



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Evaluación del efecto de las condiciones de rehidratación de
carne liofilizada de conejo México extra**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:
LAURA HERRERA MENDIETA**

**Asesores: M. en C. Jonathan Coria Hernández
Dra. Adriana Llorente Bousquets**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

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

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

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

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

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

Evaluación del efecto de las condiciones de rehidratación de carne liofilizada de conejo México extra.

Que presenta la pasante: **Laura Herrera Mendieta**

Con número de cuenta: **410093540** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de Junio de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

| | NOMBRE | FIRMA |
|----------------------|------------------------------------|-------|
| PRESIDENTE | Q.F.B. Martha Patricia Zúñiga Cruz | |
| VOCAL | I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez | |
| SECRETARIO | M. en C. Jonathan Coria Hernández | |
| 1er. SUPLENTE | M. en C. Crisoforo Mercado Márquez | |
| 2do. SUPLENTE | I.A. María Guadalupe López Franco | |

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

LMCF/cga



DEDICATORIA

Este trabajo de tesis se lo dedico principalmente a Dios por darme la oportunidad de llegar a esta meta, a mi familia que son mi esposo e hija que siempre han estado conmigo, acompañándome y haciéndome fuerte para continuar con mis sueños y metas. Así también a mis padres y hermanos que siempre confiaron en mí, sobre todo porque siempre he tenido su apoyo incondicional. A todos mis profesores de mi tan respetada Universidad Nacional Autónoma de México, por formar parte de mi vida escolar y de hacer un excelente trabajo para formar grandes profesionistas.



AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a **Dios** por permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi vida y por la salud que tengo para poder continuar superándome.

Así también a mi tan hermosa familia que amo tanto, a mi esposo **Juan Miranda Duran** y a mi hijita **Daniela**, por ser mis motores para conseguir y perseguir cada uno de mis sueños y metas, gracias por confiar en mí, gracias por estar conmigo en cualquier adversidad que la vida nos ha puesto. Te agradezco tanto mi amor, por dar todo por esta tu familia, por dar sin pedir algo a cambio, por siempre estar ahí cuando más necesito de un consejo y una palabra de aliento, haces que vea los problemas como una experiencia más en mi vida y de los cuales pueda aprender más, sé que siempre tendré tu apoyo para continuar con mis sueños, y que mejor que compartirlos con ustedes. A ti hijita por ser lo más hermoso que Dios nos ha dado y tu ser quien sea la que me motive a seguir adelante y esmerarme para que siempre estés orgullosa de mí. MUCHAS GRACIAS, QUE DIOS LOS BENDIGA SIEMPRE.

Y por consiguiente a mis padres que quiero, amo y respeto tanto, a mi padre, **Juan Herrera Arpide** y a mi madre **Alberta Mendieta Bolaños** ⁽⁺⁾, por siempre depositar su confianza en mí, por tener la fe en que yo puedo conseguir los sueños que me propongo, a ti papá te agradezco que me hallas enseñado que las cosas tienen que tener un sacrificio, que la puntualidad habla mucho de la persona, y a ti mamita que aunque ya no estás en persona conmigo, sé que siempre estas a mi lado, ayudándome a levantarme de los tropiezos que tengo, gracias por ser la que me dio las armas para ser una mujer valiente y ser capaz



de amar sin condiciones. LOS AMO Y LES AGRADEZCO TANTO SU APOYO.

A ustedes hermanos: **Guadalupe, Alfredo, Juan, Maribel, Rogelio, José Ignacio y Ana Lilia**; les agradezco enormemente, por darme siempre el apoyo incondicional, por ser quienes ponen su cariño en todo lo que me ofrecieron durante mi vida y hasta ahora, que dan las cosas sin pedirme nada a cambio, que cuando los necesito sé que estarán ahí en las buenas y malas. MUCHAS GRACIAS, SIEMPRE, así también a mis demás familiares que siempre han confiado en mí, que siempre me desean cosas buenas, de todos tengo algo guardado muy especial en el fondo de mi corazón, y que siempre estará presente.

Agradezco a mis profesores que me ofreció esta la mejor Universidad: Universidad Nacional Autónoma de México, gracias por dar lo mejor de ustedes, que por dar a la sociedad mejores seres humanos, dan su vida y esmero en conseguirlo día con día formando mejores profesionistas. MUCHAS GRACIAS POR CONFIAR EN MI.

Y finalmente a mis asesores de este trabajo: **M. en C. Jonathan Coria Hernández y a la Dra. Adriana Llorente Bousquets**, por su confianza y paciencia para culminar este trabajo, gracias por su excelente empeño como docentes, tengo que decir que fueron grandes seres humanos conmigo, los considero personas importantes en mi vida, tengo tanto que agradecerles, que solo puedo decirles. MUCHAS GRACIAS Y QUE DIOS LOS BENDIGA SIEMPRE.



Esta tesis forma parte de los proyectos del Taller Multidisciplinario de Ingeniería en Alimentos: Procesos Tecnológicos de Productos Cárnicos Laboratorio 7 de Bioconservación en la Unidad de Investigación Multidisciplinaria de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Se agradece al Proyecto DGAPA-PAPIIT IT202312 "ESTRATEGIAS DE BIOCONSERVACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LA CARNE Y SUS PRODUCTOS" por el apoyo recibido para este proyecto de tesis Y al Proyecto PIAPI 1635 "PROCESOS TECNOLÓGICOS DE PRODUCTOS CÁRNICOS"



ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 9 |
| ÍNDICE DE CUADROS | 10 |
| ABREVIATURAS..... | 11 |
| Resumen..... | 12 |
| Introducción..... | 13 |
| CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES..... | 15 |
| 1.1. El conejo | 16 |
| 1.1.1. Clasificación de conejo según la Norma Mexicana NMX-FF-105-SCFI-2005..... | 16 |
| 1.2. Manejo antes, durante y posterior al sacrificio..... | 17 |
| 1.3. Transformación del músculo en carne..... | 18 |
| 1.3.1. Aspectos Bioquímicos..... | 19 |
| 1.4. Estructura del músculo esquelético | 19 |
| 1.5. Proteínas de la carne | 21 |
| 1.5.1 Proteínas miofibrilares | 21 |
| 1.5.1.1. Miosina | 21 |
| 1.5.1.2. Actina..... | 24 |
| 1.5.2. Congelación..... | 25 |
| 1.5.3. Curva de congelación | 26 |
| 1.5.4. Liofilización..... | 27 |
| 1.5.4.1. Efectos de la liofilización..... | 29 |
| 1.5.4.2. Rehidratación de muestras liofilizadas..... | 31 |
| 1.5.4.3. Factores intrínsecos del proceso de rehidratación..... | 32 |
| 1.5.4.4. Sales de fosfatos | 33 |
| 1.5.4.5. Temperatura | 36 |
| 1.5.4.6. Interacción agua-proteína..... | 36 |
| 1.5.5. Fenómenos de transferencia de masa | 38 |
| 1.5.6. Aplicación del modelo de Peleg | 39 |
| 1.5.7. Propiedades fisicoquímicas de la carne | 40 |
| 1.5.7.1. pH final de la carne | 40 |
| 1.5.7.2. Actividad de agua (a_w)..... | 40 |
| 1.5.7.3. Efecto de la adición de solutos..... | 42 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 43 |
| Justificación | 44 |



| | |
|--|-----------|
| Problema | 44 |
| Objetivo general | 44 |
| Objetivos particulares..... | 45 |
| Hipótesis..... | 45 |
| 2.1. Determinación de unidades experimentales..... | 46 |
| 2.1.2. Congelación-Liofilización de unidades experimentales | 46 |
| 2.1.3 Preparación de soluciones de rehidratación | 47 |
| 2.1.4. Rehidratación de muestras liofilizadas, para determinación de tiempo requerido de rehidratación | 49 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 51 |
| 3.1. Diseño Experimental | 52 |
| 3.2. Análisis de pH, a_w y CRA de carne de conejo México Extra de 6h <i>post-mortem</i> | 53 |
| 3.2.1. Determinación de pH | 53 |
| 3.2.2. Capacidad de retención de agua (CRA)..... | 54 |
| 3.2.3. Actividad de agua (a_w)..... | 55 |
| 3.3. Cinéticas de rehidratación de <i>Longissimus dorsi</i> México Extra en soluciones de sales de fosfato..... | 57 |
| 3.4. Determinación de pH, a_w y CRA de muestras de <i>Longissimus dorsi</i> México Extra, liofilizadas -rehidratadas | 62 |
| 3.4.1. Actividad de agua | 62 |
| 3.4.2. Capacidad de retención de agua | 63 |
| 3.4.3. pH | 64 |
| 3.5. Análisis Estadístico de Parámetros Fisicoquímicas (CRA, a_w , pH) | 65 |
| 3.6. Aplicación del Modelo de Peleg | 68 |
| 3.6.1. Constantes del Modelo de Peleg..... | 70 |
| 3.7. Análisis y Discusión de Resultados | 72 |
| Conclusiones | 73 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Organización general del músculo esquelético..... | 20 |
| Figura 2. Esquema de la estructura de los filamentos gruesos | 22 |
| Figura 3. Estructura de la miosina | 23 |
| Figura 4. Estructura de actina | 25 |
| Figura 5. Curva de congelación | 27 |
| Figura 6. Diagrama de cambios | 28 |
| Figura 7. Pasos del proceso de liofilización | 28 |
| Figura 8. Procesos de Liofilización | 29 |
| Figura 9. Alimentos liofilizados..... | 30 |
| Figura 10. Fenómenos de rehidratación..... | 32 |
| Figura 11. Efecto del pH sobre la CRA..... | 37 |
| Figura 12. Efecto de los aniones cloruro sobre la CRA de la carne..... | 38 |
| Figura 13. Determinación de unidad experimental..... | 46 |
| Figura 14. Muestras de longissimus dorsi congelada..... | 47 |
| Figura 15. Liofilización de Longissimus dorsi: a) Liofilizadora LABCONCO, modelo Freezone 4.5, b) Muestra de Longissimus dorsi liofilizada..... | 47 |
| Figura 16. Preparación de soluciones para rehidratar | 48 |
| Figura 17. Selección de solución buffer..... | 49 |
| Figura 18. Potenciómetro de Orion 5-star | 53 |
| Figura 19. Prueba de centrifugación para la determinación de CRA en muestras refrigeradas | 54 |
| Figura 20. Higrómetro de pa _w kit | 56 |
| Figura 21. Cinéticas de rehidratación de Longissimus dorsi (México Extra)..... | 61 |
| Figura 22. a _w de muestras de Longissimus dorsi México Extra | 63 |
| Figura 23. CRA de muestras rehidratadas de Longissimus dorsi México Extra | 64 |
| Figura 24. pH de muestras rehidratadas | 65 |
| Figura 25. Gráfico de caja de a _w de muestras rehidratadas en TPF y agua a diferentes temperaturas..... | 66 |
| Figura 26. Gráfico de caja de pH de muestras rehidratadas en TPF y agua a diferentes temperaturas..... | 67 |
| Figura 27. Gráfico de caja de porcentaje de CRA | 68 |
| Figura 28. Regresión del modelo de Peleg para la rehidratación con agua a 50°C..... | 69 |
| Figura 29. Regresión del modelo de Peleg en rehidratación con agua a 70°C..... | 69 |
| Figura 30. Regresión potencial del Modelo de Peleg en rehidratación con TPF a 70°C..... | 70 |
| Figura 31. Regresión potencial del modelo de Peleg en rehidratación con TPF a 50°C..... | 70 |



ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Categorías de las canales de conejo | 16 |
| Cuadro 2. Diferencias entre un secado convencional y liofilización | 30 |
| Cuadro 3. pH de las soluciones de sales de fosfato | 42 |
| Cuadro 4. Tiempo de Rehidratación en agua y TPF a diferentes temperaturas..... | 50 |
| Cuadro 5. Condiciones de rehidratación de muestras de Longissimus dorsi | 52 |
| Cuadro 6. Determinación de pH | 54 |
| Cuadro 7. Determinación de CRA..... | 55 |
| Cuadro 8. Determinación de a_w 6 h post- mortem de muestra refrigerada de Longissimus dorsi de conejo México Extra | 56 |
| Cuadro 9. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de Longissimus dorsi de conejo México Extra con agua a 50°C | 57 |
| Cuadro 10. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de Longissimus dorsi de conejo México Extra con agua a 70°C | 58 |
| Cuadro 11. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de Longissimus dorsi de conejo México Extra con Tripolifosfato de sodio y NaCl a 50 °C | 59 |
| Cuadro 12. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de Longissimus dorsi de conejo México Extra con Tripolifosfato y NaCl a 70°C | 59 |
| Cuadro 13. Resultados de porcentaje de ganancia de agua y tiempo de rehidratación en cada rehidratante según condiciones de Rehidratación | 60 |
| Cuadro 14. Recuperación de agua (%) respecto de los registros de peso de muestras seleccionadas para las cinéticas de rehidratación | 61 |
| Cuadro 15. Determinación de a_w de muestras de Longissimus dorsi México Extra | 62 |
| Cuadro 16. Porcentajes promedios de CRA de cada condición de rehidratación..... | 63 |
| Cuadro 17. pH de muestras rehidratadas..... | 65 |
| Cuadro 18. Constantes del modelo de Peleg para la rehidratación de muestras liofilizadas de Longissimus dorsi a 50 y 70°C | 71 |



ABREVIATURAS

| | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------------|-----------|
| <i>Longissimus dorsi</i> | Lomo | L | Litro |
| $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ | Tripolifosfato de Sodio (TPF) | mL | Mililitro |
| $^{\circ}\text{C}$ | Grados centígrados | kg | Kilogramo |
| $\text{K}_1 - \text{K}_2$ | Constantes del Modelo de Peleg | H₂O | Agua |
| AMSA | American Meat Science Association (por sus siglas en inglés) | M | Molaridad |
| NOM | Norma Oficial Mexicana | Cl⁻ | Cloro |
| ANOVA | Análisis de Varianza | g | Gramos |
| NMX | Norma Mexicana | | |
| % | Porcentaje | | |
| pH | Potencial de hidrogeno | | |
| CRA | Capacidad de Retención de Agua | | |
| a_w | Actividad de agua | | |
| μm | Micrómetro | | |
| nm | Nanómetro | | |
| Ca²⁺ | Calcio | | |
| Mg²⁺ | Magnesio | | |
| kDa | Kilodalton | | |
| NH₂ | Amino | | |
| MML | Meromiosina ligera | | |
| MMP | Meromiosina pesada | | |
| -SH | Sulfhídrico | | |
| ATP | Adenosín trifosfato | | |
| ADP | Adenosín difosfato | | |
| T_i | Temperatura inicial | | |
| T_f | Temperatura mínima | | |
| T_c | Temperatura final | | |
| USDA | United States Department of Agriculture (por sus siglas en inglés) | | |
| NaCl | Cloruro de sodio | | |



Resumen

La carne de conejo es un alimento con alto contenido de agua, es por ello que, tiene una gran influencia en los atributos de calidad. Sin embargo, algunos métodos de conservación de alimentos se basan en primera instancia en modificar el contenido de agua en los mismos. Entre los métodos de eliminación de agua, que permite mantener las mejores características en los alimentos es la liofilización, que favorece la rehidratación de los mismos sin cambios estructurales. Durante la rehidratación se pueden utilizar diferentes soluciones salinas, en este proyecto se utilizó Tripolifosfato de sodio ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) como medio rehidratante en *Longissimus dorsi* liofilizado de carne de conejo México Extra, , por otro lado desde el punto de vista de fenómenos de transferencia de masa, se realizaron determinaciones de parámetros fisicoquímicos (pH, a_w y CRA) de la carne refrigerada (6 h *post-mortem*) y rehidratada, para conocer el efecto que tiene la rehidratación en tales parámetros. El enfoque de este proyecto se basó en el análisis que tiene el porcentaje de ganancia de agua en un modelo predictivo (Modelo de Peleg) que refleja como es el efecto en microestructuras de las proteínas. El fenómeno de rehidratación con sales de fosfatos, tuvo efecto en las propiedades fisicoquímicas de la carne, así como, ya demostrado en un modelo predictivo (Modelo de Peleg), el fenómeno de transferencia de masa se analizó mediante la obtención de unas constantes (K_1 y K_2) que maneja el modelo, resulto que el uso de sales, tienden a repercutir en la velocidad de transferencia de masa, y por ende el porcentaje de absorción aumenta al rehidratar a temperaturas diferentes, esto se demostró gráficamente (cinéticas) con la ayuda de datos obtenidos durante las rehidrataciones en agua y tripolifosfato a 50°C y 70°C , todo se analizó desde el punto de vista de transferencia de masa, ya que, como objetivo es conocer el efecto de la temperatura y el uso de sales en la rehidratación en *Longissimus dorsi*.



Introducción

La calidad de la carne obedece a un sinnúmero de factores que incluyen el sistema de producción, la raza, el tipo de sacrificio, la localización anatómica y procesamiento, así como el sistema de comercialización, entre otros (AMSA, 2012). La carne es definida como la estructura compuesta por fibra muscular estriada, acompañada o no, de tejido conectivo, grasa, fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos, de las especies animales autorizadas para el consumo humano (NOM-009-ZOO-1994).

La carne de conejo ha sido motivo de clasificación en términos de calidad comercial, (NMX-FF-105-SCFI-2005) en donde se le define como el cuerpo del animal sacrificado, desangrado, sin piel, abierto a lo largo de la línea media (externo -abdominal), con cabeza, extremidades seccionadas a nivel de metatarso y metacarpo, y eviscerado (pudiendo contener el hígado, corazón y riñones). Se le clasifica en términos de la edad al sacrificio, en las siguientes categorías: México Extra (77 días), México 1 (100 días) y México 2 (cualquier edad) (NMX-FF-105-SCFI-2005). La importancia del consumo de carne de conejo radica en las características nutrimentales que posee, debido a su alto contenido de proteínas y bajo contenido de grasa, se le considera una carne magra, comparado con otras carnes (Hernández, 2008). La carne de conejo es un alimento perecedero que posee un alto contenido de agua (70%), lo que la hace susceptible al crecimiento de microorganismos. De este modo y dada la distribución y movilidad del agua contenida, tiene una profunda influencia en los atributos de calidad esencial como la jugosidad, la ternura, la firmeza y apariencia (Fennema, 2010). Los métodos de conservación de alimentos se basan en primera instancia en modificar el contenido de agua en los mismos, con objeto de reducir la velocidad de las reacciones de deterioro, de este modo, la remoción del agua puede realizarse de tres formas, por métodos de eliminación, adición de solutos y congelación. Entre los métodos de eliminación de agua, se tiene el secado, deshidratado, etc. Uno de lo que permite mantener las mejores características en los alimentos es la liofilización, siendo un método que se fundamenta en la sublimación del agua congelada en el alimento, mediante la aplicación de vacío (Ozuna, 2001).



