



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**Incorporación de NaCl mediante ósmosis
para el control de la cristalización en la
congelación de carne de cerdo
(*Longissimus thoracis*)**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera en Alimentos

P R E S E N T A

Cruz Tenjhay Karina

ASESORES

Dra. Rosalía Meléndez Pérez

Dr. Jonathan Coria Hernández

Cuautitlán Izcalli, Estado de México; 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, autoriza a la alumna:
Karina Cruz Tenjhay.

Con número de cuenta: **414490240** a presentar el trabajo de: **Tesis**

Incorporación de NaCl mediante ósmosis para el control de la cristalización en la congelación de carne de cerdo (*Longissimus thoracis*).

Bajo la asesoría de: **Dra. Rosalía Meléndez Pérez.**
Para obtener el título de: **Ingeniera en Alimentos.**

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>		<u>20/MAR/21</u>
VOCAL	<u>Dr. José Luis Arjona Román</u>		<u>26/03/2021</u>
SECRETARIO	<u>M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier</u>	_____	_____
1er. SUPLENTE	<u>I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez</u>	_____	_____
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Dulce María Oliver Hernández</u>	_____	_____

Atentamente notificamos su participación en la revisión y evaluación del trabajo para que en un plazo no mayor a 15 días hábiles emita su VOTO APROBATORIO. Si existieran correcciones u observaciones en el trabajo, contará con 15 días hábiles más a partir del momento en que la pasante entrega el trabajo corregido, para emitir su VOTO APROBATORIO o RECHAZO, todo esto de acuerdo con el Reglamento para Titulación de la FES Cuautitlán.

UNAM
ATENTAMENTE DE ESTUDIOS
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. al 10 de Marzo de 2021.

I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, autoriza a la alumna:
Karina Cruz Tenjhay.

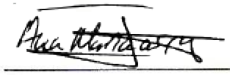
Con número de cuenta: 414490240 a presentar el trabajo de: **Tesis**

Incorporación de NaCl mediante ósmosis para el control de la cristalización en la congelación de carne de cerdo (Longissimus thoracis).

Bajo la asesoría de: Dra. Rosalía Meléndez Pérez.

Para obtener el título de: Ingeniera en Alimentos.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>	_____	_____
VOCAL	<u>Dr. José Luis Arjona Román</u>	_____	_____
SECRETARIO	<u>M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier</u>		<u>24-marzo-2021</u>
1er. SUPLENTE	<u>I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez</u>	_____	_____
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Dulce María Oliver Hernández</u>	_____	_____

Atentamente notificamos su participación en la revisión y evaluación del trabajo para que en un plazo no mayor a 15 días hábiles emita su VOTO APROBATORIO. Si existieran correcciones u observaciones en el trabajo, contaría con 15 días hábiles más a partir del momento en que la pasante entrega el trabajo corregido, para emitir su VOTO APROBATORIO o RECHAZO, todo esto de acuerdo con el Reglamento para Titulación de la FES Cuautitlán.

U.N.A.M.
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de Marzo de 2021.



I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

SECRETARÍA GENERAL

DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, autoriza a la alumna:
Karina Cruz Tenjhay.


Con número de cuenta: 414490240 a presentar el trabajo de: **Tesis**

Incorporación de NaCl mediante ósmosis para el control de la cristalización en la congelación de carne de cerdo (Longissimus thoracis).

Bajo la asesoría de: Dra. Rosalía Meléndez Pérez.

Para obtener el título de: Ingeniera en Alimentos.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>	_____	_____
VOCAL	<u>Dr. José Luis Arjona Román</u>	_____	_____
SECRETARIO	<u>M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier</u>	_____	_____
1er. SUPLENTE	<u>I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez</u>		<u>3 mayo 2021</u>
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Dulce María Oliver Hernández</u>	_____	_____

Atentamente notificamos su participación en la revisión y evaluación del trabajo para que en un plazo no mayor a 15 días hábiles emita su VOTO APROBATORIO. Si existieran correcciones u observaciones en el trabajo, contaría con 15 días hábiles más a partir del momento en que la pasante entrega el trabajo corregido, para emitir su VOTO APROBATORIO o RECHAZO, todo esto de acuerdo con el Reglamento para Titulación de la FES Cuautitlán.

U.N.A.M.
ATENTAMENTE DE ESTUDIOS
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de Marzo de 2021.


I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, autoriza a la alumna:
Karina Cruz Tenjhay.


Con número de cuenta: 414490240 a presentar el trabajo de: **Tesis**

Incorporación de NaCl mediante ósmosis para el control de la cristalización en la congelación de carne de cerdo (Longissimus thoracis).

Bajo la asesoría de: Dra. Rosalía Meléndez Pérez.

Para obtener el título de: Ingeniera en Alimentos.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>	_____	_____
VOCAL	<u>Dr. José Luis Arjona Román</u>	_____	_____
SECRETARIO	<u>M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier</u>	_____	_____
1er. SUPLENTE	<u>I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez</u>	_____	_____
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Dulce María Oliver Hernández</u>		<u>23/03/2021</u>

Atentamente notificamos su participación en la revisión y evaluación del trabajo para que en un plazo no mayor a 15 días hábiles emita su VOTO APROBATORIO. Si existieran correcciones u observaciones en el trabajo, contaría con 15 días hábiles más a partir del momento en que la pasante entrega el trabajo corregido, para emitir su VOTO APROBATORIO o RECHAZO, todo esto de acuerdo con el Reglamento para Titulación de la FES Cuautitlán.

U.N.A.M.
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de Marzo de 2021.



I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

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

AGRADECIMIENTOS

A mi *alma mater*, la Universidad Nacional Autónoma de México. Por permitirme desarrollarme y crecer no solo como profesionalista sino como persona. Por darme la oportunidad de vivir la experiencia de la movilidad académica en más de una ocasión.

Al Programa Universitario de Estudios de la Diversidad Cultural y la Interculturalidad, que mediante el Sistema de Becas para Estudiantes Indígenas me otorgaron los medios económicos para concluir la licenciatura, así como el presente trabajo. Al tutor responsable del grupo 2, Wilfrido Martínez; por brindarme su apoyo en todo momento, por las conversaciones amenas y las risas compartidas.

A mis asesores: Dra. Rosalía Meléndez Pérez y Dr. Jonathan Coria Hernández. Por su infinita paciencia para la culminación de este trabajo y mientras cursaba el taller. Por todos sus atinados consejos, observaciones y correcciones con respecto a la tesis; pero sobre todo, por brindarme siempre palabras de aliento cuando más las necesité. Porque todas las veces que me sentí hundida, ustedes llegaron a tomarme de la mano y a motivarme a continuar sin siquiera saberlo. Fue como si lo hubiesen adivinado. Gracias.

Al Dr. José Luis Arjona Román, porque a pesar de que mientras cursaba el taller, él se encontraba de año sabático y aun así se tomó el tiempo para ir a los seminarios, para emitir su juicio, observaciones y sugerencias con respecto a mis avances. Por sus aportaciones y correcciones al trabajo final. Pero también por sus bromas y comentarios que hacían mucho más amena nuestra estancia en el laboratorio.

Al resto de los miembros del jurado: M. en C. Ana María de la Cruz Javier, I. A. Dulce María Oliver Hernández e I. A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez. Por darse el tiempo de leer y comentar este trabajo.

A mis padres: Reyna Tenjhay Rodríguez y Martiniano Cruz Martínez. Por fungir como mis guías a lo largo de todo este sinuoso recorrido. Por todo el apoyo que me brindaron de manera incondicional siempre. Por ser mi motivo y ejemplo más grande de superación personal. Porque cada que cambié de rumbo aceptaron mis decisiones. Los amo con todo mi corazón y estaré eternamente agradecida por todo lo que han hecho por y para mí. Todo esto fue posible gracias a ustedes.

A mis dos grandes compañeras de aventuras de la infancia: Eunice Cruz Tenjhay y Larisa Sánchez Cruz. Por todos los momentos tan bonitos que vivimos juntas. Las quiero mucho.

A Martín y Santiago. Porque aunque es poco el tiempo que convivimos, lo hacen siempre especial por sus tan peculiares y distintas formas de ser.

A mis tías Flor, Libo y Mary. Por ser parte fundamental de mi desarrollo como persona. Por ser siempre tan amorosas y comprensivas.

A mi estimadísima Viiry's Loc. Ya hemos mencionado en otras ocasiones que no tuvimos el mejor de los comienzos. Sin embargo, sabes que eres la mejor. Te quiero mucho y estaré siempre agradecida con la vida por poner a una persona tan maravillosa como tú en mi camino. Gracias por todos los ratos que pasamos juntas, no solo en los salones de clases sino en el campo de tocho y en la vida, en general.

A Ariadna, Fanychan y Nancy. Por ser no solo las mejores compañeras de clases sino también las mejores amigas. Por todas las risas, las lágrimas, el estrés, las comidas, en fin, todo lo que compartimos a lo largo de nuestro tiempo en la universidad y fuera de ella. Las quiero mucho, morras.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
1. CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	6
1.1. Carne de cerdo	6
1.1.1. Composición y valor nutritivo	6
1.1.2. Estructura del tejido muscular	8
1.1.3. Principales proteínas constituyentes	11
1.1.4. Producción y consumo Nacional	14
1.2. Deshidrocongelación	15
1.2.1. Generalidades	15
1.3. Deshidratación osmótica	15
1.3.1. Generalidades	15
1.3.2. Mecanismo	16
1.3.3. Cinética	17
1.3.4. Factores que la afectan	18
1.4. Congelación	20
1.4.1. Generalidades	20
1.4.2. Cinética de congelación: punto inicial, tiempo y velocidad de congelación	23
1.5. Descongelación	25
1.6. Estudio de los daños al tejido	27
1.6.1. Propiedades mecánicas: Resistencia al corte	27
1.6.2. Parámetros de perfil de color en la carne	29
2. CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	31
2.1. Objetivos	31
2.1.1. Objetivo General	31
2.1.2. Objetivos Particulares	31
2.2. Materiales y métodos	31
2.2.1. Caracterización de la materia prima	31
2.2.2. Incorporación de NaCl mediante ósmosis	32

2.2.3. Selección de las condiciones del pretratamiento osmótico – análisis estadístico	32
2.2.4. Determinación de la Aw a las condiciones de proceso dadas	33
2.2.5. Congelación de carne de cerdo: tratamiento con y sin ósmosis	33
2.2.6. Descongelación de carne de cerdo: tratamiento con y sin ósmosis	33
2.2.7. Observación histológica	34
2.2.8. Determinación de la resistencia al corte	34
2.2.9. Determinación del perfil de color	34
3. CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
3.1. Selección de las condiciones de proceso durante la ósmosis: concentración de la solución hipertónica y tiempo	35
3.2. Evaluación de la congelación	39
3.2.1. Historia térmica	39
3.2.2. Punto inicial de congelación (PIC), tiempo y velocidad de congelación	40
3.3. Evaluación de la descongelación	41
3.3.1. Historia térmica	41
3.4. pH	42
3.5. Evaluación histológica	43
3.6. Evaluación de la resistencia al corte	45
3.7. Evaluación del perfil de color	47
CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes tipos de músculos esqueléticos.	8
Figura 2. Diagrama de la estructura general del músculo esquelético.	9
Figura 3. Diagrama de la microestructura de una fibra muscular.	10
Figura 4. Volumen de la producción Nacional 2009 – 2018.	14
Figura 5. Mecanismo de deshidratación osmótica de (a) material no – biológico/homogéneo y (b) material biológico.	16
Figura 6. Diagrama de fase y equilibrio teórico de congelación de una solución acuosa.	20
Figura 7. Curva de congelación de un líquido. a) Agua pura. b) solución acuosa.	22
Figura 8. Etapas en la congelación de agua y un alimento sólido.	23
Figura 9. Historia térmica durante la congelación.	24
Figura 10. Fracción de agua congelada en función de la temperatura.	26
Figura 11. Calor específico aparente de un alimento cerca del punto de congelación (mostrado en unidades arbitrarias).	26
Figura 12. Pruebas de fuerza de corte Warner – Bratzler: a) “Estándar”, b) Europea, c) Cuchilla plana.	28
Figura 13. Curva típica obtenida con la celda Warner – Bratzler.	28
Figura 14. Estructura tridimensional del sistema $L^*a^*b^*$.	29
Figura 15. Interconversiones de las formas redox de la mioglobina en carne fresca envasada.	30
Figura 16. Cambios en el pH de las soluciones hipertónicas durante el proceso de ósmosis.	35
Figura 17. Formas moleculares del agua.	36
Figura 18. Cambios en el pH de la carne de cerdo durante el proceso de ósmosis.	37
Figura 19. Pérdida de agua en la carne de cerdo al finalizar el proceso de ósmosis.	37
Figura 20. Cambios en la A_w de las placas de carne durante el proceso de ósmosis.	38
Figura 21. Historia térmica del proceso de congelación de la carne de cerdo.	39
Figura 22. Curva de descongelación de la carne de cerdo.	41
Figura 23. pH de la carne de cerdo sometida a los diversos tratamientos.	43
Figura 24. Micrografía a 35x del tejido muscular de la carne de cerdo sometida a dos procesos diferentes.	44
Figura 25. Evaluación de la fuerza de corte de la carne de cerdo sometida a los diversos tratamientos.	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química y nutrientes de la carne de lomo de cerdo.	7
Tabla 2. Principales Proteínas constituyentes de la carne de cerdo.	12
Tabla 3. Principales entidades en volumen de producción Nacional 2018.	14
Tabla 4. PIC y velocidad de enfriamiento de la carne de cerdo.	40
Tabla 5. Determinación del PIF y el tiempo de descongelación de la carne de cerdo.	41
Tabla 6. Fuerza de corte máxima de los diferentes tratamientos en lomo de cerdo.	46
Tabla 7. Cambios en el color de la carne de cerdo sometida a diversos tratamientos.	47

1. CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

1.1. Carne de cerdo

La carne es el tejido muscular, acompañado o no de tejido conectivo, hueso y grasa, además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos, que proviene de animales de abasto; el decir carne fresca implica que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas, salvo la refrigeración en combinación con el envasado (vacío, atmósfera modificada o película permeable) (SAGARPA, 2013).

1.1.1. Composición y valor nutritivo

La carne de cerdo generalmente se reconoce como un alimento con diversas propiedades debido a su alto contenido en proteínas de alto valor biológico, rico en aminoácidos esenciales, así como en vitaminas del grupo B, minerales, especialmente hierro del grupo *hemo*, oligoelementos y otros compuestos bioactivos (Kauffman, 2001). Pero la carne de cerdo también contribuye a la ingesta de grasa, ácidos grasos saturados, colesterol y otras sustancias que, en cantidades inapropiadas, pueden resultar en efectos fisiológicos negativos (Toldrá y Reig, 2011). Sin embargo, hay factores relevantes en la cría y manejo de cerdos que afectan el contenido de muchas de estas sustancias en la carne resultante y de alguna manera dicha variabilidad debe tenerse en cuenta.

La composición de la carne y su contenido depende de muchos factores tales como: (i) raza y genotipo, (ii) edad, (iii) sexo, (iv) sistema de producción, (v) tipo de alimento y su composición, y (vi) cortes/músculos específicos. Todos ellos afectan muchas características de la carne de cerdo como: (i) características físicas (peso, color, grasa intramuscular, etc.), (ii) rendimiento (peso de la canal, grasa externa, relación magra/grasa), (iii) calidad sensorial, (iv) composición química (grasa, ácidos grasos, proteínas, humedad, vitaminas, hierro) (v) perfil enzimático (proteasas, lipasas, inhibidores) y (vi) composición bioquímica (péptidos, aminoácidos, nucleótidos) (Toldrá, 2006).

El contenido total de grasa también varía de un corte a otro dependiendo de las cantidades relativas de lípidos presentes en el músculo (grasa intramuscular) y lípidos presentes entre los músculos adyacentes (grasa intermuscular) así como la cantidad de tejido adiposo externo.

La Tabla 1 reúne la composición química, así como los nutrimentos de la carne de lomo de cerdo, específicamente:

Tabla 1. Composición química y nutrientes de la carne de lomo de cerdo.

