, T4: *patties* sometidas a deshidratación a 70 °C durante 18 h en estufa de aire, T5: *patties* sometidas a cocción por inmersión en baño maría hasta alcanzar una temperatura interna de 75 °C; T6: *patties* adicionadas con 2 g 100 g⁻¹ de NaCl; T7: *patties* cocinadas a la parrilla a 280 °C, 3 min por cada lado, T8: *patties* expuestas a la luz LED (900 lúmenes) durante 15 d.

1.3.5. Oxidación lipídica (TBARS)

En relación a TBARS, los T5 y T7 fueron diferentes estadísticamente entre ellos y con el resto de los tratamientos, indicando que las *patties* sometidas a procesos térmicos, generan en la carne de pechuga de pollo el mayor grado de oxidación. En estos tratamientos el tiempo y temperatura, así como la exposición directa de la muestra al tratamiento térmico jugaron un papel clave en la oxidación de la carne. Pathera, Riar, Yadav y Singh (2016) observaron una menor oxidación lipídica en carne cocinada al vapor que aquella cocinada en horno y en microondas, indicando que el método de procesamiento térmico generan en el producto, cambios en su calidad sensorial y nutritiva.

En tanto, Min *et al.* (2010) observaron un aumento en los valores de mg de malondialdehído kg^{-1} en *patties* de pechuga de pollo cocida en baño de agua a $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ y almacenadas a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 0.92 a 2.81 y de 1.21 a 3.12 cuando además se les adicionaba 1.5 % de NaCl, indicando que la adición de sodio tiene mayor efecto al suministrarla en productos con procesamiento térmico. En este estudio para los tratamientos con procesamiento térmico (T5 y T7) se obtuvo un valor de 3.13 y 4.83 mg kg^{-1} de malondialdehído, respectivamente. (Cuadro 1). Mirzaei, Afshoon y Barmak, (2017) reportaron en pechuga de pollo cocinada en microondas y almacenada 24 h a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, un valor 4.23 mg kg^{-1} de TBARS. Relacionando la oxidación lipídica con un daño en la membrana celular cuando utilizan tratamientos térmicos (Beltran *et al.*, 2003), así como a la cantidad de grasa, ácidos grasos poliinsaturados y contenido de hierro (O'Neill *et al.*, 1999; Tang *et al.*, 2001), siendo más resistente, a la oxidación, la carne de pollo que las carnes rojas (Min *et al.*, 2010).

Otros autores observaron que el NaCl ($1.5\text{ g }100\text{ g}^{-1}$) y la mioglobina (5 mg g^{-1} del producto final), no afectaban la oxidación de carne de pollo cruda (Min *et al.*, 2010), corroborando lo obtenido en este estudio para el T6 ($2\text{ g }100\text{g}^{-1}$ de NaCl), el cual no presentó un aumento de su oxidación. Además, no se observaron diferencias significativas entre *patties* cocidas de pollo con y sin adición de NaCl al 1 % a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 10 d a la luz (616 lux); con excepción del día 6 atribuyendo este cambio a la interacción del NaCl con el hierro de la carne y reportaron valores de malondialdehído de 0.47 a 2.06 y de 0.51 a 2.10 mg kg^{-1} , respectivamente (Tang *et al.*, 2001), concluyendo que la adición de sal incrementa la oxidación al emplear procesos de cocción.

Siendo que la pechuga de pollo cruda tiene alta capacidad antioxidante, debido al bajo contenido de hierro iónico libre (Min *et al.*, 2010). Lázaro *et al.* (2012) mostraron valores iniciales de malondialdehído en carne de pollo cruda en un rango de 0.10- 0.25 mg kg⁻¹, datos similares a los reportado en este estudio donde oscilaron de 0.15 a 0.26 mg kg⁻¹ para los tratamientos en crudo. Este mismo autor menciona que en estas condiciones no se mostraron diferencias en 18 d a 4 °C, sugiriendo que la cantidad de antioxidantes presentes (como la vitamina E) empiezan a consumirse luego del proceso de matanza y cuando estos son agotados se da inicio al proceso de oxidación de la carne. Chouliara *et al.* (2007) reportan valores de mg de malondialdehído kg⁻¹ que van de 0.1 a 0.9 en pechuga entera de pollo almacenada a 4 °C, considerando aun que son valores bajos de oxidación por lo que los tratamientos 1, 2, 3, 6 y 8, donde se observó este mismo comportamiento durante 12 d, pueden considerarse dentro de los valores aceptados como normales.

Para el T4-*patties* deshidratadas, el comportamiento de los valores de malondialdehído registrados fueron ligeramente diferentes, ya que el día 15 mostró un aumento marcado, como se observa en la Figura 4., esto puede ser entendido ya que dicho tratamiento también fue sometido a un proceso térmico para lograr la deshidratación; sin embargo, no alcanzó las temperaturas del tratamiento 5 y 7, donde la oxidación lipídica fue más evidente.

Al analizar el coeficiente de correlación de Pearson se pudo observar el grado de relación de la variable TBARS de manera positiva con la luminosidad de 0.517 ($P < 0.0001$) y las pérdidas de peso de 0.674 ($P < 0.0001$) y una correlación negativa con la acidez titulable de -0.282 ($P = 0.003$). Lo anterior muestra una correlación entre la luminosidad y el grado de oxidación y las pérdidas de peso; es decir, estas variables aumentan al aumentar la oxidación lipídica. Asimismo, la acidez titulable del producto disminuye debido al aumento de pH registrando un coeficiente de correlación entre estas dos variables de -0.497 ($P < 0.0001$). Lo anterior caracteriza el comportamiento de los tratamientos en este estudio.

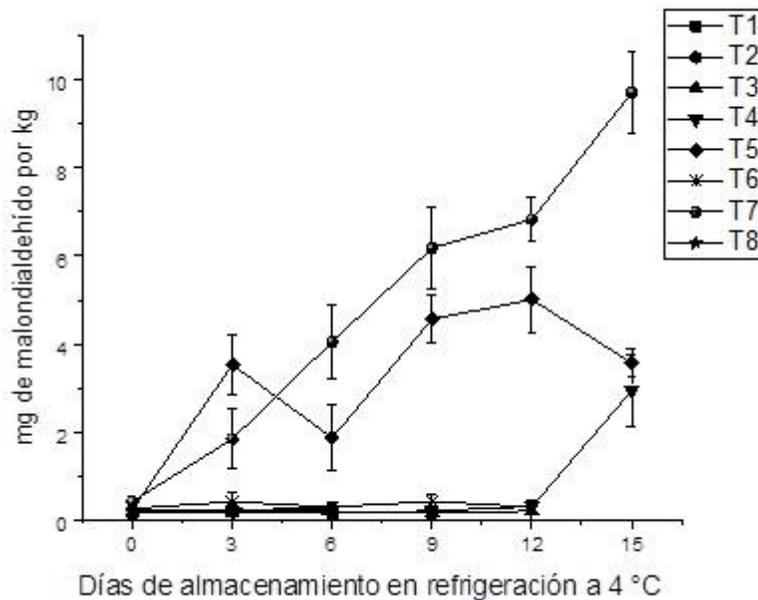


Figura 4. Comportamiento de las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico, expresada en mg kg^{-1} de malondialdehído de pechuga de pollo sometida a diferentes agentes pro-oxidantes y almacenada en refrigeración a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$

T1: *patties* de pechuga de pollo molida, T2: *patties* sometidas a congelación ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) y descongelación (hasta $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 8 h), T3: *patties* envasada al vacío, T4: *patties* sometidas a deshidratación a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 18 h en estufa de aire, T5: *patties* sometidas a cocción por inmersión en baño maría hasta alcanzar una temperatura interna de $75\text{ }^{\circ}\text{C}$; T6: *patties* adicionadas con $2\text{ g } 100\text{ g}^{-1}$ de NaCl ; T7: *patties* cocinadas a la parrilla a $280\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 min por cada lado, T8: *patties* expuestas a la luz LED (900 lúmenes) durante 15 d.

1.4. Conclusiones

Los agentes pro-oxidantes probados en este estudio, indicaron que la carne de pechuga de pollo molida, moldeada en forma de *patties* y almacenada en refrigeración a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, sometida a tratamiento térmico a altas temperaturas, a la parrilla o por inmersión en agua, afectaron el producto cárnico, siendo el principal factor pro-oxidante externo en la carne, reflejado por su alto contenido de malondialdehído. El nivel de oxidación (TBARS) mostró una correlación directa positiva con las variables pérdida de peso y luminosidad, para la carne que se sometió a tratamiento térmico. No obstante, dicho tratamiento conservó el producto cárnico durante 15 d, periodo superior en relación con la carne cruda almacenada en refrigeración.

Cuadro 1. Medias del efecto de diferentes agentes pro-oxidantes sobre pechuga de pollo en forma de *patties* almacenada en refrigeración a 4 °C ± SD.

Variables respuesta	Tratamientos analizados ± SD*								LSD
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Pérdidas de peso	1.55±1.18 ^{ba}	4.59±3.17 ^{bc}	5.46±2.88 ^c	1.12±26.65 ^f	6.92±4.07 ^d	1.47±1.19 ^a	10.44±3.05 ^e	2.26±1.76 ^{bac}	2.768
Color									
L*	52.3327±3.03 ^{cb}	51.987±4.59 ^{cb}	52.671±5.71 ^b	37.451±6.46 ^d	78.564±6.62 ^a	45.659±8.14 ^c	76.878±3.18 ^a	52.9418±4.23 ^b	6.882
a*	-0.1455±1.05 ^c	-0.32±1.2 ^c	1.2431±1.67 ^{cb}	15.876±4.15 ^a	2.8122±0.96 ^b	0.0259±1.02 ^c	1.7044±0.82 ^{cb}	-0.4836±0.95 ^c	2.24
b*	23.5027±5.92 ^{ba}	22.838±7.59 ^{ba}	26.153±4.7 ^a	26.847±7.82 ^a	21.747±5.78 ^{ba}	19.627±5.5 ^b	27.033±3.77 ^a	24.2655±4.02 ^{ba}	6.741
pH	6.2383±0.39 ^{ba}	6.1394±0.31 ^{ba}	5.98±0.15 ^b	6.165±0.1 ^{ba}	6.2475±0.23 ^a	6.2323±0.30 ^a	6.1464±0.19 ^{ba}	6.3656±0.4 ^a	0.259
Acidez	0.4173±0.04 ^{cd}	0.4418±0.02 ^b	0.4849±0.03 ^a	0.7004±0.12 ^c	0.3870±0.05 ^d	0.4020±0.05 ^{cd}	0.4118±0.05 ^{cd}	0.422±0.03 ^{cb}	0.157
TBARS	0.1694±0.05 ^c	0.2479±0.05 ^c	0.1789±0.04 ^c	0.6762±1.11 ^c	3.1313±1.74 ^b	0.3354±0.17 ^c	4.8399±3.06 ^a	0.2097±0.08 ^c	1.271

^{ab} Las medias entre columnas que no comparten letras iguales son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). LSD: diferencia mínima significativa. Pérdidas de peso expresadas en porcentaje atribuidas al almacenamiento en refrigeración, pH en unidades de pH, acidez en expresada en % de ácido láctico y TBARS en mg de malondialdehído kg⁻¹. T1: *patties* de pechuga de pollo molida, T2: *patties* sometidas a congelación (-20 °C) y descongelación (hasta 6 °C durante 8 h), T3: *patties* envasada al vacío, T4: *patties* sometidas a deshidratación a 70 °C durante 18 h en estufa de aire, T5: *patties* sometidas a cocción por inmersión en baño maría hasta alcanzar una temperatura interna de 75 °C; T6: *patties* adicionadas con 2 g 100 g⁻¹ de NaCl ; T7: *patties* cocinadas a la parrilla a 280 °C, 3 min por cada lado, T8: *patties* expuestas a la luz LED (900 lúmenes) durante 15 d

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable y al LGAC 2 del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo para realizar esta investigación.

Literatura citada

- AOAC 1990. Acidez titulable. 947.05. In Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist (AOAC). 15th ed. Washington DC.
- Ali, S., Zhang, W., Rajput, N., Khan, M. A., Li, C., & Zhou, G. (2015). Effect of multiple freeze–thaw cycles on the quality of chicken breast meat. *Food Chemistry*, 173, 808–814. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.095>
- Andersen, H. J., Bertelsen, G., Boegh-Soerensen, L., Shek, C. K., & Skibsted, L. H. (1988). Effect of light and packaging conditions on the colour stability of sliced ham. *Meat Science*, 22(4), 283–292. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(88\)90067-8](https://doi.org/10.1016/0309-1740(88)90067-8)
- Argyri, A. A., Panagou, E. Z., & Nychas, G.-J. (2012). Advances in vacuum and modified atmosphere packaging of poultry products. *Advances in Meat, Poultry and Seafood Packaging*, 205–247. Recuperado de <https://doi.org/10.1533/9780857095718.2.205>
- Armenteros, M., Heinonen, M., Ollilainen, V., Toldrá, F., & Estévez, M. (2009). Analysis of protein carbonyls in meat products by using the DNPH-method, fluorescence spectroscopy and liquid chromatography–electrospray ionisation–mass spectrometry (LC–ESI–MS). *Meat Science*, 83(1), 104–112. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.04.007>
- Beltran, E., Pla, R., Yuste, J., & Mor-Mur, M. (2003). Lipid oxidation of pressurized and cooked chicken: role of sodium chloride and mechanical processing on TBARS and hexanal values. *Meat Science*, 64(1), 19–25. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00132-8)
- Carvalho, R., Shimokomaki, M., & Estévez, M. (2017). Poultry Meat Color and Oxidation. En *Poultry Quality Evaluation* (pp. 133–157). Elsevier. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100763-1.00006-4>
- Castellini, C., Mugnai, C., & Dal Bosco, A. (2002). Effect of organic production system on broiler carcass and meat quality. *Meat Science*, 60(3), 219–225. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00124-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00124-3)

- Chan, J. T. Y., Omana, D. A., & Betti, M. (2011). Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat. *Food Chemistry*, 127(1), 109–117. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.095>
- Chouliara, E., Karatapanis, A., Savvaidis, I. N., & Kontominas, M. G. (2007). Combined effect of oregano essential oil and modified atmosphere packaging on shelf-life extension of fresh chicken breast meat, stored at 4°C. *Food Microbiology*, 24(6), 607–617. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.12.005>
- Clariana, M., Guerrero, L., Sárraga, C., & Garcia-Regueiro, J. A. (2012). Effects of high pressure application (400 and 900 MPa) and refrigerated storage time on the oxidative stability of sliced skin vacuum packed dry-cured ham. *Meat Science*, 90(2), 323–329. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.07.018>
- Coma, V. (2012). Antimicrobial and antioxidant active packaging for meat and poultry. En *Advances in Meat, Poultry and Seafood Packaging* (pp. 477–503). Elsevier. Recuperado de <https://doi.org/10.1533/9780857095718.4.477>
- Estévez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: A review. *Meat Science*, 89(3), 259–279. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.025>
- Estévez, M. (2015). Oxidative damage to poultry: from farm to fork. *Poultry Science*, 94(6), 1368–1378. Recuperado de <https://doi.org/10.3382/ps/pev094>
- Estévez, M. (2017). What's new in meat oxidation? En *New Aspects of Meat Quality* (pp. 91–109). Elsevier. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100593-4.00006-0>
- Fletcher, D. L. (2002). Poultry meat quality. *World's Poultry Science Journal*, 58(02), 131–145. Recuperado de <https://doi.org/10.1079/WPS20020013>
- Gertzou, I. N., Karabagias, I. K., Drosos, P. E., & Riganakos, K. A. (2017). Effect of combination of ozonation and vacuum packaging on shelf life extension of fresh chicken legs during storage under refrigeration. *Journal of Food Engineering*, 213, 18–26. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.026>
- Guerrero, L. I., Pérez Chabela, M. de L., & Ponce Alquicira, E. (2002). Curso práctico de tecnología de carnes y de pescado. Unidad Autónoma Metropolitana, Unidad Ixtapalapa, 171. Recuperado de <http://www.izt.uam.mx/ceu/publicaciones/MTC/carnes.pdf>
- Guerrero-Legarreta, I. (Ed.). (2010). *Handbook of poultry science and technology*. Hoboken, N.J: John Wiley. Recuperado de

- https://ubblab.weebly.com/uploads/4/7/4/6/47469791/handbook_of_poultry_science_and_technology.pdf
- Hernández, P., Zomeño, L., Ariño, B., & Blasco, A. (2004). Antioxidant, lipolytic and proteolytic enzyme activities in pork meat from different genotypes. *Meat Science*, 66(3), 525–529. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00155-4](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00155-4)
- Kingston, E. R., Monahan, F. J., Buckley, D. J., & Lynch, P. B. (1998). Lipid Oxidation in Cooked Pork as Affected by Vitamin E, Cooking and Storage Conditions. *Journal of Food Science*, 63(3), 386–389. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb15748.x>
- Ladikos, D., & Lougovois, V. (1990). Lipid oxidation in muscle foods: A review. *Food Chemistry*, 35(4), 295–314. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(90\)90019-Z](https://doi.org/10.1016/0308-8146(90)90019-Z)
- Lázaro, C. A., Conte-Júnior, C. A., Monteiro, M. L. G., Canto, A. C. V. S., Costa-Lima, B. R. C., Mano, S. B., & Franco, R. M. (2014). Effects of ultraviolet light on biogenic amines and other quality indicators of chicken meat during refrigerated storage. *Poultry Science*, 93(9), 2304–2313. Recuperado de <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03642>
- Lázaro, César Aquiles, Conte-Júnior, C. A., Canto, A. C. V. da C. S., Lucia, M., Monteiro, G., Lima, B. R. C. da C., ... Franco, R. M. (2012). Biochemical changes in alternative poultry meat during refrigerated storage. *Revista Brasileira de Ciência Veterinária*, 19(3), 195–200. Recuperado de <https://doi.org/10.4322/rbcv.2014.108>
- Lee, H.-S., & Bae, D.-H. (2017). Changes in the shelf life of frozen pork patties containing 10 and 15 percent fat according to different storage temperatures. *British Food Journal*, 120(1), 224–239. Recuperado de <https://doi.org/10.1108/BFJ-02-2017-0109>
- Lund, M. N., Hviid, M. S., & Skibsted, L. H. (2007). The combined effect of antioxidants and modified atmosphere packaging on protein and lipid oxidation in beef patties during chill storage. *Meat Science*, 76(2), 226–233. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.11.003>
- Mattila, P., & Kumpulainen, J. (2001). Coenzymes Q9 and Q10: Contents in Foods and Dietary Intake, 9. Recuperado de <https://doi.org/10.006/jfca.2000.0983>
- Min, B., & Ahn, D. U. (2005). Mechanism of lipid peroxidation in meat and meat products -A review. *Food Science and Biotechnology*, 14(1), 152–163. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Byungrok_Min/publication/228577245_Mechanism

_of_lipid_peroxidation_in_meat_and_meat_products_A_review/links/02e7e52865f433291a000000.pdf