Esto favorece la rehidratación de los alimentos sin cambios estructurales mayores, ya que se pueden utilizar diferentes medios, como son las soluciones salinas, que mejoran las características finales del producto rehidratado (Matejtschuk, 2007).

Las proteínas de la carne se encuentran estabilizadas a través de diferentes moléculas, principalmente de agua y sales, estas últimas regulan el ordenamiento del agua a su alrededor, lo que produce un cambio en sus propiedades de hidratación, así como de su estructura en la interface agua-proteína (Badui, 2006).

Con objeto de evaluar la rehidratación de carne de conejo liofilizada, en este proyecto se tomará en consideración su estabilidad con el uso de sales de fosfatos y su efecto en algunos parámetros fisicoquímicos de las muestras rehidratadas, como son el pH, CRA y a_w . Para el modelo matemático de la transferencia de materia ocurrida durante el proceso de rehidratación de un alimento, existen varias ecuaciones empíricas que ajustan los datos experimentales de humedad en función al tiempo. Dentro de las más utilizadas está, el modelo difusional que obedece a la segunda Ley de Fick y, al modelo empírico de Peleg, éste último se utilizó en este proyecto, en el que se busca el modelamiento de fenómenos de absorción de soluciones en alimentos (Agudelo, 2009).

Las propiedades fisicoquímicas que se estudiaron en este proyecto son CRA, a_w y pH, donde se pretende analizar cómo se ven afectadas, antes y después del proceso de rehidratación, de cortes de carne obtenidos del músculo *Longissimus dorsi* liofilizado de conejo.



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES



1.1. El conejo

Animal doméstico (*Oryctolagus cuniculus*) es un mamífero que pertenece al orden *Lagomorpha* y a la familia de los *Lepóridos*. El conejo para abasto es el animal doméstico de cualquier raza o línea de cruzamiento, clínicamente sano, sometido a un proceso productivo, destinado al sacrificio (NMX-FF-105-SCFI-2005).

1.1.1. Clasificación de conejo según la Norma Mexicana NMX-FF-105-SCFI-2005

La carne de conejo es muy valorada por sus propiedades nutricionales y dietéticas, es una carne magra, con un bajo contenido de grasa y con menor contenido en ácidos grasos saturados y colesterol que otras carnes. Además, es una carne blanca, fácil de cocinar, de buen sabor y adaptable a todas las dietas, adecuada para el consumo en niños, ancianos y enfermos, llegando incluso como carne deshuesada a ser industrializada como alimento para bebés (Hernández, 2008). La NMX-FF-105-SCFI-2005 dice que la carne fresca de conejo es el conejo en canal que ha sido procesado y mantenido en hielo por un máximo de 24 horas. Y al lomo lo define como la porción de la canal cuyo corte incluye de la última vértebra torácica a la última lumbar. Para los efectos de esta norma, el conejo para abasto se clasifica en las siguientes categorías (NMX-FF-105-SCFI-2005):

- México Extra
- México 1
- México 2

Cuadro 1. Categorías de las canales de conejo

| Categoría | Peso en Canal | Edad (días) |
|--------------|-----------------------------|----------------|
| México Extra | 1,0 a 1,5 | Hasta 77 |
| México 1 | 0,9 a 1,8 | Hasta 100 |
| México 2 | Menor de 0,9 o mayor de 1,8 | Cualquier edad |

Fuente: NMX-FF-105-SCFI-2005



1.2. Manejo antes, durante y posterior al sacrificio

En el contexto de las principales características de calidad de las carnes (entre ellas: terneza, color, capacidad de retención de agua, entre otras), puede observarse que la mayoría de estos aspectos están relacionados, directa o indirectamente, con características intrínsecas de los animales, factores productivos o medioambientales y procedimientos industriales de elaboración y comercialización.

Manejo *ante mortem*

El manejo de los animales antes del sacrificio tiene un efecto directo sobre la calidad de la carne para su venta en el mercado en fresco o para la elaboración de productos cárnicos. Este comprende todas aquellas actividades a las que son sometidos los animales, desde que salen de la granja de origen, hasta el matadero, incluyéndose la movilización, la carga de los vehículos y el transporte al sitio donde serán sacrificados, lugar donde se realizan actividades de descarga, arreo y alojamiento en los corrales de descanso (Llorente, 1997; López, 2004).

Dicho lo anterior, se considera que las Buenas Prácticas de Manejo de los animales antes de su matanza deben contemplar por lo menos los siguientes aspectos: el diseño, construcción y mantenimiento de las instalaciones, vehículos y equipos necesarios. Además, debe haber un programa de capacitación del personal involucrado en cada una de las actividades que se desarrollan, incluyendo programas adecuados de higiene. De esa manera, un correcto manejo de los animales antes del sacrificio evita estrés y consecuencias negativas en la calidad del producto (Llorente, 1997; Hui, 2006; Amerling, 2001).

Método de insensibilización y sacrificio

La insensibilidad se refiere a una pérdida de la capacidad de experimentar impresiones físicas, propia de los seres vivos debido a un proceso mecánico, químico o eléctrico que interrumpe de forma momentánea, la percepción a través de los sentidos. Dicho proceso se realiza con el fin de provocar su inconsciencia de los animales y asegurarse de que estos no se recuperaran antes de ser sacrificados. Al mismo tiempo, se logra inmovilizar al animal para evitar que lesione a los operarios durante la manipulación previa a su muerte (Hui, 2006; Moreno, 2006).



Los sistemas utilizados para producir la insensibilización y sacrificio de los animales deben permitir un rápido desangrado, a fin de evitar que alteren las características físicas, químicas e higiénicas del producto, además se deben evitar dolores y sufrimientos innecesarios al animal (López, 2004; Amerling, 2001; Hui, 2006).

Manejo *Post mortem*

Una vez que el animal ha sido sacrificado ocurre una serie de cambios químicos, físicos y bioquímicos, asociados a la conversión del músculo en carne, cuyas etapas más importantes se describen a continuación (Ranken, 2003).

1.3. Transformación del músculo en carne

La conversión del músculo en carne es un proceso que involucra desde que el animal está vivo, hasta su transformación en un producto para fines de alimentación, siendo la operación central de este proceso el sacrificio de los animales, toda vez que a partir de éste se inician los procesos metabólicos que alteran la naturaleza del músculo *in vivo*. Sin embargo, esta operación no puede considerarse aislada con respecto al manejo previo al sacrificio y al proceso posterior, ya que algunos aspectos de la contracción y relajación *in vivo* guardan con el acortamiento y disminución del ablandamiento que ocurren en la carne durante los cambios *post mortem*, lo cual afecta de manera sensible a la calidad de la carne (Carballo, 2001; Barrón *et al.*, Amerling, 2001). El proceso de transformación de músculo en carne se puede dividir en tres etapas: *pre-rigor*, *rigor mortis* y etapa de maduración (Hui, 2006).

Pre-rigor

En este punto el músculo es extensible y se puede estirar de modo reversible, posteriormente, cuando el oxígeno se agota en el tejido muscular, se establece de manera predominante y definitivo el metabolismo anaerobio, por lo cual se da paso a que sea la glucólisis la única vía para generar energía. Es así como las reservas de glucógeno disminuyen y el ácido láctico se acumula en el tejido muscular, lo que lleva a una reducción de pH del músculo, aunado a lo anterior se produce la falla en los mecanismos que controlan la temperatura corporal (Carballo, 2001).



Rigor mortis

Esta etapa se presenta poco después de la muerte, caracterizándose por el hecho de que el tejido muscular se encuentra en un estado de rigidez sostenida y es inextensible. Ello se debe a que el control nervioso, se pierde y se desencadena la aparición de impulsos localizados que inician rápidos ciclos de contracción y relajación muscular (Carballo, 2001; Ranken, 2003).

Etapa de maduración

A medida que avanza el tiempo *post* sacrificio de los animales, el tejido muscular va recuperando gradualmente cierta elasticidad como consecuencia de la pérdida de la integridad del tejido, mejorando con ello la textura dando lugar a la formación de compuestos precursores del aroma. De igual manera a medida que el pH del músculo desciende se van liberando enzimas asociadas a la degradación de proteínas. (Hui, 2006; Sañudo, 1992). Es de esa manera que el ablandamiento que tiene lugar durante la maduración o envejecimiento de la carne, se ha adjudicado, en parte, a la degradación de algunos componentes del tejido conectivo y del colágeno del músculo, bajo la acción de las catepsinas, lo cual da como resultado la pérdida de tensión y cambios en las estructuras de las miofibrillas (Barrón, *et al.*, 2007; Carballo, 2001; Forrest, 1979; Ranken, 2003).

1.3.1. Aspectos Bioquímicos

Según la FAO (2015) la carne es el producto pecuario de alto valor, debido al contenido de proteínas de alta calidad, por contener todos los aminoácidos esenciales, así como sus vitaminas y minerales de elevada biodisponibilidad. A lo que respecta en México la NMX-FF-105-SCFI-2005 y la NOM-009-ZOO-1994, se encuentra que la carne es la masa muscular que cubre el esqueleto del animal y que está constituida por tejido muscular, conectivo, grasa, vasos linfáticos y sanguíneos y nervios.

1.4. Estructura del músculo esquelético

La organización del músculo esquelético (Figura 1), visto desde un punto de vista macro hasta microscópico, está compuesto por haces de fibras musculares, dentro de la fibra muscular se encuentran las miofibrillas, que a su vez muestra el sarcómero con sus distintas bandas y líneas, en la cual se observa la posición de los miofilamentos en la miofibrilla. Las secciones



transversales muestran la disposición de los miofilamentos en diversas partes del sarcómero, moléculas de actina *G*, filamentos de actina formado por dos cadenas de actina *F* enrolladas entre sí. Un filamento de miosina muestra las relaciones de las cabezas con el filamento, en el que se aprecian las regiones de cabeza y cola, y meromiosina ligera y meromiosina pesada de la molécula de miosina (Forrest, 1979).



Figura 1. Organización general del músculo esquelético

Fuente: Forrest, 1979.

Las miofibrillas son bastoncitos cilíndricos y largos, de aproximadamente, 1-2 μm de diámetro (Figura 1). Los filamentos gruesos y delgados de la miofibrilla son diferentes en dimensiones, composición química, propiedades y ubicación en el sarcómero, poseen un diámetro aproximado de 14-16 nm, con una longitud de 1.5 μm . Los filamentos gruesos constituyen la banda *A* del sarcómero, estos filamentos están constituidos en su mayoría de miosina, por lo que se les denomina miofilamentos.

Estos filamentos mantienen un ordenamiento transversal y longitudinal mediante bandas gruesas cruzadas localizadas periódicamente a lo largo de su longitud y por conexiones cruzadas en el centro de la banda *A*, esta alineación de conexiones cruzadas se conoce como línea *M* (Forrest, 1979).

Los filamentos delgados tienen unos 6-8 nm de diámetro y se extienden 1 μm aproximadamente a cada lado de la línea *Z*. Estos filamentos constituyen la banda *I* del sarcómero, se constituyen principalmente de actina, por lo que se les denomina filamentos de actina y constituye la zona menos densa de toda la miofibrilla. La zona *H* es menos densa que el resto de la banda *A*, ya que constituye la región central entre las terminaciones de los



filamentos opuestos de actina (mitad del sarcómero). El ancho de la zona *H* varía con el estado de contracción muscular. El área más densa de la banda *A*, se encuentra a cada lado de la zona *H*, en donde existen filamentos de actina y miosina (Forrest, 1979).

1.5. Proteínas de la carne

Las proteínas son el componente más importante de la carne y en contenido ocupan el segundo lugar después del agua. De acuerdo con su procedencia se clasifican en: sarcoplásmicas, miofibrilares y del tejido conectivo (Forrest, 1975; Bandman, 1986).

De acuerdo a su solubilidad, las sarcoplásmicas, son solubles en agua (funcionalmente son enzimas). Las miofibrilares (forman el 50-60% del total) son insolubles en agua y solubles en soluciones salinas, por ejemplo, miosina y actina y las del tejido conectivo, insolubles en agua y soluciones salinas, por ejemplo, colágeno y elastina.

Las proteínas estructurales de las miofibrillas del músculo esquelético están clasificadas en tres categorías: contráctiles, reguladoras y del citoesqueleto. Las propiedades de estas proteínas son de significativa importancia en los atributos de la calidad de la carne *post mortem*, están muy relacionadas con el *rigor mortis*, la terneza y la capacidad de retención de agua (CRA) en la carne.

1.5.1 Proteínas miofibrilares

Las proteínas miofibrilares están constituidas principalmente por actina y miosina.

1.5.1.1. Miosina

Esta proteína está presente en mamíferos, aves y peces. Las formas presentes en las diversas especies son similares, aunque hay pequeñas diferencias en su composición de aminoácidos (Lampila, 1991). Es la más abundante de las proteínas miofibrilares; representa cerca del 55 a 60% de las proteínas totales, y constituye el 35% de todas las proteínas del tejido muscular (Yates y Greaser, 1983). Posee una carga eléctrica elevada y tiene gran afinidad por los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} . Su punto isoeléctrico es aproximadamente 5.4, tiene un contenido de prolina más bajo que la actina y es más fibrosa, su peso promedio es de 480 kilodaltons (kDa).

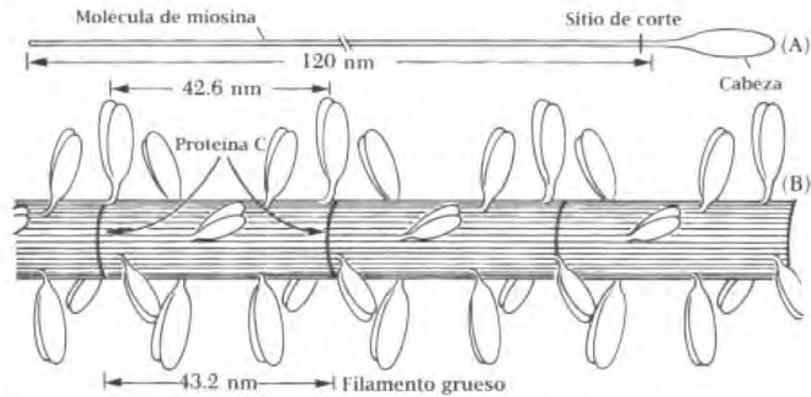


Figura 2. Esquema de la estructura de los filamentos gruesos

Fuente: Yates y Greaser, 1983.

La estructura de la miosina es de una varilla alargada, llamada región de la cola, con una porción gruesa al final, llamada región de la cabeza. La longitud promedio de su molécula es de alrededor de 160 nm. Contiene dos largas cadenas polipeptídicas idénticas de unos 200 kDa denominados cadenas pesadas. Cada una de las cadenas se enlazan en una conformación α -helicoidal en la mayor parte de su longitud excepto en su extremo NH_2 terminal donde forma la cabeza, de estructura globular (Bailey, 1982). En el centro de la banda *A*, a cada lado de la línea *M*, el filamento de miosina contiene la cola de las moléculas de miosina sin ninguna de las cabezas, esta región dentro de la zona *H*, a cada lado de la línea *M*, se denomina zona *pseudo Z*. La polaridad de los filamentos de miosina es tal que las cabezas en cada lado de la región central de la banda *A* se orientan en ángulo oblicuo separándose de la línea *M*. Tales cabezas salientes son los sitios funcionalmente activos de los filamentos gruesos durante la contracción muscular, puesto que las cabezas de miosina forman puentes cruzados con los filamentos de actina.

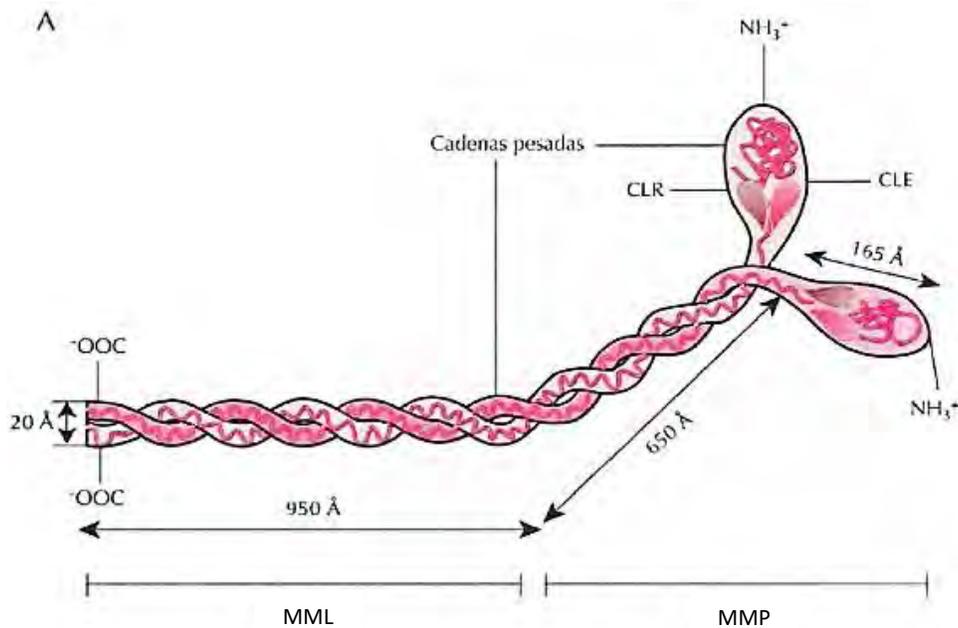


Figura 3. Estructura de la miosina

Fuente: www.arteria.iespana.es

La formación de puentes mediante la interacción entre la actina y la miosina forman el complejo actomiosina. La molécula de miosina contiene regiones que son susceptibles de una hidrólisis suave. Exponiendo brevemente la miosina a las acciones de la tripsina o de la quimotripsina se libera un fragmento pesado y otro ligero denominados meromiosina pesada (MMP), que contiene las dos cabezas, y meromiosina ligera (MML). La MML es insoluble en agua, tiene un peso molecular de aproximadamente 96 kDa y un elevado contenido de alfa-hélice (aproximadamente 80%, la MMP es soluble en agua y tiene poca estructura en α -hélice (50%). Por otra parte, tratando a la miosina con la enzima papaína se puede separar la “cabeza”. La MMP tiene un peso aproximado de 350 kDa y posee el lugar de unión para la actina y la capacidad ATP-asa. Cuando la actina está unida a la miosina se produce un cambio en la actividad ATP-ásica; los iones calcio activan la reacción, mientras que los iones magnesio a baja concentración actúan como inhibidores. La actividad enzimática de la miosina se caracteriza porque presenta dos valores óptimos de pH: 6.0 y 9.5. De los grupos -SH de la cabeza de la miosina dos son esenciales para la actividad ATP-ásica: el bloqueo de uno de los grupos esenciales produce una activación, mientras que el bloqueo de los dos determina la inactivación total (Lowey *et al.*, 1969; Hamm, 1978). En la molécula de la



miosina se encuentran cerca de 500 restos de 20 aminoácidos, entre ellos todos los esenciales. Cerca del 30% de todos los aminoácidos pertenecen a ácidos carboxílicos, lo cual le da un carácter ácido a la molécula y condiciona su capacidad específica de unión con los iones Ca^{2+} , K^{+2} y Mg^{2+} . Es por esta razón que su punto isoeléctrico está en la zona ácida de la escala de pH (5.4).