Nutriente	Unidad	Contenido/100 g
Agua	g	70.39
Energía	kcal	156
Calorías en grasa	kcal	62
Proteína	g	21.95
Lípidos totales	g	6.92
Cenizas	g	0.97
Carbohidratos	g	0
Fibra total	g	0
Azúcares totales	g	0
Calcio, Ca ²⁺	mg	7
Hierro, Fe ²⁺	mg	0.50
Sodio, Na ⁺	mg	48
Vitamina C	mg	0
Vitamina A	IU	0
Ácidos grasos, saturados	g	2.45
Ácidos grasos, trans	g	0.064
Colesterol	mg	67
Magnesio, Mg ²⁺	mg	26
Fósforo, P ³⁺	mg	226
Potasio, K ⁺	mg	374
Zinc, Zn ²⁺	mg	1.55
Selenio, Se ²⁺	µg	33.1
Tiamina	mg	0.667
Riboflavina	mg	0.185
Niacina	mg	7.989
Ácido pantoténico	mg	0.727
Vitamina B ₆	mg	0.726
Vitamina B ₁₂	µg	0.53

Fuente: USDA Nutrient Data Set for Fresh Pork, 2009

1.1.2. Estructura del tejido muscular

Existen tres tipos de tejido muscular: músculo cardíaco, músculo liso y músculo estriado o esquelético. Aquí se tratará solo con músculos esqueléticos. En términos de los principales músculos de valor comercial en las especies de carne, las estimaciones de la cantidad de músculos en el ganado bovino, ovino, caprino y porcino está en el intervalo de 300. Cada uno de estos tiene un tamaño, forma, estructura y composición diferentes porque cada uno está ideado para una función diferente en el cuerpo, pero todos son expresiones diferentes de un solo genoma. El músculo es un tejido vivo principalmente diseñado para la producción de fuerzas y movimientos en el cuerpo del animal. Como tal, el músculo no está "diseñado" como un alimento, sino que está diseñado para llevar a cabo sus roles primarios in vivo. En la Figura 1 se muestran los principales músculos esqueléticos en términos de anatomía macroscópica, los cuales se dividen en seis tipos generales: (1) músculos largos con forma de correa (ej. músculos *psoas* y *sternomandibularis*) con un diámetro bastante constante a lo largo de su longitud, (2) músculos fusiformes (ej. músculo *Biceps brachii*) que tienden a abultarse en el punto medio entre los tendones que los une a su origen y puntos de inserción en el hueso, (3) músculos en forma de abanico (ej. músculos *pectoralis*) que tienen origen ancho pero angosto hasta una pequeña inserción, (4) músculos unipenados, donde las fibras musculares se encuentran oblicuamente en ángulo con respecto a los dos tendones conectándolos a sus puntos de inserción y origen (ej. Músculo *Extensor digitorum longus*), (5) músculos bipenados, donde dos conjuntos de fibras musculares están arreglados como los velos en una flecha, inclinados en direcciones opuestas de un tendón central (ej. músculo *infraspinatus*) y finalmente (6) músculos multipenados, donde hay múltiples grupos de fibras que se inclinan opuestamente de múltiples ramas de un tendón central (ej. músculo *deltoideus*) (Purslow, 2017).

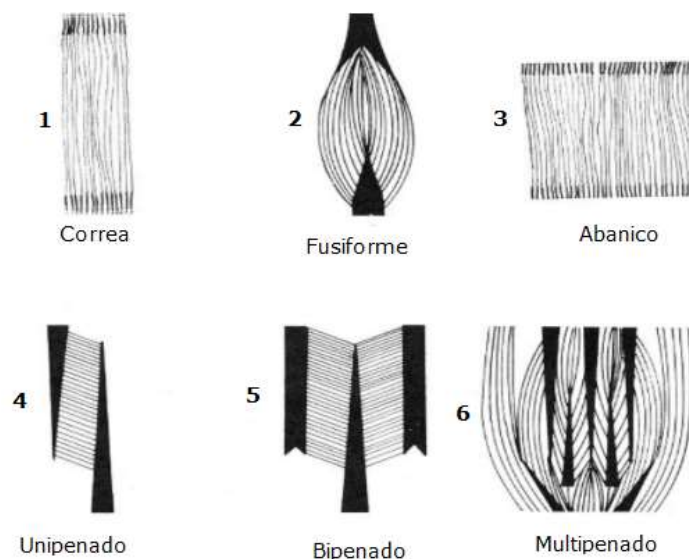


Figura 1. Diferentes tipos de músculos esqueléticos.
Fuente: Purslow, 2017.

La Figura 2 (Listrat *et al.*, 2016) resume la estructura general de los músculos esqueléticos. Son estructuras fibrosas jerárquicas, es decir, cada nivel de estructura está compuesto de varias subunidades fibrosas. El mayor nivel de estructura es un músculo entero, cuya superficie externa está definida por una capa de tejido conectivo, el epimisio. Internamente, cada músculo se divide en fascículos, o haces de fibra muscular, que están separados por otra capa de tejido conectivo, el perimisio.

Los fascículos más grandes (primarios) pueden consistir en un número de pequeños fascículos (secundarios), separados por capas más delgadas de perimisio. Los fascículos pueden tener 1 - 5 mm de diámetro y se ven fácilmente a simple vista en cortes transversales de músculos. Esto se puede referir como la textura visual del músculo. Como los animales maduran su tamaño de fascículo en los músculos, como el *Longissimus*, tiende a volverse más grande. Los fascículos están formados por numerosas fibras musculares individuales, típicamente de 20 - 80 μ m de diámetro dependiendo de la especie. Las fibras musculares individuales son células multinucleadas, cada una con su propia membrana basal suprayacente a la membrana plasmática de la célula que consiste en una bicapa de fosfolípidos. Algunos autores se refieren a la membrana plasmática como el sarcolema, y algunos otros incluyen a la membrana basal suprayacente junto con la membrana plasmática en su definición del sarcolema. La membrana basal es en realidad una estructura de la matriz extracelular (MEC) (o tejido conectivo), pero es una estructura separada de otra capa de tejido conectivo, el endomisio, que se encuentra entre las membranas basales de las células musculares adyacentes.

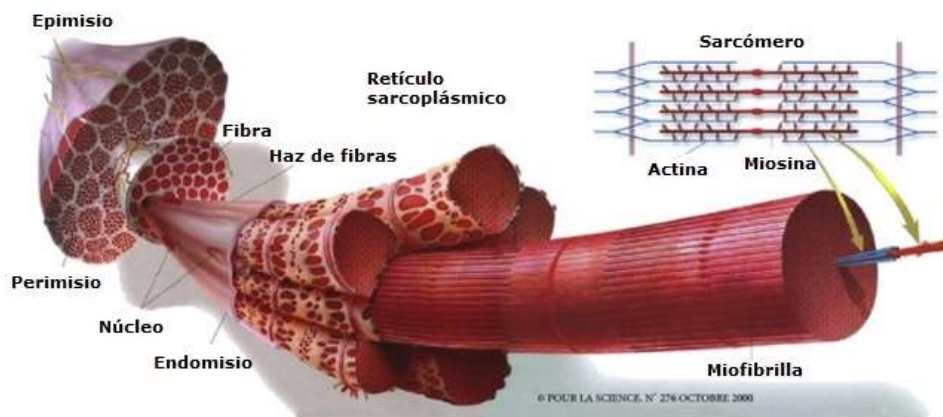


Figura 2. Diagrama de la estructura general del músculo esquelético.
Fuente: Listrat *et al.*, 2016.

A nivel celular y molecular, las células o fibras del músculo esquelético son únicas porque son multinucleadas, muy grandes y extremadamente alargadas, alcanzando varios milímetros a centímetros de longitud. La célula muscular incluye una membrana celular exterior llamada sarcolema, túbulos T, retículo sarcoplásmico (SR), mitocondrias y miofibrillas (Figura 3). Los túbulos T no son organelos reales sino más bien extensiones perpendiculares del sarcolema que se extienden a través del centro de la célula. El SR rodea cada miofibrilla y es el sitio de almacenamiento y liberación de calcio. Regula la concentración de iones de calcio en el citosol. Las mitocondrias son los sitios del metabolismo oxidativo en la célula. El número y la ubicación de las mitocondrias varían mucho entre los tipos de músculos. En el músculo esquelético blanco, ocupan alrededor del

2% del volumen, mientras que representan el 34-38% del volumen de las células del músculo cardíaco. Su concentración es mayor cerca del sarcolema que en las partes interiores de la celda (Gou y Greaser, 2017).

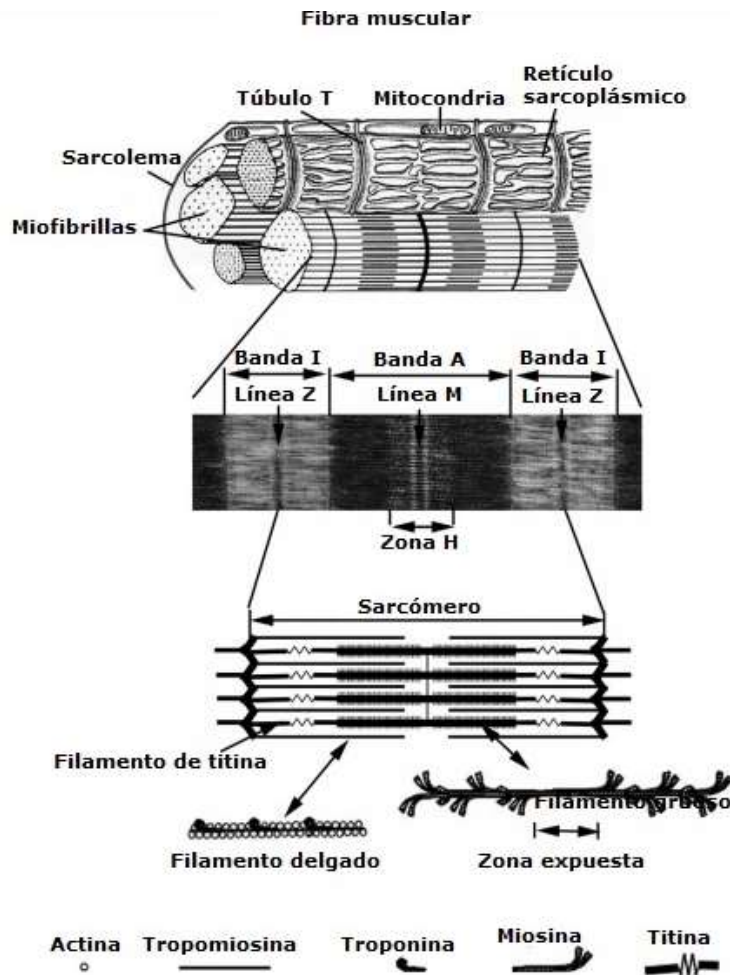


Figura 3. Diagrama de la microestructura de una fibra muscular.
Fuente: Gou y Greaser, 2017.

Las miofibrillas ocupan aproximadamente el 80% del volumen celular en el músculo esquelético de la célula. Hay típicamente 500-1000 miofibrillas en la sección transversal de una fibra muscular esquelética. Las miofibrillas facilitan la función principal de la fibra muscular, por lo que producen fuerza cuando los músculos esqueléticos o cardíacos se contraen. No están limitadas por una membrana y consisten completamente de proteínas que existen como una estructura insoluble a concentraciones fisiológicas de sal. La estructura de la miofibrilla es similar a una cuerda y se compone de sarcómeros repetidos que representan la unidad contráctil más pequeña de músculo. Una unidad sarcómera se encuentra entre dos líneas Z adyacentes. La línea Z (también llamada disco Z) está compuesta principalmente por proteína α -actinina. Los filamentos finos que contienen principalmente la proteína actina se unen a la línea Z en direcciones opuestas. La banda I está dividida en dos por una línea Z oscura ubicada en el centro de la banda I. Filamentos gruesos, que contienen principalmente la proteína miosina, se encuentran en el centro del

sarcómero formando la amplia banda oscura A. La línea M es una línea oscura en el centro de la banda A. La disposición de filamentos delgados y gruesos da a las células musculares esqueléticas y cardíacas una apariencia estriada, donde la región más clara tiene solo filamentos delgados (banda I), la región más oscura contiene los filamentos gruesos (banda A), y la región menos oscura tiene solo filamentos gruesos (zona H) (Figura 3) (Swartz, Greaser y Cantino, 2009). Comprender el patrón de bandas en miofibrillas es importante porque las longitudes del sarcómero están relacionadas con la terneza de la carne.

Un tercer tipo de filamento también pasa por el sarcómero y está compuesto únicamente por la proteína titina. Su extremo amino se ancla en la línea Z y se superpone a otro grupo amino terminal de titina de un sarcómero adyacente (Furst *et al.*, 1988; Labeit y Kolmerer, 1995; Trinick y Tskhovrebova, 1999; Obermann *et al.*, 1996; Gregorio *et al.*, 1998). Sus elementos extensibles -N, Ig media y PEVK- están ubicados en la banda I; el resto de la molécula de titina pasa por la mitad de la banda A. Su extremo carboxilo se ancla en la línea M y se superpone a otro grupo carboxilo terminal de titina de la mitad del sarcómero adyacente. La titina constituye así un sistema de filamento continuo a lo largo de la miofibrilla. La titina se une a actina y filamentos de miosina en la banda I y la banda A, respectivamente, evitando sobreestirar el músculo, alineando actina y miosina, manteniendo filamentos gruesos en el centro del sarcómero y produce tensión pasiva (Figura 3) (Tskhovrebova y Trinick, 2003; Granzier y Labeit, 2004; Horowitz *et al.*, 1986; Guo *et al.*, 2010).

1.1.3. Principales proteínas constituyentes

Las proteínas en el músculo (Tabla 2) se pueden dividir ampliamente en aquellas que son solubles en agua o soluciones de sal diluidas (las proteínas sarcoplásmicas), aquellas que son solubles en soluciones salinas concentradas (las proteínas miofibrilares) y aquellas que son insolubles en estas últimas, al menos a baja temperatura (las proteínas del tejido conectivo y otras estructuras formadas).

Tabla 2. Principales Proteínas constituyentes de la carne de cerdo.

Proteínas musculares	Miofibrilares	Miosina
		Actina
		Titina
		Nebulina
		Tropomiosinas
		Troponinas
		α y β actininas
		Miomesina
		Desmina, filamina, vinculina, talina, etc.
	Sarcoplásmicas	Gliceraldehído fosfato deshidrogenasa
		Aldolasa
		Creatina quinasa
		Fosforilasa
		Mioglobina
		Hemoglobina
	Tejido conectivo y organelo	Colágeno
		Elastina
		Mitocondrial

Fuente: López – Bote, 2017.

Proteínas Miofibrilares

Las proteínas miofibrilares son proteínas de fibrilla largas organizadas en secciones repetidas (sarcómeros) para contraer deslizando los filamentos gruesos (miosina) y delgados (actina) uno al lado del otro.

La proteína miofibrilar más abundante es la miosina. La molécula de miosina tiene un peso molecular (MW) cercano a 500,000 Da y una relación de longitud a diámetro aproximadamente 100:1. Debido a su alto contenido de ácidos glutámico y aspártico, y de aminoácidos dibásicos, está altamente cargada y tiene cierta afinidad por el calcio y iones de magnesio. La miosina es una molécula asimétrica compuesta de dos pesadas cadenas polipeptídicas y cuatro cadenas ligeras de polipéptidos. La meromiosina pesada (HMM) y la meromiosina ligera (LMM) son fragmentos proteolíticos de miosina.

LMM contiene partes de ambas cadenas pesadas y HMM comprende partes de dos cadenas pesadas y las cuatro cadenas ligeras. La H-meromiosina, que contiene toda la ATPasa y las propiedades de combinación de actina de la miosina, están ubicadas en la periferia de los filamentos de miosina. Las propiedades dependen de grupos SH libres en la molécula (Bailey, 1954). Una vez extraída del músculo, es soluble a baja fuerza iónica, pero *in situ* se extrae solo a una fuerza iónica alta. Su composición de aminoácidos es similar a la de miosina (Bailey, 1954) y, como esta última, hay pocos aminoácidos libres: parece ser un ciclopéptido (una cadena de aminoácidos formando una figura cerrada). Se sugirió que los filamentos de actina están unidos a la línea Z por una red de tropomiosina, y la tropomiosina se extiende a lo largo de la hélice en el filamento de actina. Los filamentos de actina están unidos al interior de la superficie de la membrana plasmática y la línea Z por

vinculina, un enlace lipídico. En sitios menos específicos, las proteínas celulares parecen estar unidas a la membrana por un complejo de la proteína integrina (Lawson, 2004).

La otra proteína miofibrilar importante es la actina, que puede existir en dos formas: G-actina, que consiste en unidades globulares relativamente pequeñas que tienen un MW de aproximadamente 42,000 Da, y F-actina, en la que estas unidades globulares se agregan de extremo a extremo para formar una doble cadena. La G-actina se polimeriza en F-actina en presencia de sales y pequeñas cantidades de ATP. Es la F-actina que se combina con la miosina para formar la actomiosina contráctil del músculo activo o prerigor y la actomiosina inextensible de músculo en *rigor mortis*.