- Min, Byungrok, Cordray, J. C., & Ahn, D. U. (2010). Effect of NaCl, myoglobin, Fe(II), and Fe(III) on lipid oxidation of raw and cooked chicken breast and beef loin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(1), 600–605. Recuperado de <https://doi.org/10.1021/jf9029404>
- Mirzaei, A., Afshoon, A., & Barmak, M. J. (2017). Antioxidant activity of meat from chicken and goat cooked in microwave cooking system. *International journal of advanced biotechnology and research*, 8(2), 1090–1094. Recuperado de <http://www.bipublication.com>
- O'Neill, L. M., Galvin, K., Morrissey, P. A., & Buckley, D. J. (1999). Effect of carnosine, salt and dietary vitamin E on the oxidative stability of chicken meat. *Meat Science*, 52(1), 89–94. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(98\)00152-1](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(98)00152-1)
- Pathera, A. K., Riar, C. S., Yadav, S., & Singh, P. K. (2016). Effect of cooking methods on lipid oxidation, microbiological and sensory quality of chicken nuggets under refrigerated storage. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1). Recuperado de <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1232472>
- Rahman, M. H., Hossain, M. M., Rahman, S. M. E., Amin, M. R., & Oh, D.-H. (2015). Evaluation of physicochemical deterioration and lipid oxidation of beef muscle affected by freeze-thaw cycles. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 35(6), 772–782. Recuperado de <https://doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.6.772>
- Shahidi, F., Rubin, L. j., & Wood, D. f. (1987). Control of lipid oxidation in cooked ground pork with antioxidants and dinitrosyl ferrohemochrome. *Journal of Food Science*, 52(3), 564–567. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb06675.x>
- Shahidi, F., Samaranyaka, A. G. P., & Pegg, R. B. (2014). Cooking of meat | Maillard Reaction and Browning. En *Encyclopedia of Meat Sciences* (pp. 391–403). Elsevier. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00130-6>
- Shahidi, Fereidoon. (2016). Oxidative stability and shelf life of meat and meat products (Elsevier Inc, pp. 373–389). Department of Biochemistry, Memorial University of Newfoundland, St. John's, NL, Canada. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-63067-056-6.00010-0>

- Tang, S., Kerry, J. P., Sheehan, D., Buckley, D. J., & Morrissey, P. A. (2001). Antioxidative effect of added tea catechins on susceptibility of cooked red meat, poultry and fish patties to lipid oxidation. *Food Research International*, 34(8), 651–657. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00190-3)
- Tarladgis, B. G., Watts, B. M., Younathan, M. T., & Dugan, L. (1960). A distillation method for the quantitative determination of malonaldehyde in rancid foods. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 37(1), 44–48. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/BF02630824>
- Veberg, A., Sørheim, O., Moan, J., Iani, V., Juzenas, P., Nilsen, A. N., & Wold, J. P. (2006). Measurement of lipid oxidation and porphyrins in high oxygen modified atmosphere and vacuum-packed minced turkey and pork meat by fluorescence spectra and images. *Meat Science*, 73(3), 511–520. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.02.001>
- Wood, J. D., Enser, M., Fisher, A. V., Nute, G. R., Sheard, P. R., Richardson, R. I., ... Whittington, F. M. (2008). Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. *Meat Science*, 78(4), 343–358. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.019>

CAPÍTULO II

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROENCAPSULADOS DE COENZIMA Q₁₀ GRADO ALIMENTICIO OBTENIDOS POR COACERVACIÓN SIMPLE

CAPÍTULO II.

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROESFERAS DE COENZIMA Q₁₀ GRADO ALIMENTICIO OBTENIDAS POR COACERVACIÓN SIMPLE

Damián-Hernández X.^a,
Recillas-Mota M. T.^b,
Rios-Corripio M. A.^c,
Hidalgo-Contreras J. V.^a,
Hernández-Cázares A. S.^{a*} aleyse@colpos.mx *Autor de correspondencia

^a Colegio de Postgraduados - Campus Córdoba. Programa de Posgrado en Innovación Agroalimentaria Sustentable. Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946.

^b Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Carretera a La Victoria Km 0.6, Hermosillo, Sonora, México. C.P. 83304.

^c CONACYT-Colegio de Postgraduados-Campus Córdoba, Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946.

Resumen

El objetivo de este estudio consistió en encapsular coenzima Q₁₀ grado alimenticio mediante coacervación simple y caracterizar esta fisicoquímicamente. Alginato de sodio 1 % (p/v) y cloruro de calcio 1.5 % (p/v) se utilizó como material base. ME de alginato de sodio (T1), de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] en polvo (T2), de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] disuelta en etanol [50 mL] (T3), de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] polvo (T4) y de alginato y CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] en etanol [50 mL] (T5) se elaboraron. Rendimiento, humedad, a_w, tamaño de partícula, hinchamiento, eficiencia de encapsulación, estabilidad de proceso y térmica se determinaron para su caracterización. Los resultados mostraron buena estabilidad para los cuatro tratamientos con CoQ₁₀; mayor eficiencia de encapsulación en el T4 y T5 (61 %), adecuado procesamiento, buena liberación del encapsulado y dispersión de la CoQ₁₀ en la producción del T5.

Palabras clave: Microesferas, coacervación simple, coenzima Q₁₀, FTIR.

1.1. Introducción

Existen diferentes metodologías que permiten inmovilizar compuestos bioactivos, como antioxidantes, colorantes, aceites esenciales y diferentes aditivos, para uso de la industria farmacéutica, de cosméticos, alimentos, agricultura, entre otros (Devi, Hazarika, Deka, & Kakati, 2012). La encapsulación de compuestos es una técnica que permite la formación de una barrera en un compuesto que puede ser de naturaleza sólida, líquida o gaseosa (Desai & Park, 2005). Promueve el aumento de vida útil de los productos encapsulados al retardar las reacciones químicas o bioquímicas del compuesto y facilita su manejo (Gómez *et al.*, 2018).

Los diferentes procesos para encapsular compuestos se llevan a cabo, en algunos casos, con equipamiento altamente especializado, el procesamiento puede ser en lote o continuo, uso de solventes orgánicos potencialmente tóxicos y contaminantes, polímeros de naturaleza no alimentaria (Chan *et al.*, 2016) o bien mediante el uso de emulsiones, polímeros naturales, o mediante procesamientos relativamente sencillos (Gibbs, Kermasha, Alli, & Mulligan, 1999; Madene, Jacquot, Scher, & Desobry, 2006; Moschakis & Biliaderis, 2017). La dificultad del procesamiento depende entonces del método empleado, de los compuestos encapsulados y del equipamiento requerido para su desarrollo (Gómez *et al.*, 2018).

Madene *et al.* (2006) mencionan que los factores importantes a considerar en las metodologías de encapsulación se encuentran la naturaleza química, el peso molecular, la funcionalidad química, la polaridad y la posible volatilidad de los compuestos a encapsular. Por lo que manipular su higroscopia, densidad e incorporación en las muestras, enmascara aromas, separa un componente para evitar su reacción instantánea, vuelve más estable un compuesto y mantiene propiedades nutracéuticas y funcionales (Astray, Gonzalez-Barreiro, Mejuto, Rial-Otero, & Simal-Gándara, 2009).

Las técnicas de microencapsulación de compuestos, se llevan a cabo por procesos químicos o mecánicos. Los procesos químicos contemplan a la coacervación, co-cristalización, polimerización interfacial, gelificación iónica, incompatibilidad polimérica, atrapamiento de liposomas, inclusión molecular; y los mecánicos como el secado por aspersión, el secado por congelamiento/enfriamiento y la extrusión (Madene *et al.*, 2006; Parra, 2010; Yáñez *et al.*, 2005).

La encapsulación por liposomas es la técnica más empleada en la encapsulación de la coenzima Q₁₀ (CoQ₁₀) y tiene la particularidad de aceptar en su estructura compuestos hidrofóbicos e hidrofílicos, debido a las bicapas de las micelas generadas, utilizando lípidos, con la desventaja de variabilidad en rendimiento, cuando se trabaja por lote y difícil escalamiento a nivel industrial (Demirci, Caglar, Cakir, & Gülseren, 2017).

La metodología de coacervación, requiere de un polímero que se separará en gotas para formar el coacervado, el cual se deposita sobre los compuestos a encapsular, mismos que deben ser compatibles e insolubles en el medio de coacervación; de esta manera formar capas y por gelificación formar las cápsulas o esferas; este proceso se considera el método original de encapsulación y se presenta en soluciones coloidales (Madene *et al.*, 2006).

En la industria de los alimentos, el uso de los encapsulados con compuestos bioactivos ha incrementado debido a la protección que ofrece para mantener compuestos estables y viables por mayor periodo de tiempo (Parra, 2010) o en algunos casos mejorar la funcionalidad biológica, al hacerlos más biodisponibles (Demirci *et al.*, 2017). El alginato de sodio ha sido ampliamente utilizado como agente encapsulante, por su efecto probiótico y su ingesta como fibra (Nazzaro, Fratianni, Coppola, Sada, & Orlando, 2009). En tanto, la CoQ₁₀ ubiquinona o ubidecarenona (2,3 - dimetoxi - 5 - metil -6-multiprenil-1,4-benzoquinona) (Lee & Tsai, 2010), es un antioxidante estable, tiene estructura simple y no produce reacciones inmunes peligrosas.

La CoQ₁₀ se sintetiza endógenamente y protege contra daño oxidativo a lípidos, proteínas y ADN mitocondrial principalmente (Bentinger, Brismar, & Dallner, 2007), es mucho más eficaz que la vitamina E, en proteger contra la peroxidación de proteínas de baja densidad (LDL) (Ingold, Bowry, Stocker, & Walling, 1993). Su uso en la industria de los alimentos y bebidas está limitado debido a su baja solubilidad en agua (Yoon, Seo, & Lim, 2014). El efecto antioxidante de la ubiquinona ha sido estudiado por Petillo y Hultin (2008) quienes encontraron que esta puede ser un potente eliminador de radicales libres cuando la matriz a la que es suministrada se somete a tratamientos térmicos. Cabrini, Pasquali, Tadolini, Sechi y Landi (1986) indican que la acción antioxidante de la ubiquinona es posible debido a interacciones físico-químicas de la cadena de unidades isopreniodes y las cadenas de los fosfolípidos.

El estudio de la CoQ₁₀ se ha enfocado en mejorar su solubilidad y biodisponibilidad (Yoon *et al.*, 2014). Pegoraro *et al.* (2017) microencapsuló CoQ₁₀ y vitamina E por nanoencapsulación con fines médicos y probó su efecto protector contra lesiones cutáneas, en ratas; la técnica utilizada hace uso de solventes orgánicos y estabilizantes. Wang, Vongsvivut, Adhikari y Barrow (2015) encapsularon aceite de tuna fortificado con CoQ₁₀, en una concentración de 0.05 %, por coacervación compleja con el uso de agentes reticulantes y secado por liofilización. Stratulat *et al.* (2013) adicionaron CoQ₁₀ en emulsión con caseinato de calcio, lecitina y aceite de linaza, para la elaboración de quesos funcionales, logrando retener el 93 % del compuesto.

Por coacervación simple se ha encapsulado liposomas de CoQ₁₀ [1 mg mL⁻¹] en alginato de sodio, con fines médicos, para mantener la coenzima más biodisponible en el intestino delgado (Sakchareonkeat *et al.*, 2013). Por lo que ofrecer una metodología de encapsulación de la CoQ₁₀ como antioxidante natural de naturaleza liposoluble alimentario, es un reto importante para años futuros.

En este contexto, el objetivo de este estudio fue el de elaborar y caracterizar una microesfera (ME) de CoQ₁₀ con alginato de sodio, a fin de aprovechar su capacidad antioxidante, mejorar su manipulación utilizando la metodología de coacervación simple y proponerla como aditivo alimentario.

1.2. Materiales y métodos

1.2.1. Reactivos químicos

Se utilizó coenzima Q₁₀ marca Sigma Aldrich® como estándar, coenzima Q₁₀ grado alimenticio marca Nupromic®, alginato de sodio y cloruro de calcio grado alimenticio de la marca Cosmopolita®, hexano grado HPLC marca Sigma Aldrich®, etanol marca Meyer®, tampón citrato de sodio pH 6.2 y 7.2., agua bidestilada y grado Milli-Q para la preparación de soluciones.

1.2.2. Elaboración de las microesferas

Para este estudio se diseñaron cinco tratamientos, **T1**: ME sin inclusión de CoQ₁₀; **T2**: ME de alginato+CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] en polvo; **T3**: ME de alginato+CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] en 50 mL de etanol; **T4**: ME de alginato+CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] en polvo y **T5**: ME de alginato+CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol.

La CoQ₁₀ se homogeneizó en una solución de alginato de sodio al 1.0 % (p/v) a 11000 rpm 5 min con ayuda de un Ultra-Turrax. Esta dispersión se dejó caer gota a gota con ayuda de una bomba peristáltica en una solución de cloruro de calcio (CaCl₂) al 1.5 % (p/v) para formar las ME. Las ME obtenidas se recuperaron y lavaron con agua bidestilada, se retiró el exceso de humedad, se secaron en estufa al vacío y se congelaron a -20 °C hasta su uso.

1.2.3. Rendimiento en peso seco

El rendimiento en peso seco del proceso de microencapsulación se determinó con base en la metodología sugerida por Chan *et al.* (2016). El peso de las esferas secas obtenidas se dividió entre el peso del alginato de sodio y CoQ₁₀ utilizados para la generación de las mismas, el rendimiento se expresó en porcentaje, según la siguiente ecuación (1).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Peso final de las esferas}}{\text{Peso de los ingredientes secos}} \times 100 \quad (1)$$

1.2.4. Humedad y a_w

La determinación de humedad se realizó de acuerdo a Chan *et al.* (2016), con algunas modificaciones. 100 mg de ME se colocó en una estufa de aire a 100 °C hasta peso constante. Los resultados se obtuvieron por gravimetría y se expresaron en g 100 g⁻¹ de muestra, de acuerdo a la ecuación (2).

$$\text{Humedad} = \frac{\text{Pérdida de peso en el secado}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (2)$$

La determinación de actividad de agua (a_w), se realizó con un AquaLab® (Series 3TE; Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA) con una sensibilidad de ±0.001. El equipo se calibró con estándares de NaCl, LiCl y agua bidestilada, según las instrucciones del fabricante, en un cuarto a temperatura constante.

1.2.5. Microscopía óptica invertida

La morfología superficial de la ME, el tiempo de liberación del componente activo, el hinchamiento y el rango de tamaño de partícula, se determinó utilizando la técnica de microscopía óptica invertida con un microscopio AmScope® Modelo FMA050 (USA). La morfología

superficial (redondez o deformidad) de la ME y la dispersión del componente activo de la esfera se analizó y observó en las imágenes obtenidas. El tiempo de liberación se determinó al observar una ME sumergida en 1 mL de solución tampón citrato pH 6.2 durante 15 min, pH típico de matrices alimentarias. El hinchamiento se determinó con base en la metodología propuesta por Gupta y Ravi Kumar (2000) , una ME se impregno con 1 mL de agua bidestilada y se midió a los 0, 3, 5, 10, 20, 30, 60 y 120 min, el hinchamiento se calculó con base en la siguiente fórmula (3).

$$\text{Hinchamiento} = \frac{\text{Medición final} - \text{medición inicial}}{\text{Medición inicial}} \quad (3)$$

El rango de tamaño de partícula se obtuvo al medir 100 ME de cada tratamiento en una resolución de 4X y 10X, graficando la frecuencia del tamaño.

1.2.6. Extracción de la Coenzima Q₁₀

La extracción de la CoQ₁₀ se siguió según lo descrito por Durante *et al.* (2012), 100 mg de ME se humectaron con 30 mL de tampón citrato pH 7.2 y se agitaron durante 2 h, se adicionó 5 mL de hexano grado HPLC, se homogeneizó por 2 min y se centrifugó a 18973 g durante 5 min; 2 mL del sobrenadante se evaporó con ayuda de gas nitrógeno por 1 h y se congeló a -20 °C hasta su uso para el análisis de eficiencia de encapsulamiento y FTIR.

1.2.7. Espectroscopía UV-Vis

La eficiencia de encapsulación de la CoQ₁₀ se determinó según lo descrito por Xia y Xu (2006). La CoQ₁₀ extraída se disolvió con 2 mL de etanol a 40 °C, se homogenizó durante 3 min en un vortex y se leyó la absorbancia por espectroscopia de ultravioleta visible a 275 nm. Se realizó una curva de calibración de la CoQ₁₀ grado alimenticio a 4 puntos 30, 50, 80 y 100 µg mL⁻¹ con etanol, donde se graficó la concentración de CoQ₁₀ (C) como abscisa y ΔA (incremento de absorbancia) como ordenada, la ecuación obtenida fue $A = 0.0187 C + 0.0832$ ($r^2 \geq 0.9999$). El etanol se leyó como blanco.

Para la obtención del contenido que CoQ₁₀ incorporada a las esferas se despejo la ecuación de la recta: $C = (A - 0.0832) / 0.0187$ y para la eficiencia de encapsulación se obtuvo mediante la siguiente ecuación (4):

$$\% \text{ Eficiencia de encapsulación} = \frac{\text{CoQ10 encapsulada}}{\text{CoQ10 añadida a capsulas}} \times 100 \quad (4)$$

1.2.8. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis de la interacción molecular del coacervado y el principio activo; así como de la estabilidad del proceso y térmica, se realizó utilizando un espectrofotómetro Thermo Scientific® modelo Nicolet™ iS™ 50 (USA) equipado con detector de sulfato deuterado. El método de muestreo fue Reflectancia Total Atenuada (ATR). Los espectros se obtuvieron por triplicado. Se utilizaron 32 scans con una resolución de 4 cm⁻¹ en la región espectral de 4000 a 400 cm⁻¹. El análisis de los espectros se realizó utilizando el software origin® PRO 2016 (USA). La estabilidad de la molécula al proceso de encapsulamiento se realizó con una muestra de CoQ₁₀ seca, obtenida por extracción. Para la estabilidad térmica, 100 mg de ME se colocaron en un tampón citrato pH 6.2 a 80 y 120 °C por 10 min, y se realizó inmediatamente la extracción para su lectura en FTIR.

1.2.9. Análisis estadístico

Todos los análisis se realizaron por triplicado, se realizó estadística descriptiva para las variables cuantitativas, obteniendo media ± la desviación estándar. La comparación de medias se realizó con la prueba Dunnett, así también realizaron las comparaciones de los contrastes: T2 vs T3; T2 vs T4; T4 vs T5 y T3 vs T5. Para la variable respuesta “hinchamiento”, se realizó un análisis de medidas repetidas bajo la estructura de covarianza Toeplitz. En el análisis de los datos se usó el procedimiento PROC GLIMMIX de SAS versión 9.4 con una $P \leq 0.05$.