1.5.1.2. Actina

La actina es el principal constituyente de los filamentos delgados. Es una proteína globular constituida por una cadena polipeptídica simple que une una molécula de nucleótido (ATP o ADP) y un catión divalente (calcio o magnesio) por monómero. La actina, al igual que la miosina, no se restringe a los tejidos musculares y se encuentra en muchos tipos de células (Pollard y Weihing, 1974). La actina de los músculos esquelético y cardíaco es la α -actina, mientras que en otros tejidos están presentes actinas beta y gamma (Garrels y Gibson, 1976). Esta proteína constituye aproximadamente el 22% del total de las proteínas musculares (Yates y Greaser, 1983) y es rica en el aminoácido prolina. Este aminoácido, por las características de su grupo amino (N_2H), contribuye a la forma plegable entre las cadenas polipeptídicas de las moléculas globulares de actina (*G*-actina). La actina puede existir en dos formas: *G*-actina, que consiste en unidades globulares relativamente pequeñas que tienen un peso molecular de aproximadamente 47 kDa y está compuesta de una sola cadena polipeptídica; tiene alto contenido de prolina, de ahí su baja proporción de α -hélice. Contiene restos del poco corriente aminoácido 3-metil-histidina, que también se encuentra en la miosina. La molécula de *G*-actina se enlaza muy fuertemente con un ion Ca^{2+} . También se une a una molécula de ATP o ADP con gran afinidad. La unión del ATP con la actina *G* suele ir acompañada de la polimerización de ésta a *F*-actina. La presencia de sales también induce esa polimerización. La *F*-actina es fibrosa, con un peso molecular mayor que 14 millones de Daltons (MDa), y consiste en dos hebras de actina *G* monómeros. Un filamento constituido por dos de tales hebras tendría un diámetro de 60 Å (Bandman, 1986).

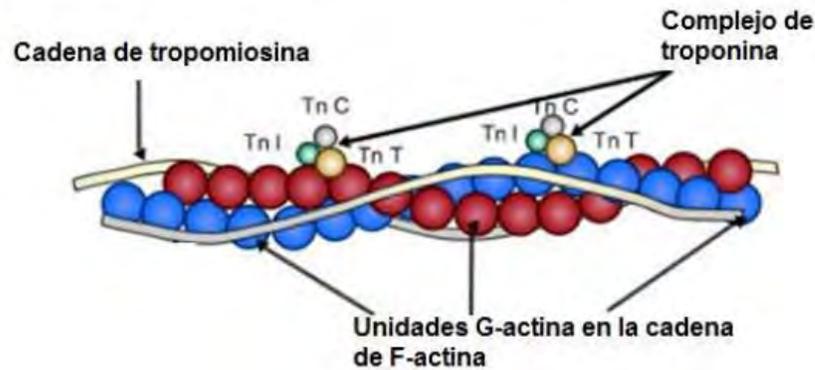


Figura 4. Estructura de actina

Fuente: Carballo y López, 1991.

1.5.2. Congelación

La congelación es aquella operación unitaria en la que la temperatura del alimento se reduce por debajo de su punto de congelación, con lo que la temperatura del agua que contiene cambia de estado formando cristales de hielo (Fellows, 1993).

La congelación de los alimentos implica el retiro de cierta cantidad de calor, tanto sensible como latente. El retiro de calor sensible antes del punto de congelación permite la disminución de temperatura del alimento hasta alcanzar dicho punto. Posteriormente es retirado calor latente, provocando el cambio de estado del agua del alimento, de líquido a sólido (Martínez, 1998).

No toda el agua presente en el alimento puede separarse en forma de cristales como consecuencia de la congelación. En el alimento existe una fracción del agua no congelable a la que corresponde una actividad de agua muy baja (de hasta 0.3). Ésta, se encuentra fuertemente unida a las estructuras moleculares, y se denomina agua ligada y, representa entre el 5 y el 10% de la masa total de agua contenida en el alimento. El agua libre o no ligada, por su parte, representa la mayor parte del agua contenida en los alimentos. No obstante, esta agua no sale espontáneamente de los tejidos, se encuentra en forma de geles tanto en el interior de la célula como en los espacios intercelulares, estando su retención influenciada por el pH y las fuerzas iónicas. Durante la congelación el agua es removida de su posición normal dentro de los tejidos y convertida en hielo (Martínez, 1998).



1.5.3. Curva de congelación

El proceso de congelación en los alimentos es más complejo que la congelación del agua pura. Los alimentos al contener otros solutos disueltos además de agua presentan un comportamiento ante la congelación similar al de las soluciones. La evolución de la temperatura con el tiempo, durante el proceso de congelación es denominada, curva de congelación. La curva de congelación típica de una solución se muestra en la figura 4, donde, la cristalización del agua dependerá del sistema de congelación utilizado (rápido o lento). Según Martínez (1998), la congelación puede dividirse en tres etapas (a los efectos de su visualización, en realidad estas etapas se superponen parcialmente):

Refrigeración: En este período el alimento se enfría desde su temperatura inicial T_i , que generalmente es mayor que $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta la temperatura de comienzo de cambio de fase.

Congelación: Este período está caracterizado por la nucleación y el crecimiento de cristales de hielo. El tamaño de los cristales dependerá de la velocidad de transferencia de calor; la gran mayoría de los alimentos está constituida por una matriz de sólidos insolubles y una fase acuosa que contiene una cierta cantidad de sólidos disueltos. Debido a éstos, la congelación del agua no se produce a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, sino que, el cambio de fase comienza a una temperatura menor T_f la magnitud del descenso es proporcional a la concentración inicial. Al avanzar la congelación, la concentración de sólidos en la fase sin congelar aumenta, razón por la cual la temperatura de cambio de la fase continúa descendiendo, obteniéndose un intervalo de temperaturas de cambio de fase. Se encuentra además que aún a temperaturas muy bajas, por ejemplo $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, una pequeña proporción del contenido inicial de agua permanece sin congelar, esta fracción se denomina "agua ligada". A los fines prácticos se considera que, para alimentos de alto contenido acuoso, la mayor parte del cambio de fase ocurre entre T_f y $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Martínez, 1998).

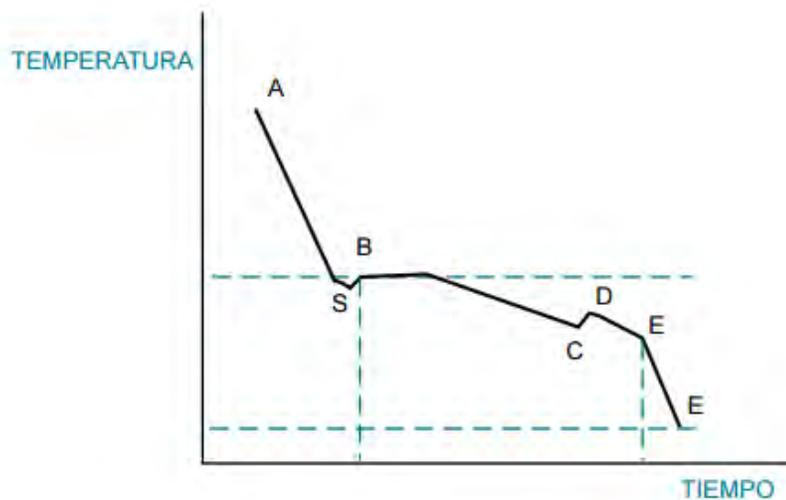


Figura 5. Curva de congelación

Fuente: Martínez, 1998.

Sub-enfriamiento: Esta última etapa consiste en enfriar el alimento ya congelado hasta la temperatura final T_c . Si bien no existen limitaciones para seleccionar T_c , los dos valores más utilizados en la práctica son -10 y -18°C .

1.5.4. Liofilización

La liofilización consiste en un proceso de secado de alimentos previamente congelados por medio de la sublimación, a muy bajas temperaturas y sobre vacío. Según Rubens, Adelaide y Tomie (2008), básicamente es un proceso de transferencia de calor y de masa simultáneo, en el cual el calor es proporcionado a la materia prima congelada y el vapor de agua es retirado continuamente. El cambio de fase de sólido a vapor, o sublimación, debe realizarse en condiciones de presión y temperatura menores a las del punto triple (punto en el que conviven los tres estados de la materia), ya que, por debajo de éste, no existe la fase líquida (Figura 6).

Para eliminar entonces la mayor parte del agua libre contenida en el sólido obtenido, se le debe agregar calor, a fin de lograr la sublimación total del hielo, cuidando que la temperatura del producto se mantenga siempre por debajo de su temperatura de transición vítrea. Al final de este cambio de fase, se obtiene un producto que conserva el volumen y tamaño original, presentado la forma de un vidrio altamente poroso.

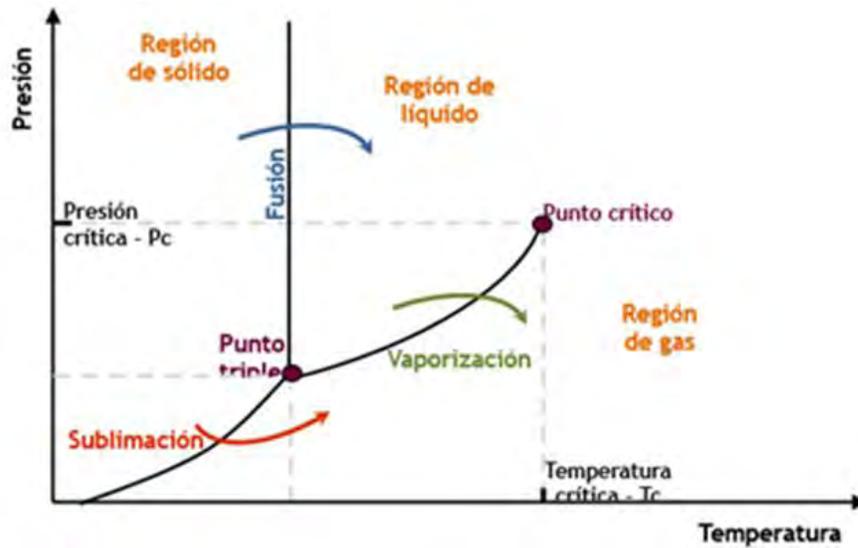


Figura 6. Diagrama de cambios

Fuente: Orrego, 2008.

El proceso de liofilización involucra cuatro etapas principales (Figura 7):

1. Preparación
2. Congelación
3. Desección Primaria
4. Desección Secundaria

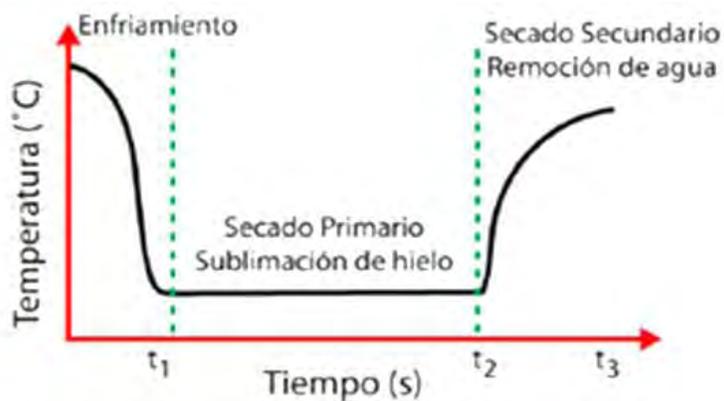


Figura 7. Pasos del proceso de liofilización

Fuente: Ramírez, 2006.

Antes de comenzar el proceso, es fundamental el acondicionamiento de la materia prima, ya que los productos liofilizados no pueden ser manipulados una vez completado el proceso. Lo que suele hacerse con alimentos como chicharos o arándanos se perfora la piel con el objetivo



de aumentar su permeabilidad. Los líquidos, por otro lado, se concentran previamente con el fin de bajar el contenido de agua, lo que acelera el proceso de liofilización. La segunda etapa se lleva a cabo en congeladores independientes o en el mismo equipo. El objetivo es congelar el agua libre del producto, para ello se trabaja a temperaturas entre -20 y -40 °C. Para la optimización de este proceso es fundamental conocer y controlar:

- La temperatura en la que ocurre la máxima solidificación.
- La velocidad óptima de enfriamiento.
- La temperatura mínima de fusión incipiente.

El conocimiento de la formulación o composición del producto a liofilizar es el paso más importante del proceso. La naturaleza, tiempo y gasto del proceso de liofilización son directamente dependientes de la naturaleza química y física del producto, su impacto sobre el proceso de secado y sobre la naturaleza del producto final no es frecuentemente bien entendido (Ramírez, 2006).

Con esto se busca que el producto congelado tenga una estructura sólida, sin que haya líquido concentrado, de manera que el secado ocurra únicamente por sublimación. En los alimentos se pueden obtener mezclas de estructuras luego de la congelación, que incluyen cristales de hielo, mezclas y zonas vítreas amorfas, (Figura 8). Estas últimas se forman por la presencia de azúcares, alcoholes, cetonas, aldehídos y ácidos, así mismo como por las altas concentraciones de sólidos en el producto inicial (Ramírez, 2006).



Figura 8. Procesos de Liofilización

Fuente: Alimentos Argentinos-MinAgri- www.aliementosargentinos.gob.ar

1.5.4.1. Efectos de la liofilización

Al finalizar el proceso de liofilización, el alimento se convierte en una estructura rígida que conserva la forma y el volumen, pero con peso reducido, preservando sus características



nutritivas y sensoriales. Al rehidratarlo se recuperarán la textura, el aroma y el sabor original. En el Cuadro 2 se enlistan las diferencias entre un secado convencional y la liofilización.

Cuadro 2. Diferencias entre un secado convencional y liofilización

| Secado convencional | Liofilización |
|--|---|
| Recomendado para obtener alimentos secos (verduras y granos) | Recomendado para la mayoría de los alimentos |
| Es poco satisfactorio para carne | Recomendado para carnes crudas y cocidas |
| En el caso de las vitaminas presentes en frutas y verduras, hay mayor degradación de estas, debido al tiempo y temperatura de proceso. | La degradación de estas es menor, por la congelación y sublimación del alimento (frutas y verduras) |
| Se evapora el agua de la superficie del alimento | Se sublima el agua del frente de congelación |
| Rehidratación incompleta o retardada | Rehidratación casi completa y rápida. |
| Costos generalmente bajos | Costos elevados, en algunos casos cuatro veces más caro que el secado convencional |

Fuente: Fellows, 2000.



Figura 9. Alimentos liofilizados

Fuente: www.alimentosargentinos.gob.ar



1.5.4.2. Rehidratación de muestras liofilizadas

Es importante considerar que la rehidratación no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de factores distintos. Las operaciones previas a la deshidratación, llamadas pretratamientos, tienen marcada influencia sobre las características y la composición del producto finalmente rehidratado. Aquellos pretratamientos que contribuyen a mantener la integridad de los tejidos permiten evitar mayores pérdidas de sólidos solubles hacia el medio de rehidratación. Ya durante el escaldado de vegetales, existen pérdidas por difusión de sólidos: vitaminas, azúcares, aminoácidos, minerales; adicionalmente una cantidad importante de sólidos solubles puede migrar a la solución durante la rehidratación, afectando la calidad nutricional del producto y su capacidad de imbibición de agua (Marín *et al.*, 2006).

Los alimentos deshidratados deben en lo posible rehidratarse lo más rápido posible y mostrar las mismas características estructurales y químicas del alimento fresco, como también sus propiedades nutricionales y sensoriales. Para ello se ha propuesto nueva tecnología de secado además de combinaciones de las ya existentes. Por ejemplo, se han realizado experimentos de rehidratación aplicando vacío y ultrasonido. No obstante, el aumentar la temperatura de la solución rehidratante sigue siendo el método más utilizado para reducir el tiempo de rehidratación sin incurrir en mayores costos de operación.

Dentro de los medios de rehidratación más utilizados en alimentos se encuentran, la inmersión en agua como la más simple. En cuanto a la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación, se puede mencionar que el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente la absorción hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o con solución hidratante. De esta manera la absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta sucesivamente el volumen de este, junto con una salida de los sólidos desde el interior de estos tejidos (Marín *et al.*, 2006).