Proteínas sarcoplásmicas

Las enzimas de la vía glucolítica constituyen la mayor proporción de proteínas sarcoplásmicas (Li *et al.*, 2015) y pueden estar presentes en más de una forma (isozimas). Las enzimas glucolíticas están ligadas a la proteína actina miofibrilar, la proporción unida aumenta con la estimulación de la glucólisis (Trinick y Cooper, 1982; Li *et al.*, 2015).

Las enzimas glucolíticas se unen también a otras ubicaciones en la célula muscular, incluyendo el sarcolema, el retículo sarcoplásmico y las membranas de los núcleos y las mitocondrias. Gran parte de la actividad de AMP-deaminasa del músculo se encuentra en los extremos de los filamentos de miosina en la unión A / I (Trinick y Cooper, 1982). La fosforilasa-b parece estar localizada tanto en el disco Z como en la línea M (Maruyama *et al.*, 1985). La línea M también es la ubicación de creatina quinasa.

Tejido conectivo

El tejido conectivo intramuscular (IMCT) es una red compleja de proteínas extracelulares que mantienen la estructura muscular y llevan las fuerzas de contracción a tendón y huesos. Además de su función estructural, el IMCT es importante en la regulación del crecimiento de las células musculares por señalización celular directa y por modulación de los factores de crecimiento (Nishimura, 2015).

Hay diferentes capas de tejido conectivo. El epimisio externo rodea todo el músculo y está hecho de gruesas láminas de fibras de colágeno. El perimisio separa el músculo en filamentos y también contiene láminas de fibras de colágeno. Estos filamentos están formados por varias fibras musculares, que están rodeadas por el endomisio, compuesto también por una red de fibrillas de colágeno que rodea cada fibra muscular (Nishimura *et al.*, 2009; Nishimura, 2015). Finalmente, la membrana basal une el tejido conectivo con la membrana de la célula muscular, contiene colágeno (40%) y algunos complejos polisacáridos. Epimisio, perimisio y endomisio convergen para formar agregados de tejido conectivo, conocidos como tendones que se unen al esqueleto y transfieren las fuerzas. Se estima que más del 90% de colágeno intramuscular está ubicado en el perimisio (McCorninck, 1994). El tejido conectivo está formado principalmente de colágeno seguido de elastina, proteoglicanos y glucoproteínas. Estas dos últimas proteínas tienen fuertes cargas negativas que permiten la repulsión y una estructura extendida capaz de retener agua. El colágeno tiene una secuencia regular de aminoácidos, con una proporción muy alta de glicina, prolina e hidroxiprolina, que son aminoácidos no esenciales con valor nutricional limitado.

1.1.4. Producción y consumo Nacional

Producción

La producción Nacional de carne de cerdo registró una tendencia creciente durante la década reciente, con una tasa de crecimiento promedio anual de 2.2 por ciento, para ubicarse en 1.5 millones de toneladas en 2018. Se estima que continúe esta tendencia de crecimiento en los próximos años.

La Figura 4 muestra el crecimiento en la producción de carne de cerdo en México a lo largo de la última década:

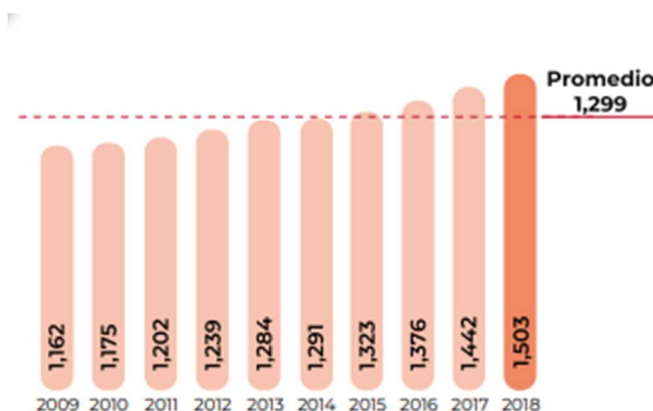


Figura 4. Volumen de la producción Nacional 2009 - 2018. (Miles de toneladas, carne en canal). Fuente: Panorama Agroalimentario, SIAP – SAGARPA, 2019.

En 2018, más de la mitad de la producción Nacional se concentró en cinco entidades: Jalisco, Puebla, Sonora, Yucatán y Veracruz. La Tabla 3 resume el *top 10* en volumen de producción Nacional de carne de cerdo.

Tabla 3. Principales entidades en volumen de producción Nacional 2018.

Posición	Entidad Federativa	Región	Volumen (toneladas)
1	Jalisco	Centro - Occidente	321,736
2	Sonora	Noroeste	277,451
3	Puebla	Centro	167,314
4	Yucatán	Sur - Sureste	144,235
5	Veracruz	Sur - Sureste	136,927
6	Guanajuato	Centro - Occidente	111,972
7	Michoacán	Centro - Occidente	44,784
8	Chiapas	Sur - Sureste	28,913
9	Oaxaca	Sur - Sureste	28,117
10	Querétaro	Centro - Occidente	25,552
Total Nacional			1,502,523

Fuente: Panorama Agroalimentario, SIAP – SAGARPA, 2019.

Consumo

El consumo *per cápita* de carne de cerdo en México ha aumentado de manera consistente durante la última década. Entre 2006 y 2016, creció a una tasa promedio anual de 3.1 por ciento, para ubicarse en 18.0 kilogramos *per cápita* en 2018 (SIAP – SAGARPA, 2019).

1.2. Deshidrocongelación

1.2.1. Generalidades

La deshidrocongelación es una variante de la congelación en la cual, un alimento es deshidratado hasta una humedad deseable y después es congelado (Spiazzi *et al.*, 1998; Li y Sun, 2002). La carne contiene una cantidad considerable de agua en la membrana celular que es susceptible a la formación de grandes cristales de hielo formados durante la congelación. A pesar de que el incremento en la velocidad de congelación puede reducir las posibilidades de la formación de grandes cristales de hielo, el daño en los tejidos es inevitable debido a la presencia del agua. La deshidrocongelación provee una forma prometedora de preservar alimentos al remover una parte del agua previo a la congelación (Robbers *et al.*, 1997). Una reducción en el contenido de humedad reduciría la cantidad de agua a congelar y, por ende, es menor el calor a remover, lo que conlleva a una disminución en el punto inicial de congelación, así como un menor tiempo de congelación.

La deshidratación parcial constituye la primera etapa de la deshidrocongelación y para lograrla se ha empleado la deshidratación osmótica, por su facilidad para llevarse a cabo y debido a los mínimos requerimientos energéticos que supone su empleo.

1.3. Deshidratación osmótica

1.3.1. Generalidades

La deshidratación osmótica es una operación empleada para la remoción parcial de agua de tejidos biológicos por inmersión en una solución hipertónica (osmótica). La remoción de agua está basada en el fenómeno natural y no destructivo de ósmosis entre las membranas celulares. La fuerza impulsora para la difusión del agua del tejido hacia la solución es provista por la presión osmótica mayor de la solución hipertónica. La difusión del agua está acompañada por la difusión simultánea en contracorriente de los solutos de la solución osmótica hacia el tejido. Debido a que la membrana celular responsable del transporte osmótico no es perfectamente selectiva, los solutos presentes en las células (ácidos orgánicos, azúcares reductores, minerales, sabores y pigmentos) pueden ser transportados hacia la solución osmótica (Dixon y Jen, 1977; Lericci *et al.*, 1985; Giancomo *et al.*, 1987; Rastogi *et al.*, 2014).

La diferencia en los respectivos potenciales químicos del agua y el soluto en el sistema sólido – líquido (solución) resulta en flujos de diversos componentes de materia y de la solución. La transferencia de masa en ambos sentidos (del agua hacia la solución y del soluto hacia el alimento) ocurre en las primeras 2 – 3 horas de inmersión. Después de ese lapso, el contenido diferencial de agua entre el alimento y la solución osmótica decrece gradualmente, hasta que eventualmente el sistema alcanza un estado de equilibrio dinámico (Shi y LeMaguer, 2002).

La deshidratación osmótica es usada como pretratamiento en diversos procesos para mejorar las propiedades nutrimentales, sensoriales y funcionales de los alimentos sin alterar su integridad. Es efectiva incluso a temperatura ambiente, ya que los daños a la textura, color y sabor producidos por el calor pueden ser minimizados (Torreggini, 1993). Generalmente precede procesos como la congelación y la liofilización, entre otros. Asimismo, mejora la textura y estabilidad de los pigmentos durante la deshidratación, así como durante el almacenamiento (Raoult - Wack, 1994). Otra aplicación principal es la reducción de la actividad de agua con el fin de inhibir el crecimiento microbiano. Además, es reconocido como un método energético eficiente de deshidratación parcial debido a que no hay necesidad de un cambio de fase.

1.3.2. Mecanismo

La diferencia entre los mecanismos de la remoción osmótica de agua de materiales homogéneos y de materiales biológicos, propuesta por Rastogi *et al.* (2000), puede ser explicada con la ayuda del diagrama mostrado en la Figura 5. En material homogéneo (Figura 5a), se asume generalmente que la tasa de difusión constante (con coeficiente de difusión D) ocurre bajo la influencia de un gradiente de humedad uniforme. Sin embargo, esto no resulta del todo cierto, especialmente después de que las fases iniciales del proceso se terminan y la estructura física del material empieza a cambiar.

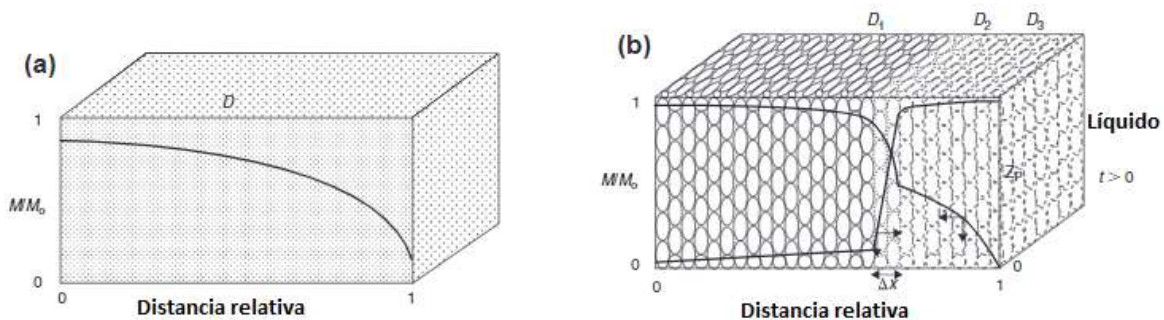


Figura 5. Mecanismo de deshidratación osmótica de (a) material no - biológico/homogéneo y (b) material biológico. Z_p y M/M_0 son el índice de desintegración celular y el contenido relativo de humedad. D es el coeficiente de difusión del agua del material durante la deshidratación osmótica. D_1 , D_2 y D_3 son los coeficientes de difusión del agua desde el centro del material hacia el frente de deshidratación, a través del frente, y a través del material tratado osmóticamente hacia la solución osmótica, respectivamente. Δx es el espesor del frente móvil de deshidratación.

Fuente: Rastogi *et al.*, 2002.

En el mecanismo para materiales biológicos, se propone que el frente de deshidratación (representado por Δx) se mueve hacia el centro del material. Esto resulta en la desintegración de la membrana celular en la región deshidratada, y el agua es transportada a través de las tres diferentes regiones (cada una con características propias): la difusión del agua desde el centro del material hacia el frente de deshidratación, la difusión del agua a

través del frente, y la difusión del agua a través de las capas osmóticamente deshidratadas hacia el medio circundante.

Primeramente, el agua se difunde desde la capa externa de la muestra hacia el medio osmótico, incrementando de este modo la presión osmótica en la superficie. En cuanto la presión osmótica alcanza un valor crítico, las membranas celulares se encogen y rompen. Esto resulta en una rápida reducción en la proporción de células intactas, lo cual se refleja en un incremento del índice de permeabilización celular (Z_p). Z_p es un parámetro integral que indica la reducción relativa en la proporción de células intactas. El coeficiente de difusión del agua liberada a través de estas células hacia la solución osmótica en cualquier momento es denotado como D_3 .

A medida que la deshidratación osmótica procede, el frente de deshidratación se mueve dentro del producto. En este frente, las células están en proceso de desintegración y, por lo tanto, la velocidad de transferencia de masa incrementa abruptamente. En esta unión, una cantidad relativamente grande de agua se difunde con un coeficiente de difusión D_2 ($D_2 \gg D_3$). Como las células en el centro del material están intactas, el coeficiente de difusión del agua de este núcleo (D_1) es mucho más bajo que D_2 y D_3 (Rastogi *et al.*, 2002).

1.3.3. Cinética

La cinética de la transferencia de masa en la deshidratación osmótica se describe empleando términos como pérdida de agua (WL), ganancia de sólidos (SG), ganancia de solutos (WG) y reducción de peso (WR) (Pekoslawska y Lenart, 2009; Ramya y Jain, 2016).

Dichos parámetros pueden determinarse mediante las siguientes ecuaciones (Abrao *et al.*, 2013):

$$WG = \frac{w_t - w_0}{w_0} \quad (1)$$

$$WL = \frac{w_0 x_0 - w_t x_t}{w_0} \quad (2)$$

$$SG = \frac{w_t s_t - w_0 s_0}{w_0} \quad (3)$$

Donde:

w_0 y w_t : masa de la muestra en el tiempo 0 y t , respectivamente (g)

x_0 y x_t : fracción de humedad en el tiempo 0 y t , respectivamente (g/g_{s.s.})

s_0 y s_t : fracción de sólido en el tiempo 0 y t , respectivamente (g/g_{s.h.})

Estas ecuaciones están basadas en la suposición de que no hay transferencia de sólidos del alimento hacia la solución osmótica.

1.3.4. Factores que la afectan

La deshidratación osmótica como proceso de transferencia de masa es afectada por diferentes factores. De acuerdo con Ramya y Jain (2016), pueden clasificarse en tres grandes grupos:

➤ **Factores relacionados con pretratamientos**

La velocidad de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de alimentos es un proceso lento debido a que la membrana celular ejerce alta resistencia a la transferencia, reduciendo así dicha velocidad (Erle y Schubert, 2001; Allali *et al.*, 2009). Por ende, existe la necesidad de desarrollar técnicas suplementarias para acelerar la transferencia de masa sin afectar adversamente la calidad de los alimentos. Entre estas técnicas se encuentran: escaldado (Campos *et al.*, 2012; Gupta *et al.*, 2012), recubrimientos (García *et al.*, 2010; Pisalkar *et al.*, 2011), congelación/descongelación (Grzegory *et al.*, 2013; Nowicka *et al.*, 2015), alta presión hidrostática, campos eléctricos pulsantes, ultrasonido (Verma *et al.*, 2014; Wiktor *et al.*, 2014) y calentamiento óhmico (Allali *et al.*, 2010; Moreno *et al.*, 2011).

➤ **Factores relacionados con el producto**

La geometría de las muestras afecta el comportamiento de la concentración osmótica debido a la variación del área superficial por unidad de volumen (o masa) y la longitud de la difusión del agua y los solutos involucrados en el transporte de masa (Tortoe, 2010). La forma del material es otro factor importante porque la pérdida de humedad y la ganancia de sólidos decrecen con un incremento en el tamaño de la muestra. Si el alimento es más grande, se deshidratará más lentamente porque la longitud del trayecto de difusión es mayor y hay una menor área superficial disponible para el intercambio de sólidos y, por ende, los sólidos permearán al alimento a una menor velocidad (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2001; Rastogi *et al.*, 2002).

Durante el tratamiento osmótico la membrana celular semipermeable puede cambiar de permeabilidad parcial a total, conduciendo así a cambios significativos en la estructura del tejido. Particularmente, la porosidad del material tiene un efecto significativo en el fenómeno de encogimiento y la velocidad de transferencia de masa, así como de rehidratación (Bekele y Ramaswamy, 2010). Fito *et al.* (1996) reportaron que la estructura tisular juega un papel muy importante, no sólo en términos de la porosidad, sino también del tamaño y la forma de distribución de los poros y sus interacciones con la solución osmótica.

➤ **Factores relacionados con la solución osmótica**

El proceso osmótico es afectado también por las propiedades fisicoquímicas de los solutos empleados. La selección del soluto debe considerar los siguientes factores principales:

▪ **Temperatura de la solución osmótica**

La variable más importante que afecta la cinética de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica es la temperatura (Mokhtarian *et al.*, 2014). Por lo tanto, se espera que un incremento en la temperatura y la concentración de la solución osmótica causará un incremento en la pérdida de peso, humedad y ganancia de sólidos (Narang y Pandey, 2013).

El incremento en la temperatura disminuye la viscosidad de la solución osmótica, disminuyendo la resistencia a la transferencia de masa en la superficie del producto. Facilitando así, el flujo del agua en el alimento hacia la solución osmótica y de los solutos hacia el alimento (Phisut, 2012).