1.3. Resultados y discusión

1.3.1. Rendimiento en peso seco

Los resultados obtenidos del rendimiento de elaboración de las ME, se muestran en el Cuadro 1, donde se observa que el T1 mostró el mayor rendimiento. Esto puede ser posible debido a la versatilidad del alginato como estabilizante, aglutinante, espesante, inmovilizando agua contenida en la solución coloidal cuando ocurre su gelificación (Lupo-Pasin, González-Azón, & Maestro-Garriga, 2012), por lo que es conocido como polímero superabsorbente. Pero al adicionar el compuesto bioactivo, CoQ₁₀, en el proceso de encapsulación, el T5 mostró el mejor rendimiento, seguido de T3, T4 y T2. El alginato, además es un polielectrolito, le confiere la capacidad de interactuar con otras moléculas permitiendo formar sistemas mixtos y otorga mejoras en las

propiedades estructurales del gel de alginato (Lupo-Pasin *et al.*, 2012). Así, los rendimientos obtenidos desde un punto de vista industrial, impacta en la producción y en el aprovechamiento comercial.

Chan *et al.*, (2016) obtuvieron por el método de secado por aspersión, microcápsulas de κ -carragenina conteniendo CoQ₁₀, con rendimientos en un rango de 26.77 a 46.73 %, una humedad de 2.67 % a 2.88 % y una a_w en el rango de 0.38 a 0.40. Por lo que los resultados obtenidos en este estudio son muy prometedores, el rendimiento es más alto, quizá derivado de un mayor contenido de humedad, pero con a_w bajas en los tratamientos adicionados con CoQ₁₀, lo que le confiere buena estabilidad a las ME.

1.3.2. Humedad y a_w

En el análisis de humedad y a_w , las ME mostraron diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de Dunnett. El T1 mostro lo niveles más altos (Cuadro 1), los cuales fueron significativamente diferentes al resto de los tratamientos (2, 3, 4 y 5). Al realizar las comparaciones planeadas, el T2 fue diferente significativamente ($P < 0.0001$) con el T3 y T4 y al analizar el T4 vs T5, el valor de P -value obtenido fue de $P = 0.0002$ en humedad y $P < 0.0001$ para a_w . Asimismo, al comparar T3 vs T5, estos indicaron una $P < 0.0001$, lo que muestra que cada par de tratamiento comparado mostró diferencias significativas entre ellos. Razón por la cual, se cree que la adición de CoQ₁₀ en el proceso de elaboración de ME contribuyó en reducir la humedad y a_w .

Cuando se analizan tan solo los tratamientos con inclusión de CoQ₁₀, el T3 mostró la menor humedad y a_w y el T2 los mayores valores (Cuadro 1). Ambos tratamientos contienen una concentración de 1 g L⁻¹ de CoQ₁₀ en cápsulas secas; pero en el T3 se utilizó etanol como disolvente. La a_w en general mostró valores por debajo de 0.6, valores deseables para minimizar el crecimiento de bacterias, hongos y levaduras, otorgándole estabilidad, sobretodo alargar su vida útil durante el almacenamiento. Lee y Tsai (2010) y Li y Chen (2017) utilizaron métodos de encapsulamiento de la CoQ₁₀ para la industria farmacéutica, con la inyección de solventes con el etanol y con la dispersión de película seca con cloroformo, para dispersar el principio activo. Esto permitió a su vez, remover los solventes sin influir directamente en las características de la cápsula.

Razón por la cual se considera que la humedad y a_w de las ME está relacionada directamente con la adición de CoQ₁₀, al preferir el alginato esta molécula que la del agua.

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica de las ME de alginato + CoQ₁₀, elaboradas por el método de coacervación simple

Esferas	% Rendimiento en peso seco	% Eficiencia de encapsulamiento	Humedad ±DS (g 100 g ⁻¹)	a_w ±DS
T1	143.08	----	37.45±0.01	0.94±0.00
T2	107.50	45.01	21.50±0.00	0.69±0.00
T3	117.72	46.81	14.82±0.00	0.25±0.00
T4	112.47	61.26	16.17±0.00	0.42±0.00
T5	119.83	61.24	18.06±0.00	0.55±0.00

T1: ME sin inclusión de CoQ₁₀, **T2:** ME de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] en polvo; **T3:** ME de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol; **T4:** ME de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] en polvo y **T5:** ME de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol.

1.3.3. Microscopía óptica invertida

Morfología superficial de las microesferas de CoQ₁₀

El proceso de microencapsulación por coacervación simple permitió obtener ME con la CoQ₁₀ dispersa en forma de diminutas partículas en la matriz de alginato (Figura 1A). Una vez secas presentaron forma de polvo amorfo de color amarillo (Figura 1B); similar a la CoQ₁₀ pura; la cual, tiene una forma irregular, con superficies rugosas y proyecciones (Chan *et al.*, 2016).

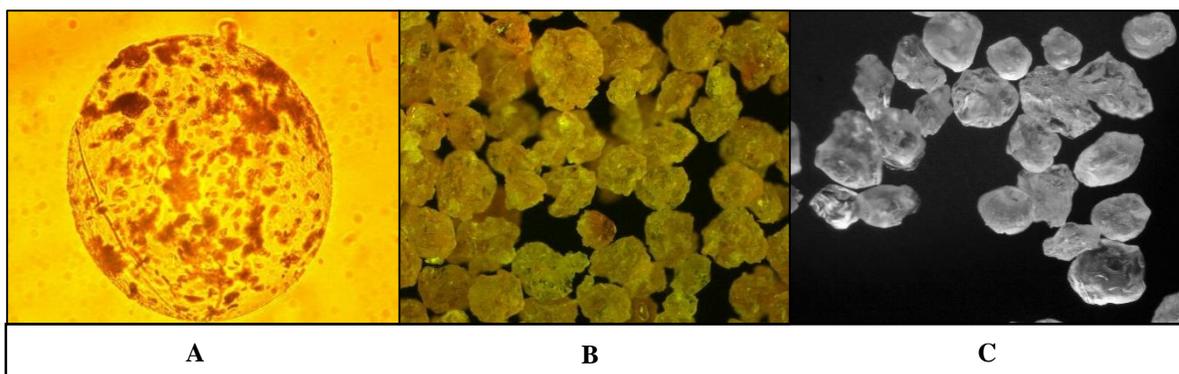


Figura 1. Microesfera húmeda de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol – T5 (A) [Resolución 10X], microesfera secas del T5 (B) [Resolución 4X] y microesferas de alginato -T1 (C).

Gharsallaoui *et al.* (2007) mencionan que la forma de la cápsula depende los materiales de la pared, del principio activo y el resto de los ingredientes utilizados en su elaboración. La morfología superficial fue similar en los cinco tratamientos analizados, incluyendo el T1, el cual no incluía CoQ₁₀ (Figura 1C). En la Figura 1, se presenta como ejemplo de este análisis a los T5 (B) y T1

(C), ambas ME presentaron rugosidad en la superficie, atribuida a la ausencia de un centro líquido. En el T5 como esfera húmeda, se notó la distribución homogénea del compuesto activo (Figura 1.A), pero con ligeros agregados, aun después de haber sido solubilizada en etanol; lo cual es atribuido a la propiedad hidrófoba de las unidades isoprenoides de la CoQ₁₀.

Zhao *et al.* (2013) indicaron, que la molécula de CoQ₁₀ es soluble en etanol, y que dicha solubilidad aumenta a una temperatura de 37 °C. En las ME obtenidas en este estudio, se incorporó adecuadamente CoQ₁₀ (Cuadro 1), sin necesidad de adicionar aceites para solubilizarla (Balakrishnan *et al.*, 2009; Chan *et al.*, 2016; Lee & Tsai, 2010; Xia & Xu, 2006), sin comprometer la actividad antioxidante de la coenzima (Petillo & Hultin, 2008). No obstante, encapsular compuestos con características lipídicas retarda su oxidación, con mayor eficiencia si se conservan en ausencia de luz y en refrigeración (Durante *et al.*, 2012), como se ha planteado en este estudio. Nehilla *et al.* (2008) comprobó que el uso de surfactantes no es necesario para prevenir la formación de agregados en la encapsulación de compuestos, ni para mantener la función antioxidante del compuesto activo estable. Además la adición del alginato como parte estructural de la ME provee una efectiva, segura y barata forma de atrapar compuestos funcionales para uso en la industria cosmética, médica y de alimentos (Durante *et al.*, 2012).

Tiempo de liberación del componente activo

El tiempo de liberación de los tratamientos con adición de CoQ₁₀, se observó al impregnar las ME en tampón citrato pH 6.2. En estas condiciones la estructura se rompe casi instantáneamente y se separa en pequeñas partículas, llegando a la dispersión total en 15 min. En la Figura 2, se muestra la evolución de la degradación de la red polimérica del T5.

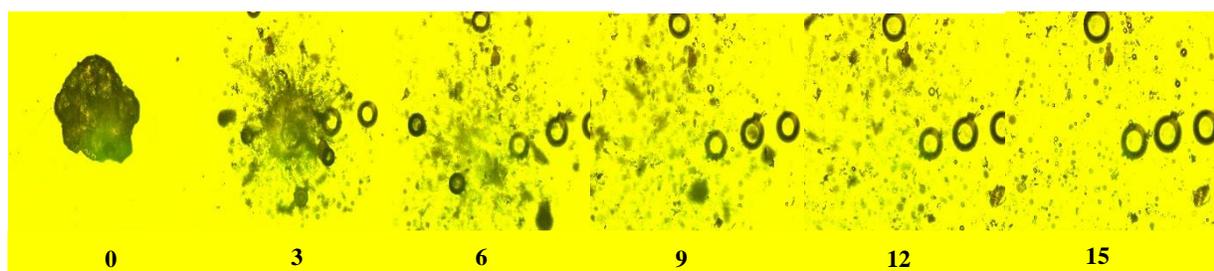


Figura 2. Comportamiento de la microesfera seca del T5 [Alginato + CoQ₁₀ (2 g L⁻¹) + 50 mL de etanol] impregnada con tampón citrato pH 6.2, a los 0, 3, 6, 9, 12, 15 min, observada al microscopio en una resolución de 4X.

Sakchareonkeat *et al.* (2013) observaron una liberación prolongada en esferas de alginato conteniendo liposomas de CoQ₁₀, durante 2 h a un pH de 2. En dicho estudio la liberación de la CoQ₁₀ estuvo en función de la erosión del gel y mantuvo estable en un 60 % los liposomas durante 60 min. Por lo que es posible decir que la liberación del antioxidante está en función del pH del medio circundante (K. Gupta & Ravi Kumar, 2000) y de la erosión de la pared de las esferas, además la liberación puede ser controlada manipulando dichos ambientes externos.

La competencia iónica, en este sentido juega un papel clave en la degradación de la red polimérica. Como se observó en este estudio, la ME mantuvo su estructura por mayor tiempo en agua bidestilada, como se muestra en el apartado de hinchamiento, en comparación con un pH de 6.2. Devi *et al.* (2017), mencionan que la liberación del componente activo depende de la concentración de este, de la cantidad de reticulante y de la concentración del polímero. La estructura de las ME puede ser más o menos rígida en función de la concentración de los componentes con que se elabora la esfera.

Hinchamiento

El análisis de covarianza de medidas repetidas para la variable hinchamiento indicó que las muestras presentaron diferencias con respecto al tiempo de inmersión (Cuadro 2); pero no así entre tratamientos o en la interacción de tratamiento/tiempo. La máxima absorción de agua de las ME se obtuvo a los 10 min (Figura 3), a partir de ahí se mantuvieron estables en estructura por un tiempo de 2 h. La velocidad de crecimiento de la ME a los 10 min fue de 0.022, 0.026, 0.027, 0.025 y 0.019 (d/t), para los tratamientos 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente; sin embargo, no fueron significativas.

Gupta y Kumar (2000) mencionan que el proceso de hinchamiento da lugar a la relajación mecánica de las estructuras poliméricas y a la disociación del enlace de hidrógeno hasta lograr que las esferas queden totalmente solvatadas. Por lo tanto, la degradación del polímero estará en función del grado de reticulación de la estructura de las esferas (Gupta & Kumar, 2000) dando lugar a la liberación del componente activo, relacionando el hinchamiento con el porcentaje de liberación, y el pH del medio. Así, el principio activo se libera a partir de que ocurra la apertura

de la red polimérica. En este estudio, es necesario un tiempo de 10 min para que la ME esté totalmente solvatada en inmersión total.

Cuadro 2. Medias del tiempo de inmersión del T1, T2, T3, T4 y T5 para la variable hinchamiento

Tiempo	Hinchamiento (μm)
120	0.3055 ^a
60	0.2910 ^a
30	0.2829 ^a
20	0.2647 ^a
10	0.2421 ^a
5	0.1643 ^b
3	0.1036 ^c
0	-448E-18 ^d

LS-medias con la misma letra no son significativamente diferente, con una $P \leq 0.05$. **T1:** ME sin inclusión de CoQ₁₀, **T2:** ME de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] en polvo; **T3:** ME de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol; **T4:** ME de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] en polvo y **T5:** ME de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol.

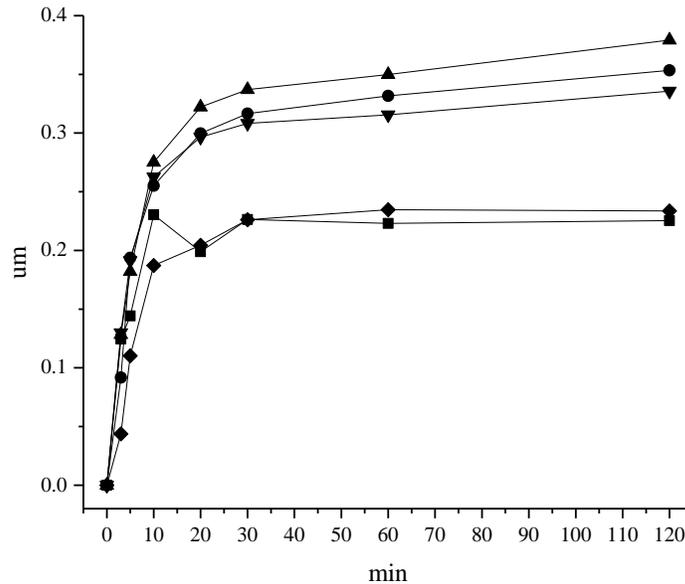


Figura 3. Poder de hinchamiento de las microesferas de alginato y CoQ₁₀ elaboradas por coacervación simple. Medidas indicadas en μm . ■ **T1:** microesferas de alginato de sodio; ● **T2:** microesferas de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] en polvo; ▲ **T3:** microesferas de alginato + Q₁₀ [1 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol; ▼ **T4:** microesferas de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] polvo; ◆ **T5:** microesferas de alginato + CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] disuelta en etanol.

De igual manera, Dima, Cotârlet, Alexe y Dima (2014) mencionan que el grado de hinchamiento de la esfera, está relacionado con la velocidad de liberación del componente activo, y tiene una estrecha relación con el tiempo y la temperatura. Por lo que es necesario optimizar las condiciones de temperatura y pH en la que se pretende adicionar las ME. En este estudio, se realizó el análisis a un pH de 6.2, pH óptimo de diversas matrices alimentarias. La finalidad de esto fue evaluar su comportamiento; ya que la temperatura libera más fácilmente los componentes debido a cambios estructurales de la matriz polimérica.

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula de la ME se observa en la Figura 4. Los gráficos de frecuencia acumulada, para los cinco tratamientos, siguieron un comportamiento normal. El T1 y T2 obtuvo su mayor porcentaje de tamaño de partícula en un rango de 250-300 μm , con el 45 y 32 % respectivamente. El T3, 41 % en el rango de 200-250 μm . El T4 y T5 presentaron similitud en los rangos de 200-250 y 250-300; los cuales evidenciaron un tamaño de partícula de 30% para el T4 y 38 % para el T5. Además, los tratamientos 2, 3, 4 y 5 fueron diferentes estadísticamente con el T1 ($P<0.0001$). El T2 fue diferente del T3 ($P<0.0001$) y T4 ($P=0.0147$), por su parte el T4 fue similar al T5 ($P=0.3130$) y este a su vez fue diferente del T3 ($P=0.1606$), según la prueba de Dunnett.

Chan *et al.* (2016) mencionan que la viscosidad de la solución empleada juega un rol importante en definir el tamaño de partícula, a mayor viscosidad mayor tamaño de partícula. Sin embargo, en este estudio no fue clara la relación que juega la viscosidad de la solución empleada. Aunque Devi *et al.* (2017) indicaron que el tamaño de las microcápsulas aumenta a medida que se incrementa la cantidad de principio activo (aceite de oliva) y polímero. Además, Stratulat *et al.* (2013), encontraron que la incorporar la CoQ₁₀ disuelta en aceite reduce la viscosidad de la solución, haciendo que el rompimiento de las gotas sea más fácil y logrando menores tamaños de partícula. En este estudio los tratamientos con etanol, como solvente de la CoQ₁₀, redujeron la viscosidad de la solución coloidal del alginato, logrando en el T3 los menores tamaños de partícula (Figura 4), ya que, contenían una menor concentración de CoQ₁₀ disuelta en etanol; por su parte el T5, además mostró la mejor homogeneidad de tamaño.

En general, el porcentaje obtenido en el rango de 250-300 μm fue de 34.4 % considerando todos los tratamientos. Considerándose el rango más estable por efecto del procesamiento

completamente manual, lo que puede ser una oportunidad de mejora en el método de encapsulamiento mediante el uso de equipos con goteo automatizado. Sin embargo, todas las ME obtenidas se encontraron en el rango de tamaño para ser consideradas óptimas en el tamaño de partícula.

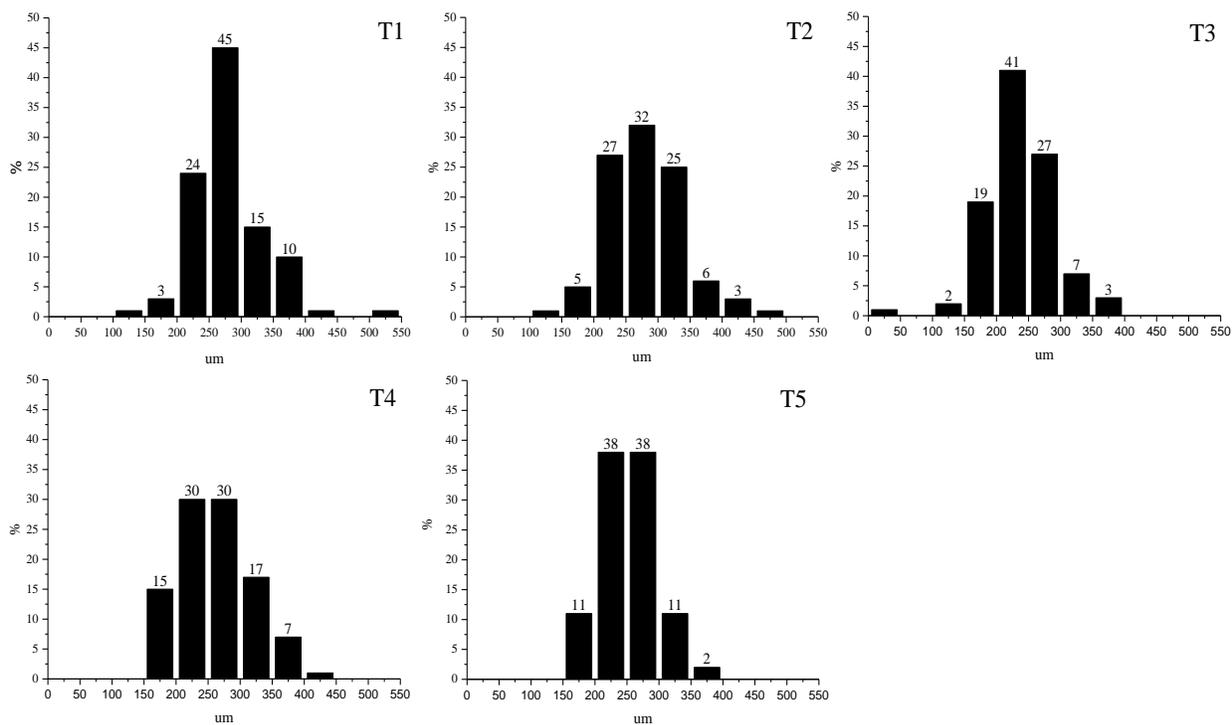


Figura 4. Frecuencia del rango de tamaño de partícula de las esferas obtenidas por coacervación simple. **T1:** microsferas de alginato, **T2:** microsferas de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] en polvo, **T3:** microsferas de alginato + CoQ₁₀ [1 g L⁻¹] disuelta en 50 mL de etanol, **T4:** microsferas de alginato y CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] polvo, **T5:** microsferas de alginato y CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] disuelta en etanol.