En el fenómeno de la rehidratación existen tres procesos simultáneos:

- a) la absorción de agua dentro del material deshidratado
- b) la lixiviación de solutos



c) el hinchamiento del material

Donde el cambio de volumen del producto deshidratado es proporcional a la cantidad de agua absorbida, aumentado o recuperando su tamaño y volumen inicial (Figura 10). Las variables operacionales del secado (temperatura, velocidad de aire, humedad relativa y tiempo) afectan significativamente la calidad final del producto rehidratado, por lo que es común utilizar índices numéricos para observar este efecto, entre estos indicadores destacan la capacidad de rehidratación y la capacidad de retención de agua, que tienen que ver con la estructura, el tejido y la capacidad de mantener el agua absorbida por el alimento. Estos índices pueden disminuir o aumentar, ya sea por una desnaturalización y/o agregación de proteínas bajo el efecto calor, concentración de sales, desorción de agua, destrucción de pectinas y membranas celulares.

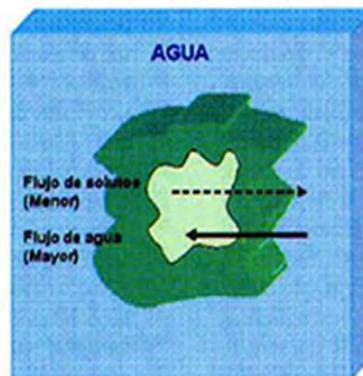


Figura 10. Fenómenos de rehidratación

Fuente: Marín *et al.*, 2006.

1.5.4.3. Factores intrínsecos del proceso de rehidratación

Líquido de rehidratación: Los alimentos deshidratados generalmente se rehidratan con agua, pero en algunos procesos se utilizan medios de rehidratación tales como leche, yogur, disoluciones azucaradas o salinas, entre otros, siempre con el fin de mejorar las características finales del producto rehidratado, como son la textura, retención de color y aroma, aumento de la viscosidad, disminución de la actividad de agua (a_w), reducción de tiempos de proceso, entre otros. La velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua, en cambio es menor por ejemplo en soluciones azucaradas, leche o yogurt, debido a la elevada viscosidad



que presentan éstas, sin embargo, estas últimas pueden transportar sólidos de importancia nutritiva al producto como vitaminas, proteínas, minerales, entre otros (Marín *et al.*, 2006).

La temperatura de la solución de rehidratación: Un alimento deshidratado a una temperatura constante, y luego rehidratado a diferentes temperaturas en un medio rehidratante, aumenta su contenido de humedad de equilibrio cuanto mayor sea la temperatura de rehidratación, debido al gradiente de calor entre el interior del alimento y el líquido de inmersión, además la alta presión que se ejerce sobre los gases que pudiesen estar atrapados entre los espacios intercelulares, permite que se mueven por difusión o capilaridad, tomando ese lugar el líquido rehidratante.

Con el aumento de la temperatura del medio de rehidratación se incrementó la velocidad del proceso, debido principalmente al aumento de la difusividad de agua y de solutos, otorgando así una reducción sustancial del tiempo de rehidratación (Marín *et al.*, 2006).

Agitación durante la rehidratación: La generación de turbulencia en el medio de rehidratación logra una mayor homogenización, aumentado la entropía del sistema y la facilidad del intercambio de materia (agua y solutos), siempre teniendo en cuenta la velocidad de agitación.

Características del producto: Antes de aplicar rehidratación a alimentos deshidratados, se deben conocer las características del alimento en su estado fresco y deshidratado, ya que las propiedades fisicoquímicas, mecánicas (microestructurales), sensoriales y nutricionales, cambian considerablemente de un producto fresco a deshidratado, de tal manera que estos factores determinan el comportamiento de los alimentos en el proceso de rehidratación (Marín *et al.*, 2006).

1.5.4.4. Sales de fosfatos

Las propiedades de los fosfatos han permitido su utilización en casi todos los alimentos. Dentro de estas propiedades están el aumento en retención de agua ya que incrementa el pH del músculo *post-rigor*. La mayoría de los fosfatos aumentan el pH de la carne, sin embargo, la relación entre la presencia de fosfatos y la capacidad de retención de agua varía con los diferentes fosfatos. Entre los fosfatos inorgánicos aprobados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus



siglas en inglés) para el uso en productos cárnicos se encuentra el Tripolifosfato mono, di y tri sódico, el hexametáfosfato de sodio, el Tripolifosfato mono, di y tri potasio; el Tripolifosfato de sodio que es muy utilizado en productos cárnicos por su alta capacidad de retención de agua y aumento de pH y la fuerza iónica (Mencía y Bolaños, 2010), así como un intercambio específico con la proteína muscular fibrilar. Estos favorecen el proceso de emulsión, ya que estimulan la dispersión molecular.

Los fosfatos por su naturaleza tienen una acción conservadora, especialmente las sales Polifosfatos impiden o retrasan el proceso de oxidación de las grasas insaturadas de los sistemas alimentarios y atacan contra el crecimiento de muchos microorganismos presentes (Mencía y Bolaños, 2010).

El uso de Tripolifosfato de sodio en productos bajos en sodio se encuentra en concentraciones que van desde 0.15 a 0.5 %. Entre los productos a los cuales se les puede aplicar concentraciones más bajas de Tripolifosfato de sodio se encuentran las hamburguesas, Nuggets, croquetas, embutidos, salami cocido y embutidos similares, Embutidos y carnes frías, (Miranda, 2007). Según Mencía y Bolaños (2010), el uso de fosfatos en niveles más bajos de los recomendados (ej., 0.3%), sólo en el caso de la adición de el Pirotripolifosfato tetrapotásico se ha notado un gusto no deseado por parte del consumidor en producto emulsionante.

Las sales fosfatos se clasifican en alcalinos y ácidos. Los fosfatos alcalinos se añaden para aumentar la fuerza del ligado y retención de agua en las proteínas solubles de la carne (actina y miosina). La adición de sal afecta la fuerza iónica del sistema. Específicamente, el ion cloruro (Cl^-) es ligado fuertemente por los grupos cargados positivamente y como consecuencia, estos últimos son prácticamente eliminados, mientras que el ion sodio se liga sólo débilmente por las cargas negativas. El efecto neto de este fenómeno es un desplazamiento del punto isoeléctrico hacia un pH más bajo, lo que provoca una mayor repulsión electrostática de las proteínas musculares, y lo cual finalmente permite que existan más sitios cargados para ligar agua.

El incremento de la capacidad de retención de agua (CRA) por parte de los fosfatos tiene como resultados: a) reducción de la pérdida de agua durante el cocimiento; b) incremento del rendimiento después del cocimiento; c) reducción de la pérdida de



agua durante la descongelación; d) incremento de la suavidad; e) retención de sabor por menor pérdida de los jugos propios de la carne durante el cocimiento; f) reducción del quemado por frío; g) incremento de la capacidad de ligado entre piezas musculares; y h) prolongación de vida en anaquel por la habilidad de secuestrar el hierro que cataliza las reacciones de oxidación de las grasas.

Desde que el USDA autorizó en 1982 la incorporación directa de ciertos fosfatos a productos embutidos, su uso se ha expandido a una amplia gama de productos de ave y de carne de bovino y porcino (Wierbicki *et al.*, 1963).

Los Fosfatos cumplen varias funciones en los productos cárnicos

1. Neutralizar el enlace entre la actina y la miosina, formada durante el *rigor mortis*, y el apoyo de la disociación del complejo actomiosina en fibras se vuelven a separar. Las fuerzas electrostáticas se reducen en el complejo actomiosina, esta función de fosfatos que se conoce como el “efecto específico sobre la proteína muscular”, ya que contribuye en gran medida a la solubilidad de la proteína muscular.

Los fosfatos solo son capaces de actuar por separado en la actina y miosina después del rigor mortis y esa es la razón principal del uso mundial de fosfatos. La separación de la actina y la miosina se lleva a cabo como resultado de la unión de los iones fosfato con carga negativa con la carga positiva Mg^{2+} o Ca^{2+} . El Mg^{2+} con carga positiva y los iones Ca^{2+} juegan un papel vital en la contracción muscular, así como la relajación y están presentes en el punto donde la unión entre la actina y la miosina produce el bloqueo de la miosina en la actina.

2. A través de la adición de sal, así como los fosfatos, al mismo tiempo a un producto cárnico, la proteína muscular aumenta su solubilidad. La proteína puede inmovilizar a los altos niveles de agua añadida, así como emulsionar una gran cantidad de grasa, dado que la proteína de la carne es un excelente emulsionante de grasas.

3. Casi todos los fosfatos, así como mezclas de fosfatos, utilizados en la industria de procesamiento de carne, son los fosfatos alcalinos, por lo que la adición de fosfatos alcalinos a la carne ligeramente ácidos conduce a un aumento en el pH en el interior del producto cárnico. Es decir, es el resultado de las fuerzas de repulsión



electrostática, creando grandes brechas entre la actina y la miosina, por lo tanto, la mayor cantidad de agua añadida se puede enlazar.

4. La adición de fosfato, aumenta la fuerza iónica de la carne.

5. Los fosfatos son ligeramente bacteriostáticas, es decir que, aunque no produce la muerte a una bacteria, impide su reproducción; la bacteria envejece y muere. Sin embargo, es casi intrascendente que, en los productos cárnicos, la concentración de fosfatos necesarios para un impacto significativo sobre el crecimiento de bacterias sea una concentración superior a la permitida.

Los Pirofosfatos y Tripolifosfato cuando se adicionan a la carne, incrementan la CRA, como estas sales son también eficaces agentes formadores de complejos con los iones calcio, se ha sugerido que el efecto de los fosfatos sobre la CRA se debe a la eliminación del calcio de los tejidos (Wierbicki *et al.*, 1963).

1.5.4.5. Temperatura

A altas temperaturas de secado implican un menor tiempo de rehidratación, pero los índices de calidad del producto final presentan cambios muy variables con respecto al producto fresco, como son la textura y el color, dejando ver que la temperatura de secado en uno de los principales factores que influyen sobre la calidad del producto rehidratado.

Varios autores proponen que la rehidratación se puede considerar como una medida del daño en el alimento ocurrido durante la deshidratación, considerándose como un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado con o sin pretratamientos al secado. En algunos casos la velocidad de rehidratación sirve como medida de la calidad del producto deshidratado, siendo los alimentos deshidratados en condiciones óptimas, los que se deterioran menos y se rehidratan de forma homogénea (Marín *et al.*, 2006).

1.5.4.6. Interacción agua-proteína

Las proteínas de la carne desempeñan un papel crucial en el mecanismo que liga agua en el tejido muscular. Cada molécula de agua actúa como un pequeño dipolo que interacciona de manera no covalente con gran número de moléculas cargadas. De estas interacciones grupo cargado dipolo, los puentes de hidrógeno y las interacciones hidrofóbicas son las de mayor importancia (Kumar, Wismer-Pedersen y Caspersen, (1986)). La disposición espacial de las



cargas positivas y negativas convierte a la molécula de agua en un dipolo que se orienta activamente en presencia de cargas eléctricas de ambos signos. Las moléculas proteicas tienden a replegarse de forma que los grupos eléctricamente cargados y los grupos polares queden expuestos en la superficie molecular, en contacto con el agua. La estructura primaria de la miosina y la tropomiosina se caracteriza por un alto contenido en aminoácidos ácidos y básicos, que confieren una carga eléctrica fuerte a las moléculas. La unión de moléculas de agua a estas proteínas está dominada por interacciones grupo cargado dipolo, la molécula proteica nativa tiende a ser la más hidrófila.

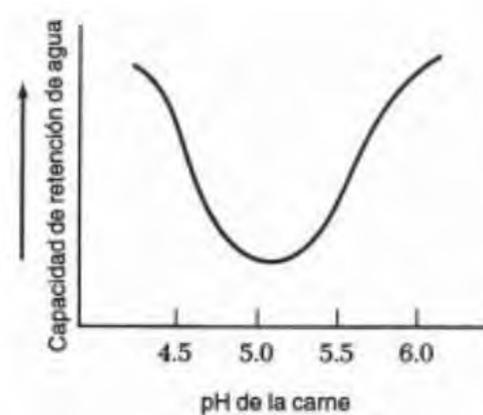


Figura 11. Efecto del pH sobre la CRA

Fuente: Andújar, 2003.

Las miofibrillas retienen agua debido a que forman un retículo tridimensional de filamentos y la cantidad de agua inmovilizada depende del espacio existente entre filamentos, lo que se pone de manifiesto observando el efecto del pH sobre la capacidad de retención de agua (Figura 11). Cuando se añade agua a muestras de carne a las que se les ha ajustado el pH entre 4, 5 y 7, se aprecia un mínimo de CRA a pH entre 5.0 y 5.1, valor que corresponde aproximadamente al punto isoeléctrico de las proteínas miofibrilares e indica el pH al que la carga neta de las moléculas proteicas es mínima. Las proteínas tienen un máximo de grupos cargados en su superficie y por tanto su hidrofilia es máxima también (Andújar, 2003).

Si el pH se encuentra por encima del punto isoeléctrico, desaparecen algunas cargas positivas que determinan la repulsión de los filamentos dejando más espacio a las moléculas de agua. De la misma forma el exceso de cargas positivas a bajos valores de pH provoca la repulsión



y aumenta el espacio entre las moléculas de agua y por tanto aumentan de volumen los miofilamentos (Andújar, 2003).

Las proteínas tienen un máximo de grupos cargados en su superficie y por tanto su hidrofilia es máxima también. Si el pH se encuentra por encima del punto isoeléctrico, desaparecen algunas cargas positivas que determinan la repulsión de los filamentos dejando más espacio a las moléculas de agua. De la misma forma el exceso de cargas positivas a bajos valores de pH provoca la repulsión y aumenta el espacio entre las moléculas de agua y por tanto aumentan de volumen los miofilamentos (Offer y Trinick, 1983).

La adición de sales afecta también el número total y relativo de grupos cargados de los filamentos. El cloruro de sodio aumenta la CRA e hinchamiento de la carne (Figura 12), cuando el pH se encuentra del lado alcalino del punto isoeléctrico. El efecto neto es el desplazamiento del punto isoeléctrico hacia un pH más bajo y el aumento del espacio entre los filamentos a pH 5 o superior (Hamm, 1961).

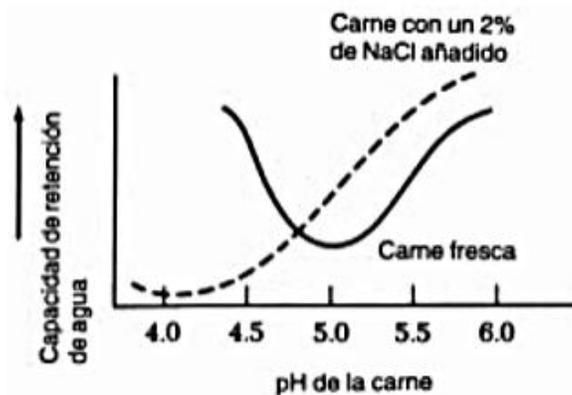


Figura 12. Efecto de los aniones cloruro sobre la CRA de la carne

Fuente: Hamm, R., 1961.

1.5.5. Fenómenos de transferencia de masa

Para el modelo matemático de la transferencia de materia (agua) ocurrida durante el proceso de rehidratación de un alimento deshidratado existen varias ecuaciones empíricas que ajustan los datos experimentales de humedad en función del tiempo. Dentro de las más utilizadas están: el modelo difusional, el cual utiliza la segunda ley de Fick, el modelo empírico de Peleg y el modelo probabilístico de Weibull, las cuales se ha demostrado que simulan



correctamente el proceso, además de describir ciertos mecanismos y variables existentes durante el mismo. En la mayoría de los estudios realizados sobre la rehidratación de los alimentos, los modelos de Fick y Peleg son los más usados por presentar parámetros de importancia para la optimización de los procesos (Bilbao-Sáinz, 2005).

1.5.6. Aplicación del modelo de Peleg

Peleg (1988) propuso una ecuación (Ec.1) para predecir la absorción de agua durante el remojo de cereales que se ha utilizado igualmente para describir los cambios de humedad durante procesos de hidratación y secado. El modelo de Peleg (1988) ha sido utilizado para estudiar el proceso de absorción de agua en vegetales y materiales con almidón y semillas (Abu-Ghannam y McKenna, 1997; Hung y Trewhella, 1993). La ecuación del Modelo de Peleg (Ec.1) viene dada por la siguiente expresión:

$$M_t = M_0 + \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad \text{.....Ec. 1}$$

Dónde se hace un despeje de las constantes del Modelo de Peleg (Ec. 2):

M_t = Masa en el tiempo (g)

M_0 = Masa inicial (g)

t = tiempo de rehidratación (min)

K_1 = Constante de ratio de Peleg (s. $\text{kg}_{\text{m.s}}/(\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}})$)

K_2 = Constante de capacidad de Peleg ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{m.s}}$)

Por lo tanto, el despeje es:

$$\frac{t}{M - M_0} = K_1 + K_2 t \quad \text{.....Ec. 2}$$

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ y & = & b + mx \end{array}$$

Constantes del modelo de Peleg

K_2 es una constante relacionada con la máxima capacidad de absorción de agua; entre más bajo K_2 , más alta la capacidad de absorción de agua.

K_1 es una constante que se relaciona con la tasa de transferencia de masa, por lo tanto, a menor valor de K_1 mayor tasa inicial de absorción de agua. El decrecimiento de K_1 con el



incremento de la temperatura sugiere un correspondiente incremento en la rata inicial de absorción de agua.

1.5.7. Propiedades fisicoquímicas de la carne

1.5.7.1. pH final de la carne

En la etapa *rigor-mortis* el pH de la carne es alto, (> 6.0), debido a la disminución del glucógeno previo al sacrificio, causado por estrés pre- sacrificio, inanición o tratamiento con drogas, entre otras (Knight y Offer, 1980).

La formación de ácido láctico y la consecuente caída del pH en el período *post mortem*, son responsables de la reducción del número total de grupos reactivos disponibles para ligar agua a la proteína. Este cambio da lugar a una cantidad variable de desnaturalización y pérdida de solubilidad de las proteínas. La reducción de los grupos reactivos se debe a que el pH se aproxima al punto isoeléctrico de las proteínas musculares: pH al que es igual el número de grupos cargados positiva y negativamente. En consecuencia, estos grupos tienden a atraerse entre sí y solamente aquellos que se mantienen libres son los que presentan la capacidad de atraer el agua. Esta influencia de pH se denomina “efecto de carga neta”. A los valores posibles de pH de la carne (5.2 – 6.8) es obvio que los valores más altos se asocian a una mayor carga neta de la proteína y a un mayor porcentaje de agua inmovilizada (Bandman, 1987).