- **Concentración del agente osmótico**

A medida que la concentración de la solución incrementa, la resistencia a la transferencia de masa en la solución adyacente a la superficie de los alimentos también incrementa (Nieuwenhuijzen *et al.*, 2001). Por esta razón, se requiere más tiempo para que soluciones concentradas alcancen el equilibrio. En tanto que la concentración incrementa, la solución osmótica es más viscosa y, por lo tanto, los solutos tienen mayores dificultades en la penetración hacia el alimento (Oladejo *et al.*, 2013). El pH de la solución también puede afectar el proceso osmótico. La acidificación incrementa la velocidad de remoción de agua debido a cambios en las propiedades de los tejidos y los cambios resultantes en la textura de frutas y vegetales (Ramya y Jain, 2016).

- **Tipo de agente osmótico**

Generalmente, los agentes osmóticos de bajo peso molecular presentan mayor facilidad para penetrar las células vegetales, comparados con aquellos de alto peso molecular (Tortoe, 2010). Estudios sobre la penetración han demostrado que la velocidad de penetración del soluto es directamente proporcional a la concentración de la solución e inversamente proporcional al tamaño de la molécula del soluto (Giraldo *et al.*, 2003).

- **Agitación**

Un adecuado nivel de agitación garantiza la minimización o eliminación de la resistencia a la transferencia de masa en la superficie del alimento y una fuerza impulsora constante (Rastogi *et al.*, 2002). El uso de soluciones altamente concentradas y/o viscosas genera dificultades como la flotación de los alimentos, la obstrucción del contacto entre el alimento y la solución osmótica, causando una reducción en las velocidades de transferencia de masa. Así que para promover la transferencia de masa y prevenir la formación de una película de la solución alrededor de los productos, puede aplicarse agitación durante la deshidratación osmótica (Gheybi *et al.*, 2013; Akbarian *et al.*, 2014).

- **Relación solución osmótica - masa del alimento**

Generalmente, se emplean relaciones del orden 1:10 a 1:60 para evitar una dilución significativa de la solución osmótica debido a la captación de agua por el alimento y la transferencia de solutos hacia el mismo, y consecuentemente el decremento en la fuerza osmótica impulsora durante la deshidratación (Sutar y Sutar, 2013; Gheybi *et al.*, 2013). Mientras que otros investigadores han empleado una relación solución - alimento mucho más baja (1:1, 3:1, 4:1 o 5:1) para poder monitorear la transferencia de masa evaluando los cambios en la concentración de la solución osmótica (Gupta *et al.*, 2012; Alam e Islam, 2013).

1.4. Congelación

1.4.1. Generalidades

La congelación es una operación unitaria destinada a la preservación de alimentos sin causar cambios significativos en sus cualidades sensoriales o valor nutrimental. Involucra una reducción en la temperatura del alimento por debajo de su punto de congelación, usando refrigeración mecánica o criógenos. Produce que una proporción del agua en el alimento se someta a un cambio de estado para formar cristales de hielo. La inmovilización del agua en forma de hielo y la concentración resultante de los solutos disueltos en el agua no congelada disminuye la actividad de agua (A_w) del alimento. Los solutos forman un estado vítreo que actúa como crioprotector, reduciendo el daño en los tejidos celulares. Esto protege la textura de los alimentos cuando la temperatura de transición vítrea es mayor que la temperatura de congelación en almacenamiento. Cuando los alimentos son congelados correctamente, se presentan cambios no significativos en el valor nutrimental o las cualidades sensoriales (Fellows, 2017).

➤ *Comportamiento de equilibrio entre hielo y agua*

El punto de congelación de una solución alcanza un mínimo (temperatura eutéctica) en la *composición eutéctica* (E), más allá de la cual el soluto se solidificará antes que el solvente (Figura 6). El equilibrio teórico de congelación de una solución acuosa se ilustra en el diagrama de fase de la Figura 6: la solución líquida (A) es enfriada hasta que alcanza la temperatura de congelación en B. Se forma el hielo puro (C) y continúa separándose mientras la temperatura desciende, dejando una solución mayormente concentrada que progresa de B a E, eventualmente alcanzando la temperatura eutéctica y la composición E. En tanto que la temperatura continúa bajando, el agua restante y el soluto cristalizarán juntos.

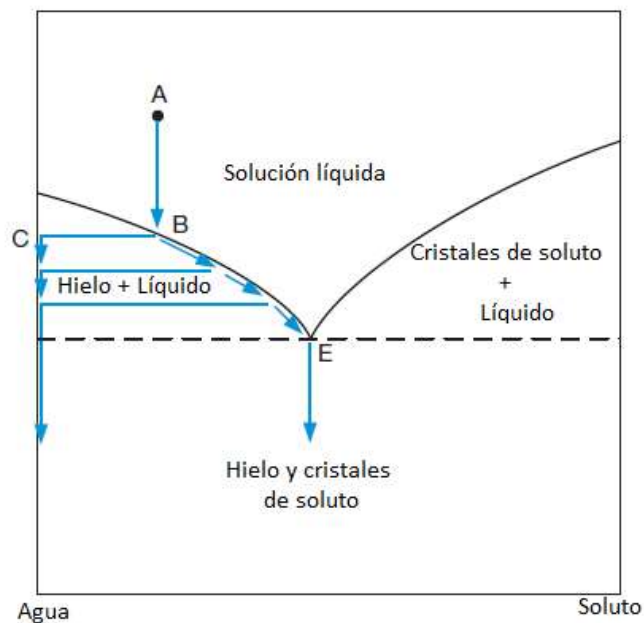


Figura 6. Diagrama de fase y equilibrio teórico de congelación de una solución acuosa.
Fuente: Pham, 2016.

➤ **Nucleación**

La nucleación es el arreglo espontáneo de un grupo de moléculas en un cristal que es lo suficientemente estable para crecer. A temperaturas por debajo del punto termodinámico de congelación T_f , la fase cristalina tiene menor energía libre que la fase líquida y es por lo tanto la fase más estable. Sin embargo, esto es contrarrestado por la energía en la superficie del cristal, la cual predomina cuando la proporción superficie – volumen es alta, es decir, cuando el cristal es pequeño, causando así su fusión. Los nuevos cristales formados, o núcleos, son por ende inestables incluso a temperaturas por debajo del punto de congelación, a menos (y hasta) que alcancen un cierto radio crítico.

▪ **Nucleación extracelular e intracelular**

En los tejidos animales y vegetales, la congelación usualmente ocurre en el espacio extracelular, cuyos largos y continuos volúmenes facilitan el crecimiento de cristales. Mientras los cristales extracelulares se forman y crecen, la solución extracelular se vuelve más concentrada, causando una diferencia en la presión osmótica entre los espacios intra- y extracelulares. El agua intracelular se difunde a través de la membrana celular para depositarse en los cristales extracelulares en formación, causando el encogimiento celular.

El que la nucleación intracelular ocurra depende de la velocidad de congelación. A bajas velocidades de congelación, el agua tiene mucho tiempo para difundirse fuera de las células, y la concentración intracelular aumenta casi para mantener el equilibrio con la concentración extracelular; por lo tanto, las células están siempre a una temperatura cercana a su punto de congelación. Debido al bajo grado de superenfriamiento, la nucleación intracelular no ocurrirá. A velocidades de congelación altas, el punto de congelación en las células decrece mucho más lentamente que la temperatura local, resultando en un gran decremento del superenfriamiento en las células, lo cual facilita la nucleación intracelular (Pham, 2016).

➤ **Transferencia de calor: cambios de temperatura durante la congelación**

Una vez que la nucleación ha comenzado, los cristales crecen rápidamente al tiempo que las moléculas líquidas próximas se depositan en la superficie de cristal, liberando calor latente. La temperatura local aumenta casi instantáneamente hasta que alcanza el punto de congelación termodinámico, en este momento se ralentiza el crecimiento de los cristales y desde este punto en adelante puede proceder tan rápido como lo permita la velocidad a la que el calor se puede conducir lejos de los cristales de hielo: este es la fase controlada de congelación. Si el líquido está bien agitado, y su temperatura es uniforme, permanecerá en el punto de congelación hasta que se solidifique completamente. La temperatura por lo tanto exhibe una meseta de congelación. Una vez que toda el agua se ha solidificado, su temperatura disminuirá nuevamente hacia el entorno. Si el producto se enfría y se congela uniformemente sin ninguna variación de la temperatura espacial, la evolución de la temperatura será como se muestra en la Figura 7.

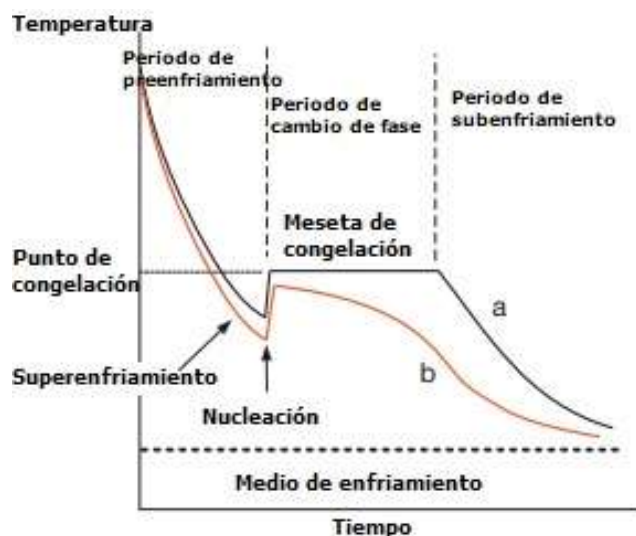


Figura 7. Curva de congelación de un líquido. a) Agua pura. b) solución acuosa.
Fuente: Pham, 2016.

Para el agua pura, la curva de temperatura (a) muestra una clara meseta horizontal, mientras que para una solución (b), la temperatura desciende continuamente durante el cambio de fase debido a la creciente concentración de soluto y la meseta es mucho menos pronunciada.

Para el agua pura, la curva de enfriamiento se divide en período de preenfriamiento, un período de cambio de fase y un período de subenfriamiento, mientras que para alimentos y otras soluciones, los últimos dos periodos son distintos.

La congelación uniforme solo puede ocurrir en un líquido con agitación uniforme o cuando el producto es muy pequeño o la congelación muy lenta, permitiendo que la temperatura se iguale en cada instante. En la congelación de la mayoría de los productos sólidos, se desarrollará un perfil de temperatura, donde la superficie es significativamente más fría que el centro durante todo el proceso. Después del enfriamiento y superenfriamiento, la nucleación ocurrirá en la superficie, y la temperatura cercana a la superficie alcanzará rápidamente el punto de congelación. Formando así una capa de hielo en la superficie.

La interfase entre las regiones congeladas y no congeladas es llamada frente de congelación. Para el agua pura, el frente de congelación es compacto y su temperatura es la temperatura de congelación; mientras que, para los alimentos y las soluciones acuosas, el frente es difuso. La región congelada exterior se encuentra por debajo del punto de congelación; en tanto que la interna (no congelada) se encuentra por encima de éste. Ambas regiones continúan enfriándose mientras el calor es conducido desde el interior hasta la superficie. El frente de congelación se desplaza gradualmente hacia el interior del producto, usualmente a través de cristales que crecen desde el centro hacia la superficie. A menos que la congelación sea extremadamente rápida o que haya barreras que impidan el crecimiento de los cristales, una vez que la nucleación en la superficie ocurre, el crecimiento de cristales será el principal o único mecanismo, y no ocurrirá ningún otro superenfriamiento o nucleación (Pham, 2016).

Una vez que el frente de congelación alcanza el centro, se ha completado el cambio de fase. Posteriormente, procederá algún enfriamiento sensible hasta que el hielo se equilibre con el ambiente exterior. Cada punto en el producto ha pasado las tres etapas de preenfriamiento,

cambio de fase y subenfriamiento, pero en tiempos diferentes dependiendo de su distancia con la superficie (Figura 8).

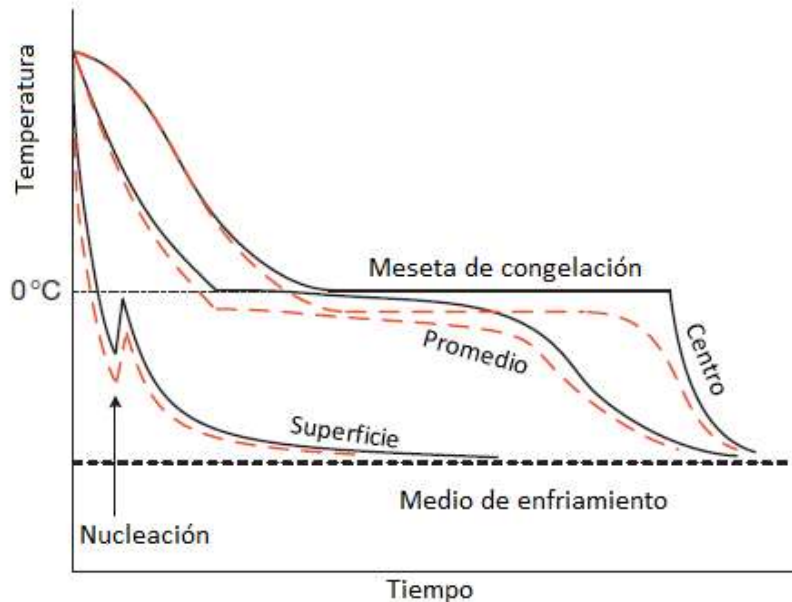


Figura 8. Etapas en la congelación de agua (línea sólida) y un alimento sólido (línea punteada).

Fuente: Pham, 2016.

La superficie alcanza la temperatura de congelación rápidamente, mientras que el centro se enfría a una temperatura cercana a la de congelación y permanece de esa forma, en un estado no congelado, durante cierto tiempo. La temperatura en el centro aún muestra una “meseta de congelación” aparente similar a la de la Figura 7, pero su significado físico no es idéntico, ya que, en este caso, la meseta empieza algún tiempo después de que la nucleación ocurre en la superficie y antes de que el cambio de fase comience en el centro. Esto significa que debido a que el núcleo no congelado está rodeado por un frente de congelación cuya temperatura es la del punto de congelación, cualquier punto en éste (incluyendo el centro) tenderá hacia esa temperatura, pero no podrá enfriarse más hasta que el punto de congelación lo haya atravesado (Pham, 2016).

1.4.2. Cinética de congelación: punto inicial, tiempo y velocidad de congelación

➤ Punto inicial de congelación

El equilibrio o punto inicial de congelación (PIC) es una de las propiedades termodinámicas más importantes de un alimento congelado, requerido para la predicción de propiedades físicas y térmicas debido a la discontinuidad exhibida en ese punto. La información sobre el punto de congelación puede usarse también para calcular o determinar otras propiedades tales como el peso molecular, actividad de agua, agua ligada, libre y congelada, entalpía por debajo del punto de congelación y la construcción del diagrama de estado.

Si la temperatura se monitorea en el centro térmico de un alimento mientras el calor es removido, se obtiene una curva característica (Figura 9).

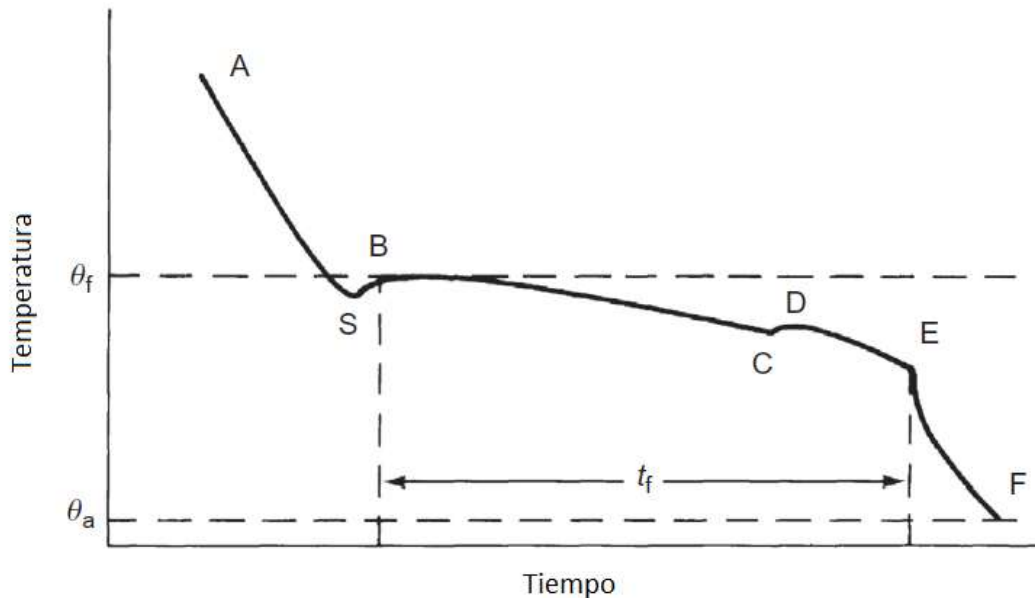


Figura 9. Historia térmica durante la congelación.
Fuente: Fellows, 2017.