1.3.4. Espectroscopia UV-Vis

Eficiencia de encapsulamiento (EE).

La eficiencia de encapsulamiento de las ME de CoQ₁₀ indicó que los T4 y T5 obtuvieron el mayor porcentaje, de 61.26 y 61.24 %, respectivamente; además, el T5, mostró buena distribución en el tamaño de partícula. Chan *et al.* (2016) observan que a mayor contenido de CoQ₁₀ homogeneizada en aceite, la eficiencia de encapsulación disminuye debido a la insuficiencia del polímero encapsulante para atrapar el componente activo. Sin embargo, en este estudio las cantidades incorporadas permitieron un buen atrapamiento, como se observa en el Cuadro 1, a mayor concentración de CoQ₁₀ (2 g L⁻¹) adicionada a la ME, el porcentaje de EE aumenta. Sakchareonkeat *et al.* (2013) obtuvieron una EE del 85.5 % en microcápsulas de alginato de sodio y CaCl₂ al 1:1

por atrapamiento en liposomas de CoQ₁₀ [1 mg mL⁻¹ de CoQ₁₀]. La mitad de lo incorporado en este estudio para los tratamientos 4 y 5 [2 g L⁻¹].

Por otro lado, se indica que a mayor velocidad de homogenización (18,000 rpm) del coacervado, con el principio activo, se reduce la eficiencia de encapsulación con ingredientes funcionales liposolubles. Wang *et al.* (2015) demostraron que a mayor velocidad de homogenización se incorpora aire, el cual es atrapado en el interior de la microcápsula y se escapa al momento del secado, liberando el compuesto de la microcápsula. Para efficientizar el encapsulado en este estudio se redujo la velocidad de homogenización a 11,000 rpm, con resultados prometedores, incrementando además el rendimiento.

La EE, el rendimiento de la microcápsula y el tamaño de partícula son características primordiales para decidir el tipo de proceso de microencapsulación a utilizar; parámetros que se complementan con los análisis fisicoquímicos como humedad y pH. En este sentido, el T5 es el tratamiento que mejor comportamiento mostró en estas variables, con posibilidades de mantener la vida útil de la esfera por más tiempo.

1.3.5. Espectroscopia de infrarrojo Transformada de Fourier.

Efectividad del proceso de microencapsulado.

A fin de corroborar la pureza y estabilidad de la CoQ₁₀ grado alimenticio incorporada a las ME se comparó el espectro FTIR con el obtenido de la CoQ₁₀ grado reactivo (Sigma Aldrich®, Figura 5a). El bandeo característico de la CoQ₁₀ grado reactivo y alimenticio (Figura 5b) se observa en la zona de 1444.86 a 1101.80 cm⁻¹ y de 876.42 a 742.42 cm⁻¹, e indican la similitud de las moléculas (Chan *et al.*, 2016).

La efectividad del proceso de microencapsulado de la CoQ₁₀ con el coacervado se identificó mediante la comparación de los espectros del alginato de sodio grado alimenticio (Figura 6a), la CoQ₁₀ grado alimenticio (Figura 6b), las esferas de alginato sin adición de CoQ₁₀ (Figura 6c); así como las esferas cargadas con CoQ₁₀ (Figura 6d). En el espectro FTIR del alginato, se encontraron las bandas características en 3296 cm⁻¹ y 2926 cm⁻¹ para los grupos funcionales O-H, C-H, en 1590 cm⁻¹ y 1415 cm⁻¹ para los grupos C=O (Devi *et al.*, 2012; Fertah *et al.*, 2017); así como para las esferas de alginato sin adición de CoQ₁₀. El espectro FTIR de la coenzima Q₁₀ grado alimenticio mostró bandas características en 1647 cm⁻¹ de las unidades isoprenoides y 1609 cm⁻¹ para el anillo

de benzoquinona así como un bandeo característico en la zona de 2966.61 a 2842.63 cm^{-1} en CoQ_{10} , similar a lo reportado por Chan *et al.* (2016).

El espectro FTIR de las esferas cargadas con CoQ_{10} , hace notar la presencia de bandeo en el rango de 2830 a 2979 cm^{-1} , mostrando la presencia de la CoQ_{10} encapsulada en la ME. Las bandas características de las unidades isoprenoides y del anillo de benzoquinona no se observaron, lo que es atribuido a la baja concentración de CoQ_{10} , datos similares a lo reportado por Wang *et al.* (2015) quienes no observaron cambios considerables en encapsulados de compuestos lipofílicos como la CoQ_{10} , a una concentración de 0.03 a 0.1%.

Chan *et al.* (2016) observaron por FTIR los componentes de la cápsula e indicaron que las bandas de la microcápsula no se modificaron considerablemente, respecto a los componentes, sino que sufrían un ensanchamiento atribuido al carácter amorfo de la cápsula. Similar a lo encontrado en esta investigación donde es posible observar la presencia de los compuestos que forman la esfera Figura 6d. Donde la benzoquinona y las unidades isoprenoides de la CoQ_{10} se cubren con el alginato, atribuido a la concentración de la CoQ_{10} en la esfera (8%). Esta cobertura de las unidades isoprenoides representan una mejora en la solubilidad de la CoQ_{10} , debido al carácter apolar de ellas, similar a lo encontrado por Chan *et al.* (2016).

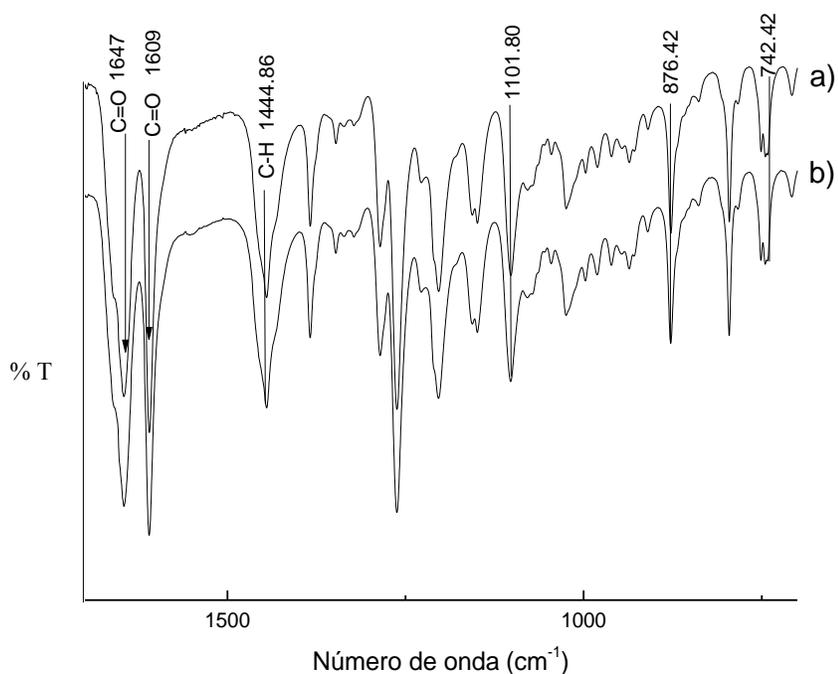


Figura 5. Espectros FTIR de: (a) CoQ₁₀ grado reactivo (Sigma Aldrich) y (b) CoQ₁₀ grado alimenticio; en la región de 1750 a 750 cm⁻¹

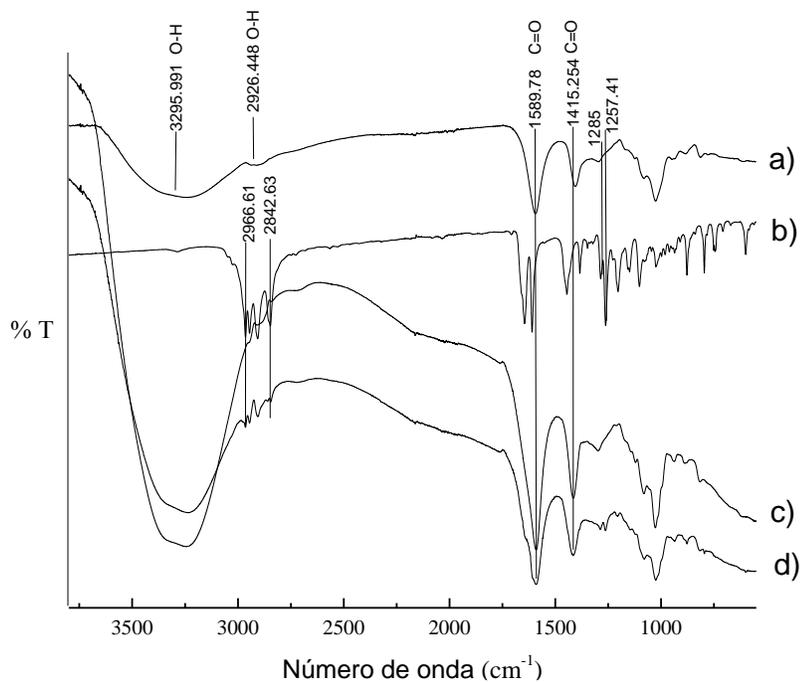


Figura 6. Espectros FTIR de: (a) alginato grado reactivo, (b) coenzima Q₁₀ grado alimenticio, (c) esfera de alginato sin principio activo y (d) esfera cargadas con Coenzima Q₁₀ 2 g L⁻¹ (T5); en la región de 3750 a 500 cm⁻¹

Estabilidad de la CoQ₁₀ al proceso de encapsulamiento

La estabilidad de la CoQ₁₀ al proceso de encapsulamiento se observa en el Figura 7, ambos espectros FTIR presentan similitud, lo que indica que, al no alterarse significativamente la estructura química de la CoQ₁₀, el espectro no sufre modificaciones en su línea base, corroborando que el proceso de coacervación simple es adecuado para conservar la CoQ₁₀.

Como se observó en este estudio su conservación en congelación mostró un comportamiento similar al expresado por Durante *et al.* (2012), quienes indican un sinergismo entre la temperatura y oscuridad para prevenir la degradación de compuestos antioxidantes.

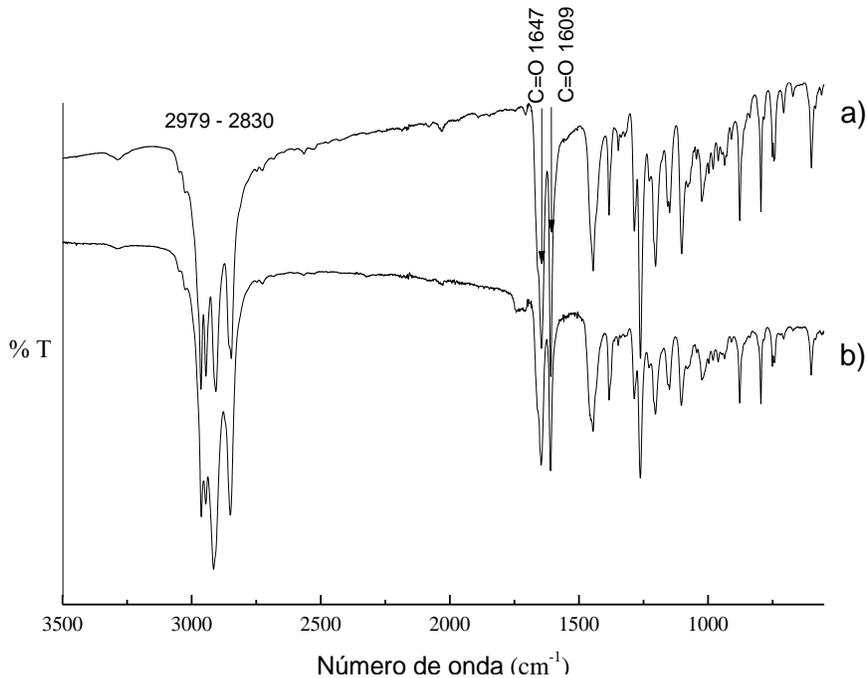


Figura 7. Espectros FTIR de la estabilidad de la Coenzima Q₁₀ durante el proceso de encapsulamiento: a) CoQ₁₀ grado alimenticio, b) CoQ₁₀ extraída de ME del 2 g L⁻¹ (T5); en la región de 3500 a 500 cm⁻¹

Estabilidad térmica de la CoQ₁₀ microencapsulada

La estabilidad térmica de la CoQ₁₀ microencapsulada expuesta a 80 °C y 120 °C durante 10 min no mostró degradación de la estructura de la molécula, al mantener las bandas características en los espectros FTIR (Figura 8). La banda a 1647 cm⁻¹ muestra las unidades isoprenoides y a 1609 cm⁻¹ el anillo de la benzoquinona, los cuales se mantienen posterior a los tratamientos realizados. Ercan y El (2011) reportaron una pérdida de CoQ₁₀ endógena en carne de res del 23 % después de un proceso de cocción y Weber *et al.* (1997), reportaron una degradación del 14 al 32 % de la

CoQ₁₀ después del freído. Por lo que encapsular la CoQ₁₀ que se añade exógenamente a diferentes productos, permite mantenerla en mayor proporción, para su acción antioxidante en el momento en que se requiera, aun sometiéndola a tratamientos térmicos, como se muestra en este estudio. Similar a lo reportado por Sakchareonkeat *et al.* (2013) quienes probaron que la CoQ₁₀ en liposomas o en su forma pura, se degradan casi en un 100 % luego de someterlas a 20, 30 y 40 °C durante 5 días; sin embargo, al microencapsular los liposomas de CoQ₁₀ con alginato de sodio, se conservan más de un 50 %, luego de aplicar los tratamientos térmicos mencionados. Lo que indica que el recubrimiento con este polímero provee una protección a los liposomas, para mantenerlos disponibles por mayores periodos de tiempo.

Como se observa en la Figura 8, el espectro FTIR del T5, las microesferas sometidas a tratamientos térmicos altos, el alginato protegió el principio activo de la posible degradación, este comportamiento se observó también en todos los tratamientos adicionados con CoQ₁₀.

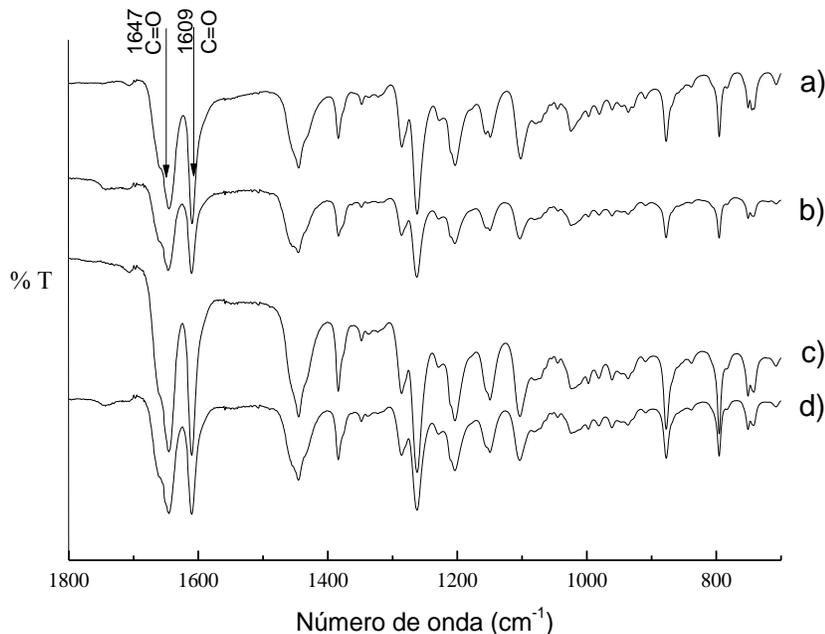


Figura 8. Espectros FTIR de: a) coenzima Q₁₀ grado alimenticio, b) Extracción de CoQ₁₀ expuesta a 120 °C durante 10 min, c) Extracción de CoQ₁₀ expuesta a 80 °C durante 10 min y d) Extracción de CoQ₁₀ del 2 g L⁻¹ (T5), en la región de 1800 a 700 cm⁻¹

1.4. Conclusiones

Es posible encapsular CoQ₁₀ con alginato de sodio como coacervado y cloruro de calcio como agente entrecruzante, de manera eficiente, y sencilla, mediante la técnica de coacervación simple. La técnica es fácil de implementar y manipular para lograr rendimientos superiores al 100 %, estabilidad de las microcápsula tanto en el proceso como a los tratamientos térmicos (de 80 y 120 °C 10 min), humedad y a_w .

Las microesferas de alginato y CoQ₁₀ [2 g L⁻¹] disuelta en etanol, fue el tratamiento que mejores características obtuvo, eficiencia de encapsulamiento del 61 %, buena dispersión del principio activo y homogeneidad en el tamaño de partícula, para ser utilizadas con potencial antioxidante en matrices alimentarias.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. (CIAD-Hermosillo Sonora), área biopolímeros, por las facilidades para realizar esta investigación. A la Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable y a la LGAC 2 del Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba; así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo en la presente investigación.