1.5.7.2. Actividad de agua (a_w)

Las propiedades coligativas, reológicas y de textura de un alimento dependen de su contenido de agua, aun cuando éste también influye definitivamente en las reacciones físicas, químicas, enzimáticas y microbiológicas que se describen en otros capítulos de este texto. Como ya se indicó, y sólo para efectos de simplificación, el agua se dividió en “libre” y en “ligada”; la primera sería la única disponible para el crecimiento de los microorganismos y para intervenir en las otras transformaciones, ya que la segunda está unida a la superficie sólida y no actúa por estar “no disponible o inmóvil”. Es decir, bajo este sencillo esquema, sólo una fracción del agua, llamada actividad del agua, a_w , es capaz de propiciar estos cambios y es aquella que tiene movilidad o disponibilidad. Es con base en este valor empírico que se puede predecir la estabilidad y la vida útil de un producto, y no con su contenido de agua; refleja el grado de



interacción con los demás constituyentes, además de que se relaciona con la formulación, el control de los procesos de deshidratación y de rehidratación, la migración de la humedad en el almacenamiento y muchos otros factores (Fennema, 2010).

La noción de «actividad» procede rigurosamente de las leyes de equilibrio termodinámico de G.N. Lewis, y en su aplicación a los alimentos fue pionero Scott. Aquí basta con afirmar que:

$$a = \frac{f}{f_0} \dots\dots\dots \text{Ec. 3}$$

Donde f es la fugacidad del solvente de la solución (la fugacidad es la tendencia molecular de un solvente a escapar de una solución) y f_0 es la fugacidad del solvente puro. A bajas presiones (por ej., ambiente), la diferencia entre f/f_0 y p/p_0 es menor del 1%, por lo que la definición de la a_w (Ec. 4) en términos de p/p_0 es claramente justificable. Por tanto (Fennema, 2010).

$$a_w = \frac{p}{p_0} \dots\dots\dots \text{Ec. 4}$$

1.5.7.3. Capacidad de Retención de Agua (CRA)

La CRA es un parámetro fisicoquímico importante por su contribución a la calidad de la carne (fue asociada ya por Wierbicki *et al.*, 1957; y Hamm, 1960) y la de sus productos derivados. La CRA de la carne está relacionada con la textura, terneza y color de la carne cruda, jugosidad y firmeza de la carne cocida. Dicha retención de agua se produce a nivel de las cadenas de actino-miosina.

La capacidad de retención de agua es un término que se emplea frecuentemente para describir la eficacia de una matriz de moléculas, normalmente macromoléculas presentes a bajas concentraciones, para atrapar físicamente grandes cantidades de agua, inhibiendo la exudación (Fennema, 2010).

La capacidad de retención se relaciona con la propiedad que tienen las proteínas cárnicas, para retener agua, es decir, el fenómeno de retención de agua se produce a nivel de cadenas de actino-miosina, si bien solo se refiere al agua inmovilizada y no guarda relación directa con el agua libre, estando así determinada, en primer lugar, por una inmovilización de agua de tejidos en el sistema miofibrilar, más el agua mantenida en el músculo. Los cambios en la CRA son un indicador muy sensible de aquello que se produce en la estructura de las



proteínas miofibrilares, al desnaturalizarse las proteínas, dicha CRA disminuye (López, 2004).

Los fosfatos incrementan notablemente la CRA de la carne. Este efecto se ha fundamentado en diversos factores, entre ellos, variación del pH, fuerza iónica, capacidad secuestrante y su interacción con las proteínas, además, pueden tener comportamiento diferente si se encuentran solos en la carne o en presencia de Cloruro de Sodio (Arango, 1996).

1.5.7.3. Efecto de la adición de solutos

Las sales Polifosfatos usadas como aditivos, constituyen una gama de productos denominados "retenedores de agua" pues son polielectrolitos que se encuentran fuertemente cargados negativamente por lo que atraen moléculas de agua facilitando su retención. El equilibrio entre agua libre y ligada se desplaza en función de las condiciones del medio. Las sales polifosfatos actúan como secuestrantes, mediante la formación de complejos con Ca^{2+} y Mg^{2+} influyendo así en la retención de agua, abren las cadenas peptídicas y esto permite su hidratación. Los fosfatos alcalinos ayudan a retener el agua que exuda en los ciclos de congelación-descongelación.

Para Aljawad y Bowers (1988) el agua ligada se incrementa, con la adición de NaCl, mientras que el agua libre disminuye. Así también incrementa la solubilidad de las proteínas miofibrilares (Hamm, 1960, Schut, 1976).

A continuación, se presenta el listado de los fosfatos y su pH aprobados por el USDA en 1973 para el uso en productos cárnicos curados (Ellinger, 1983).

Cuadro 3. pH de las soluciones de sales de fosfato

| Tipo de sal | pH |
|--------------------------|------|
| Pirofosfato sódico ácido | 4.3 |
| Fosfato monosódico | 4.5 |
| Hexametafosfato sódico | 6.9 |
| Fosfato sódico | 8.8 |
| Tripolifosfato sódico | 9.9 |
| Pirofosfato sódico | 10.5 |

Fuente: Ellinger, 1983.



CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



Justificación

Uno de los principales problemas que enfrentan los productores de conejo es la limitada vida de anaquel de la carne que producen y comercializan, lo que obliga en la mayoría de los casos a una distribución del producto congelado sin ser esta una forma habitual de consumo de carne por parte del consumidor.

La conservación de carne de conejo mediante la liofilización permite obtener un producto estable y de buena calidad, sin embargo, es necesario llevar a cabo estudios formales con los que no se cuenta hoy en la literatura, que permitan explicar los fenómenos de transferencia de masa que ocurren durante la rehidratación de la carne de distintas especies, fundamentados en el uso de diferentes medios de rehidratación, con objeto de poder identificar el efecto de distintas sales en las proteínas de carne liofilizada, como las sales de fosfatos, asimismo, identificar la cinética de rehidratación que siguen las muestras liofilizadas, a distintas temperaturas en las soluciones empleadas.

Problema

Efecto de la temperatura y solutos a emplear en la rehidratación en *Longissimus dorsi* (lomo) liofilizado de conejo México Extra para fundamentar los fenómenos de transferencia de masa.

Objetivo general

Sustentar los fenómenos de transferencia de masa mediante la construcción de cinéticas de rehidratación para evaluar el efecto de la temperatura y solutos (Tripolifosfato de sodio) a utilizar en la rehidratación de *Longissimus dorsi* liofilizado de conejo México Extra.



Objetivos particulares

- 1.-Evaluar el efecto de diferentes condiciones de proceso de rehidratación de carne de conejo liofilizada, en el comportamiento del pH (electrometría), a_w (higrometría) y CRA (centrifugación controlada) identificando su respuesta a diferentes temperaturas y soluciones de rehidratación.
- 2.-Fundamentar el Modelo Predictivo de Peleg, mediante la construcción de cinéticas de rehidratación, para analizar el efecto de las condiciones de rehidratación de carne de conejo liofilizada, en las constantes de dicho modelo.

Hipótesis

Las sales de fosfato tienen la función de mejorar la capacidad de retención de agua, al favorecer un intercambio específico con la proteína muscular fibrilar, que estimulan la dispersión molecular y elevación del pH, entonces tendrá un efecto positivo durante los fenómenos de transferencia de masa, en la rehidratación.



2.1. Determinación de unidades experimentales

Se trabajó con carne proveniente de 8 conejos de la raza California proporcionados del Módulo de Cunicultura del Centro de Enseñanza Agropecuaria (CEA) de la FES Cuautitlán, de 70 días de edad al sacrificio clasificación México Extra según NMX-FF-105-SCFI.

La matanza se realizó según la NOM-033-ZOO-1995, en el Taller de Carnes del CEA, donde fueron diseccionados los músculos izquierdo y derecho *Longissimus dorsi* y fueron transportados en un contenedor adiabático a 4 °C, al Laboratorio 7 de la UIM-FESC.

Para la estandarización de unidad experimental:

Se realizó la disección de *Longissimus dorsi* México Extra, posteriormente se quitó la fascia y se obtuvieron 2 cortes de cada lomo, y así, se realizaron los cortes transversales de 1cm de ancho con un Vernier (Figura 13), donde salen 8 trozos de cada mitad, que posteriormente se llevaron a congelar en un ultra congelador marca REVCO a una temperatura de $-50\pm 2^{\circ}\text{C}$.

La selección de corte se hizo con las técnicas manejadas anteriormente con este tipo de carne (*Longissimus dorsi*), ya realizadas y analizadas en el mismo taller, lo que hizo posible un manejo fácil y eficaz de las muestras.



Figura 13. Determinación de unidad experimental

2.1.2. Congelación-Liofilización de unidades experimentales

Las placas fueron colocadas en recipientes de plástico (4 muestras en cada uno) cuidando ubicarlas por separado. Posteriormente se congelaron las muestras (Figura 14), en un ultracongelador REVCO Marca Thermo, Mod. Ultima II, donde permanecieron durante 24 horas a una temperatura interna de la cámara de $-50\pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figura 14. Muestras de *longissimus dorsi* congelada

Después de 24 h de ultracongelación de las muestras, con un peso aproximado de 5 g se liofilizaron en un equipo LABCONCO (Figura 15), modelo Freezone 4.5 a una temperatura del colector de -50 ± 1 °C a una presión en el sistema de 0.160 mBar durante 24 h (Figura 15) (De la Cruz, 2009; Coria, 2011).

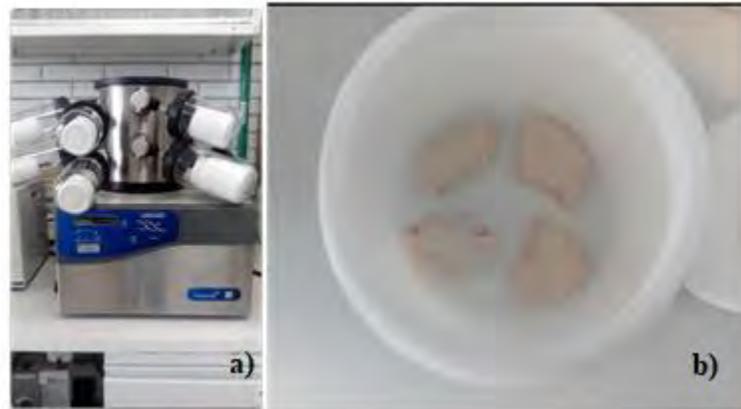


Figura 15. Liofilización de *Longissimus dorsi*: a) Liofilizadora LABCONCO, modelo Freezone 4.5, b) Muestra de *Longissimus dorsi* liofilizada

2.1.3 Preparación de soluciones de rehidratación

Se prepararon soluciones de $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ [0.3 M], máximo permitido en productos cárnicos (NOM-213-SSA1-2002), mediante la siguiente ecuación de Molaridad de la solución (Ec.5).

$$\frac{M \text{ en g.solute}}{100 \text{ mL de disolución}} \dots \dots \text{Ec. 5}$$

$$\frac{(500\text{mL} \times 0.3 \text{ g})}{100 \text{ mL}} = 0.75\text{g de TPF [0.3 M]}$$



Se realizó el mismo procedimiento para la preparación de la solución NaCl

$$\frac{(250\text{mL} \times 0.4\text{g})}{100\text{mL}} = 10 \text{ g de NaCl [0.4 M]}$$

Se prepararon las soluciones de ambas sales TPF [0.3 M] y NaCl [4 M] con agua destilada (1 L). Se les determinó pH a las soluciones, con el potenciómetro Oakton, se tomaron lectura de datos de pH y temperatura, con sus debidas repeticiones (Figura 16).



Figura 16. Preparación de soluciones para rehidratar

En la Figura 17, la gráfica muestra que el pH mas alto que se obtuvo para medio rehidratante, es el caso de tripolifosfato de sodio en agua destilada, para el caso de la solución buffer a elegir se tiene como principio que tenga valores de pH alcalinos lo que nos da como buen resultado esa solución para la posterior experimentación, sin embargo para obtener una buena CRA que es lo que se pretende, se elige la de tripolifosfato [0.3 M] en disolución con NaCl [4 M], ya que ambos casos son lo que originan que en el caso de la carne se tenga mayor capacidad de retención de agua (CRA), así también que tiene un pH alcalino que funcionara como buena solución buffer para una posterior rehidratación de carne liofilizada.

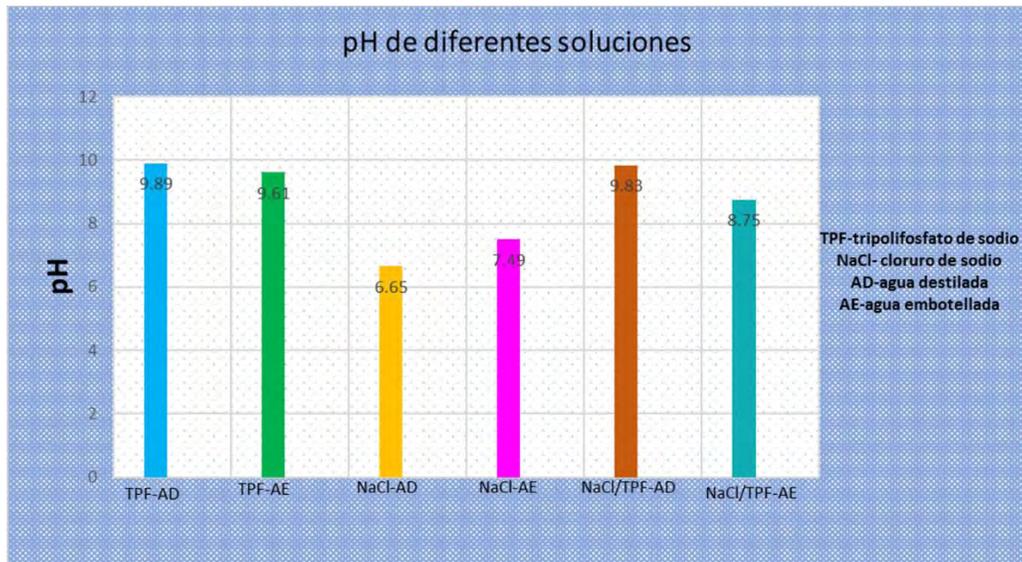


Figura 17. Selección de solución buffer

2.1.4. Rehidratación de muestras liofilizadas, para determinación de tiempo requerido de rehidratación

Antes de realizar la rehidratación de muestras liofilizadas, se determinó el peso inicial de cada una. Se colocaron 100 mL de solución rehidratante en un recipiente de aluminio en parrillas de calentamiento Marca CIMAREC a 50 y 70 °C según el caso.

Cuando cada solución llegó a la temperatura establecida (50 y 70°C), se sumergieron las muestras (4) en cada solución (TPF y TPF/NaCl) y se pesaron cada 30s, para determinar el peso ganado en cada tiempo de rehidratación, hasta peso constante. Esto se hizo con tres de las muestras y la cuarta se utilizó como testigo. Se mantuvieron sumergidas hasta obtener peso constante y se registraron los datos de peso y tiempo requeridos para la rehidratación de *Longissimus dorsi* de conejo liofilizado México Extra.



En el Cuadro 4 se muestra el tiempo promedio que se requirió para alcanzar el peso constante de las muestras de *Longissimus dorsi*, con las diferentes condiciones de rehidratación, los resultados son el promedio de tres réplicas.

Cuadro 4. Tiempo de Rehidratación en agua y TPF a diferentes temperaturas

| Medio rehidratante | Tiempo de rehidratación (min) |
|--------------------|-------------------------------|
| Agua-50°C | 4 |
| Agua-70°C | 3.5 |
| TPF-50 °C | 3 |
| TPF-70 °C | 2.5 |



CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS Y

DISCUSIÓN DE

RESULTADOS



3.1. Diseño Experimental

ANOVA de 2 vías

Variables:

- Independientes: Medio rehidratante: agua – TPF [0.3 M]
en solución con NaCl [4M]

Temperatura: 50°C- 70°C

- Dependientes: pH, a_w , CRA

Réplicas por experimento: 3

Números de experimentos: 18

Respuestas: porcentaje de recuperación de agua, constantes de Peleg.

Cuadro 5. Condiciones de rehidratación de muestras de *Longissimus dorsi*

| Experimento | Muestra | Medio rehidratante | Temperatura (°C) |
|-------------|---------------------------------------|--|------------------|
| 1 | refrigerada (6 h <i>post-mortem</i>) | No aplica | 4 |
| 2 | Liofilizada | No aplica | No aplica |
| 3 | Rehidratada | Agua | 50 |
| 4 | Rehidratada | Agua | 70 |
| 5 | Rehidratada | Na ₅ P ₃ O ₁₀ | 50 |
| 6 | Rehidratada | Na ₅ P ₃ O ₁₀ | 70 |



3.2. Análisis de pH, a_w y CRA de carne de conejo México Extra de 6h *post-mortem*

Se analizaron los parámetros fisicoquímicos (pH, CRA y a_w) de las placas de lomo de *Longissimus dorsi* México Extra (6 h *post-mortem*) refrigeradas (4 °C) para su comparación con los lotes de placas congeladas- liofilizadas- rehidratadas en distintos medios rehidratantes y a diferentes temperaturas y construir las cinéticas de rehidratación de todos los lotes.

3.2.1. Determinación de pH

La prueba de pH se realizó con un Potenciómetro Orion Five Star, modelo 9121APWP, (Figura 18), con un electrodo Kniphe con cuchilla incorporada según protocolo 981.12 del AOAC (2000), con muestra refrigerada (4 °C) de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra.



Figura 18. Potenciómetro de Orion 5-star

En el siguiente Cuadro 6 muestra los resultados de la determinación de pH de *Longissimus dorsi* 6 h *post-mortem*, para que posteriormente se comparen después de realizar la liofilización y rehidratación de las muestras.