Los seis componentes de la curva son los siguientes:

- A – S: El alimento es enfriado por debajo de su punto inicial de congelación (θ_f) el cual, con excepción del agua pura, es siempre menor que $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el punto S, el agua permanece líquida, a pesar de que la temperatura está por debajo del punto de congelación. Este fenómeno es conocido como superenfriamiento, el cual puede ser hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por debajo del punto de congelación, y es el periodo en el cual la nucleación ocurre. La duración del periodo de superenfriamiento depende del tipo de alimento y la velocidad a la cual el calor es removido.
- S – B: La temperatura incrementa rápidamente hasta el punto de congelación a medida que los cristales de hielo comienzan a formarse y el calor latente de cristalización se disipa.
- B – C: El calor es removido del alimento a la misma velocidad que en las etapas previas, pero es el calor latente el que se remueve a medida que se forma el hielo y, por ende, la temperatura permanece casi constante en el punto de congelación. El punto de congelación es gradualmente abatido debido al incremento en la concentración del soluto en la fracción no congelada; y como se forma más hielo, la temperatura decrece ligeramente. Una vez que se ha formado un núcleo estable, continúa creciendo y es durante esta etapa que la mayor parte de hielo se forma.
- C – D: Uno de los solutos se torna más sobresaturado y cristaliza. El calor latente de cristalización es liberado y la temperatura incrementa hasta la temperatura ‘eutéctica’ (temperatura para ese soluto).
- D – E: La cristalización del agua y el soluto continúan. El tiempo total (t_f) empleado para el crecimiento de los cristales de hielo (la ‘meseta de congelación’) depende de

la velocidad de transferencia de masa del agua de la fase líquida hacia el núcleo y la velocidad a la cual el calor es removido. La temperatura de la mezcla hielo – agua decrece hasta que alcanza la temperatura del medio de congelación.

- E – F: La formación de hielo y la concentración de soluto continúan hasta que no es posible congelar más agua. La temperatura decrece mientras que el calor sensible es removido del hielo. La temperatura (θ_a) en el punto F es conocida como ‘temperatura de transición vítrea’ de la solución amorfa concentrada. Cuando se alcanza una concentración crítica soluto-dependiente, el estado físico del líquido no congelado cambia de un líquido viscoelástico a un cristal quebradizo, sólido y amorfo.

La curva de congelación es uno de los métodos más precisos y mayormente utilizados para determinar el punto de congelación de los alimentos. La extensa aplicación de este método se debe a su precisión y simplicidad. En el método de la curva de congelación, la relación tiempo – temperatura de las muestras es registrada por un dispositivo indicador de la temperatura. El punto de congelación se deriva de la meseta de temperatura relativamente larga, que es consecuente al superenfriamiento en una historia térmica (Rahman *et al.*, 2002). Por lo que basta con extrapolar el punto B (Figura 9) hacia el eje de la temperatura para de esta manera obtener el PIC (θ_f). Otro método para su obtención es mediante el empleo de un software que permita determinar el máximo de la curva de manera aún más precisa.

➤ **Velocidad de congelación**

La velocidad de congelación ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) de un producto está definida como la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura final dividida entre el tiempo de congelación (IIR, 1986; Singh, 2014). Ya que la temperatura en diferentes puntos de un producto puede variar durante la congelación, una velocidad de congelación local se define por un punto dado en el producto como la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura deseada, dividida entre el tiempo transcurrido hasta el momento en el que la temperatura deseada es alcanzada en dicho punto.

1.5. Descongelación

La descongelación consume mayor tiempo y es más difícil de controlar que la congelación. Se deben emplear temperaturas ambientales por encima de cero, lo cual incrementa el riesgo de crecimiento microbiológico. Debido a que la temperatura ambiental debe mantenerse baja, el gradiente de temperatura que conduce la transferencia de calor es usualmente mucho más bajo durante la descongelación que durante la congelación, teniendo así, tiempos largos de procesamiento. Además, los alimentos descongelados tienen menor conductividad térmica que los alimentos congelados, lo que disminuye la transferencia de calor aún más.

La congelación y descongelación de los alimentos no se lleva a cabo a una temperatura sostenida, sino que ocurre gradualmente en un intervalo de temperaturas. La cantidad de agua no congelada (Figura 10) residual a cualquier temperatura dada por debajo del punto de congelación puede ser calculada mediante la ley del punto de depresión de congelación, y es aproximadamente proporcional a T_f/T , donde T es la temperatura y T_f el punto inicial

de congelación del alimento. Por ende, atemperar un alimento toma mucho menos tiempo que la descongelación completa, incluso si la temperatura final de atemperación se encuentra cerca del punto de congelación de dicho alimento.

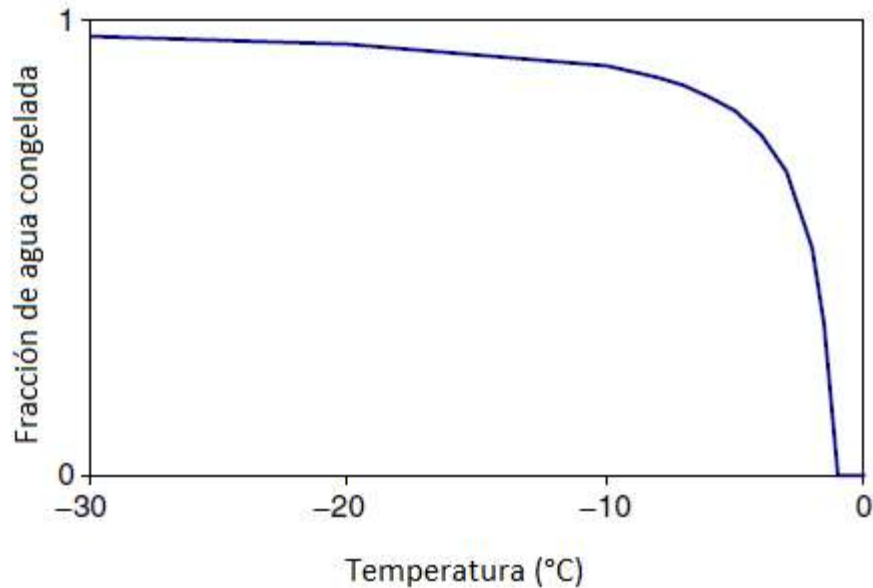


Figura 10. Fracción de agua congelada en función de la temperatura.
Fuente: Pham, 2014.

El calor específico aparente (la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa del alimento en 1 °C) es mucho mayor justo por debajo del punto inicial de congelación T_f , porque ahí es donde la mayor parte del hielo se descongela (Figura 11).

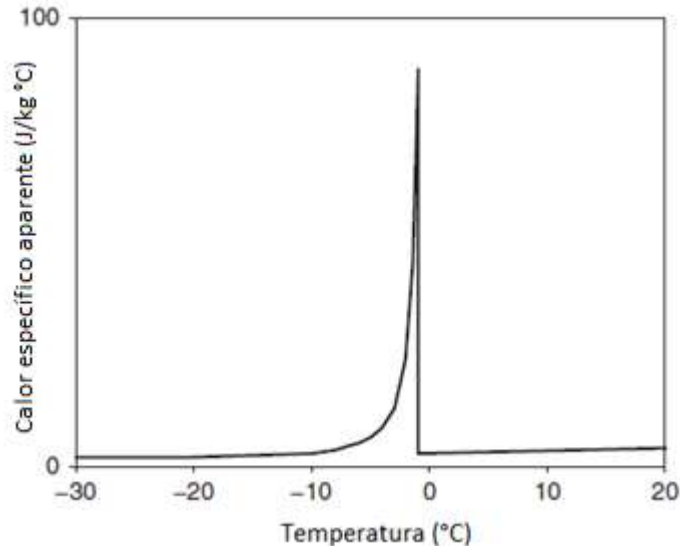


Figura 11. Calor específico aparente de un alimento cerca del punto de congelación (mostrado en unidades arbitrarias).
Fuente: Pham, 2014.

Una vez que todo el hielo se ha descongelado, el calor específico decrece hasta un valor bajo. El pico es conocido como 'pico de calor latente' y significa que, a un alimento congelado le

podría tomar mucho tiempo para descongelarse completamente. Aquellas partes del alimento que se descongelan primeramente (como las esquinas) se calentarán más rápidamente y permanecerán con mayores temperaturas por un tiempo prolongado, causando que el tratamiento se lleve a cabo de una manera no uniforme e incrementando el riesgo local de crecimiento microbiológico. Esta no uniformidad es mucho más pronunciada en alimentos grandes y cuando la velocidad de transferencia de calor es mayor.

El tiempo de descongelación de un alimento puede calcularse mediante una variedad de métodos que van desde simples aproximaciones hasta rigurosos cálculos computacionales. El tiempo de descongelación depende principalmente de los siguientes factores:

- La temperatura circundante.
- El coeficiente de transferencia de calor (HTC), un valor que mide la facilidad con que el calor es transferido desde el exterior hacia el producto. Emplear agua o aire con alta velocidad alrededor del alimento incrementará el HTC, mientras que envolverlo lo reducirá.
- La forma y el espesor del alimento, el cual determina qué tanto tiene que desplazarse el calor desde la superficie hasta el centro.
- La composición de la carne, especialmente su contenido de grasas y agua.

1.6. Estudio de los daños al tejido

1.6.1. Propiedades mecánicas: Resistencia al corte

La prueba de la fuerza de corte se usa frecuentemente en el análisis de textura de los alimentos. Es muy común ya que diversos alimentos son primeramente rebanados o cortados por los dientes incisivos cuando son introducidos en la boca. Consecuentemente, las variaciones en textura de los alimentos pueden ser medidas rebanando la muestra con cuchillas que imitan la acción de los incisivos para evaluar las propiedades de la carne. Dependiendo de la geometría de la cuchilla, se realizan diferentes acciones en las muestras, incluyendo corte, desgarre y compresión (García – Segovia *et al.*, 2014).

El sistema de corte más común para la evaluación de la carne, pollo y pescado es la prueba de Warner – Bratzler (WB). La Figura 12 muestra las diferentes pruebas, diferenciadas principalmente por la geometría de la cuchilla acoplada al instrumento en el que se evalúa. La configuración mayormente empleada es aquella en la que la placa de corte es perpendicular a las fibras musculares. En esta prueba operan fuerzas de tensión, corte y compresión.

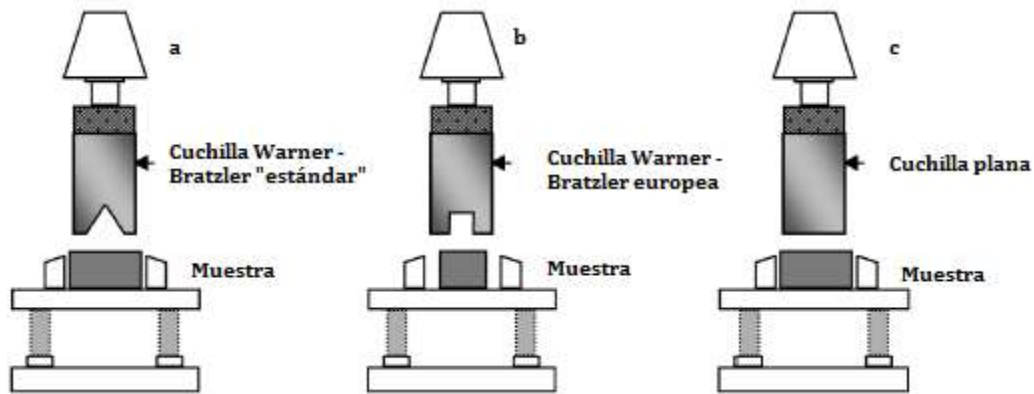


Figura 12. Pruebas de fuerza de corte Warner – Bratzler: a) “Estándar”, b) Europea, c) Cuchilla plana.

Fuente: García – Segovia et al., 2014.

La Figura 13 muestra la típica curva de deformación (fuerza ejercida en función de tiempo o distancia) obtenida en una prueba WB. La muestra debe ser cortada perpendicularmente a las fibras. Los parámetros a medir son la máxima fuerza de corte (el punto máximo de la curva) (N o kgf) que indica la resistencia máxima de la muestra al corte; y la energía total (N x mm) (el trabajo total necesario para el corte total de la muestra) (Honikel, 1998; García – Segovia et al., 2014).

Diversos estudios examinaron la apariencia de la curva de deformación al corte y muestran que la prueba WB puede proveer información acerca de los dos componentes estructurales de la carne, proteínas miofibrilares y tejido conectivo. Usualmente, el primer pico antes de la fuerza máxima de corte está asociado con los componentes miofibrilares y corresponden a la fuerza inicial mientras que el pico subsecuente corresponde al tejido conectivo (Honikel, 1998; Möller et al., 1981; Girard et al., 2012).

Los factores que afectan los resultados de la prueba de fuerza de corte Warner Bratzler son: uniformidad del tamaño de la muestra, dirección de las fibras musculares, presencia de tejido conectivo y depósitos de grasa, temperatura de la muestra y velocidad del corte (García – Segovia et al., 2014).

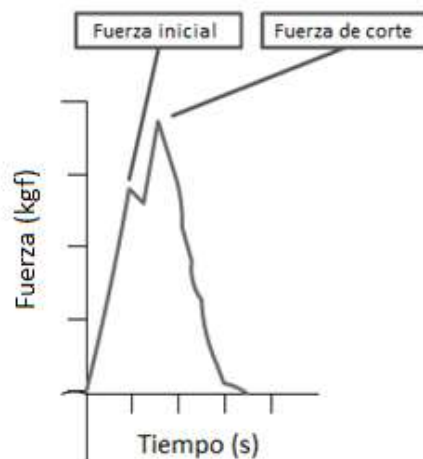


Figura 13. Curva típica obtenida con la celda Warner – Bratzler.

Fuente: García – Segovia et al., 2014

1.6.2. Parámetros de perfil de color en la carne

El color es el resultado de la radiación visible que produce un estímulo en la retina, el cual es transmitido al cerebro a través del nervio óptico. Es afectado por diversos factores: la energía espectral radiante de una fuente de luz, la fisiología de la visión, y la percepción psicológica de cada observador, éstos últimos constituyen un fenómeno altamente complejo. A pesar de que la percepción del color depende en parte de la composición del objeto que refleja o transmite la luz, el color no puede considerarse como una propiedad inherente al objeto, porque el color percibido del objeto es alterado si la fuente de luz cambia (Meléndez – Martínez *et al.*, 2005).

El color es un parámetro de calidad importante para las industrias agrícolas y de alimentos. Es el primer punto de contacto para el consumidor, incluso antes de ser introducido a la boca. La medición del color permite la detección de ciertas anomalías o defectos que los alimentos pudieran presentar (León *et al.*, 2006). Debido a que el color tiene una asociación cercana con factores de calidad tales como frescura, madurez e inocuidad alimentaria, su rol prominente es incuestionable para la aceptabilidad del consumidor. Es un factor importante para la mayoría de los productos alimenticios incluyendo carne y vegetales, tanto para el consumo humano como para el animal (McCaig, 2002).

Para medir el color en los alimentos, se emplean diversos espacios; el más usado es el espacio $L^*a^*b^*$ debido a la distribución uniforme de colores, y porque además es muy cercano a la percepción humana. El sistema $L^*a^*b^*$ (Figura 14), o CIELab, es un estándar internacional para la medición del color, adoptada por la *Commission Internationale d'Eclairage (CIE)* en 1976. L^* es el componente de luminancia o luminosidad, cuyo intervalo va de 0 a 100; y los parámetros a^* (de verde a rojo) y b^* (de azul a amarillo) son dos componentes cromáticos, cuyos intervalos van de -120 a 120 (Wu y Sun, 2013). El espacio $L^*a^*b^*$ es perceptualmente uniforme, por ejemplo, la distancia euclidiana entre dos colores diferentes corresponde a aproximadamente la diferencia de color percibida por el ojo humano (León *et al.*, 2006). En el sistema CIELab dicha distancia es representada por la ecuación de la diferencia total en el color (ΔE_{ab}^*). Dados dos colores (L_1^*, a_1^*, b_1^*) y (L_2^*, a_2^*, b_2^*), la ecuación de ΔE_{ab}^* se define como:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

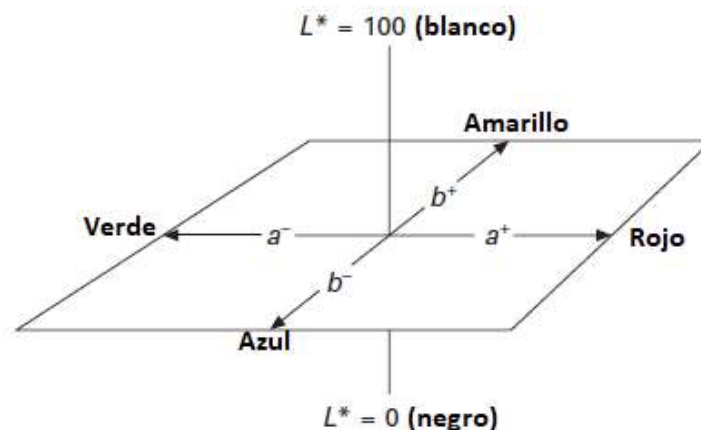


Figura 14. Estructura tridimensional del sistema $L^*a^*b^*$.