Literatura citada

- Ali, S., Zhang, W., Rajput, N., Khan, M. A., Li, C., & Zhou, G. (2015). Effect of multiple freeze–thaw cycles on the quality of chicken breast meat. *Food Chemistry*, 173, 808–814. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.095>
- Astray, G., Gonzalez-Barreiro, C., Mejuto, J. C., Rial-Otero, R., & Simal-Gándara, J. (2009). A review on the use of cyclodextrins in foods. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1631–1640. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.01.001>
- Balakrishnan, P., Lee, B.-J., Oh, D. H., Kim, J. O., Lee, Y.-I., Kim, D.-D., ... Choi, H.-G. (2009). Enhanced oral bioavailability of coenzyme Q10 by self-emulsifying drug delivery systems. *International Journal of Pharmaceutics*, 374(1–2), 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2009.03.008>
- Bentinger, M., Brismar, K., & Dallner, G. (2007). The antioxidant role of coenzyme Q. *Mitochondrion*, 7, S41–S50. <https://doi.org/10.1016/j.mito.2007.02.006>

- Cabrini, L., Pasquali, P., Tadolini, B., Sechi, A. M., & Landi, L. (1986). Antioxidant behaviour of Ubiquinone and β -Carotene Incorporated in model Membranes. *Free Radical Research Communications*, 2(1–2), 85–92. <https://doi.org/10.3109/10715768609088058>
- Chan, S. W., Mirhosseini, H., Taip, F. S., Ling, T. C., Nehdi, I. A., & Tan, C. P. (2016). Emulsion formulation optimization and characterization of spray-dried κ -carrageenan microparticles for the encapsulation of CoQ10. *Food Science and Biotechnology*, 25(S1), 53–62. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0098-3>
- Demirci, M., Caglar, M. Y., Cakir, B., & Gülseren, İ. (2017). 3 Encapsulation by nanoliposomes. nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical Industries, 74.
- Desai, K. G. H., & Park, H. J. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technology*, 23(7), 1361–1394. <https://doi.org/10.1081/DRT-200063478>
- Devi, N., Hazarika, D., Deka, C., & Kakati, D. K. (2012). Study of complex coacervation of gelatin a and sodium alginate for microencapsulation of olive oil. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 49(11), 936–945. <https://doi.org/10.1080/10601325.2012.722854>
- Devi, Nirmala, Sarmah, M., Khatun, B., & Maji, T. K. (2017). Encapsulation of active ingredients in polysaccharide–protein complex coacervates. *Advances in Colloid and Interface Science*, 239, 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.05.009>
- Dima, C., Cotârlet, M., Alexe, P., & Dima, S. (2014). Reprint of “Microencapsulation of essential oil of pimento [*Pimenta dioica* (L) Merr.] by chitosan/ κ -carrageenan complex coacervation method.” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 25, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.07.008>
- Durante, M., Lenucci, M. S., Laddomada, B., Mita, G., & Caretto, S. (2012). Effects of sodium alginate bead encapsulation on the storage stability of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) bran oil extracted by supercritical CO₂. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(42), 10689–10695. <https://doi.org/10.1021/jf303162m>
- Ercan, P., & El, S. N. (2011). Changes in content of coenzyme Q10 in beef muscle, beef liver and beef heart with cooking and in vitro digestion. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(8), 1136–1140. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.05.002>
- Fertah, M., Belfkira, A., Dahmane, E. montassir, Taourirte, M., & Brouillette, F. (2017). Extraction and characterization of sodium alginate from Moroccan *Laminaria digitata*

- brown seaweed. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3707–S3714.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.05.003>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107–1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the food industry: a review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(3), 213–224. <https://doi.org/10.1080/096374899101256>
- Gómez, B., Barba, F. J., Domínguez, R., Putnik, P., Bursac Kovačević, D., Pateiro, M., ... Lorenzo, J. M. (2018). Microencapsulation of antioxidant compounds through innovative technologies and its specific application in meat processing. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.10.006>
- Gupta, K. C., & Kumar, M. N. V. R. (2000). Preparation, characterization and release profiles of pH-sensitive chitosan beads. *Polymer International*, 49(2), 141–146. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0126\(200002\)49:2<141:AID-PI303>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0126(200002)49:2<141:AID-PI303>3.0.CO;2-0)
- Ingold, K. U., Bowry, V. W., Stocker, R., & Walling, C. (1993). Autoxidation of lipids and antioxidation by α -tocopherol and ubiquinol in homogeneous solution and in aqueous dispersions of lipids: Unrecognized consequences of lipid particle size as exemplified by oxidation of human low density lipoprotein. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 90, 5.
- Lee, W.-C., & Tsai, T.-H. (2010). Preparation and characterization of liposomal coenzyme Q10 for in vivo topical application. *International Journal of Pharmaceutics*, 395(1–2), 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.05.006>
- Li, H., & Chen, F. (2017). Preparation and quality evaluation of coenzyme Q10 long-circulating liposomes. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(4), 797–802. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.10.025>
- Lupo-Pasin, B., González-Azón, C., & Maestro-Garriga, A. (2012). Microencapsulación con alginato en alimentos. Técnicas y aplicaciones. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 130–151.
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release - a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>

- Moschakis, T., & Biliaderis, C. G. (2017). Biopolymer-based coacervates: Structures, functionality and applications in food products. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 28, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2017.03.006>
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., Sada, A., & Orlando, P. (2009). Fermentative ability of alginate-prebiotic encapsulated *Lactobacillus acidophilus* and survival under simulated gastrointestinal conditions. *Journal of Functional Foods*, 1(3), 319–323. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2009.02.001>
- Nehilla, B. J., Bergkvist, M., Popat, K. C., & Desai, T. A. (2008). Purified and surfactant-free coenzyme Q10-loaded biodegradable nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 348(1), 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.07.001>
- Parra, R. A. (2010). Revisión: Microencapsulación de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 63(2), 5669–5684.
- Pegoraro, N. S., Barbieri, A. V., Camponogara, C., Mattiazzi, J., Brum, E. S., Marchiori, M. C. L., ... Cruz, L. (2017). Nanoencapsulation of coenzyme Q10 and vitamin E acetate protects against UVB radiation-induced skin injury in mice. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 150, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.11.013>
- Petillo, D., & Hultin, H. O. (2008). Ubiquinone-10 as an Antioxidant*. *Journal of Food Biochemistry*, 32(2), 173–181. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2008.00151.x>
- Sakchareonkeat, P., Huang, T., Suwannaporn, P., Hsuan Chiang, Y., Liang Hsu, J., & Han Hong, Y. (2013). Encapsulation efficiency of coenzyme Q10-liposomes in alginate. *Nutrition & Food Science*, 43(2), 150–160. <https://doi.org/10.1108/00346651311313463>
- Stratulat, I., Britten, M., Salmieri, S., St-Gelais, D., Champagne, C. P., Fustier, P., & Lacroix, M. (2013). Encapsulation of coenzyme Q 10 in a simple emulsion-based nutraceutical formulation and application in cheese manufacturing. *Food Chemistry*, 141(3), 2707–2712.
- Wang, B., Vongsvivut, J., Adhikari, B., & Barrow, C. J. (2015). Microencapsulation of tuna oil fortified with the multiple lipophilic ingredients vitamins A, D3, E, K2, curcumin and coenzyme Q10. *Journal of Functional Foods*, 19, 893–901. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.03.027>
- Weber, C., Bysted, A., & Hølmer, G. (1997). Coenzyme Q10 in the diet-daily intake and relative bioavailability. *Molecular Aspects of Medicine*, 18, 251–254. [https://doi.org/10.1016/S0098-2997\(97\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0098-2997(97)00003-4)

- Xia, S., & Xu, S. (2006). Improved assay of coenzyme Q10 from liposomes by Tween 80 solubilisation and UV spectrophotometry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(13), 2119–2127. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2585>
- Yáñez, J., Salazar, J. A., Chaires, L., Jiménez, J., Márquez, M., & Ramos, E. G. (2005). Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. *Mundo Alimentario*.
- Yoon, H.-K., Seo, T.-R., & Lim, S.-T. (2014). Stabilization of aqueous dispersion of CoQ10 nanoparticles using maize starches. *Food Hydrocolloids*, 35, 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.05.008>
- Zhao, Y., Sun, Y.-H., Li, Z.-Y., Xie, C., Bao, Y., Chen, Z.-J., ... Zhang, C. (2013). Solubility measurements and prediction of coenzyme Q10 solubility in different solvent systems. *Journal of Solution Chemistry*, 42(4), 764–771. <https://doi.org/10.1007/s10953-013-9998-5>

CAPÍTULO III
MICROESFERAS DE CoQ₁₀ COMO ALTERNATIVA
ANTIOXIDANTE EN *PATTIES* DE PECHUGA DE POLLO
(Pectoralis major)

CAPÍTULO III

MICROESFERAS DE CoQ₁₀ COMO ALTERNATIVA ANTIOXIDANTE EN *PATTIES* DE PECHUGA DE POLLO (*Pectoralis major*)

Damián-Hernández X¹,
Hernández-Cázares A. S.^{1*}
Recillas-Mota M. T.²
Hidalgo-Contreras J. V.¹,
Rojas-López M.³

¹ Colegio de Postgraduados - Campus Córdoba. Programa de Innovación Agroalimentaria Sustentable. Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Amatlán de los Reyes, C.P. 94946, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: aleyse@colpos.mx

² Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.

Carretera a La Victoria km 0.6 C.P. 83304, Hermosillo, Sonora, México.

³ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Tlaxcala – Instituto Politécnico Nacional. Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Tecuexcomac – Tepetitla km 1.5. C.P. 90700. Tlaxcala, Tlaxcala, México.

Resumen

El uso de antioxidantes sintéticos o naturales en carne de pollo, es un método de conservación que ha sido utilizado para alargar su vida útil evitando su deterioro sensorial y funcional. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la adición de microesferas (ME) de CoQ₁₀ en pechuga de pollo molida, cocida y almacenada en refrigeración a 4 °C, como alternativa antioxidante. La inclusión de las ME en la carne fue de 0, 100, 200, 300 mg de CoQ₁₀ por cada 100 g de carne. La pérdida de peso, humedad, a_w, pH, acidez, oxidación lipídica (TBARS), oxidación proteica (análisis FTIR), perfil de textura (TPA) se evaluaron a los 0, 3, 6, 9, 12 y 15 d de almacenamiento en refrigeración. Los resultados mostraron que la pechuga de pollo adicionada con 100 mg de CoQ₁₀ en ME conservan las características de calidad del producto cárnico, reduciendo la oxidación lipídica en un 38 % y evitando el cambio de la amida I, comparada con aquella que no se adicionó ME, manteniendo sus características de textura adecuadas para su consumo.

Palabras clave: Microesfera de CoQ₁₀, *patties* de pollo, antioxidantes, FTIR.

1.1. Introducción

La producción mundial de la carne de pollo se encuentra en aumento cada año y se cree superará 90 millones de ton para el año 2018 (USDA, 2018), debido a alta demanda de los consumidores, por sus características nutricionales y costos asequibles. Esta carne es rica en proteínas (21 g 100 g⁻¹) y ácidos grasos poliinsaturados (32 g 100 g⁻¹ en pechuga) (Mozdziak, 2014; Ratnayake, Ackman, & Hulan, 1989), condición que la hace muy susceptible al deterioro, principalmente a la oxidación lipídica y proteica.

Para afrontar esto, la industria cárnica ha utilizado diferentes antioxidantes sintéticos, con posible potencial cancerígeno (Shahidi, Rubin, & Wood, 1987), y naturales, con la desventaja de una pobre capacidad antioxidante. Así que, la búsqueda de antioxidantes naturales con alto potencial antioxidante, para su aplicación en diversos productos, aún se encuentra en estudio. Rattan (2008) indica que la concentración adecuada de un antioxidante a utilizar, es muy importante, debido a su efecto hormético, ya que en función de su concentración puede presentar características de antioxidante o pro-oxidante.

La auto-oxidación de los ácidos grasos involucran una reacción en cadena de radicales libres (O'Sullivan, 2017) que se generan debido a la presencia de un agente pro-oxidante interno o externo, como puede ser el oxígeno, la luz, la temperatura, etc. (Argyri, Panagou, & Nychas, 2012) y determinan el grado de oxidación de la carne. De igual manera, las proteínas en carne experimentan cambios bioquímicos derivado de su propia oxidación, alto contenido de grupos carbonilo y baja concentración de grupos sulfidrilos indican oxidación proteica (Park, Xiong, Alderton, & Ooizumi, 2006).

El proceso de microencapsulación se ha utilizado como método de protección de compuestos activos de daños del medio circundante, como temperatura, oxígeno, humedad y otros (Gómez *et al.*, 2018). Estos pro-oxidantes mencionados afectan a muchos compuestos bioactivos, produciendo efectos sensoriales negativos en los productos en los que son suministrados. Dando paso a las metodologías de encapsulamiento. Los métodos utilizados para la encapsulación de compuestos liposolubles, como la coenzima Q₁₀ (CoQ₁₀), ha sido la inclusión en liposomas. Sin embargo, se requiere el uso de reactivos como fosfolípidos y lecitinas, así como otros reactivos

químicos con capacidad emulsionante o estabilizante, mismos que desarrollan oxidación de sus hidrocarburos insaturados (Cabrini, Pasquali, Tadolini, Sechi, & Landi, 1986). La microencapsulación de la CoQ₁₀ por coacervación simple se ha utilizado con fines médicos (biodisponibilidad en el intestino delgado), para aprovechar sus propiedades antioxidantes en el organismo (Sakaridis, Soultos, Batzios, Ambrosiadis, & Koidis, 2014).

El contenido de la CoQ₁₀, en los tejidos animales se relaciona con el contenido de mitocondrias y debido a ello se le conoce como ubiquinona, (Mattila y Kumpulainen, 2001). Es abundante en fibras tipo I y carnes rojas (Purchas & Busboom, 2005; Reig, Aristoy, & Toldrá, 2015). En carne de ave, Weber, Bysted, y Hølmer, (1997) reportan un contenido de Q₁₀ de 17 µg g⁻¹, que tras la aplicación de tratamientos térmicos, se reduce un 15-32 % en carne de cerdo y 15 % en carne de res (Purchas *et al.* 2006).

La forma reducida de la coenzima (ubiquinol) debe su capacidad antioxidante al ceder átomos de hidrógeno a grupos de radicales libres, frenando la etapa de iniciación de oxidación, lo cual da lugar a moléculas de semiubiquinona o ubiquinona, respectivamente. La ubiquinona, elimina radicales libres, pero no tan eficiente como lo haría su forma reducida (Petillo & Hultin, 2008) y tiene capacidad antioxidante sobre ácidos grasos que contienen más de dos dobles enlaces (Petillo & Hultin, 2008). Además, elimina el oxígeno singlete y afecta la estructura de la bicapa lipídica inhibiendo la descomposición del hidroperóxido, catalizada por metales, las cuales generan peroxidación lipídica espontánea (Cabrini *et al.*, 1986).

La CoQ₁₀ se ha utilizado para fortificar marices alimentarias como leche, kéfir, cuajada, néctar de manzana, y jarabe de frutas; en forma de un complejo CoQ₁₀/β-ciclodextrina (Q10Vital) soluble en agua, para dar la característica de alimento funcional. (Pravst & Pro, 2009). También ha sido añadida en queso, una emulsión con caseinato de calcio, aceite de linaza y lecitina, en forma de liposomas, para mejorar sus características sensoriales (Stratulat *et al.*, 2013).

Por lo que evaluar encapsulados de CoQ₁₀, como alternativa antioxidante en carne de pollo supone un potencial interés de la industria cárnica. Así, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto

antioxidante de ME de CoQ₁₀, en su forma ubiquinona, adicionada en pechuga de pollo molida, cocinada y almacenada en refrigeración a diferentes niveles de inclusión.

1.2. Materiales y métodos

1.2.1. Reactivos químicos

Se utilizó NaOH valorado al 0.1 N marca Hycel®, Fenolftaleína al 1% en solución alcohólica, solución Tampón a pH 4.01 y 7.00 marca Thermo Scientific®, Ácido 2-({2-[bis(carboximetil)amino]etil}(carboximetil)amino)acético (EDTA), Ácido 2-tiobarbitúrico (TBA) y Cloruro de hidrógeno (HCl) marca J.T. Baker®, así como, n-Propilo 3,4,5 Trihidroxi Benzoato (PG), ácido tricloroacético(TCA), 2,6-bis(1,1-dimetiletil)-4-metilfenol (BHT) y trimetilfosfato (TMP), marca Sigma-Aldrich®. Las soluciones fueron preparadas con agua bidestilada marca J.T Baker®.

Para la preparación de las ME de CoQ₁₀ se utilizó solución de alginato de sodio al 1 % (p/v) y cloruro de calcio como agente entrecruzante en una concentración de 1.5 %, la CoQ₁₀ fue disuelta en 50 mL de etanol y homogeneizada en la solución de alginato a 11,000 rpm durante 5 min con ayuda de un Ultra-Turrax. Las esferas obtenidas fueron lavadas con agua bidestilada, se les retiro el exceso de humedad y se secaron en estufa de vacío a 25 °C

1.2.2. Preparación de la muestra

Patties de pechuga de pollo (*Pectoralis major*) se elaboraron a partir de carne del mismo lote de producción con 6 h *post-mortem* tratada térmicamente a 4 °C, por triplicado. A la pechuga se le retiró piel, hueso y grasa visible, la carne se trituró en molino marca Torrey® Modelo M-22RW y cedazo TORREY CI-22 3/8 F. 100 g de carne se moldeó en forma de *patties*, con un diámetro de 100 mm. Las ME de CoQ₁₀ (caracterización en trabajo previo) se obtuvieron por el método de coacervación simple, en una concentración de 2 g L⁻¹ de CoQ₁₀ dispersa en la solución de alginato.

1.2.3. Preparación de los tratamientos

Para el estudio se diseñaron cuatro niveles de inclusión de ME en la carne: **T1**, 0 mg de CoQ₁₀ en ME, **T2**, 100 mg de CoQ₁₀ en ME, **T3**, 200 mg de CoQ₁₀ en ME, **T4**, 300 mg de CoQ₁₀ en ME, por 100 g de carne. Las *patties* se sometieron a cocción hasta alcanzar una temperatura interna de 72 °C en 15 min, en horno eléctrico de convección Marca Hobart®, HEC5; se enfriaron a

temperatura ambiente 2 h, se envasaron en bolsas de cierre hermético y se almacenaron en refrigeración a 4 °C para su análisis a los 0, 3, 6, 9, 12 y 15 d.

1.2.4. Caracterización de la materia prima

Para determinar la calidad de la carne de pechuga de pollo cruda se analizó en pH, acidez titulable, humedad y color, con las metodologías descritas en el apartado 1.2.5 y 1.2.6. previo a la preparación de los experimentos. Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

1.2.5. Pérdidas de peso, pH, acidez, humedad y a_w

La pérdidas de peso, se realizó según lo describe Rahman *et al.* (2015). Cada *patties* se pesó antes y después del tratamiento térmico, una vez enfriadas, y se calculó el porcentaje al multiplicar la diferencia del peso inicial y el peso final por cien y dividirlo entre el peso inicial. Durante el cocinado y a los 3, 6, 9, 12 y 15 d de almacenamiento en refrigeración. Los datos se expresaron en porcentaje de pérdida de peso (%). El pH se determinó según lo describe (Guerrero-Legarreta, Pérez-Chabela, & Ponce-Alquicira, 2002), con el uso de un potenciómetro marca Thermo Scientific®, modelo Orion 3 Star. La acidez, expresada como % de ácido láctico, se determinó de acuerdo al método 947.05 de la AOAC, 1990. La humedad se obtuvo al secar la muestra hasta peso constante en estufa de aire caliente a 105 °C, según lo describe la AOAC, 2005. La a_w se realizó con un medidor marca Rotronic® modelo C1 AW calibrado de acuerdo a instrucciones del fabricante.