**Cuadro 6. Determinación de pH**

| Prueba | pH de muestra refrigerada |
|----------|---------------------------|
| 1 | 5.39 |
| 2 | 5.4 |
| 3 | 5.42 |
| Promedio | 5.4 |
| Desv.Std | 0.015 |
| C.V. | 0.27% |

3.2.2. Capacidad de retención de agua (CRA)

La prueba se realizó, en una centrifuga Centurion Scientific K2015R, siguiendo el método descrito por Guerrero *et al.* (2002) y Berg, (2008) mediante la molienda de la muestra refrigerada (4 °C) 6 h *post mortem*, se colocaron en tubos Falcon, 5 g en cada tubo, se le añadieron 8 mL de solución fría de NaCl 0.6 M, y se mezclan durante 15 min, posteriormente se colocaron en la centrifuga Marca Centurion Scientific Mod. K2015R a 5000 RPM a 4±1 °C durante 30 min (Figura 19).



Figura 19. Prueba de centrifugación para la determinación de CRA en muestras refrigeradas



Se decantó y se midió el sobrenadante con una probeta de 10 mL, los datos obtenidos se aplicaron en la siguiente ecuación (Ec.6) de Porcentaje de Capacidad de Retención de agua.

$$CRA = \frac{Va - Vs}{\text{peso de la muestra}} \times 100 \dots \dots \text{Ec. 6}$$

Dónde:

CRA= Capacidad de retención de agua (%)

Va = volumen (mL) de solución salina añadida al tubo de centrífuga

Vs = volumen (mL) del sobrenadante.

En el Cuadro 7 se muestran los promedios de porcentajes de CRA en muestra refrigerada de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra.

Los resultados reportados son los promedios de las repeticiones que se realizaron a la muestra refrigerada, se reportan para posteriormente realizar comparación con las rehidrataciones que se harán a las muestras liofilizadas.

Cuadro 7. Determinación de CRA

| g de muestra de <i>Longissimus dorsi</i> refrigerada | Medio sobrenadante (mL) | CRA (%) en muestra refrigerada |
|--|-------------------------|--------------------------------|
| 5.03 | 7.1 | 17.89 |
| 5.01 | 7.2 | 15.96 |
| 5.02 | 7.2 | 15.93 |
| Promedio | | 16.59 |
| Desv. Std | | 0.011 |
| C.V | | 0.06 |

3.2.3. Actividad de agua (a_w)

La determinación de a_w se realizó con un higrómetro de punto de rocío marca Decagon Devices Mod. Pa_wkit (Figura 20). Siguiendo el método 978.18 del AOAC (2000). Previamente calibrado el equipo se colocaron las muestras en recipientes de plástico de este, se registraron los datos de a_w y la temperatura.



Figura 20. Higrómetro de pawkit

Posteriormente se utilizó la ecuación de Clausius-Clapeyron para la corrección de temperatura.

En el Cuadro 8 se muestran los datos de a_w promedio de muestra refrigerada de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra.

Cuadro 8. Determinación de a_w 6 h *post-mortem* de muestra refrigerada de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra

| Prueba | a_w refrigerada |
|-----------|-------------------|
| 1 | 0.89 |
| 2 | 0.92 |
| 3 | 0.93 |
| Promedio | 0.91 |
| Desv. Std | 0.31 |
| C.V | 0.34 |

Después de haber realizado la liofilización de *Longissimus dorsi* México Extra, con las condiciones de proceso ya mencionadas anteriormente, se realizó la rehidratación con diferentes medios rehidratantes: agua y TPF [0.3 M] a 50 y 70°C para ambos casos.

Durante la rehidratación de muestras liofilizadas de *Longissimus dorsi* México Extra, se hizo el registro de pesos de todas las muestras como se muestra en el Cuadro 5 (condiciones de



rehidratación de *Longissimus dorsi*), para así realizar el cálculo correspondiente y obtener el porcentaje de ganancia de agua respecto a las muestras rehidratadas, para ello se registraron los pesos de las muestras cada minuto, hasta obtener un peso constante en la rehidratación y así obtener el tiempo requerido para cada caso respecto a medio rehidratante (agua y TPF) y temperaturas (50 y 70 °C). Después se elaboraron las cinéticas de rehidratación, para obtener así el comportamiento de la recuperación de agua (%) respecto al tiempo y determinar qué condiciones son las mejores para el caso de la rehidratación de *Longissimus dorsi* México Extra.

3.3. Cinéticas de rehidratación de *Longissimus dorsi* México Extra en soluciones de sales de fosfato

Para lograr alcanzar el Objetivo 2 se realizaron cinéticas de rehidratación con placas de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra, en soluciones de sales de fosfatos a 50 °C, los pesos fueron registrados durante la rehidratación en ambos casos, para así obtener el porcentaje de ganancia de agua según cada caso. El Cuadro 9 muestra los datos obtenidos de peso y porcentaje de ganancia de agua que obtenían las muestras durante la rehidratación a 50 °C en agua.

Cuadro 9. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra con agua a 50 °C

| MR* peso (g) | ML** % de agua | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min |
|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5.25 | 23.42 | 68.38 | 72.38 | 73.14 | 73.14 | - | - |
| 6.78 | 22.12 | 67.84 | 70.20 | 70.94 | 71.53 | 71.53 | - |
| 5.25 | 23.04 | 72.38 | 74.09 | 75.23 | 75.23 | - | - |
| 6.31 | 22.82 | 55.30 | 56.57 | 61.80 | 62.91 | 64.50 | 64.50 |

*Muestra Refrigerada

** Muestra Liofilizada

En el Cuadro 10 se muestran los datos registrados de peso adquirido de muestras liofilizadas en cada rehidratación, así como, su porcentaje de ganancia de peso durante la rehidratación a 70 °C en agua, como se puede analizar el tiempo de rehidratación es menor en comparación con temperatura de 50 °C, es decir que, aunque el medio rehidratante es el mismo (agua) aquí la temperatura si influye en la velocidad de rehidratación. Sin embargo, es importante



mencionar que, en comparación, la rehidratación de 50 °C en agua obtuvo mayor porcentaje de recuperación de agua obteniendo 75.23% de ganancia de agua, en comparación a un 68.42% en el caso de rehidratación a 70 °C, siendo estos los mayores porcentajes en general.

Cuadro 10. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra con agua a 70 °C

| MR* peso (g) | ML** % de agua | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min |
|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6.28 | 25 | 51.59 | 55.41 | 58.59 | 59.39 | 63.67 | 63.67 |
| 5.32 | 24.06 | 63.24 | 68.42 | 68.42 | - | - | - |
| 5.29 | 23.81 | 65.02 | 67.86 | 67.86 | - | - | - |
| 4.78 | 20.71 | 57.74 | 59.62 | 59.62 | - | - | - |

*Muestra Refrigerada

** Muestra Liofilizada

Así también se realizó la evaluación del efecto de los diferentes medios rehidratantes y así conocer el efecto que estos tienen, en las propiedades fisicoquímicas (CRA, pH y a_w), en sí, la capacidad de rehidratar, es decir, diferenciar en que condición la muestra liofilizada puede obtener mayor capacidad de absorber agua, por lo tanto también se registran los datos de ganancia de peso y porcentaje de agua durante dicha rehidratación, en este caso el Cuadro 11, indica datos que se obtuvieron durante la rehidratación con TPF y NaCl a 50 °C.

En los Cuadros 11 y 12 se muestra el efecto del uso de sales fosfatos, es decir que cuando se rehidrata con agua simplemente, se obtuvieron los mayores porcentajes de recuperación (en caso de 50 °C), sin embargo, podemos observar que para este caso se obtiene mayor porcentaje de absorción de agua o rehidratación en las muestras cuando aplicamos una sal fosfato, aunque si es importante recalcar que se toma menor tiempo en obtener una rehidratación final, es decir cómo se muestra en la tabla al primer minuto tenemos un porcentaje alto de ganancia de agua, sin embargo tarda para llegar a un peso constante (peso que nos indica que ya no se absorbe más agua), en comparación con las dos anteriores rehidrataciones. Se obtienen porcentajes de recuperación de agua en el intervalo más alto de cada caso, de hasta un 69.15-69.41 según sea el caso, es decir que, si influye el uso de sales fosfatos, en velocidad de rehidratación y porcentaje de recuperación de agua.



Cuadro 11. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra con Tripolifosfato de sodio y NaCl a 50 °C

| MR* peso (g) | MR** | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min | 7 min |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6.51 | 24.11 | 52.53 | 55.91 | 57.75 | 58.52 | 59.60 | 59.60 | |
| 6.31 | 25.67 | 61.01 | 64.97 | 65.76 | 67.98 | 69.41 | 69.41 | |
| 6.47 | 24.72 | 47.75 | 49.92 | 50.38 | 51.31 | 51.77 | 52.24 | 52.24 |
| 6.63 | 24.88 | 47.05 | 51.43 | 52.18 | 52.63 | 52.79 | 52.79 | |

*Muestra Refrigerada ** Muestra Liofilizada

Cuadro 12. Porcentaje de ganancia de agua durante la rehidratación de muestras de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra con Tripolifosfato y NaCl a 70 °C

| MR* 6h post mortem peso (g) | ML** % de agua | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min |
|--------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5.75 | 23.82 | 50.26 | 50.43 | 53.56 | 53.73 | 55.47 | 55.47 |
| 5.72 | 23.42 | 50 | 55.24 | 56.46 | 57.16 | 57.16 | - |
| 6.26 | 24.44 | 49.52 | 58.14 | 60.38 | 61.02 | 63.09 | 63.09 |
| 5.9 | 25.25 | 60.16 | 65.42 | 67.79 | 67.96 | 69.15 | 69.15 |

*Muestra Refrigerada ** Muestra Liofilizada

En el Cuadro 13, se muestra el peso inicial de muestra refrigerada y el peso de la muestra liofilizada con el porcentaje de pérdida de agua que se obtuvo durante la liofilización, que, mediante un método de proporción, se obtienen los porcentajes finales de recuperación de agua, por lo tanto, al rehidratar en los diferentes casos el mayor porcentaje de recuperación es del 91.84% de agua, en el caso de muestra en rehidratación a 50 °C con agua y con un tiempo mínimo.



Cuadro 13. Resultados de porcentaje de ganancia de agua y tiempo de rehidratación en cada rehidratante según condiciones de Rehidratación

| Rehidratante | MR* 6h <i>post mortem</i> peso (g) | ML** Peso (g)/ pérdida de agua (%) | Peso constante (g) | Recuperación de agua (%) /Ganancia de agua (%) | min |
|--------------|--|--|--------------------------|---|-----|
| Agua/50°C | 6.78 | 1.5/77.88 | 4.85 | 71.53/91.84 | 5 |
| Agua/70°C | 6.28 | 1.57/75 | 3.98 | 63.67/84.89 | 6 |
| TPF/50°C | 6.51 | 1.57/75.87 | 3.88 | 59.60/78.55 | 6 |
| TPF/70°C | 6.26 | 1.53/75.56 | 3.95 | 63.09/83.49 | 6 |

*Muestra Refrigerada

**Muestra liofilizada

Para la realización de cinéticas de rehidratación se utilizaron los datos registrados de peso inicial (muestra liofilizada), así como los pesos durante la rehidratación (se pesaron las muestras cada minuto) y el peso final (peso donde ya no hay más absorción), para posteriormente obtener el porcentaje de ganancia de agua.

Se construyeron las gráficas con los datos obtenidos durante las cinéticas de rehidratación, para conocer el comportamiento que siguieron las muestras de *Longissimus dorsi*, bajo las diferentes condiciones de rehidratación, con los diferentes medios rehidratantes y distintas temperaturas, se utilizaron los datos mostrados anteriormente, y se graficó el porcentaje de recuperación de agua respecto al tiempo.

Con la selección de datos que se muestra en el siguiente Cuadro 14, fue la manera más precisa de realizar las cinéticas, ya que fueron los porcentajes que se obtuvieron en las rehidrataciones que se seleccionaron por tener porcentajes de pérdida de peso casi iguales (peso de 22-25 g) al ser liofilizadas, son datos que se obtienen de un promedio de 3 repeticiones según el caso de cada rehidratación. Se manejan solo los datos de porcentaje de ganancia de agua ya que, para realizar las cinéticas, se grafican solo tiempo y porcentaje de absorción o ganancia de agua y así conocer el comportamiento que presenta gráficamente y así obtener una corrección para saber si se cumple el modelo predictivo que se busca demostrar.



Cuadro 14. Recuperación de agua (%) respecto de los registros de peso de muestras seleccionadas para las cinéticas de rehidratación

| ML** 0 min | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min | Medio rehidratante |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| 22.12 | 67.84 | 70.2 | 70.94 | 71.53 | 71.53 | | Agua/ 50°C |
| 25 | 51.59 | 55.41 | 58.59 | 59.39 | 63.67 | 63.97 | Agua/ 70°C |
| 24.44 | 49.52 | 58.14 | 60.38 | 61.02 | 63.09 | 63.09 | TPF 50°C |
| 24.11 | 52.53 | 55.91 | 57.75 | 58.52 | 59.6 | 59.06 | TPF 70°C |

**Muestra liofilizada

La Figura 21 muestra el comportamiento que tiene *Longissimus dorsi* México Extra liofilizado, en las diferentes condiciones de rehidratación, da como resultado un modelo de la potencia, ya que empieza a tomar el registro de peso al primer minuto de rehidratación, por lo tanto, el aumento del peso hasta llegar al equilibrio de humedad, hasta mantener un peso constante, donde no se puede rehidratar más, teniendo así un comportamiento casi lineal al final de la rehidratación. Como se muestra es la cinética de cada tipo de rehidratación, según sea el caso.

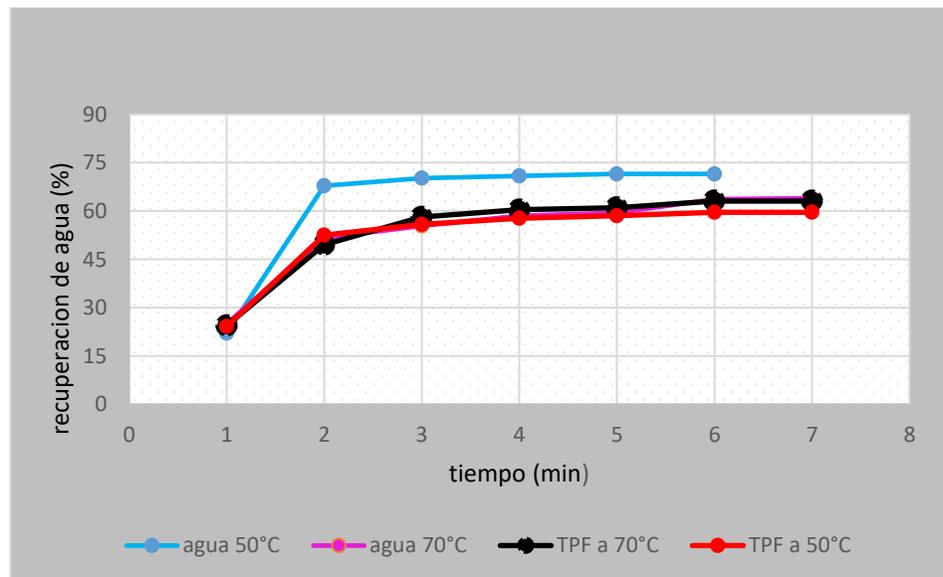


Figura 21. Cinéticas de rehidratación de *Longissimus dorsi* (México Extra)



3.4. Determinación de pH, a_w y CRA de muestras de *Longissimus dorsi* México Extra, liofilizadas -rehidratadas

En esta etapa del proceso se evaluaron algunas propiedades fisicoquímicas (pH, a_w y CRA) de las muestras rehidratadas bajo las distintas condiciones de soluciones rehidratante y temperaturas.

3.4.1. Actividad de agua

Los resultados obtenidos de la medición de actividad de agua, en las distintas rehidrataciones de *Longissimus dorsi* México Extra, refrigeradas o liofilizadas se presentan en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Determinación de a_w de muestras de *Longissimus dorsi* México Extra

| Muestra | a_w |
|-------------|-------|
| Refrigerada | 0.92 |
| Liofilizada | 0.12 |
| Agua/50 °C | 0.94 |
| Agua/70 °C | 0.98 |
| TPF/50 °C | 0.95 |
| TPF/70 °C | 0.96 |

La Figura 22, indica que se obtiene mayor a_w en las muestras durante la rehidratación a 70 °C, en ambos rehidratantes (agua y TPF). Sin embargo, desde el punto de vista de mecanismos que ocurren durante la rehidratación con sales, las sales estabilizan y promueven la hidratación, aun así, aplicándoles energía, en conjunto con una sal, y dependiendo del tipo de sal, esta favorece sea capaz de ligar más agua que se encuentra rodeada en la proteína y no íntimamente ligada a la matriz y así obtener una mayor actividad de agua. Aun con lo anterior, los resultados muestran que al rehidratar con agua solamente, se obtiene valores más altos, esto se debe a que la velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua, a comparación en otros medios rehidratantes.

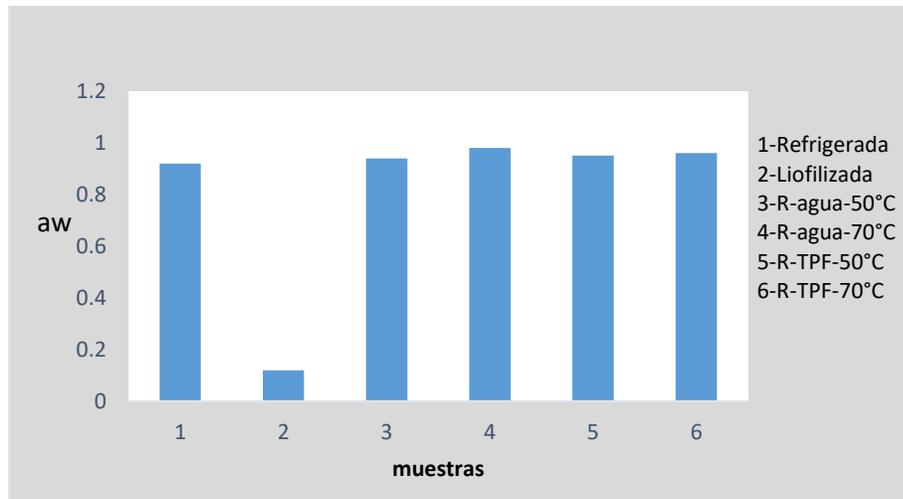


Figura 22. a_w de muestras de *Longissimus dorsi* México Extra

3.4.2. Capacidad de retención de agua

En el Cuadro 16 se muestra el porcentaje promedio de capacidad de retención de agua de las muestras de *Longissimus dorsi* de conejo México Extra a diferentes condiciones de rehidratación.