Fuente: Feiner, 2016.

El color de la carne se determina en gran parte por la concentración y el estado químico de la mioglobina (estado oxidativo y de oxigenación). En las superficies de carne fresca, la mioglobina se presenta generalmente en forma férrica no oxigenada. A esto se conoce como desoximioglobina y es en apariencia, morada – rojiza. Cuando la carne es cortada y expuesta al aire, el oxígeno atmosférico se une al hierro del grupo *hemo* para formar oximioglobina ferrosa con color rojo; a este proceso se le conoce como “*blooming*”. La eventual oxidación del hierro del grupo *hemo* a un estado férrico conducirá a la disociación del oxígeno y a un subsecuente enlace del agua para formar metamioglobina férrica con color marrón (Faustman y Suman, 2017).

El monóxido de carbono puede enlazarse a la mioglobina ferrosa y producir un color rojo que es casi idéntico al de la oximioglobina. Las interconversiones de las formas *redox* de la mioglobina en carne fresca envasada expuesta a los ligandos se presenta en la Figura 15.

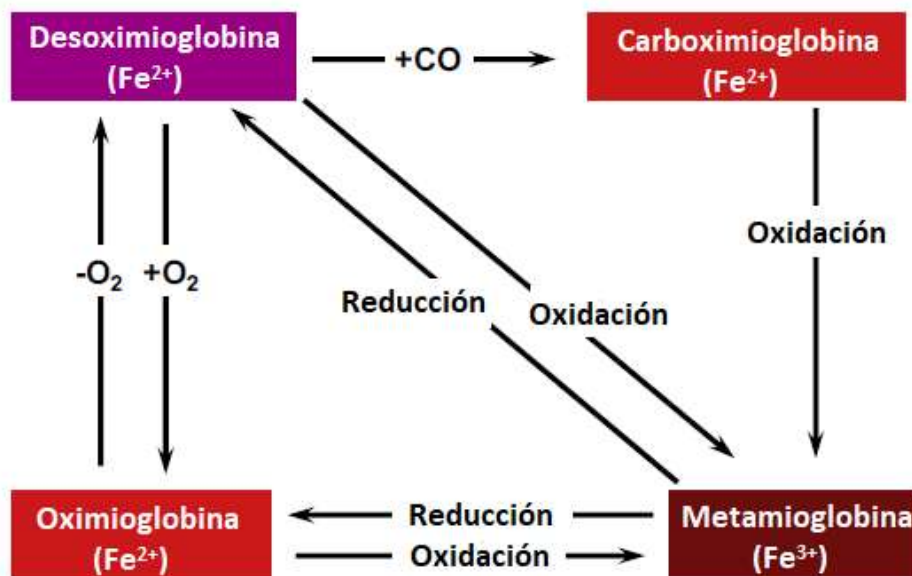


Figura 15. Interconversiones de las formas redox de la mioglobina en carne fresca envasada.

Fuente: Faustman y Suman, 2017.

Es importante indicar que la conversión de la mioglobina de un estado férrico a uno ferroso, conocido como reducción de la metamioglobina, puede ocurrir en la carne (Bekhit *et al.*, 2005). La reducción de la metamioglobina es dependiente de la reducción de equivalentes proporcionados por metabolitos en el sarcoplasma muscular y ocurre hasta que estos se han agotado.

2. CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la incorporación de una solución de NaCl mediante ósmosis para el control de la cristalización durante la congelación de carne de cerdo (*Longissimus thoracis*).

2.1.2. Objetivos Particulares

1. Evaluar el efecto de la incorporación de NaCl en carne de cerdo (*Longissimus thoracis*) variando la concentración de la solución hipertónica para seleccionar las condiciones de proceso durante la ósmosis.
2. Evaluar el efecto de la congelación convencional asistida por ósmosis en carne de cerdo (*Longissimus thoracis*) mediante la determinación de la resistencia al corte y la observación histológica para determinar el daño estructural en los tejidos.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Caracterización de la materia prima

Durante la experimentación se empleó carne de lomo de cerdo fresca (*Longissimus thoracis*) proveniente de cerdos castrados de 6 meses de edad con masa promedio de 110 kg. Éstos fueron sacrificados en condiciones homogéneas y adquiridos siempre con el mismo proveedor, ubicado en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Los cortes de cerdo se obtuvieron luego de 48 horas del sacrificio y se almacenaron en condiciones de refrigeración controladas.

Se determinó el pH del lomo de cerdo con un potenciómetro para carne HI 99163®, Hanna Instruments (RI, USA) acoplado a una cuchilla de acero inoxidable siguiendo el procedimiento empleado por Gutzke y Trout (2002).

Para la obtención de las unidades experimentales se realizaron cortes a lo ancho y a lo largo del músculo a aproximadamente 2 cm cada extremo lateral, con el fin de que el trozo de carne fuese lo más rectangular posible y facilitar los cortes posteriores. Posteriormente, se cortaron placas paralelepípedicas de 2 x 2 x 2.75 cm. Dichas placas tuvieron una masa de 24.60 ± 2.69 g (n = 36).

2.2.2. Incorporación de NaCl mediante ósmosis

Se prepararon soluciones hipertónicas con concentraciones 10 % y 20 % m/v de NaCl de una marca comercial en agua destilada. Las placas de carne fueron sometidas al proceso de ósmosis durante 20 y hasta 240 (20, 40, ..., 220, 240) minutos a 25 °C. La relación solución – muestra fue de 3:1 para evitar una dilución significativa del medio por remoción de agua, lo cual conduce a una reducción local de la fuerza impulsora durante el proceso de ósmosis (Dermesonlouoglou *et al.*, 2016). Se emplearon 12 vasos de precipitados para cada concentración de solución hipertónica (uno por cada tiempo establecido – intervalos de 20 minutos). Las placas fueron sumergidas en la solución y sometidas al proceso osmótico con agitación, empleando un agitador magnético. Al finalizar los tiempos seleccionados, cada placa de carne fue removida de la solución y puesta sobre papel absorbente para remover el exceso de solución y posteriormente, fue pesada. El proceso descrito anteriormente, se realizó por triplicado.

Una vez terminado el proceso de ósmosis, se determinó el pH de la solución hipertónica en cada uno de los tiempos establecidos, por triplicado, con un potenciómetro HI 99163®, Hanna Instruments (RI, USA).

De acuerdo con Gutzke y Trout (2002), para la determinación del pH de la carne, se empleó nuevamente el potenciómetro HI 99163 acoplado a una cuchilla de acero inoxidable y se penetró cada una de las placas sometidas al tratamiento osmótico (y posteriormente, en congelación) en tres diferentes puntos: una medición en el centro y la otra en los extremos) tanto superficial (5 mm) como internamente (10 mm).

Finalmente, como parámetro osmótico se determinó la pérdida de agua (% WL), la cual fue calculada de acuerdo con la ec. (2) (Abrao *et al.*, 2013):

$$\% WL = \frac{w_0x_0 - w_t x_t}{w_0} * 100 \dots (2)$$

Donde:

w_0 y w_t : masa de la muestra en el tiempo 0 y t, respectivamente (g)

x_0 y x_t : fracción de humedad en el tiempo 0 y t, respectivamente (g/g_{s.s.})

Sin embargo, al no haberse determinado la fracción de humedad en las muestras, se realizó una modificación a la ecuación anterior y se sustituyeron las x_0 y x_t por Aw_0 y Aw_t , respectivamente.

2.2.3. Selección de las condiciones del pretratamiento osmótico – análisis estadístico

Para seleccionar las condiciones durante la congelación, se analizaron primeramente los resultados obtenidos luego del tratamiento osmótico; para ello, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con un nivel de confianza del 95 % (Minitab ® 16.2.0,

Minitab Inc.), en el que se evaluó si existía diferencia entre cada una de las variables obtenidas del proceso de ósmosis y el tiempo de tratamiento, así como de la concentración. Posteriormente, se realizó un análisis de t pareada (Minitab ® 16.2.0, Minitab Inc.) para evaluar las diferencias entre los tratamientos con las dos diferentes concentraciones de la solución hipertónica.

Las condiciones seleccionadas del tratamiento osmótico previo a la congelación fueron: solución hipertónica de NaCl con concentración 20 % m/v y 140 minutos de procesamiento.

2.2.4. Determinación de la A_w a las condiciones de proceso dadas

Se determinó la actividad de agua de cada una de las placas de carne antes y después de cada uno de los tratamientos a los que fue sometida (ósmosis y congelación), mediante el empleo de un higrómetro de punto de rocío AquaLab 4TE (WA, USA); calibrado a dos puntos con LiCl 13.41 M ($A_w = 0.250$) y con KCl 0.5 M ($A_w = 0.984$), en concordancia con la metodología descrita por Fernández – Salguero *et al.* (1994).

2.2.5. Congelación de carne de cerdo: tratamiento con y sin ósmosis

Se colocó un termopar tipo K en el centro de tres placas de carne sometidas a la deshidratación osmótica parcial, así como dentro de placas control (sin tratamiento previo) y se situaron de manera individual dentro de bolsas resellables Ziploc ®. Dichas muestras se colocaron dentro de una cámara de convección forzada (Torrey, México).

La temperatura de las muestras fue medida cada 20 segundos, hasta que alcanzaron la temperatura de -21 °C. Los datos fueron obtenidos mediante un termómetro registrador de datos HH309, Omega ® y su software correspondiente, SE – 309.

2.2.6. Descongelación de carne de cerdo: tratamiento con y sin ósmosis

Para llevar a cabo la descongelación se mantuvieron los termopares dentro de las placas de carne y se descongelaron por inmersión en agua a 25 °C dentro de un recipiente aislado, hasta que la temperatura de las muestras fue de 20 °C. Los datos fueron registrados mediante el termómetro registrador de datos HH309, Omega ® y su software correspondiente, SE – 309.

2.2.7. Observación histológica

Para el análisis histológico, se obtuvieron láminas delgadas de aproximadamente 1 mm de espesor, tanto de las muestras control (F), como de las muestras sometidas a los procesos de ósmosis (O) y ósmosis - congelación (OC) y se colocaron en un portaobjetos para ser observadas en el estereomicroscopio a 35x con incidencia de luz blanca (Leica ®, Alemania).

2.2.8. Determinación de la resistencia al corte

Para evaluar la resistencia al corte de cada una de las muestras sometidas a cada proceso (control, ósmosis, congelación y ósmosis - congelación) se siguió la metodología propuesta por la USDA (2013), empleando un texturómetro CT3 (Brookfield, USA) acoplado con cuchilla plana, colocada de forma perpendicular a las fibras musculares; el análisis se realizó con un ciclo de compresión, a una velocidad de 2 mm/s durante 20 s y con carga de activación de 125 gf. Las muestras fueron evaluadas a una temperatura de 25 ± 1 °C.

2.2.9. Determinación del perfil de color

Para evaluar el color en la superficie de las placas de carne se empleó un colorímetro CR - 400 (Konica Minolta ®, Japón) y se obtuvieron los parámetros de perfil de color L^* (luminosidad), a^* (color rojo - verde) y b^* (color amarillo - azul) de acuerdo con el sistema CIELab, según el protocolo descrito por la AMSA (2012). El color se midió en tres diferentes secciones de la placa a todas las muestras sometidas a cada proceso (control, ósmosis, congelación y ósmosis - congelación).

3. CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Selección de las condiciones de proceso durante la ósmosis: concentración de la solución hipertónica y tiempo

Los resultados correspondientes a los cambios producidos en la solución hipertónica durante el proceso de ósmosis se ven reflejados en la Figura 16. Como puede observarse, la diferencia entre una y otra concentración de NaCl no produce cambios estadísticamente significativos en el pH con respecto del tiempo ($p > 0.05$) ni tampoco entre ambos tratamientos; sin embargo, el pH inicial de ambas soluciones hipertónicas es cercano a la neutralidad y se observa una disminución drástica del mismo desde los primeros 20 minutos de tratamiento, ello podría estar asociado con la solubilidad de las proteínas presentes en la carne. Debido a que la miosina es soluble en sal, ésta podría estar disolviéndose en la solución, dejando grupos carboxilo presentes, lo que produce la baja en el pH.

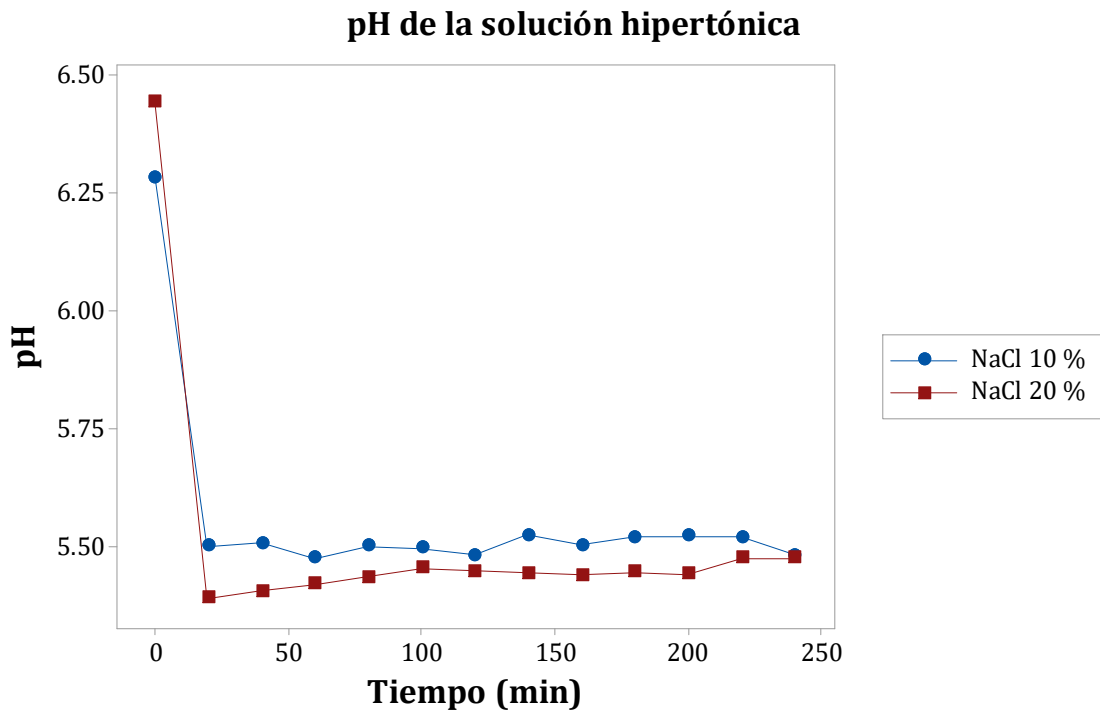


Figura 16. Cambios en el pH de las soluciones hipertónicas durante el proceso de ósmosis

Los iones cosmotrópicos (*'structure - making'*) causan un efecto de hidratación positivo, lo cual significa que, como solutos, promueven una red de puentes de hidrógeno con las moléculas de agua circundantes, lo que hace a las moléculas de agua menos movibles y más estructuradas que en el agua *'ordenada'* [Figura 17] (Puolanne y Halonen, 2010). Los cationes monovalentes Na^+ están clasificados como cosmotrópicos (Wiggins, 1995). Éstos estabilizan las conformaciones nativas de diversas proteínas (Dér *et al.*, 2007).

Por el contrario, los iones caotrópicos (*'structure - breaking'*) tienen un efecto de hidratación opuesto, lo que significa que debilitan los puentes de hidrógeno de las moléculas de agua circundante, haciendo a las moléculas de agua más movibles y menos estructuradas que en el agua 'ordenada' [Figura 17] (Puolanne y Halonen, 2010). Por consiguiente, el agua 'ordenada' tiende a repeler caótropos hacia las interfases (Lo Nostro *et al.*, 2006). Los iones monovalentes Cl^- están clasificados como caótropos (Hribar *et al.*, 2002).