1.2.6. Color

La determinación del color se realizó con un colorímetro marca HunterLab®, Modelo MiniScan EZ, en la escala CIELAB ($L^* a^* b^*$), L^* (luminosidad de negro a blanco), a^* (- verde a + rojo) b^* (-Azul a + amarillo).

1.2.7. Sustancias Reactivas al Ácido Tiobarbiturico (TBARS)

Para la determinación de TBARS, se adaptó a lo descrito por Bruna, Ordóñez, Fernández, Herranz, y de la Hoz (2001) y Raharjo, Sofos, y Schmidt (1992). 10 g de muestra, 40 mL de TCA al 5 % y 50 μ l de BHT (10 mg mL⁻¹) se homogeneizaron durante 1 min. El homogenizado se transfirió a un tubo falcón de 50 mL y se centrifugó a 3402 g 20 min. La muestra obtenida se filtró y aforó a 50 mL con TCA al 5 %, se homogeneizó en vortex, se tomó un alícuota de 2 mL y se homogeneizó

con 2 mL de TBA 20 Mm. La mezcla se colocó a ebullición 1 h, se enfrió y se leyó en un espectrofotómetro a 530 nm. Se leyó un blanco de reactivo. Se realizó una curva patrón a 8 puntos: 25 µm, 12.5 µm, 6.25 µm, 3.152 µm, 1.563 µm, 0.7871 µm, 0.391 µm y .195 µm de TMP, en TCA al 5 %. Obteniendo la ecuación de la recta $y = 12.993x - 0.028$ con una $R^2 = 0.9997$. Los resultados se reportaron en mg MDA kg⁻¹ de carne (valor TBAR).

1.2.8. Perfil de textura (TPA)

Se realizó un perfil de textura (TPA), con un texturómetro marca Shimadzu® modelo EZ-S 500 (USA) y *software* TRAPEZIUM2. Para ello obtuvieron muestras homogéneas en altura, con ayuda de un sacabocados con diámetro interno de 2.3 cm y se leyeron por triplicado para obtener dureza, cohesión, floculación, gomosidad, elasticidad y masticabilidad.

1.2.9. Degradación proteica por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Las *patties* de cada tratamiento fueron trituradas y leídas con el uso de un espectrofotómetro FTIR Thermo Scientific® modelo Nicolet™ iS™ 50 (USA) equipado con detector de sulfato deuterado, bajo el método de muestreo de Reflectancia total atenuada (ATR). Se realizaron 160 scans con una resolución de 4 cm⁻¹ en la región espectral de 4000 a 400 cm⁻¹. El análisis de los espectros se realizó utilizando el software origin® PRO 2016 (USA). Los promedios de los espectros se normalizaron y graficaron para mostrar el comportamiento de las bandas en la región de la amida I (1624 cm⁻¹) y amida II (1539 cm⁻¹), durante el almacenamiento refrigerado de las *patties*.

1.2.10. Análisis estadístico

El experimento se realizó bajo un diseño completamente al Azar (DCA) de doble entrada con interacción por triplicado. El primer factor corresponde a los tratamientos especificados en el apartado 1.2.3. El segundo factor consistió en el tiempo, cuyos intervalos fueron equidistantes, (0, 3, 6, 9, 12 y 15 d). El análisis de los datos fue a través del procedimiento PROC GLM de SAS® versión 9.4. La comparación de las medias se realizó mediante la prueba de TUKEY, con una *P-value* ≤ 0.05. Bajo el siguiente modelo:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + tiempo_j + (\tau * tiempo)_{ij} + e_{ijk} \quad \text{con } i = 1,2,3,4, j = 1,2,3,4,5,6 \text{ y } k = 1,2,3, \quad (1)$$

donde: y_{ijk} es la variable respuesta del i-ésimo tratamiento en el j-ésimo tiempo y la k-ésima repetición; μ es la media global; τ_i es el efecto fijo del i-ésimo tratamiento; $tiempo_j$ es el efecto fijo del j-ésimo tiempo; $(\tau * tiempo)_{ij}$ es el efecto combinado de la interacción del i-ésimo tratamiento con el j-ésimo tiempo; e_{ijk} es el error experimental aleatorio el cual se asume independiente e idénticamente distribuido normal con media cero y varianza σ^2 .

Para la variable respuesta TBARS se realizó un análisis de superficies de respuesta con el procedimiento PROC GLIM MIX de SAS® versión 9.4.

1.3. Resultados y discusión

1.3.1. Caracterización de la materia prima

La calidad de la carne de pollo, especialmente en cuestiones de oxidación lipídica y sus radicales libres, es estudiada debido a que tiene gran influencia en la frescura de la carne (Ladikos & Lougovois, 1990). La carne cruda de pechuga de pollo utilizada, en este estudio, para el procesamiento de las *patties* presentó un pH inicial de 5.86 (6 h *post-mortem*), acidez de 0.37 %, humedad de 73 % y color en la escala L*, a *y b* de 47.67, 4.26 y 26.19 respectivamente. Por lo que se consideró carne normal para el desarrollo del experimento. Kılıç, Şimşek, Claus y Atılgan (2014) consideraron un rango de pH de 5.7 a 6.2 como aceptable en carne de pechuga de pollo.

1.3.2. Pérdidas de peso, pH, acidez, humedad y a_w de la *patties*

Las pérdidas de peso de las *patties* después del proceso de cocción indicaron que el T1 (20.47 %) era similar al T3 (17.66 %) y diferente del resto de los tratamientos, T2 (16.69 %) y T4 (16.19 %) ($P < 0.0001$). Este comportamiento solo se evidenciaba en el tiempo cero, ya que durante el tiempo de almacenamiento en refrigeración a 3, 6, 9, 12 y 15 d se observó en todos los niveles de inclusión de ME de CoQ₁₀, una pérdida similar que iba de 3.34 ± 0.22 a 4.06 ± 0.22 , sin mostrar diferencias significativas ($P = 0.0969$), como se muestra en la Cuadro 1. Por otro lado, la adición de ME de CoQ₁₀, a una concentración de 100 y 300 mg por 100 g⁻¹ en la carne cruda causó una retención de agua de 3.78 y 4.28 % respectivamente, comparada con el T1. Ali *et al.* (2015) y Castellini, Mugnai y Dal Bosco (2002) mencionan que la capacidad de retención de agua (CRA) de la carne depende de estructuras miofibrilares, así como de la miosina, las cuales pueden ser afectadas por el pH; a su vez se relación con el color de la carne y en conjunto caracterizan el fenómeno oxidativo.

El pH mostró diferencias significativas entre tratamientos ($P<0.0001$) y durante su almacenamiento en refrigeración ($P=0.0103$). Con una disminución del pH a mayor cantidad de ME adicionadas en la carne, siendo el T1 y T2, similares estadísticamente y los T3 y T4, diferentes entre ellos y el resto de los tratamientos. Indicando buena estabilidad de la *patties* a los 15 d de almacenamiento refrigerado.

Kılıç *et al.* (2014) reportaron un pH de 6.13 ± 0.099 en carne de pollo molida cocida, valor similar a lo encontrado en este estudio, para el T1 y T2. Por lo que la adición de las ME no afectó la estabilidad de la carne de pollo molida y cocinada cuando se aplicó una concentración de 100 mg de CoQ₁₀ en ME. Por su parte Lázaro *et al.* (2012) reportó valores de pH en pollo crudo convencional de 5.7 y para pollo orgánico de 6.0. Por lo que podría decirse que la adición de ME en una concentración de 200 y 300 mg de CoQ₁₀ mantuvieron los valores de pH de la carne, posterior al tratamiento térmico.

La determinación de acidez, expresada en % de ácido láctico, mostró diferencias significativas entre tratamientos ($P<0.0001$); donde el tratamiento sin adición de la CoQ₁₀ (T1) fue diferente al resto de los tratamientos (Cuadro 1).

En humedad el T4, *patties* de carne adicionadas con 300 mg CoQ₁₀ 100 g⁻¹ encapsulada, presentó el menor contenido, siendo estadísticamente diferente ($P=0.0079$) al T1 y T2 (Cuadro 1). La concentración de ME de CoQ₁₀ añadidas afectó directamente el contenido de humedad del producto cárnico, reflejándose en la textura del producto (Cuadro 2). Esta reducción de humedad por atrapamiento del agua, con las moléculas de alginato, debido a que este polímero se considera superabsorbente (Lupo-Pasin, González-Azón, & Maestro-Garriga, 2012). Sin embargo, el a_w no presentó un cambio significativo entre tratamientos ($P=0.2205$), con valores superiores a 0.96, valores de a_w que favorecen el crecimiento microbiano en carne; sin embargo, debido a los valores de pH (ácidos) presentados en los T3 y T4, el crecimiento de microorganismos se reduce, lo cual es coadyuvado por el procesamiento térmico al que se sometieron las *patties*.

Cuadro 1. Medias de las características fisicoquímicas de *patties* de pechuga de pollo cocidas y almacenadas a 4 °C durante 15 d adicionada con diferentes niveles de inclusión de ME de CoQ₁₀ (0, 100, 200 y 300 mg de CoQ₁₀ en ME 100 g⁻¹ de carne)

Variables respuesta	T1 ± ES* (0 mg de CoQ ₁₀ 100 g ⁻¹)	T2 ± ES* (100 mg de CoQ ₁₀ 100 g ⁻¹)	T3 ± ES* (200 mg de CoQ ₁₀ 100 g ⁻¹)	T4 ± ES* (300 mg de CoQ ₁₀ 100 g ⁻¹)
Pérdidas de peso (%)	4.06 ± 0.22 ^a	3.42 ± 0.22 ^a	3.34 ± 0.22 ^a	3.45 ± 0.22 ^a
pH	6.19 ± 0.03 ^a	6.08 ± 0.03 ^a	5.90 ± 0.04 ^b	5.76 ± 0.04 ^c
Acidez (% en ácido láctico)	0.41 ± 0.03 ^a	0.38 ± 0.03 ^b	0.38 ± 0.03 ^b	0.37 ± 0.04 ^b
Humedad (g 100 g ⁻¹)	69.73 ± 0.40 ^a	69.43 ± 0.40 ^a	69.19 ± 0.40 ^{ab}	67.80 ± 0.40 ^b
a _w	0.97 ± 0.00 ^a	0.97 ± 0.00 ^a	0.97 ± 0.00 ^a	0.97 ± 0.00 ^a
Color:				
L*	74.95 ± 0.62 ^a	72.57 ± 0.63 ^b	69.71 ± 0.63 ^c	69.55 ± 0.63 ^c
a*	4.89 ± 0.29 ^d	6.06 ± 0.29 ^c	7.20 ± 0.29 ^b	8.47 ± 0.29 ^a
b*	27.21 ± 0.86 ^c	32.15 ± 0.86 ^b	35.67 ± 0.86 ^a	37.98 ± 0.86 ^a
TBARS (mg kg ⁻¹ malondialdehído)	1.48 ± 0.06 ^a	0.90 ± 0.06 ^b	0.73 ± 0.06 ^b	0.72 ± 0.06 ^b

^{a, b} Las medias de diferentes columnas que no comparten letra son significativamente diferentes, con una *P*-value ≤ 0.05* ± Error estándar (ES). Utilizando un ANOVA y una comparación de medias de Tukey.

1.3.3. Color

El color de las *patties* del T1, carne de pollo sin la adición de ME de CoQ₁₀, presentó diferencias significativas (*P*<0.0001) con el resto de los tratamientos, al mostrar altos valores de luminosidad; los cuales son relacionados con degradación proteica (Ali *et al.*, 2015), lo que indica que a mayor cantidad de ME incorporadas es posible referirse a una disminución de los niveles de oxidación, reflejado en una disminución de luminosidad de las *patties*. De manera semejante, el T1 mostró el menor valor de los índices a* y b*, con diferencias significativas del resto de los tratamientos (Cuadro 1). Lo que hace evidente que la adición de las ME de CoQ₁₀ tiene efecto sobre la carne de pechuga de pollo.

Un incremento de ME adicionadas, aumenta la cantidad de alginato y CoQ₁₀, lo que conlleva a mayor absorción de agua y por lo tanto también menor luminosidad. En la escala de rojez fue posible evidenciar un aumento de color de 1.17, 2.31 y 3.58 unidades cuando se incorporaba 100, 200 ó 300 mg de CoQ₁₀ en ME, y en amarillez 4.94, 8.46 y 10.77 unidades, por efecto del propio color de la CoQ₁₀. Basanta *et al.* (2017) observaron un aumento de los valores en a*, con la adición de micropartículas, ya sea de pulpa o de cáscara de ciruela, valor que se mantenía durante 10 días en refrigeración 4 °C y posterior a un proceso de cocinado a la parrilla (165–180 °C). Lo que indicó que las *patties* de pollo se tornaban en tonos rojos.

1.3.4. Sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS)

Las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), mostró que el tratamiento sin la adición de ME de CoQ₁₀ (T1) presenta diferencias significativas ($P < 0.0001$) con el resto de los tratamientos (2, 3, 4); pero no entre ellos. Lo que indica que la adición de ME de CoQ₁₀ reducen la oxidación lipídica en la carne de pechuga de pollo molida, cocinada y almacenada en refrigeración, al evidenciar los menores valores de malondialdehído (MDA). Debido a que tratamientos térmicos generan daño en la membrana celular, provocando oxidación lipídica (Beltran, Pla, Yuste, & Mor-Mur, 2003).

Xu, Cheng, Liu y Zhu (2019) indicaron que el proceso de microencapsulación de compuestos antioxidantes (polifenoles), contribuye a mantenerlos disponibles; aun posterior a tratamientos térmicos, hasta un 2.96 veces más. En este estudio, la CoQ₁₀ microencapsulada, como antioxidante, redujo la oxidación lipídica en un 39.19 %, 50.68 % y 51.36 % en las *patties* de pechuga de pollo cocida con 100, 200 y 300 mg de CoQ₁₀, respectivamente, por lo que podría decirse que se mantuvo viable después del procesamiento térmico.

Como se observa en la Figura 1, adicionar los diferentes niveles de inclusión de de Q₁₀ en ME por cada 100 g de carne (Cuadro 1), evita la oxidación lipídica de las *patties* de carne de pollo cocida; donde, a mayor incorporación de CoQ₁₀ microencapsulada, menor oxidación lipídica, presentada en los valores de MDA, lo cual también es visible durante el periodo de almacenamiento en refrigeración a 4 °C. Además, a pesar de no mostrar diferencias entre los T2, T3 y T4, la superficie de respuesta de las *patties* procesadas mostró buenas características para los T2 y T3, los cuales se relacionan con la textura del producto. Por lo que concentraciones de 100 y 200 mg de CoQ₁₀ microencapsulada, son potencialmente adecuados para incorporar a productos cárnicos. Petillo y Hultin (2008) demostraron que la benzoquinona (CoQ₁₀ oxidada) en una concentración de 1:100 presenta un efecto antioxidante al adicionarla en un modelo para determinación de oxidación, que incluía un lípido no oxidativo y un agente oxidante en una concentración de 100 µmol/mL hexano. Similar a lo reportado en este estudio donde la benzoquinona microencapsulada mostró potencial antioxidante en la matriz cárnica de pollo, en dosis de 100, 200 y 300 mg 100 g⁻¹ de carne.

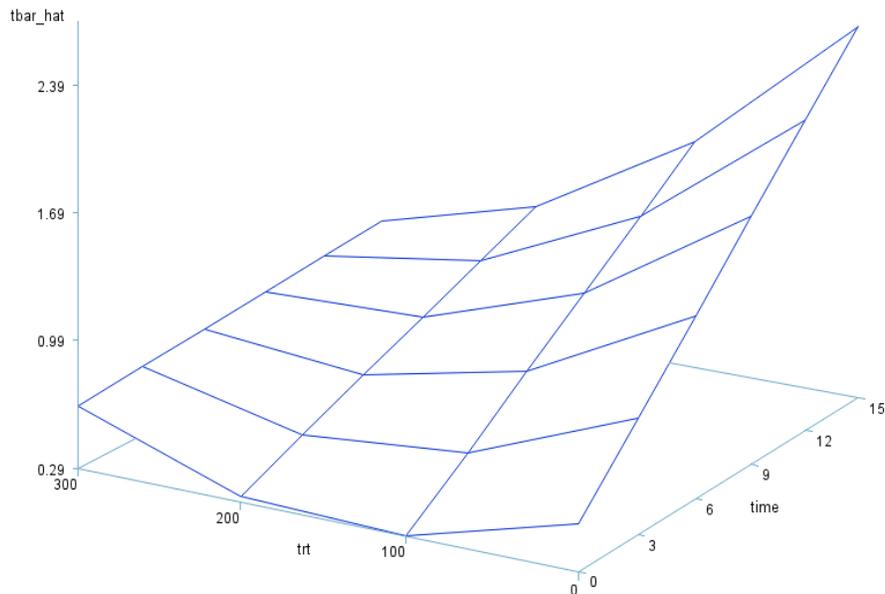


Figura 1. Superficie de respuesta para oxidación lipídica expresada en mg de MDA kg^{-1} para a los 0, 3, 6, 9, 12 y 15 d de almacenamiento en refrigeración a 4 °C de *patties* de pechuga de pollo cocida, de **T1**, 0 mg de CoQ₁₀, **T2**, 100 mg de ME de CoQ₁₀, **T3**, 200 mg de ME de CoQ₁₀ y **T4**, 300 mg de ME de CoQ₁₀ por 100 g de carne.

Por otra parte, en carne y productos cárnicos almacenados en refrigeración a 4 °C o en congelación a -18 °C se ha probado la adición de varios antioxidantes naturales, entre ellos el extracto de semilla de uva, té verde (Pateiro, Lorenzo, Amado, & Franco, 2014), el extracto acuoso de brócoli (Banerjee *et al.*, 2012), romero (Al-Hijazeen, Al-Rawashdeh, Al-Hijazeen, & Al-Rawashdeh, 2017) y ciruela y pulpa de ciruela (Basanta *et al.*, 2017), inhibiendo significativamente los valores de TBARS; incluso mejor que antioxidantes sintéticos como BHA y BHT (Banerjee *et al.*, 2012; Pateiro *et al.*, 2014). Sin embargo, hay pocos estudios en carne de pollo que han probado el uso de antioxidantes micronecapsulados para sus productos cárnicos (Kılıç *et al.*, 2014; Reis *et al.*, 2017; B. Wang, Vongsivut, Adhikari, & Barrow, 2015).

Wang *et al.* (2018ab), probaron microcápsulas obtenidas por el método de secado por aspersión, de aceite de clavo y alicina, con efecto antifúngico en carne de pollo, cerdo, pan y tofu. En carne de pollo, la mezcla de antioxidante a una concentración de 0.040 % inhibe la presencia de hongos; pero no se evidencia diferencias significativas si estas se adicionan microcapsuladas o no; aunque

en la forma encapsulada si mejora su solubilidad, evita la liberación de compuestos volátiles y presenta resistencia a tratamiento térmico.