Cuadro 16. Porcentajes promedios de CRA de cada condición de rehidratación

| Muestra | CRA (%) |
|-------------------------|---------|
| Refrigerada | 16.64 |
| Rehidratación-agua/50°C | 44.39 |
| Rehidratación-agua/70°C | 86.86 |
| Rehidratación-TPF/50°C | 82.94 |
| Rehidratación-TPF/70°C | 91.81 |

Como se puede observar, las sales fosfato (TPF) favorecieron la funcionalidad de incrementar la CRA, respecto de las muestras rehidratadas sólo con agua. Se observa en la Figura 23, que al incrementar a 70°C la temperatura de los medios rehidratantes se incrementó la CRA en



ambos casos agua y solución de TPF, cabe resaltar que a esa temperatura con TPF se obtuvo la mayor CRA (91%).

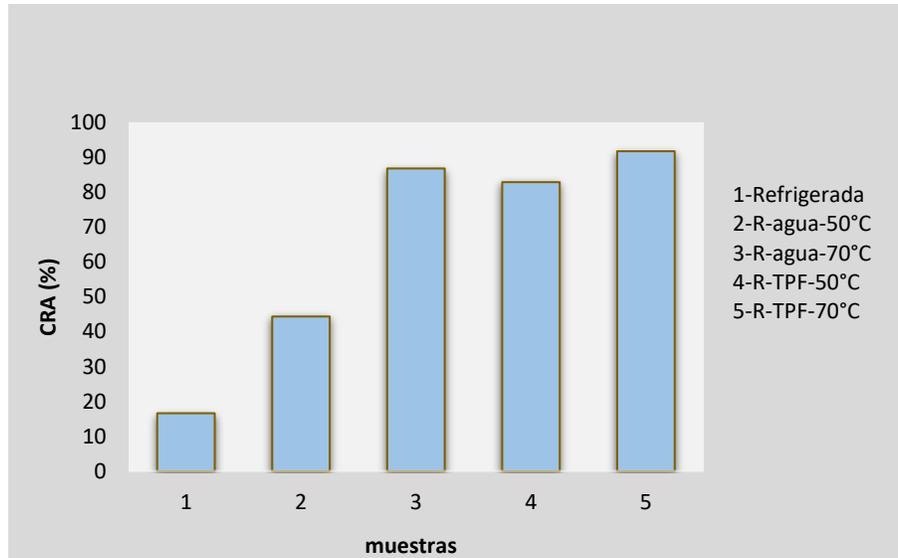


Figura 23. CRA de muestras rehidratadas de *Longissimus dorsi* México Extra

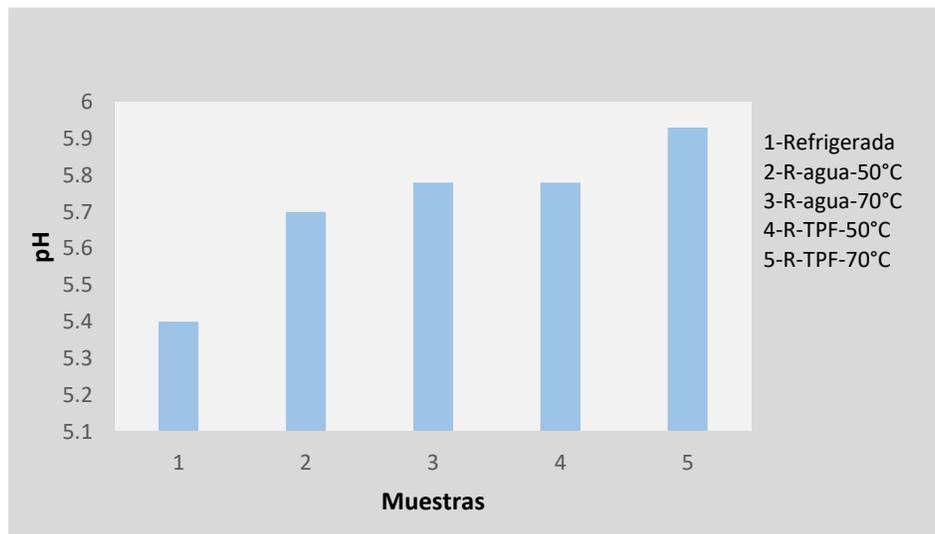
3.4.3. pH

Determinación de pH de las muestras de *Longissimus dorsi* México Extra a distintas condiciones (Cuadro 17).

Es importante resaltar como se mencionó que la CRA y pH están relacionados por modificación del punto isoeléctrico de las proteínas por la adición de una sal. En ambos casos de rehidratación a temperatura de 70 °C en agua y Tripolifosfato se obtienen los valores más altos de pH (Figura 24). Es decir que la temperatura para estos parámetros es importante, debido al gradiente de calor entre el interior del alimento y el líquido de inmersión.

**Cuadro 17. pH de muestras rehidratadas**

| Muestra | pH promedio |
|--------------------------|-------------|
| Refrigerada | 5.4 |
| Rehidratación-agua-50 °C | 5.7 |
| Rehidratación-agua-70 °C | 5.78 |
| Rehidratación-TPF-50 °C | 5.78 |
| Rehidratación-TPF-70 °C | 5.93 |

**Figura 24. pH de muestras rehidratadas**

3.5. Análisis Estadístico de Parámetros Físicoquímicas (CRA, a_w , pH)

De acuerdo con el arreglo matricial se tiene 2 factores: temperatura y medio rehidratante y cada uno con dos niveles de variación: 50 y 70 °C y agua y TPF de sodio, donde se realizaron tres repeticiones a cada una de las pruebas (a_w , pH, CRA) a muestras rehidratadas previamente. Se realizó un análisis estadístico de un ANOVA de dos vías, utilizando el software Minitab 16.0.1, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

En la Figura 25 se presenta el gráfico de caja, en donde se observa para el caso de actividad de agua, no hay diferencia significativa, al rehidratar con agua o TPF, ya que se alcanza la



a_w que se espera tener como en una muestra refrigerada. Es importante resaltar, que se alcanzaron los valores más altos de actividad de agua a temperaturas altas en ambas rehidrataciones como se muestra en el Cuadro 15. Esto se debe a que al aumentar la temperatura se favorece la difusividad, ya que las miofibrillas tienden a abrirse y absorber mayor cantidad de agua posible, ya que todos los espacios inter o intracelulares quedan saturados con agua o con solución hidratante. Así mismo, se observa que a pesar de que al rehidratar con agua a 70 °C se tiene una mayor dispersión de los datos, indicando que las muestras son heterogéneas a diferencia de la rehidratación a 50 °C, donde el valor de la media es inferior, pero con poblaciones más homogéneas entre sí.

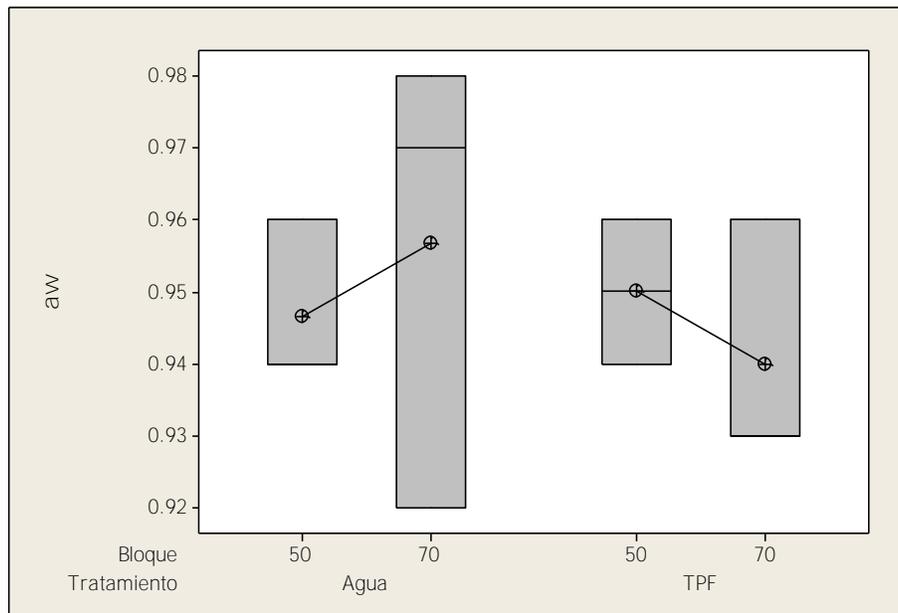


Figura 25. Gráfico de caja de a_w de muestras rehidratadas en TPF y agua a diferentes temperaturas

Para el caso de la rehidratación con TPF de sodio se obtiene mayor dispersión a 70 °C en comparación a 50 °C, es decir que el valor de la media estándar es menor en ambos casos de la rehidratación a temperaturas altas.

A pesar de que el TPF es una sal que proporciona una mayor captación de agua, se tiene que en el caso de la actividad acuosa es indistinto el uso de agua o una sal a 50 o 70 °C.

En la Figura 26 muestra que estadísticamente hay diferencia significativa ($P < 0.05$), respecto a rehidratación en agua o TPF a 70 y 50 °C. El efecto de temperaturas altas durante la



rehidratación es notable, ya que a estas condiciones se obtuvo mayor pH, debido a que al incrementar la cantidad de energía se favorece la desnaturalización de proteínas. Lo que hace que al tener contacto con las sales estas tienden a modificar el pH de la carne.

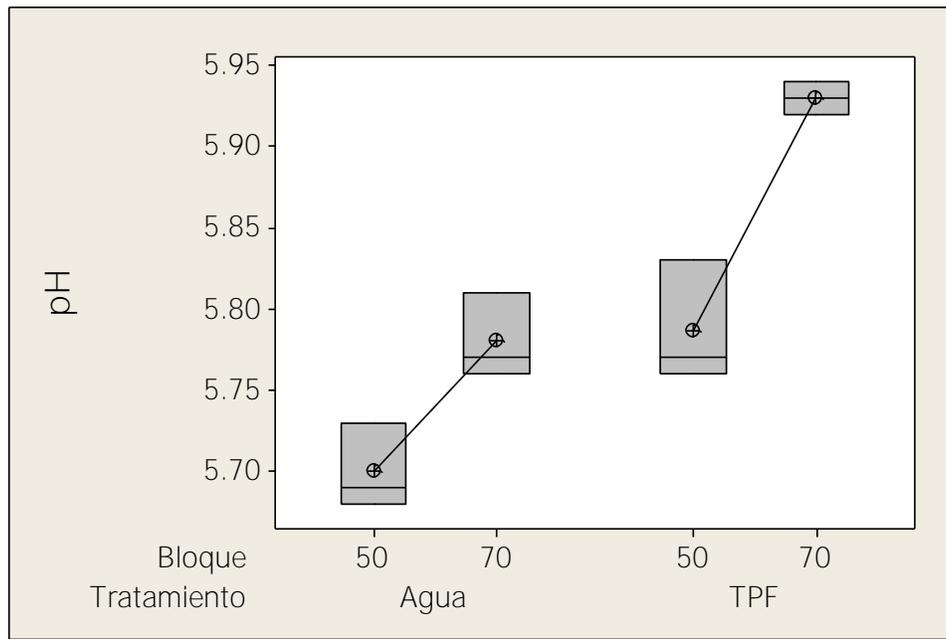


Figura 26. Gráfico de caja de pH de muestras de *Longissimus dorsi* rehidratadas en TPF y agua a diferentes temperaturas

Estadísticamente hablando para el caso de la rehidratación de agua a 70 y 50 °C no hay diferencia significativa, aunque es inferior la media estándar para el caso de 50 °C, pero al rehidratar con TPF a 70 y 50 °C en agua, si hay una diferencia significativa donde es importante decir que al modificar la temperatura, el pH tiene un efecto al incrementarse este con el uso de una sal que hace modificar el pH de la carne por considerar que el punto isoeléctrico de las proteínas se ve modificado.

Para el caso de CRA hay diferencias significativas ($P < 0.05$), es decir que en el proceso de rehidratación la temperatura si es primordial, como se observa en la figura 24, el pH aumento en rehidratación con altas temperaturas, por lo tanto, es básico decir que la CRA y pH muestran una tendencia directa, ya que, al aumentar el pH, aumenta la CRA (Figura 27).

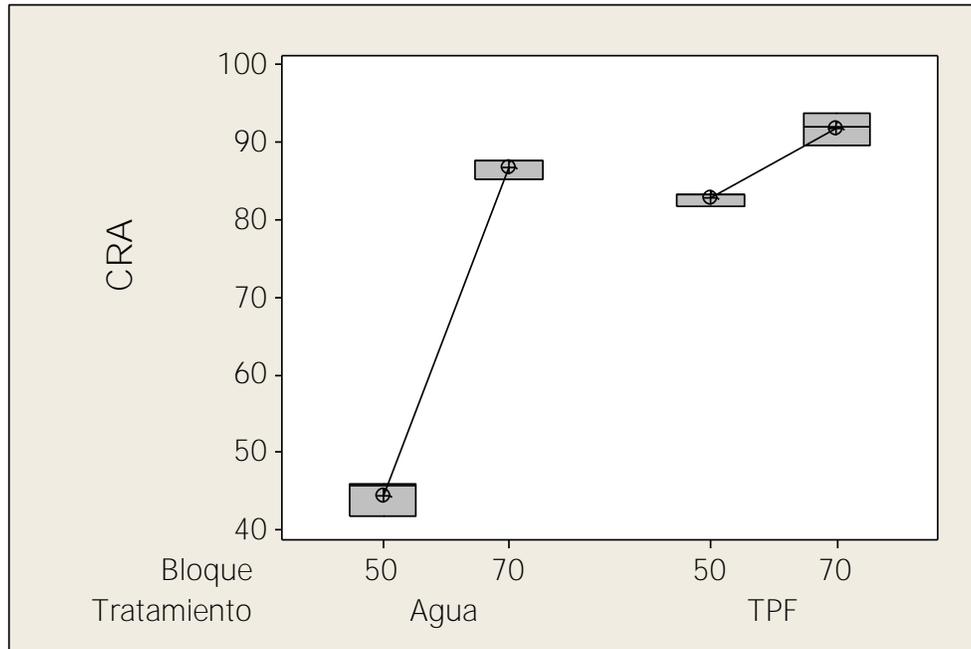


Figura 27. Gráfico de caja de porcentaje de CRA

Estadísticamente los resultados de la CRA muestran una diferencia al rehidratar con agua a 50 y a 70 °C, demostrando que, al aumentar la temperatura del agua, esto incrementa la desnaturalización de las proteínas lo que hace que retengan mayor cantidad de agua al rehidratarlas. En el caso del uso de TPF se obtienen mayores porcentajes de CRA en comparación con agua, sin embargo, al rehidratar a 50 y 70 °C no hay diferencia significativa.

3.6. Aplicación del Modelo de Peleg

Para la aplicación del modelo de Peleg, se realizó la obtención de las constantes (K_1 y K_2) mediante la regresión potencial de las cinéticas de rehidratación de cada caso.

Aquí se registraron solamente las regresiones potenciales de las rehidrataciones, es decir que como se analiza desde el punto de vista del modelo matemático, es necesario mostrar las regresiones de las cuales se obtienen las constantes del modelo de Peleg (Ec.7).

$$y = mx^b \begin{matrix} \longrightarrow & K_1 \\ | & \\ & K_2 \end{matrix} \dots\dots\dots \text{Ec.7}$$



Las siguientes Figuras (28-31) muestran las regresiones potenciales que se realizaron con los datos obtenidos durante la rehidratación, mismos que serán utilizados según el Modelos de Peleg como constantes (K_1 y K_2), estas constantes nos indican la relación de la velocidad de transferencia de masa y la recuperación de agua durante la rehidratación.