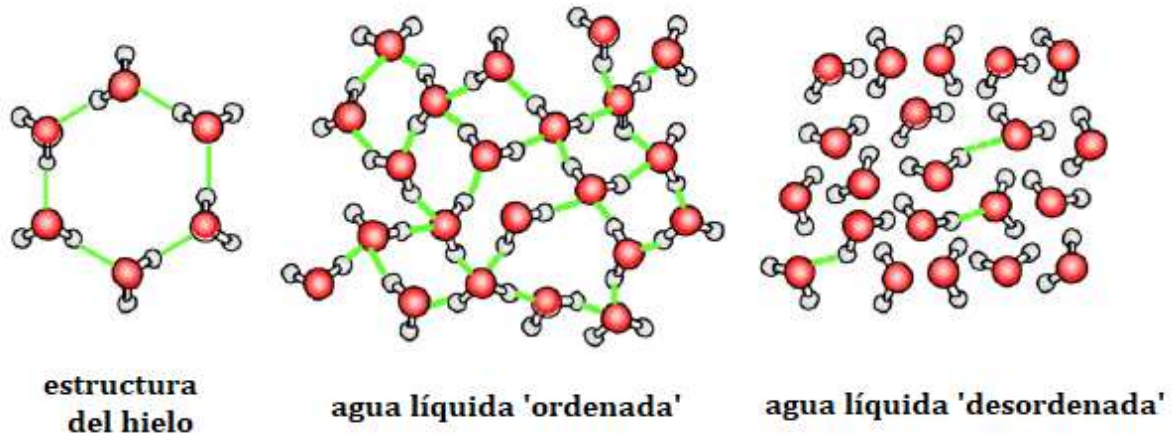


Figura 17. Formas moleculares del agua
Fuente: Moelbert *et al.*, 2004.

El NaCl está iónicamente equilibrado al estar conformado por un ion cosmótropo y uno caótropo, por lo que el efecto de su actividad iónica genera cambios no sustanciales en el medio acuoso, lo que explica el comportamiento prácticamente lineal en el pH de ambas soluciones hipertónicas (10 % NaCl y 20 % NaCl) a lo largo de todo el proceso osmótico (Figura 16).

Tanto el pH interno en la carne (Figura 18a) como el pH superficial (Figura 18b) muestran una tendencia a disminuir cuanto mayor tiempo transcurre en el caso de ambos tratamientos. La razón por la que esto sucede es porque al estar siendo agua liberada al medio, la concentración de solutos en los tejidos musculares aumenta, lo que conlleva a una disminución en el pH. En cuanto al efecto de la concentración de la solución hipertónica sobre el pH interno, sí se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$); en tanto que, para el pH superficial, no se mostraron dichas diferencias ($p > 0.05$). Ello concuerda con lo observado por Dér *et al.* (2007), quienes afirman que los iones Cl^- se acumulan en la interfase proteína-H₂O y, además, son absorbidos hacia las superficies e interfases no polares, lo que significa que pueden ser absorbidos al extremo no polar de las cadenas de arginina, histidina y lisina.

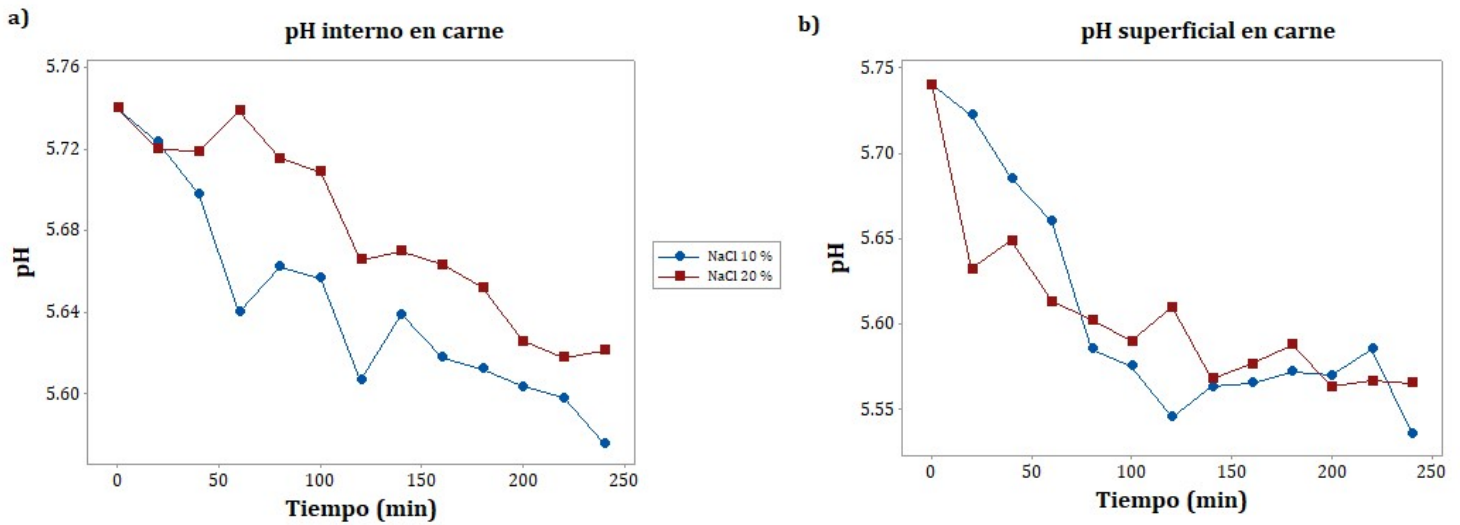


Figura 18. Cambios en el pH de la carne de cerdo durante el proceso de ósmosis

Offer y Knight (1988) propusieron que los iones Cl^- se unen a los filamentos de miosina, pero como las proteínas estructurales son sólidas y no se pueden mover, fuerzas eléctricas jalar los contraiones (iones Na^+) muy cerca de la superficie del filamento, creando así, una distribución desigual de iones en la fase acuosa. Además, el efecto de los aniones es mayor que el de los cationes debido a la asimetría de cargas en la molécula de agua. Así, las diferencias de concentración establecen una presión osmótica dentro de la red de filamentos que, a su vez, empuja las moléculas de agua a la solución osmótica. Dicho fenómeno puede apreciarse en la Figura 19, donde tanto mayor es el tiempo de procesamiento, mayor es el porcentaje de agua removido de las placas de carne.

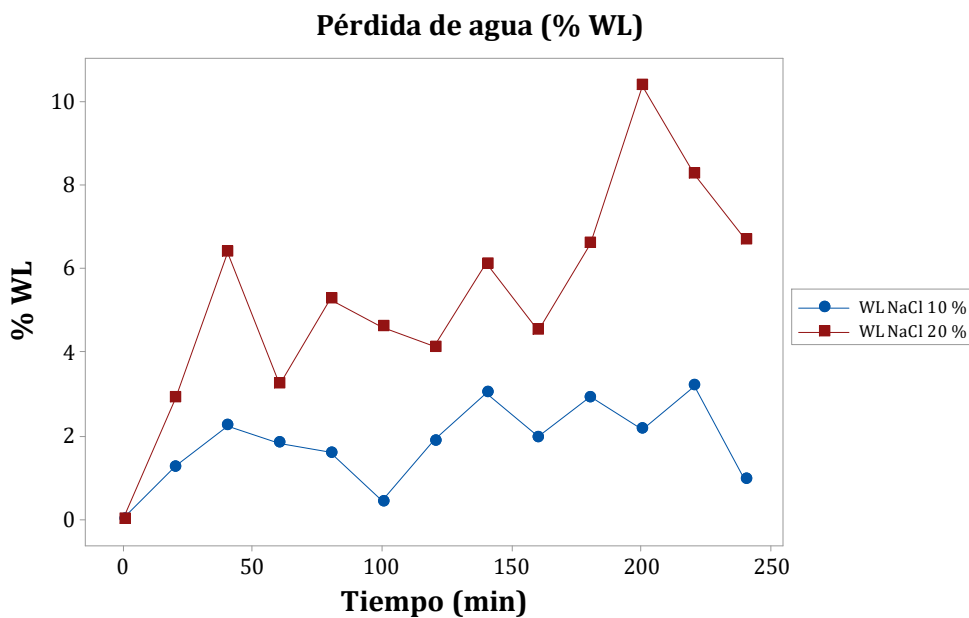


Figura 19. Pérdida de agua en la carne de cerdo al finalizar el proceso de ósmosis

Lo anterior, puede contrastarse con los resultados obtenidos de actividad de agua (A_w). La Figura 20 muestra que hubo un decremento en la A_w de todas las muestras conforme incrementó el tiempo de tratamiento osmótico, así como cuando se duplicó la concentración de la solución hipertónica; lo cual, tiene sentido si se considera que cuanto mayor cantidad de agua se retira, menor será la cantidad de agua disponible presente en las placas de carne y, por ende, también se ve disminuida la A_w .

Puede apreciarse, además, en la curva correspondiente al tratamiento con solución de NaCl al 20 % que cuando se alcanza el minuto 140, la A_w permanece constante; a diferencia del primer tratamiento, en el que sigue disminuyendo.

En ambos casos -% WL y A_w - se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en relación con la concentración de las soluciones hipertónicas.

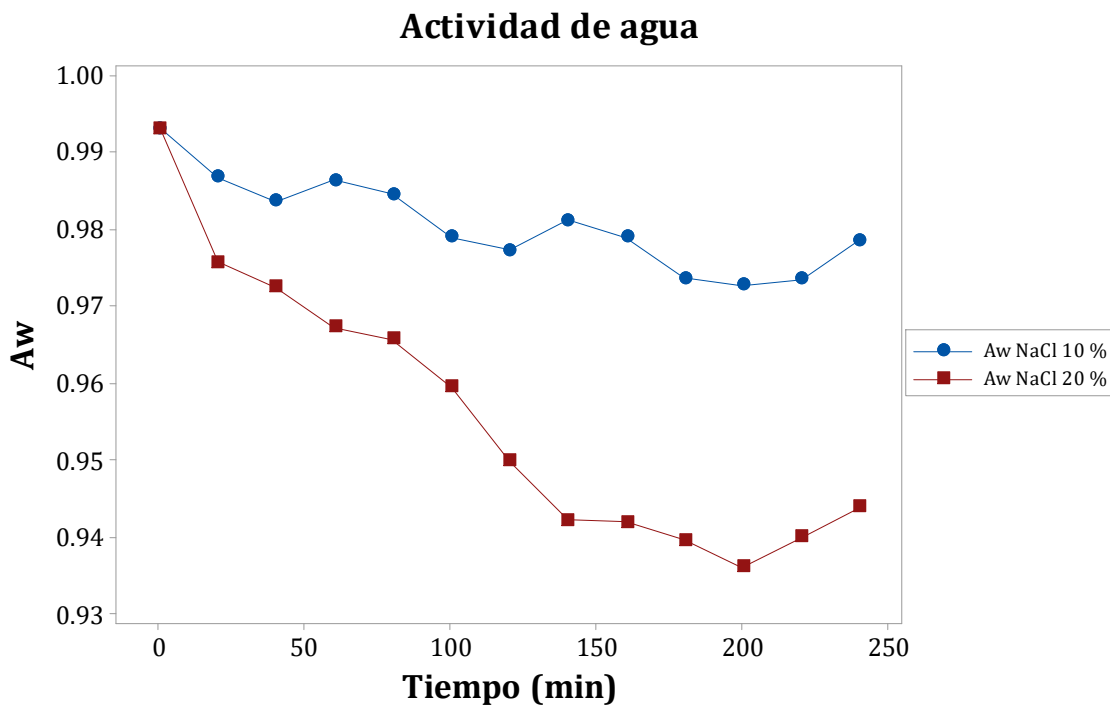


Figura 20. Cambios en la A_w de las placas de carne durante el proceso de ósmosis

Por los motivos descritos anteriormente, se tomó la decisión de elegir éstas como las condiciones para llevar a cabo el proceso de ósmosis previo a la congelación, es decir: solución hipertónica de NaCl al 20 % y 140 minutos de procesamiento.

3.2. Evaluación de la congelación

3.2.1. Historia térmica

Se realizó la historia térmica (Figura 21) durante la congelación de la carne fresca (Control) y la adicionada con NaCl (Ósmosis). En ésta se observa el efecto que produce la adición de NaCl mediante el tratamiento osmótico a la carne. Asimismo, se precisa cómo efectivamente la presencia de sales retarda el crecimiento de los cristales de hielo, lo que supone también una disminución en el punto inicial de congelación. En ausencia de sal, el crecimiento de hielo ocurre rápidamente, tan es así que el punto donde inicia la nucleación es prácticamente imperceptible. La diferencia entre la temperatura inicial de nucleación y la temperatura del punto inicial de congelación se define como grado de superenfriamiento (Cheng *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2019). La calidad de los alimentos congelados se ve mejorada con el incremento del grado de superenfriamiento. En general, los grados de superenfriamiento altos pueden inducir cristales de hielo más pequeños, tanto dentro como fuera de las células. Por el contrario, grados de superenfriamiento bajos resultan en la formación de cristales de hielo grandes en el espacio intercelular (Cheng *et al.*, 2014). El grado de superenfriamiento fue de 3.48 °C en el caso de las placas de carne sometidas al tratamiento osmótico en tanto que para el tratamiento control fue de 0.13 °C. De esta forma, por lo que se puede observar en la Figura 21, se esperaría que el lomo de cerdo con tratamiento osmótico presente menor daño tisular.

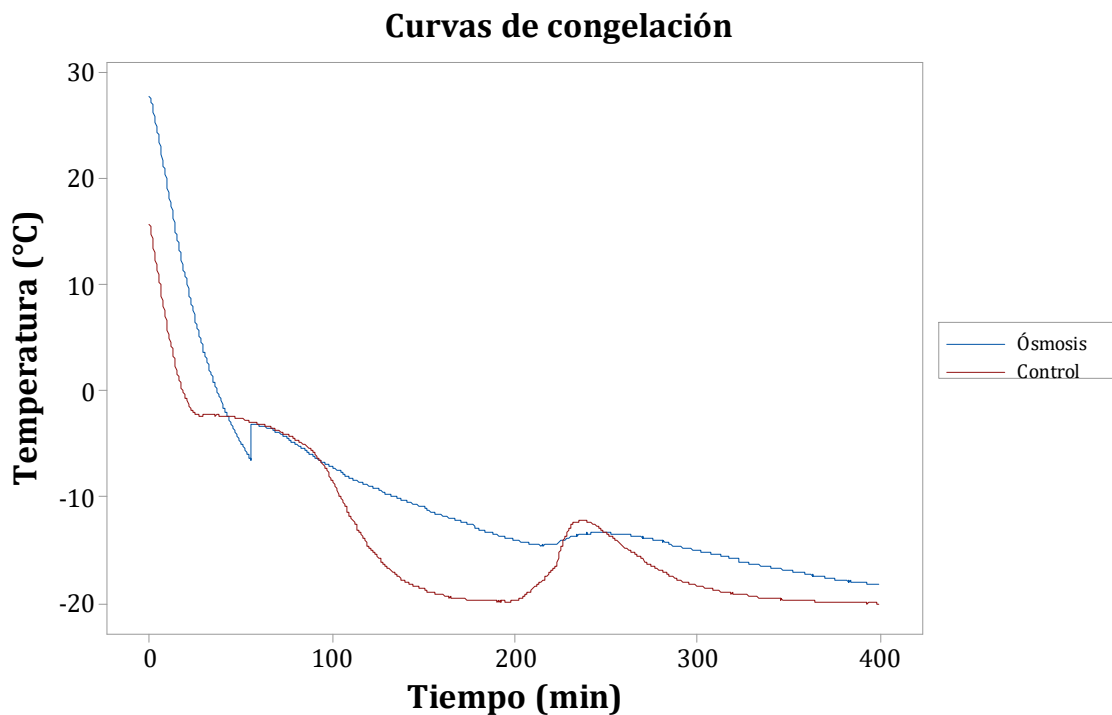


Figura 21. Historia térmica del proceso de congelación de la carne de cerdo

Como consecuencia de las diferencias observadas en los dos perfiles de temperatura, se obtuvieron parámetros significativamente diferentes ($p < 0.05$) en lo que respecta al punto inicial de congelación, el tiempo y la velocidad de congelación. Estos valores se vieron reflejados también en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas evaluadas posteriormente.

3.2.2. Punto inicial de congelación (PIC), tiempo y velocidad de congelación

De la historia térmica (Figura 21) se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4, para ello se determinaron las derivadas mediante el uso del programa OriginPro 8 (OriginLab Corporation, USA). Dichos resultados concuerdan con los reportados por James *et al.* (2005), Anderson *et al.* (2004) y Levy (1982).