Xu *et al.* (2019), evidenciaron también, que la adición de microcápsulas de polifenoles de mora, obtenidos por liofilización, reducen la oxidación lipídica en carne de cerdo durante el proceso de secado (55 °C 30 % de humedad), horneado (150 °C 3 min) en rodajas y almacenamiento a vacío a temperatura ambiente, yendo de 0.53 mg MDA kg⁻¹ hasta 3.78 mg MDA kg⁻¹ durante 20 d de almacenamiento. Asimismo, observaron un sinergismo entre los polifenoles añadidos con y sin encapsular, para un mejor efecto antioxidante. Insausti *et al.* (2001), mencionan que un valor de 5 mg MDA kg⁻¹ es el valor detectable para indicar rancidez en productos cárnicos de res; este es un valor muy importante a considerar ya que representa el rechazo por paneles sensoriales entrenados; en este estudio no se llegó a dichos valores, conservando la vida útil del producto por un tiempo de 15 d, lo cual debe ser corroborado con posteriores análisis microbiológicos. Sin embargo, estos mismos autores mencionan que el factor limitante para indicar término de vida útil, de estos productos, se relacionó con la rancidez y no con la degradación relacionada con la carga microbiana.

Reis *et al.* (2017) utilizó microcápsulas de propóleos, obtenidas mediante secado por aspersión, inhibiendo la oxidación lipídica de hamburguesas de carne de res almacenadas a -15 °C durante 28 d a valores de 0.95 mg de MDA kg⁻¹, indicando mayor inhibición que el antioxidante sintético eritorbato de sodio, el cual mostró valores de MDA de 1.20 mg kg⁻¹; este estudio los valores obtenidos oscilaron de 0.90 a 0.72 mg de MDA kg⁻¹ cuando se adicionaba de 100 a 300 mg de CoQ₁₀ en ME.

Kılıç *et al.* (2014) observaron mejor estabilidad oxidativa, durante el almacenamiento, reflejada en una disminución de TBARS en muestras de carne de pollo y res molida y cocida a 74 °C (calentamiento inicial de 60 y 85 °C) y almacenadas en refrigeración a 4 °C durante 7 d adicionadas con microcápsulas de fosfatos; donde un proceso de cocción lento en carne de pollo dio como resultado mayor oxidación que la cocción rápida y diferente a la carne de res, la cual se comportó similar en los dos tipos de procesamiento. Logrando valores de MDA en carne de pollo de 3.98, a los 7 d de almacenamiento, cuando se añadía hexametáfosfato de sodio encapsulado. En este

estudio los 15 d de almacenamiento se encontraban por debajo de esos valores. Otros autores indicaron que la adición de partículas de fibra de ciruela liofilizadas agregadas como fuente antioxidante, reducen la oxidación lipídica en *patties* de carne de pollo crudas en un 50 % (Basanta *et al.*, 2017); en este estudio se lograron dichos resultados aun después de realizar procesos de cocción para los T3 y T4.

1.3.5. Perfil de textura (TPA)

El análisis de perfil de textura en las *patties* de carne de pollo mostró diferencias significativas en dureza ($P < 0.0001$). El T4 y T3 obtuvieron la mayor dureza con diferencias significativas entre ellos y el resto de los tratamientos, por otro lado, el T1 y T2 no mostraron diferencias significativas entre ellos (Cuadro 2). En cohesión, la adición de ME en la carne de pollo, evidenció diferencias significativas ($P = 0.0120$) del T1 con el T2 y T4. Para gomosidad y masticabilidad las *patties* del T4 mostró diferencias significativas ($P = 0.0007$) con el resto de los tratamientos, mostrando los mayores valores. La elasticidad de las *patties* no se vio influenciada por la adición de las ME de CoQ₁₀, al no mostrar diferencias entre tratamientos.

Cuadro 2. Resultados del perfil de textura de las *patties* de pechuga de pollo cocidas y almacenadas en refrigeración a 4 °C, adicionadas con ME de CoQ₁₀

Variable Respuesta	T1±ES* (0 mg de Co Q ₁₀ 100 mg ⁻¹)	T2±ES* (100 mg de Co Q ₁₀ 100 g ⁻¹)	T3±ES* (200 mg de Co Q ₁₀ 100 g ⁻¹)	T4±ES* (300 mg de Co Q ₁₀ 100 g ⁻¹)
Dureza (N)	63.29±2.71 ^c	60.18±2.71 ^c	75.26± 2.82 ^b	95.98±2.71 ^a
Cohesividad	-0.21±0.03 ^b	-0.10±0.03 ^a	-0.13±0.03 ^{ab}	-0.08±0.03 ^a
Masticabilidad (N)	31.18±2.74 ^b	28.05±2.74 ^b	32.44±2.91 ^b	44.96±2.74 ^a
Elasticidad	0.97±0.04 ^a	1.02±0.04 ^a	0.89±0.05 ^a	0.92±0.04 ^a

^{a b} Las medias de diferentes columnas que no comparten letra son significativamente diferentes, con una P -value $\leq 0.05^* \pm$ Error estándar (ES). Utilizando un ANOVA y una comparación de medias de Tukey

Basanta *et al.* (2017) indicaron mayor dureza y menores valores de elasticidad y cohesividad, en *patties* de carne de pollo crudas cuando se adicionaban micropartículas de cáscara de ciruela. Para este estudio solo las concentraciones de 200 y 300 mg de CoQ₁₀ proporcionaban mayor dureza, pero la elasticidad no variaba y la cohesividad era superior en el T2 y T4. Los autores asociaban sus resultados a cierta fragilidad de las *patties*; sin embargo, esto no se presentó del todo en este estudio, lo cual se cree es debido a la presencia de alginato y sus propiedades gelesificantes y espesantes, y al proceso de cocción. Además, estos autores también encontraron cierta elasticidad

en *patties* de pollo cocida, indicando la contribución en la gelificación debido a la presencia de pectina en la pulpa de ciruela.

1.3.6. Degradación proteica FTIR

Las proteínas en general se componen por una secuencia de polipéptidos, conformadas por estructuras secundarias (α -helice y β -plegadas), conformando estructuras terciarias, que a su vez formaran la estructura cuaternaria la cual consiste en más de una cadena de aminoácidos (Byler & Susi, 1986). Su oxidación debida a pro-oxidantes externos como calor, frio, soluciones salinas, etc., afectan su actividad biológica (enzimática), su solubilidad, su capacidad de unión de agua y exponen enlaces peptídicos.

La metodología de FTIR permite visualizar las estructuras secundarias de las proteínas y el método de deconvolución, empleado en estas metodologías, ha permitido indicar que la banda amida I de cada proteína, a excepción de la caseína, está estructurada de seis a nueve componentes (Byler & Susi, 1986). Aunado a lo anterior, la degradación proteica ocurre en los grupos Amida I y Amida II, ya que surgen de los enlaces amino que unen a los aminoácidos (Gallagher, 1997). La Amida I, conduce a vibraciones de estiramiento del grupo funcional C=O a un número de onda de 1660 y 1630 y la Amida II a vibraciones de flexión de N-H a un número de onda de 1545 (Gallagher, 1997). Ambos grupos funcionales son sensibles al contenido de estructura secundaria de la proteína ya que participan en los enlaces hidrógeno de la estructura, pero es la amida I, el principal grupo funcional que se relaciona con la concentración de la estructura secundaria (Byler & Susi, 1986).

Chan, Omana y Betti (2011) mencionan que la miosina de pollo es mucho más resistente a la desnaturalización que la de cerdo. De igual manera, se sabe que la proteína de músculo rojo que contiene el pollo es igualmente susceptible a la desnaturalización que las miofibrillas rojas y blancas del cerdo, ya que las miofibrillas rojas contienen menores cantidades de miosina extraíble. Sin embargo, este músculo se encuentra en muy pequeñas proporciones, ya que la carne de pollo se compone principalmente de miofibrillas blancas (Van Laack & Lane, 2000), razón por la cual la desnaturalización proteica para las *patties* de carne de pollo es mucho menos evidente. Como se

observa en los espectros FTIR (Figura 2), los cuatro tratamientos indican que la amida I, presenta muy ligeras fluctuaciones.

Además, un incremento temprano de los valores de pH es atribuido a degradación proteica, debido a la producción de nitrógeno molecular alcalino (Kılıç *et al.*, 2014), lo cual no se observó en los tratamientos que contenían 200 y 300 mg de CoQ₁₀ en ME; pero si en los T1 y T2 con 0 y 100 mg de CoQ₁₀; este comportamiento no es del todo evidente en el comportamiento de los FTIR de dichos tratamientos (Figura 2), lo cuales atribuido a la alta capacidad de las proteínas del pollo a mantener estabilidad.

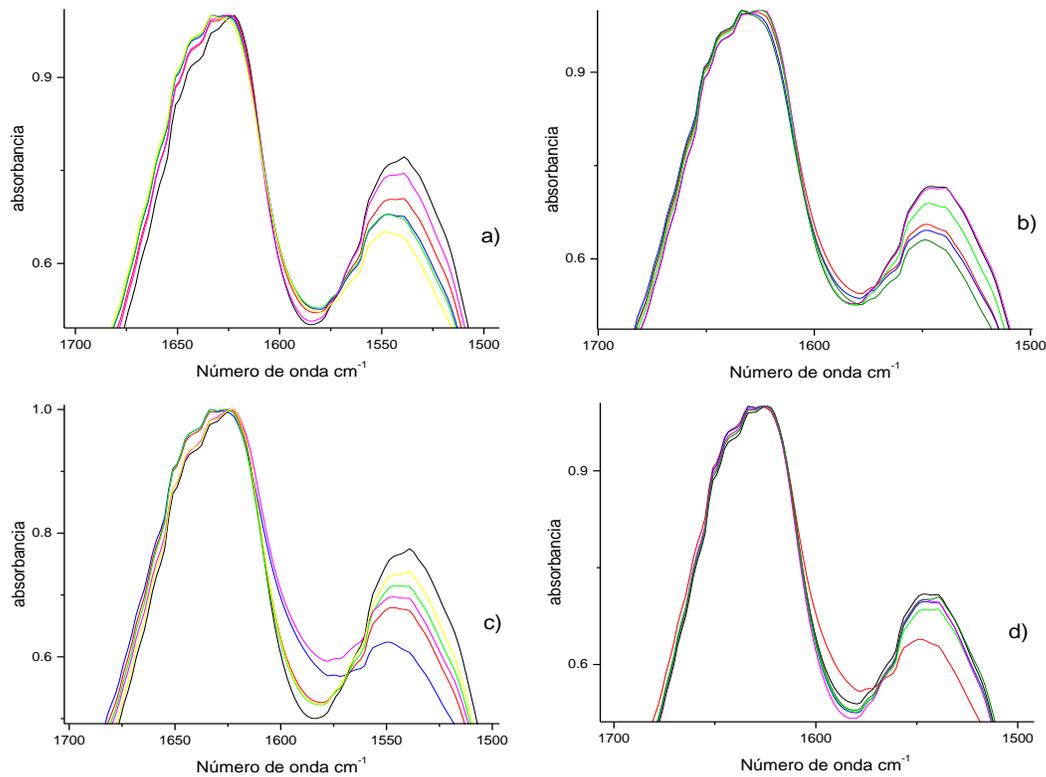


Figura 2. Espectros FTIR de *patties* de pechuga de pollo cocida y almacenada en refrigeración a 4 °C, analizada a los 0, 3, 6, 9, 12 y 15 d en diferentes niveles de inclusión de esferas de CoQ₁₀. a) T1, 0 mg de ME de CoQ₁₀ por 100 g de carne, b) T2, 100 mg de ME de CoQ₁₀, c) T3, 200 mg de ME de CoQ₁₀ y d) T4, 300 mg de ME de CoQ₁₀.

Además, cada tratamiento estudiado en *patties* de pechuga de pollo cocida y almacenada en refrigeración a 4 °C, se conservó durante 15 d. La amida I no presentó degradación. Pero la Amida II, mostró una oscilación en su comportamiento. Es importante resaltar que aun cuando hay

compuestos antioxidantes que previenen la oxidación lipídica de la carne, no todos son efectivos en reducir la oxidación proteica (Estévez, 2011). Sin embargo, también debe quedar claro que la amida II, no se relaciona totalmente con la estructura secundaria de las proteínas (Gallagher, 1997). Xiong, Brekke y Leung (1987) indicaron por calorimetría diferencial de barrido, que la desnaturalización de proteínas miofibrilares de pechuga de pollo ocurre a los 60.8 °C, por lo que los procesos de cocción empleados en este estudio podrían adicionar un efecto similar, debido al uso de temperaturas superiores a los 70 °C. Los cuales pudieron equilibrarse por la adición de ME de CoQ₁₀ en las concentraciones añadidas, ya que el T1 (0 mg de CoQ₁₀ en ME), presentó mayor oscilación en la línea base de la amida II.

1.4. Conclusiones

La CoQ₁₀ microencapsulada por coacervación simple, en su forma ubiquinona, tiene potencial como aditivo alimentario antioxidante de *patties* de pechuga de pollo cocidas y almacenadas en refrigeración a 4 °C; retardando la oxidación lipídica, en promedio en un 46.6 % y la oxidación proteica, al evitar la modificación de la amida I y por lo tanto mantener la estructura secundaria de las proteínas durante 15 d, para los tratamientos 2, 3 y 4. Siendo las concentraciones de 100 y 200 mg de CoQ₁₀ en ME, las que otorgan las mejores características fisicoquímicas y de textura en las *patties* de pechuga de pollo cocida.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable y al LGAC 2 del Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba; así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo para realizar esta investigación.

Literatura citada

- Al-Hijazeen, M., Al-Rawashdeh, M., Al-Hijazeen, M., & Al-Rawashdeh, M. (2017). Preservative effects of rosemary extract (*Rosmarinus officinalis* L.) on quality and storage stability of chicken meat patties. *Food Science and Technology*, (AHEAD), 0–0. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.24817>
- Ali, S., Zhang, W., Rajput, N., Khan, M. A., Li, C., & Zhou, G. (2015). Effect of multiple freeze–thaw cycles on the quality of chicken breast meat. *Food Chemistry*, 173, 808–814. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.095>

- Argyri, A. A., Panagou, E. Z., & Nychas, G.-J. (2012). Advances in vacuum and modified atmosphere packaging of poultry products. *Advances in Meat, Poultry and Seafood Packaging*, 205–247. <https://doi.org/10.1533/9780857095718.2.205>
- Banerjee, R., Verma, A. K., Das, A. K., Rajkumar, V., Shewalkar, A. A., & Narkhede, H. P. (2012). Antioxidant effects of broccoli powder extract in goat meat nuggets. *Meat Science*, 91(2), 179–184. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.016>
- Basanta, M. F., Rizzo, S. A., Szerman, N., Vaudagna, S. R., Descalzo, A. M., Gerschenson, L. N., ... Rojas, A. M. (2017). Plum (*Prunus salicina*) peel and pulp microparticles as natural antioxidant additives in breast chicken patties. *Food Research International*. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.011>
- Beltran, E., Pla, R., Yuste, J., & Mor-Mur, M. (2003). Lipid oxidation of pressurized and cooked chicken: role of sodium chloride and mechanical processing on TBARS and hexanal values. *Meat Science*, 64(1), 19–25. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00132-8)
- Bruna, J. M., Ordóñez, J. A., Fernández, M., Herranz, B., & de la Hoz, L. (2001). Microbial and physico-chemical changes during the ripening of dry fermented sausages superficially inoculated with or having added an intracellular cell-free extract of *Penicillium aurantiogriseum*. *Meat Science*, 59(1), 87–96. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00057-2)
- Byler, D. M., & Susi, H. (1986). Examination of the secondary structure of proteins by deconvolved FTIR spectra. *Biopolymers*, 25(3), 469–487. <https://doi.org/10.1002/bip.360250307>
- Cabrini, L., Pasquali, P., Tadolini, B., Sechi, A. M., & Landi, L. (1986). Antioxidant behaviour of Ubiquinone and β -Carotene Incorporated in model Membranes. *Free Radical Research Communications*, 2(1–2), 85–92. <https://doi.org/10.3109/10715768609088058>
- Castellini, C., Mugnai, C., & Dal Bosco, A. (2002). Effect of organic production system on broiler carcass and meat quality. *Meat Science*, 60(3), 219–225. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00124-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00124-3)
- Chan, J. T. Y., Omana, D. A., & Betti, M. (2011). Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat. *Food Chemistry*, 127(1), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.095>

- Estévez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: A review. *Meat Science*, 89(3), 259–279. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.025>
- Gallagher, W. (1997). FTIR Analysis of Protein Structure. *Biochemistry*, 8.
- Gómez, B., Barba, F. J., Domínguez, R., Putnik, P., Bursac Kovačević, D., Pateiro, M., ... Lorenzo, J. M. (2018). Microencapsulation of antioxidant compounds through innovative technologies and its specific application in meat processing. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.10.006>
- Guerrero-Legarreta, I., Pérez-Chabela, M. de L., & Ponce-Alquicira, E. (2002). Curso práctico de tecnología de carnes y de pescado. Unidad Autónoma Metropolitana, Unidad Ixtapalapa, 171.
- Insausti, K., Beriain, M. J., Purroy, A., Alberti, P., Gorraiz, C., & Alzueta, M. J. (2001). Shelf life of beef from local Spanish cattle breeds stored under modified atmosphere. *Meat Science*, 9.
- Kılıç, B., Şimşek, A., Claus, J. R., & Atılğan, E. (2014). Encapsulated phosphates reduce lipid oxidation in both ground chicken and ground beef during raw and cooked meat storage with some influence on color, pH, and cooking loss. *Meat Science*, 97(1), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.01.014>
- Ladikos, D., & Lougovois, V. (1990). Lipid oxidation in muscle foods: A review. *Food Chemistry*, 35(4), 295–314. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(90\)90019-Z](https://doi.org/10.1016/0308-8146(90)90019-Z)
- Lázaro, C. A., Conte-Júnior, C. A., Canto, A. C. V. da C. S., Lucia, M., Monteiro, G., Lima, B. R. C. da C., ... Franco, R. M. (2012). Biochemical changes in alternative poultry meat during refrigerated storage. *Revista Brasileira de Ciência Veterinária*, 19(3), 195–200. <https://doi.org/10.4322/rbcv.2014.108>
- Lupo-Pasin, B., González-Azón, C., & Maestro-Garriga, A. (2012). Microencapsulación con alginato en alimentos. Técnicas y aplicaciones. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 130–151.
- Mattila, P., & Kumpulainen, J. (2001). Coenzymes Q9 and Q10: Contents in Foods and Dietary Intake, 9. <https://doi.org/10.006/jfca.2000.0983>
- Mozdziak, P. (2014). Species of meat animals | Poultry. In *Encyclopedia of Meat Sciences* (pp. 369–373). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00080-5>