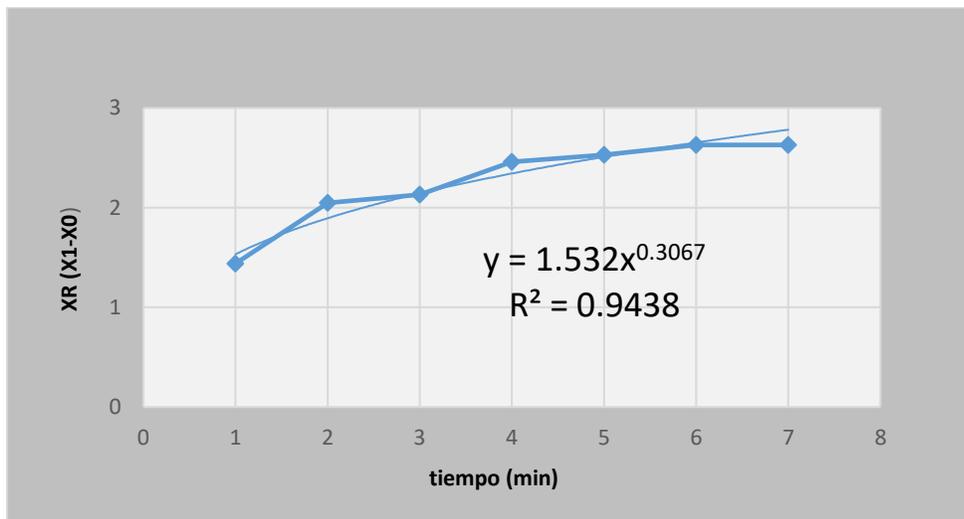


Figura 28. Regresión del modelo de Peleg para la rehidratación con agua a 50°C

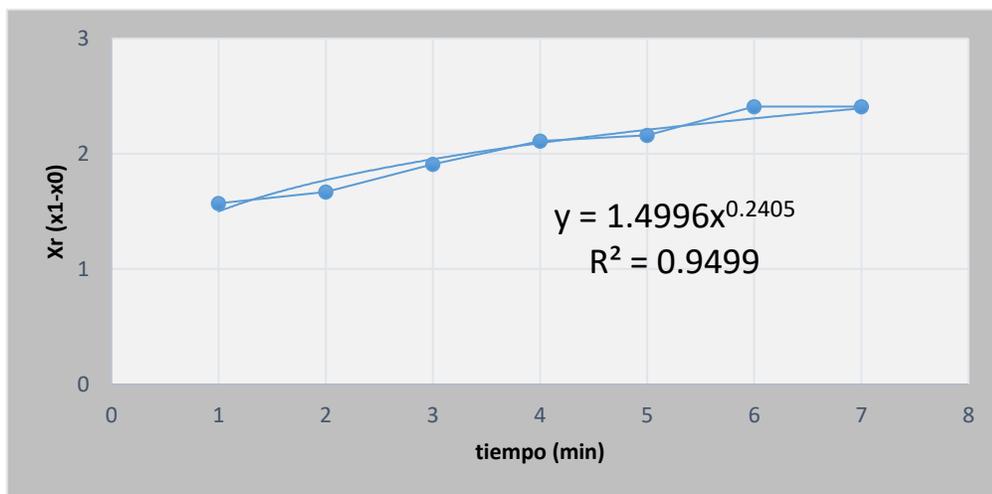


Figura 29. Regresión del modelo de Peleg en rehidratación con agua a 70°C

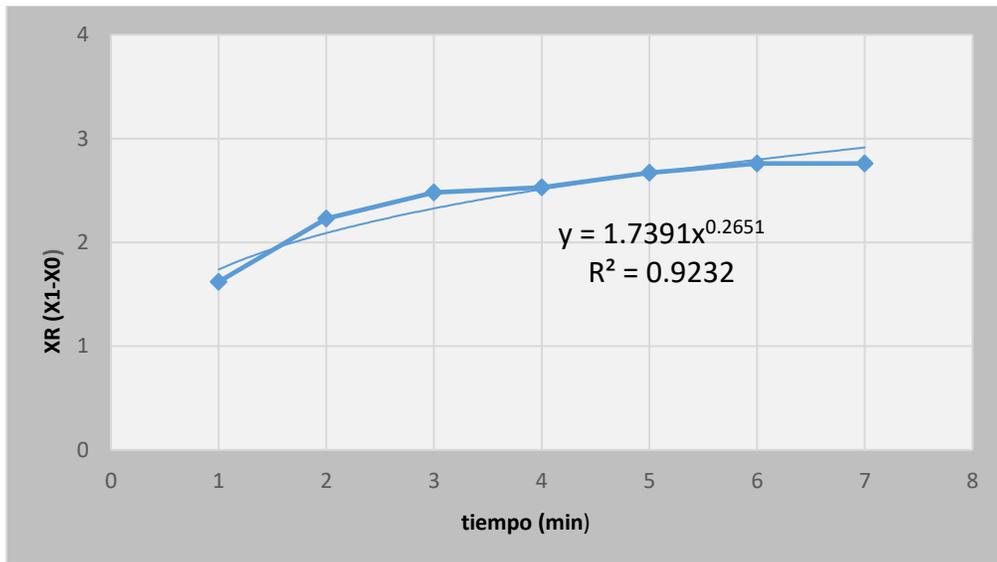


Figura 30. Regresión potencial del Modelo de Peleg en rehidratación con TPF a 70°C

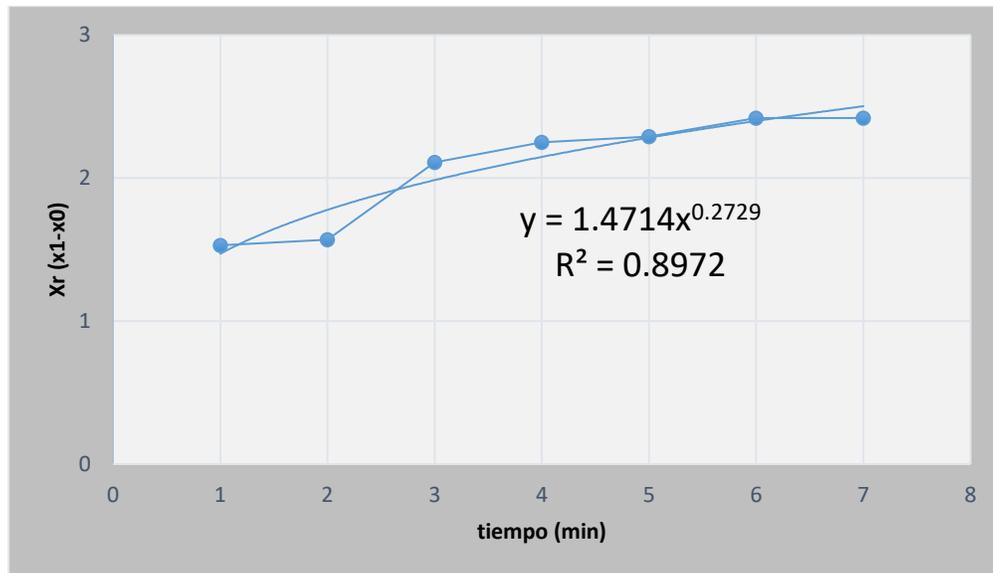


Figura 31. Regresión potencial del modelo de Peleg en rehidratación con TPF a 50°C

3.6.1. Constantes del Modelo de Peleg

De la regresión potencial de cada rehidratación, se obtienen las constantes del modelo de Peleg, es decir que K_1 es “ b ” y K_2 es “ m ” en cada caso, por lo tanto, se registraron los datos en el Cuadro 18, para poder ser analizados desde el punto de vista del modelo matemático de Peleg.



Cuadro 18. Constantes del modelo de Peleg para la rehidratación de muestras liofilizadas de *Longissimus dorsi* a 50 y 70°C

| K_1 | K_2 | R^2 | Muestra |
|--------|-------|--------|-----------|
| 0.3067 | 1.532 | 0.9438 | 50°C agua |
| 0.2405 | 1.499 | 0.9499 | 70°C agua |
| 0.2651 | 1.471 | 0.9232 | 70°C TPF |
| 0.2729 | 1.739 | 0.8972 | 50°C TPF |

Respecto a al análisis de los resultados obtenidos mediante las constantes se dice que K_1 es una constante que se relaciona con la velocidad de transferencia de masa, por lo tanto, a menor valor de K_1 mayor velocidad inicial de absorción de agua. El decrecimiento de K_1 con el incremento de la temperatura sugiere un correspondiente incremento en la velocidad inicial de absorción de agua cuanto mayor sea la temperatura (Turhan *et al.*, 2002).

K_2 es una constante relacionada con la máxima capacidad de absorber agua, entre más bajo K_2 más alta la capacidad de absorber agua. (Sopade y Obekpa ,1990). observaron que K_2 suele ser independiente de la temperatura del agua de remojo, representando una característica de absorción de cada producto.



3.7. Análisis y Discusión de Resultados

Para el fenómeno de estudio que es la rehidratación de *Longissimus dorsi* liofilizado, es importante en este proceso la interacción agua -proteína, teniendo en cuenta que hay factores como el pH, CRA, la temperatura, la fuerza iónica siendo estos algunos factores extrínsecos que afectan la funcionalidad de la proteína, así también está relacionada con la disposición de aminoácidos, el tipo de sal a utilizar. El fenómeno sucede por la solvatación de grupos iónicos afines al agua, solvatación de grupos no-polares y polares y formación de puentes entre agua asociada a proteínas. La rehidratación con adición de sales a temperaturas distintas tiene un efecto importante en las propiedades fisicoquímicas que se analizaron. Tomando en cuenta que, al adicionar una sal en una proteína desnaturalizada, es más fácil obtener mayores porcentajes de recuperación de agua, así como CRA.

Para el modelo predictivo (Modelo de Peleg) respecto a las constantes, en el caso de K_1 , la temperatura más alta en ambos medios rehidratantes fue significativo, ya que al tener menor valor de K_1 , se considera que hay mayor velocidad de transferencia de masa a mayores temperaturas, así también respecto al medio rehidratante el agua es el mejor medio para obtener mayor velocidad de transferencia de masa.

Para el caso de K_2 el medio rehidratante es por el cual obtenemos mayor capacidad de absorber agua, ya que es lo que se busca al adicionar TPF que tiene como finalidad de retener mayor cantidad de agua disponible en la hidratación de muestras liofilizadas.



Conclusiones

La liofilización es un método de conservación que garantiza una mayor estabilidad de los alimentos y durante la rehidratación, logran obtener mayores porcentajes de recuperación de agua, así como mejores índices de CRA, a_w y pH. En este proyecto con *Longissimus dorsi*, se consideró el uso de agua como referente para hacer la comparación con el uso de una sal (TPF), donde esta última, garantiza obtener mayores porcentajes de pH, CRA y a_w , lo más cercano a datos registrados de una carne refrigerada (6 h *post mortem*).

En el caso del análisis de propiedades fisicoquímicas se confirma que el medio rehidratante a 70 °C promueve diferencias significativas respecto de lotes de 50 °C, la CRA aumenta con la adición de sales fosfatos a mayor temperatura, por consiguiente, el pH aumenta al retener más agua, por la ionización que se genera en el proceso, tomando en cuenta el punto isoeléctrico de las proteínas miofibrilares.

Los datos obtenidos y analizados estadísticamente, en el caso de a_w establece que influye el medio rehidratante, ya que hay una diferencia significativa al rehidratar en agua que con una solución de tripolifosfato de sodio, para CRA y pH, las sales fosfatos jugaron el papel de mejorar la interacción agua-proteína.

El modelo de Peleg es una alternativa muy importante que ayuda a entender el fenómeno de rehidratación, al permitir conocer la velocidad de transferencia de masa con la relación de absorción de agua en la rehidratación, ya que se puede relacionar que la adición de la sal y la temperatura del rehidratante afecta la absorción de agua.

En esta investigación de *Longissimus dorsi* liofilizado-rehidratado. El modelo de Peleg facilita la relación que promueve la adición de la sal TPF, al obtener mayores índices de recuperación de agua y mayores porcentajes en las propiedades fisicoquímicas (CRA, pH y a_w) analizados, así mismo la transferencia de masa, con la tasa de absorción de agua en una solución salina a alta temperatura.



Bibliografía

- Agudelo O. 2009. Aplicación de la ley de Fick y el modelo de Peleg para estudiar la absorción de agua en el frijol cargamanto ombligo amarillo (*Phaseolus vulgaris L.*) y la arveja seca (*Pisan sativa*) durante la rehidratación. *Revista Publicaciones e Investigación*. Bogotá, Colombia. **3**. (1):22-25.
- Alimentos Argentinos (2016). Recuperado de: www.aliementosargentinos.gob.ar. Visitado en junio de 2016.
- Aljawad & Bowers (1988). Water-binding capacity of ground lamb-soy mixtures with different levels of water and salt and internal end-point temperatures. *Journal of Food Science*, **53**(2), 376-378.
- Alzate, C. E. O. (2008). *Congelación y liofilización de alimentos*. Gobernación de Caldas.
- Amerling, C. (2001). *Tecnología de la carne: antología*. UNED.
- Andújar, G., Pérez, D., & Venegas, O. (2003). Química y bioquímica de la carne y los productos cárnicos. *Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia, La Habana*, 18-47.
- Arango, M., & María, C. (1996). Calidad Industrial de la carne: Propiedades funcionales de las proteínas cárnicas. *Medellín: Universidad Nacional de Colombia*.
- Badui, S. 2006. Química de los alimentos, México. Pearson education. 4^a ed.
- Bandman E. 1987. Chemistry of animal Tissues, Part 1 -Proteins. In: The Science of meat and meat products. Editors: Price F.J. y Schweigert S.B. 3a ed. Food and Nutrition Press, Inc. Connecticut, USA.
- Bilbao-Sáinz, C., Andrés, A., & Fito, P. (2005). Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. *Journal of food Engineering*, **68**(3), 369-376.
- Carballo, B., López de Torre, G., & Madrid, A. (2001). *Tecnología de la carne y de los productos cárnicos*. AMV Ediciones.
- Cerny, L. C., & Bandman, E. (1986). Contractile activity is required for the expression of neonatal myosin heavy chain in embryonic chick pectoral muscle cultures. *J. Cell Biol*, **103**, 2153-2161.
- Cury, K., Martínez, A., Aguas, Y., & Olivero, R. (2011). Caracterización de carne de conejo y producción de salchicha. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECI*, **3**(2), 269-282.
- Ellinger, R.H., (1983). Phosphates in food processing. In: CRC Handbook of food additives. Ed.: Furia E.T. 2^a ed. CRC Press, Inc. Florida, USA.



- Fellows, P., Trepát, S., & Javier, F. (1993). *Tecnología del procesado de los alimentos: principios y prácticas*. Acribia.
- Fennema, O. R. (2010). *Química de alimentos*. México. Acribia, 3ª Ed.
- Forrest, J. (1977). COLS. (1979) *Fundamentos de Ciencia de la Carne*. Acribia. Zaragoza.
- Furia, T. E. (Ed.). (1983). *CRC handbook of Food additives*. CRC Press.
- Hamm, R. (1961). Biochemistry of meat hydration. *Advances in food research*, 10, 355-463.
- Hamm, R., & Deatherage, F. E. (1960). Changes in hydration, solubility and charges of muscle proteins during heating of meat. *Journal of Food Science*, 25(5), 587-610.
- Hernández, P. (2008). *La carne de conejo como alimento funcional*. Instituto de Ciencia y Tecnología Animal. Tesis Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 46022.
- Honikel, K. O., Kim, C. J., Hamm, R., & Roncales, P. (1986). Sarcomere shortening of prerigor muscles and its influence on drip loss. *Meat science*, 16(4), 267-282.
- Hunt, M. C., Acton, J. C., Benedict, R. C., Calkins, C. R., Cornforth, D. P., Jeremiah, L. E., ... & Shivas, S. D. (1991). Guidelines for meat color evaluation. *American Meat Science Association, Kansas State University: Manhattan, KS*, 1-17.
- Knight, P. A., & Offer, G. (1980). Investigation, by cross-linking, of conformational changes in F-actin during its interactions with myosin. *Biochemistry*, 19(20), 4682-4687.
- Lee, K. T., Farid, M., & Nguang, S. K. (2006). The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 16-23.
- Legarreta, G., Hui, Y., & Rosmini, M. R. (2006). *Ciencia y tecnología de carnes*. Limusa.
- Llorente, A. B., 1997. Influencia del manejo de los animales antes del sacrificio en la calidad de la carne. *Lácteos y Cárnicos Mexicanos*, 12 (5):12-15.
- López, G., Carballo, B., & Madrid, A. (2001). *Tecnología de la carne y de los productos cárnicos*. Mundiprensa. Madrid, España.
- Lowey, S., Slayter, H. S., Weeds, A. G., & Baker, H. (1969). Substructure of the myosin molecule: I. Sub fragments of myosin by enzymic degradation. *Journal of molecular biology*, 42(1), 11N17-6IN1229.
- Marín, E., Lemus, R., Flores, V., & Vega, A. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista chilena de nutrición*, 33(3), 527-538.
- Martínez-Monzó, J. (1998). *Cambios físico-químicos en manzanas Granny Smith asociados a la impregnación a vacío. Aplicaciones en congelación* (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia).



- Matejtschuk, P. (2007). Lyophilization of Proteins. In *Cryopreservation and Freeze-Drying Protocols* (pp. 59-72). Humana Press.
- Mencía, A. M., & Bolaños, D. J. (2010). *Efecto de dos concentraciones de fosfato, de grasa y la adición de inulina sobre las propiedades físicas y sensoriales de una salchicha de pollo reducida en sal* (Bachelor's thesis, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano).
- Miller, R. (2003). Assessing consumer preferences and attitudes toward meat and meat products. *Brazilian Journal of Food Technology*, 6(Special issue).
- Miosina (2016). Recuperado de: <https://www.ecured.cu/Miosina>. Visitado en mayo de 2016.
- Moreno, G. B. (2006). Reposo de los animales en el matadero y cuidados antes del sacrificio. *Higiene e inspección de carnes-I. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos*, 84-92.
- Norma Mexicana NMX-FF-105-SCFI-2005. Productos pecuarios - carne de conejo en canal - calidad de la carne- Clasificación.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-009-ZOO-1994. Proceso sanitario de la carne.
- Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2002. Productos y servicios. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.
- Offer, G., & Trinick, J. (1983). On the mechanism of water holding in meat: the swelling and shrinking of myofibrils. *Meat science*, 8(4), 245-281.
- Ospina, J. F. A., & Castro, R. A. F. (2009). Aplicación de la ley de Fick y el modelo de Peleg para estudiar la absorción de agua en el frijol cargamanto ombligo amarillo (*phaseolus vulgaris* l.) y la arveja seca (*pisan sativa*) durante la rehidratación. *Publicaciones e Investigación*, 3(1), 15-28
- Ozuna M. (2001). La liofilización como método de conservación de alimentos. México: Tesis de licenciatura. Química de Alimentos. Facultad de Química. U. N. A. M.
- Pollard, T. D., Weihing, R. R., & Adelman, M. R. (1974). Actin and myosin and cell movemen. *CRC critical Review in Biochemistry*, 2(1), 1-65.
- Ramírez-Navas, J. S. (2006). *Liofilización de alimentos*. Revista ReCiTeIA.
- Ranken, M. D. (2003). Manual de Industrias de la Carne.
- Rubens Jr, M., Adelaide, B. E., & Tomie, K. E. (2008). Proceso de Liofilización de Naranja, Composición Alimenticia.
- Salazar B.RM. (2010), Manual de color de carne y productos cárnicos, México: Material de apoyo a la docencia. Ingeniería en Alimentos. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.



- Skaara, T., & Regenstein, J. M. (1990). The structure and properties of myofibrillar proteins in beef, poultry, and fish. *Journal of Muscle Foods*, **1**(4), 269-291.
- Wierbicki, E., Kunkle, L. E., & Deatherage, F. E. (1957). Changes in the water-holding capacity and cationic shifts during the heating and freezing and thawing of meat as revealed by a simple centrifugal method for measuring shrinkage. *Food Technology*, **11**(2), 69-73.
- Yates, L. D., Greaser, M. L., & Huxley, H. E. (1983). Quantitative determination of myosin and actin in rabbit skeletal muscle. *Journal of molecular biology*, **168**(1), 123-141.