- O'Sullivan, M. G. (2017). Sensory properties affecting meat and poultry quality. In *A Handbook for Sensory and consumer-driven new product development* (pp. 225–257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100352-7.00011-7>
- Park, D., Xiong, Y. L., Alderton, A. L., & Ooizumi, T. (2006). Biochemical changes in myofibrillar protein isolates exposed to three oxidizing systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(12), 4445–4451. <https://doi.org/10.1021/jf0531813>
- Pateiro, M., Lorenzo, J. M., Amado, I. R., & Franco, D. (2014). Effect of addition of green tea, chestnut and grape extract on the shelf-life of pig liver pâté. *Food Chemistry*, 147, 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.153>
- Petillo, D., & Hultin, H. O. (2008). Ubiquinone-10 as an Antioxidant*. *Journal of Food Biochemistry*, 32(2), 173–181. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2008.00151.x>
- Pravst, I., & Pro, M. (2009). The stability of coenzyme Q10 in fortified foods. *Acta Chim. Slov.*, 56, 953–958.
- Purchas, R. W., & Busboom, J. R. (2005). The effect of production system and age on levels of iron, taurine, carnosine, coenzyme Q10, and creatine in beef muscles and liver. *Meat Science*, 70(4), 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.02.008>
- Purchas, R. W., Busboom, J. R., & Wilkinson, B. H. P. (2006). Changes in the forms of iron and in concentrations of taurine, carnosine, coenzyme Q10, and creatine in beef longissimus muscle with cooking and simulated stomach and duodenal digestion. *Meat Science*, 74(3), 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.03.015>
- Raharjo, S., Sofos, J. N., & Schmidt, G. R. (1992). Improved speed, specificity, and limit of determination of an aqueous acid extraction thiobarbituric acid-C18 method for measuring lipid peroxidation in beef. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(11), 2182–2185. <https://doi.org/10.1021/jf00023a027>
- Rahman, M. H., Hossain, M. M., Rahman, S. M. E., Amin, M. R., & Oh, D.-H. (2015). Evaluation of physicochemical deterioration and lipid oxidation of beef muscle affected by freeze-thaw cycles. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 35(6), 772–782. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.6.772>
- Ratnayake, W. M. N., Ackman, R. G., & Hulan, H. W. (1989). Effect of redfish meal enriched diets on the taste and n-3 pufa of 42-day-old broiler chickens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 49(1), 59–74. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740490107>

- Rattan, S. I. S. (2008). Hormesis in aging. *Ageing Research Reviews*, 7(1), 63–78.
<https://doi.org/10.1016/j.arr.2007.03.002>
- Reig, M., Aristoy, M.-C., & Toldrá, F. (2015). Sources of variability in the analysis of meat nutrient coenzyme Q10 for food composition databases. *Food Control*, 48, 151–154.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.02.009>
- Reis, A. S. dos, Diedrich, C., Moura, C. de, Pereira, D., Almeida, J. de F., Silva, L. D. da, ... Carpes, S. T. (2017). Physico-chemical characteristics of microencapsulated propolis co-product extract and its effect on storage stability of burger meat during storage at –15 °C. *LWT - Food Science and Technology*, 76, 306–313.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.033>
- Sakaridis, I., Soultos, N., Batzios, C., Ambrosiadis, I., & Koidis, P. (2014). Lactic acid bacteria isolated from chicken carcasses with inhibitory activity against *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes*. *Czech Journal of Food Science*, 32(1), 61–68.
- Shahidi, F., Rubin, L. j., & Wood, D. f. (1987). Control of lipid oxidation in cooked ground pork with antioxidants and dinitrosyl ferrohemochrome. *Journal of Food Science*, 52(3), 564–567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb06675.x>
- Stratulat, I., Britten, M., Salmieri, S., St-Gelais, D., Champagne, C. P., Fustier, P., & Lacroix, M. (2013). Encapsulation of coenzyme Q 10 in a simple emulsion-based nutraceutical formulation and application in cheese manufacturing. *Food Chemistry*, 141(3), 2707–2712.
- Van Laack, R. L. J. M., & Lane, J. L. (2000). Denaturation of myofibrillar proteins from chicken as affected by pH, temperature, and adenosine triphosphate concentration. *Poultry Science*, 79(1):105-9., 5. <https://doi.org/DOI: 10.1093/ps/79.1.105>
- Wang, B., Vongsvivut, J., Adhikari, B., & Barrow, C. J. (2015). Microencapsulation of tuna oil fortified with the multiple lipophilic ingredients vitamins A, D3, E, K2, curcumin and coenzyme Q10. *Journal of Functional Foods*, 19, 893–901.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.03.027>
- Wang, Y., Jia, J., Shao, J., Shu, X., Ren, X., Wu, B., & Yan, Z. (2018a). Preservative effects of allicin microcapsules on daily foods. *LWT*, 98, 225–230.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.043>

- Wang, Y.-F., Jia, J.-X., Tian, Y.-Q., Shu, X., Ren, X.-J., Guan, Y., & Yan, Z.-Y. (2018b). Antifungal effects of clove oil microcapsule on meat products. *LWT*, 89, 604–609. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.042>
- Weber, C., Bysted, A., & Hølmer, G. (1997). Coenzyme Q10 in the diet-daily intake and relative bioavailability. *Molecular Aspects of Medicine*, 18, 251–254. [https://doi.org/10.1016/S0098-2997\(97\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0098-2997(97)00003-4)
- Xiong, Y. L., Brekke, C. J., & Leung, H. K. (1987). Thermal denaturation of muscle proteins from different species and muscle types as studied by differential scanning calorimetry. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 20(5), 357–362. [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(87\)71331-5](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(87)71331-5)
- Xu, L., Cheng, J.-R., Liu, X.-M., & Zhu, M.-J. (2019). Effect of microencapsulated process on stability of mulberry polyphenol and oxidation property of dried minced pork slices during heat processing and storage. *LWT*, 100, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.025>

CONCLUSIONES GENERALES

La presente tesis de investigación mostró que las microesferas de CoQ₁₀ favorecen la estabilidad lipídica y proteica de la carne de pechuga de pollo, molida, cocida y almacenada en refrigeración a 4 °C, al conservar sus características fisicoquímicas, durante 15 d.

Al examinar los factores pro-oxidantes que influyen en la calidad de la carne de pollo, se demostró que los tratamientos térmicos cocción a la parrilla a 280 °C 3 min por lado y cocción por inmersión en baño maría hasta alcanzar una temperatura interna de 75 °C, afectan de manera significativa la estabilidad lipídica y proteica. Con cambios que influyen en el color, aumentando la luminosidad, las pérdidas de peso durante el almacenamiento y la cantidad de malondialdehído presente en el producto cárnico.

Se obtuvieron microesferas de CoQ₁₀ por el método de coacervación simple, sin requerir el uso de aceites y agentes emulsificantes, con porcentajes de incorporación del 61 % y estabilidad de la ubiquinona durante el proceso de encapsulación indicados en el análisis de espectros de FTIR y después de realizar tratamientos térmicos, conservando sus propiedades antioxidantes.

Se confirma que la adición de microesferas de CoQ₁₀ en su estado oxidado, reduce la oxidación lipídica en un 39 % en *patties* de pechuga de pollo molidas, cocidas y almacenadas en refrigeración a 4 °C, por 15 d. Situación que hace posible el uso de las microesferas como ingrediente no cárnico para productos cárnicos cocidos.

RECOMENDACIONES GENERALES

Se recomienda para futuras investigaciones:

Agentes pro-oxidantes.

- Para los análisis de agentes pro-oxidantes, se sugiere incluir tres niveles de aplicación de cada tratamiento realizado, con la finalidad de observar cambios por la aplicación en menor o mayor concentración de ellos.
- Realizar un diseño de ecuaciones estructurales para evaluar el fenómeno oxidativo, lipídico y proteico, como un todo.

Microencapsulación de CoQ₁₀

- En la microencapsulación de CoQ₁₀, se sugiere probarla en su estado reducido (ubiquinol) y comparar con los datos ya obtenidos con la finalidad de identificar si esta forma química provee una actividad antioxidante significativa con respecto a su estado oxidado (ubiquinona).
- Realizar más estudios acerca de la eficiencia de encapsulamiento, mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), para respaldar lo reportado, en esta investigación.
- Realizar microscopía SEM de las microesferas obtenidas, con la finalidad de observar morfología.
- Realizar más estudios de la liberación del componente activo, evidenciando el tiempo óptimo en el cual realiza su efecto y su comportamiento en tratamientos térmicos.

Aplicación de microesferas en patties de carne de pollo cocida

- Realizar el análisis de deconvolución de la segunda derivada para espectros FTIR, del tiempo de almacenamiento en refrigeración, para evidenciar degradación lipídica y proteica.
- Llevar a cabo análisis cuantitativos de proteína y oxidación proteica para evidenciar su degradación.
- Evaluar el perfil lipídico y proteico durante el almacenamiento de las *patties* en refrigeración y definir su comportamiento.
- Realizar ensayos *in vitro* de la biodisponibilidad de la CoQ₁₀ en el tracto gastrointestinal, para categorizar las ME como alimento funcional.
- Aplicar ME en el procesamiento de diversas matrices alimentarias.

ANEXOS

ANEXOS

A1. Evidencia fotográfica Experimental 1

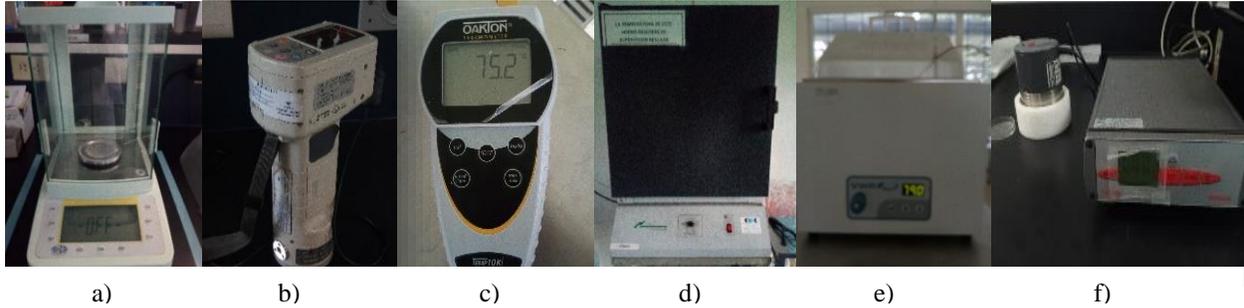


Figura 1. Equipo utilizado en la fase experimental; a) balanza analítica, b) colorímetro, c) termopar, d) estufa de aire, e) baño termostático y f) medidor de a_w

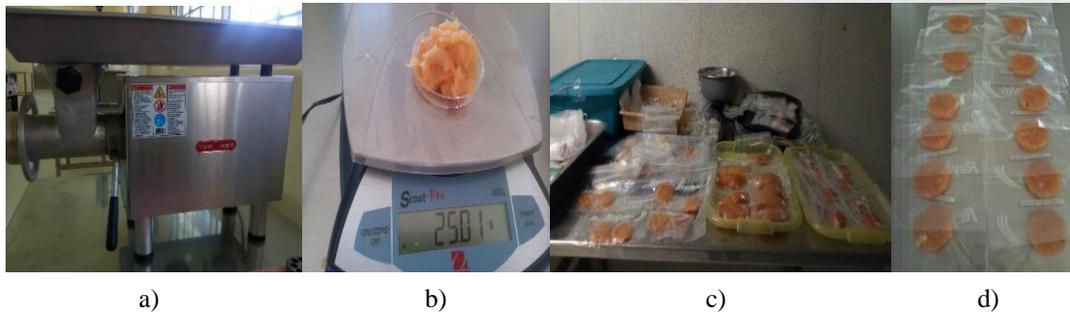


Figura 2. Proceso de elaboración de *patties* de pechuga de pollo. a) Molino marca Torrey, b) pesado de 25 g, c) *patties* de pollo almacenadas y d) *patties* envasadas.



Figura 3. Análisis de pH en *patties* de pechuga de pollo bajo diferentes tratamientos de agentes pro-oxidantes.



Figura 4. Determinación de acidez titulable, expresada en ácido láctico en *patties* de pechuga de pollo bajo diferentes tratamientos de agentes pro-oxidantes.

A2. Evidencia fotográfica Experimental 2

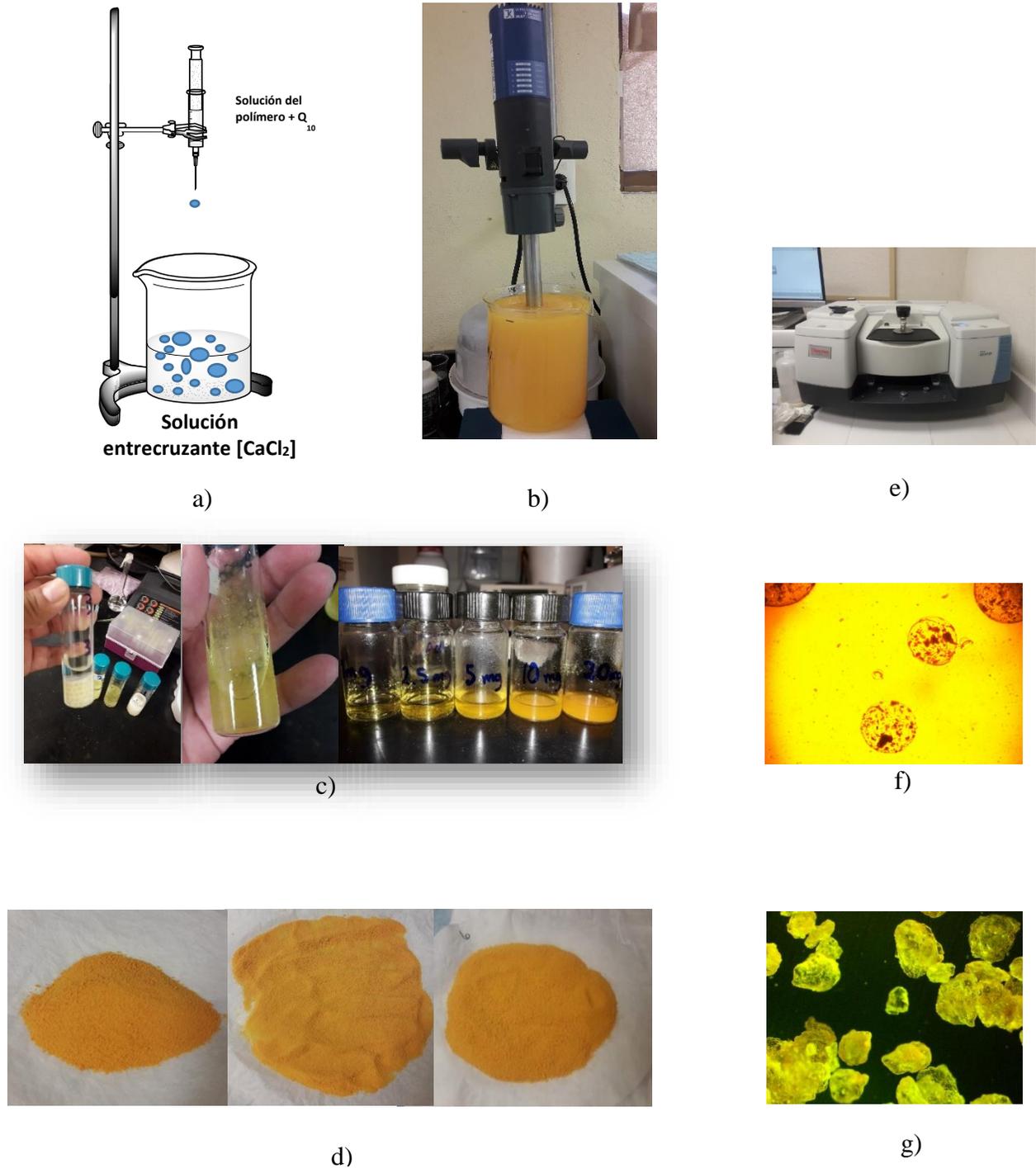


Figura 1. Proceso de elaboración de microsferas de CoQ₁₀: a) Goteo de dispersión coloidal en solución entrecruzante, b) homogenización de principio activo en solución coloidal, c) extracción de CoQ₁₀ de microsferas, d) microsferas de CoQ₁₀, e) Espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier, f) microsferas húmedas vistas al microscopio, g) microsferas secas vistas al microscopio.

A3. Evidencia fotográfica Experimental 3



Figura 1. Proceso de elaboración de *patties* de carne de pechuga adicionadas con microesferas de alginato mas Q₁₀

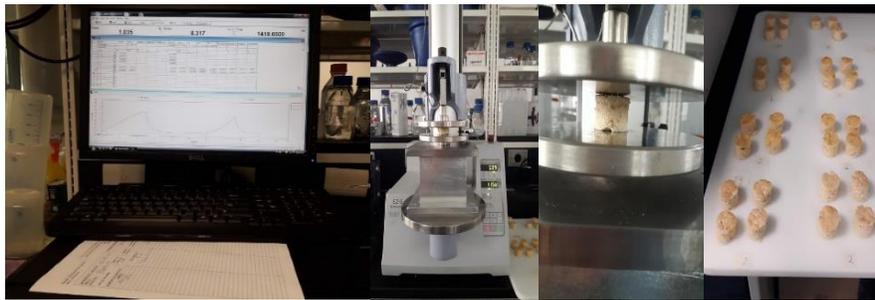


Figura 2. Análisis del perfil de textura de *patties* de pechuga de pollo almacenada en refrigeración a 4 °C. Texturometro Shimadzu® modelo EZ-S 500.

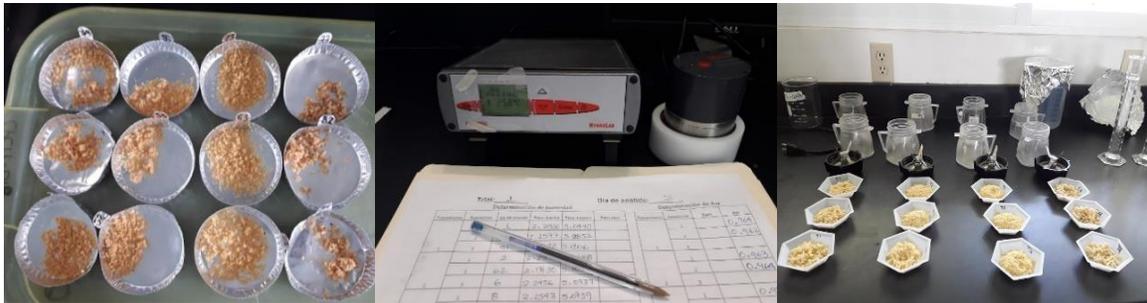


Figura 3. Análisis Fisicoquímicos de las *patties* de pechuga de pollo, almacenadas a 4 °C, bajo diferentes tratamientos: **T1**, 0 mg de CoQ₁₀ en ME, **T2**, 100 mg de CoQ₁₀ en ME, **T3**, 200 mg de CoQ₁₀ en ME, **T4**, 300 mg de CoQ₁₀ en ME, por 100 g de carne.



Figura 4. Análisis de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) de *patties* de pechuga de pollo, almacenadas a 4 °C, bajo diferentes tratamientos: **T1**, 0 mg de CoQ₁₀ en ME, **T2**, 100 mg de CoQ₁₀ en ME, **T3**, 200 mg de CoQ₁₀ en ME, **T4**, 300 mg de CoQ₁₀ en ME, por 100 g de carne.