Tabla 4. PIC y velocidad de enfriamiento de la carne de cerdo

Muestra	PIC (°C)	Tiempo de congelación (min)	Velocidad de congelación (°C/h)
Control	-2.23 ± 0.01	211.20 ± 0.44	1.45 ± 0.01
Ósmosis	-3.00 ± 0.07	191.40 ± 0.11	2.17 ± 0.01

Promedio ± desviación estándar

Como era esperado, el PIC de las muestras de lomo de cerdo se vio afectado por la presencia de sales, observándose una disminución considerable debido a la presencia de solutos. Estudios previos sugieren que el daño estructural al tejido debido al proceso de congelación es altamente dependiente del tamaño y la ubicación de la formación de cristales de hielo. Los factores principales que determinan el tamaño y la ubicación de los cristales de hielo son precisamente el PIC y el tiempo de congelación (Grujić *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 2018). El tiempo de congelación de ósmosis fue menor y, por ende, la velocidad de congelación mayor. Opuestamente, la muestra control presentó un tiempo de congelación mayor y, en consecuencia, una velocidad de congelación menor. Por lo tanto, es razonable aseverar que las placas de lomo de cerdo sometidas al tratamiento osmótico presentaron daño criogénico del tejido muscular en menor grado en comparación con las placas de carne control, debido a la formación de cristales de hielo intracelulares más pequeños formados en las células musculares. Adicionalmente, una congelación rápida, conlleva a la formación de cristales pequeños, en tanto que una congelación lenta produce cristales alargados en forma de aguja. Por lo que se esperaría que los cristales formados en la carne adicionada con NaCl fuesen más pequeños, al haber sido este tratamiento con el que se obtuvo una velocidad de congelación mayor; como lo sugieren estudios previos, en los que se estableció que los cristales de hielo intracelulares con diámetros pequeños se forman bajo condiciones de congelación más rápidas (Grujić *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 2015).

3.3. Evaluación de la descongelación

3.3.1. Historia térmica

Las curvas de descongelación se presentan en la Figura 22, como puede apreciarse, no existe diferencia significativa ($p>0.05$) entre ambos tratamientos excepto por el punto inicial de la curva, que se atribuyó como punto inicial de fusión (PIF).

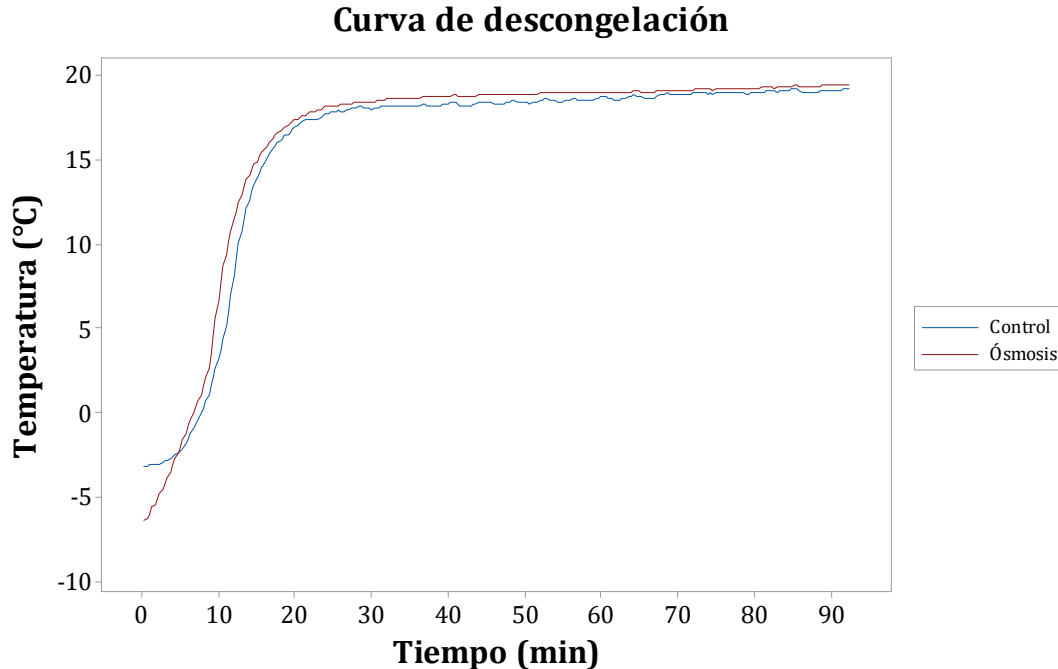


Figura 22. Curva de descongelación de la carne de cerdo

Los tiempos de descongelación correspondientes a cada uno de los tratamientos a los que se sometió la carne de cerdo obtenidos de esta historia térmica se encuentran indicados en la Tabla 5. El tiempo de descongelación fue definido como el tiempo requerido por la temperatura del centro térmico de las placas de lomo de cerdo para alcanzar 20 °C. Dicha información concuerda con la reportada por James *et al.* (2005) pero difiere de la reportada por Lee *et al.* (2021). Los tiempos de descongelación –por refrigeración– obtenidos por dichos autores triplican a los reportados en el presente estudio.

Tabla 5. Determinación del PIF y el tiempo de descongelación de la carne de cerdo

Muestra	PIF (°C)	Tiempo de descongelación (min)
Control	-3.02 ± 0.03	18.1 ± 0.06
Ósmosis	-6.08 ± 0.02	18.3 ± 0.04

Promedio \pm desviación estándar

El tiempo que toma a la descongelación de las muestras sometidas a ósmosis no es significativamente diferente ($p>0.05$) comparado con el de las muestras de carne fresca. Esto puede atribuirse a la diferencia de temperatura entre el medio de descongelación (agua) y las muestras congeladas de carne de cerdo, la cual actúa como fuerza impulsora en el proceso de congelación y descongelación (Lee *et al.*, 2021). Por ende, la descongelación por inmersión en agua reduce efectivamente el tiempo de descongelación de las muestras de carne de cerdo. Un periodo de descongelación largo puede deteriorar la calidad de la carne ya que ocurren diversos cambios bioquímicos y físicos durante el proceso, tales como: pérdida de humedad, desnaturalización de las proteínas, oxidación de lípidos, cambios de color, endurecimiento y crecimiento microbiológico (Lee *et al.*, 2021; Li y Sun, 2002; Petrović *et al.*, 1993).

3.4.pH

El pH de la carne que ha sido congelada y descongelada tiende a ser menor que previo a la congelación. Como el pH es una medida de la cantidad de iones hidrógeno libres (H^+) en una solución, es posible que la congelación con la subsecuente producción de exudados cause desnaturalización de las proteínas, la liberación de iones hidrógeno y, por ende, un descenso en el pH como se observa en la Figura 23; donde la carne fresca presenta un valor mayor del pH en comparación con el lomo de cerdo sometido a tratamientos posteriores, siendo la carne osmóticamente tratada y luego congelada la de menor valor. Se observa también que no existen diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$) entre la carne sometida a congelación y la tratada osmóticamente pero sí entre la carne control y dichos tratamientos, así como entre la carne fresca y la que fue sometida a los dos tratamientos (ósmosis y congelación). Dichos resultados coinciden con los reportados por Aliño *et al.* (2010) y Zequan *et al.* (2019).

En general, el proceso de congelación/descongelación produce una disminución del pH de la carne debido a la desnaturalización de las proteínas buffer y/o un incremento en la concentración de solutos acompañados de pérdida de agua (Leygonie *et al.*, 2012). Los resultados presentados en este estudio concuerdan con dicha aseveración, ya que el pH de todos los tratamientos disminuyó con respecto del de la carne fresca. Leygonie *et al.* (2012) señalan, además, que la pérdida de agua durante la descongelación podría incrementar la concentración de iones hidrógeno en la carne congelada/descongelada, lo que contribuye al descenso del pH. Por ende, la diferencia de pH entre los tratamientos está relacionada con el grado de pérdida de agua durante el proceso de congelación/descongelación, pero también con el tratamiento osmótico.

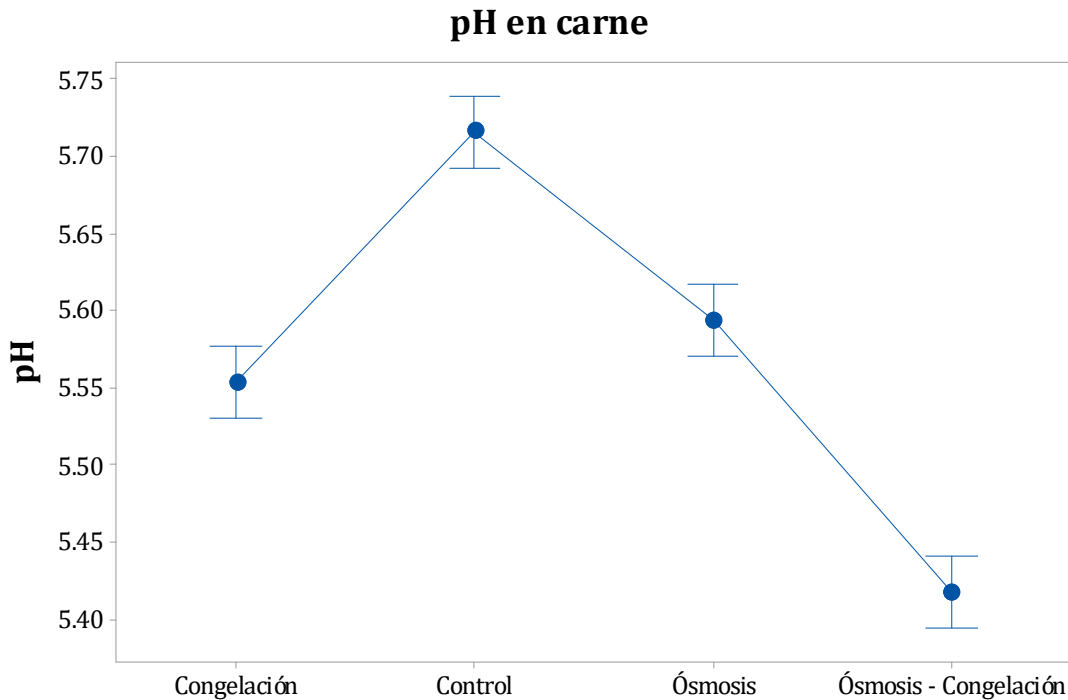


Figura 23. pH de la carne de cerdo sometida a los diversos tratamientos

Alternativamente, la pérdida de fluido del tejido de la carne puede causar un incremento en la concentración de solutos, lo que resulta en una disminución del pH; lo que explica por qué el lomo de cerdo con el tratamiento ósmosis – congelación presentó el valor menor de pH. Otra explicación para este suceso involucra la desaminación de las proteínas por acción enzimática o microbiológica, con la consecuente liberación de átomos de hidrógeno (Leygonie *et al.*, 2011).

3.5. Evaluación histológica

Las imágenes de las secciones longitudinales observadas en el estereomicroscopio de las placas de carne de cerdo a 35x se presentan en la Figura 24. Las muestras control exhibieron mayor daño estructural que aquellas con tratamiento osmótico previo. Diversos estudios han demostrado que las velocidades de congelación menores causan daño estructural notorio de las fibras musculares como resultado de la presión ocasionada por los cristales de hielo de tamaño grande formados entre las fibras (Grujić *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 2018). Los daños estructurales menos severos fueron observados en el lomo de cerdo con pretratamiento osmótico (Figura 24b). Generalmente, los espacios entre las fibras musculares en carne congelada/descongelada se han observado debido a la contracción de las fibras musculares y la ruptura del endomisio (Qi *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2018).

Durante la congelación los centros de cristalización se forman primero en los espacios intercelulares. La congelación de esta porción de agua incrementa la concentración de los

sólidos disueltos en el agua remanente, y esto incrementa la presión osmótica del líquido en los espacios intercelulares. Con el fin de igualar la concentración de sólidos en el agua inter- e intrafibrilar, el agua se difunde desde las fibras hasta los espacios intercelulares. Esta agua se congela uniéndose a los cristales ya formados, causando que crezcan. Cuando la temperatura de la carne disminuye hasta el valor que permite la formación de centros de cristalización entre las fibras, esto último no ocurre porque, como lo reportaron Grujić *et al.* (1993), desde el punto de vista termodinámico, el crecimiento de cristales ya existentes es más probable que el proceso de formación de centros de cristalización adicionales. Al haber menor cantidad de agua disponible en las muestras sometidas al tratamiento osmótico es menor también la cantidad de agua que se difunde desde el interior de las células hacia los espacios interfibrilares por lo que se formaron menos núcleos de hielo y como consecuencia, el daño tisular también se vio disminuido.

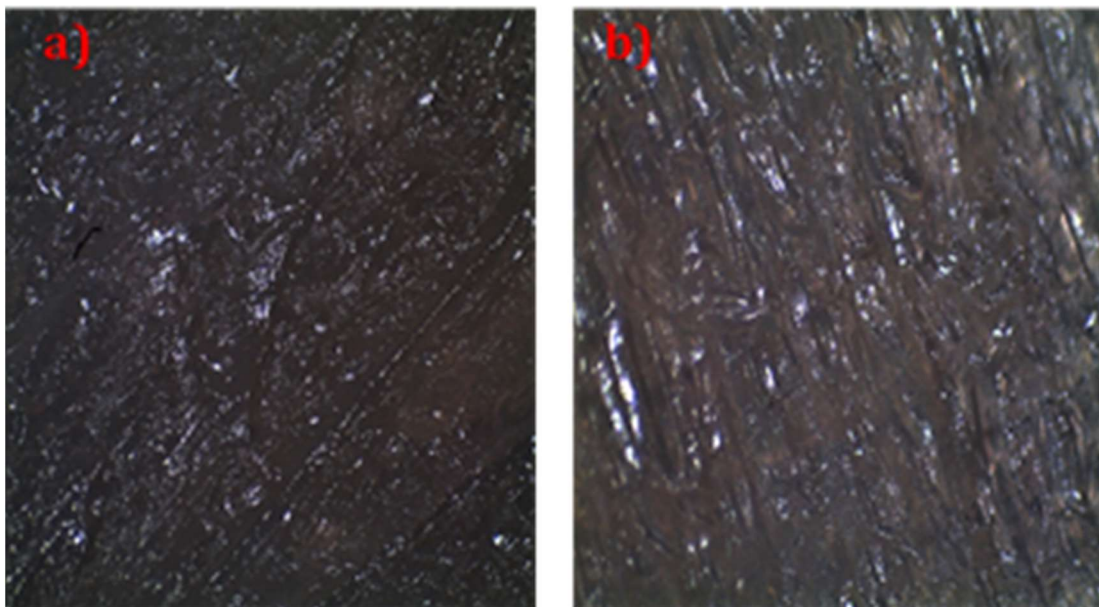


Figura 24. Micrografías a 35x del tejido muscular de la carne de cerdo sometida a dos procesos diferentes. a) Congelación. b) Ósmosis – congelación.

En la Figura 24b los espacios intercelulares formados por los cristales de hielo son más regulares, las cavidades son más pequeñas y uniformes que las de la Figura 24a; lo cual coincide con el tiempo de congelación obtenido, pues la muestra con tratamiento osmótico previo a la congelación tardó menos tiempo en ser congelada; en concordancia con Jiang *et al.* (2019), quienes observaron que después de la incorporación de NaCl en carne, los espacios intracelulares se vuelven más pequeños y mantienen formas más regulares, en comparación con la carne a la que no se adiciona sal.

Si la velocidad de congelación es lenta y el tiempo de congelación es largo, los cristales de hielo crecen en los espacios extracelulares, lo que deforma y rompe las paredes celulares y,

durante la descongelación, las células son incapaces de recuperar su forma, dando como resultado una carne blanda y con mayor cantidad de exudado, como sucedió con la muestra de la Figura 24a.

De las fibras aparentemente deformadas en las muestras sin la presencia de sal, se puede especular que estos tejidos fueron sujetos a una gran presión ejercida por los cristales de hielo durante el proceso de congelación – descongelación, y liberaron fluidos celulares a los espacios intracelulares. Estos espacios extracelulares son considerados responsables del incremento de exudados y la formación de un mayor número de canales con mayor diámetro durante la descongelación (Jiang *et al.*, 2019).

3.6. Evaluación de la resistencia al corte

En diversos estudios (Leygonie *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2018; Zequan *et al.*, 2019) se ha reportado una disminución en la fuerza de corte luego del proceso de congelación – descongelación debido principalmente, al daño físico y estructural asociado con la formación de cristales de hielo. Este comportamiento puede observarse en la Figura 25 donde se presentan las curvas que representan la fuerza de corte de cada uno de los tratamientos empleados en la carne de lomo de cerdo.

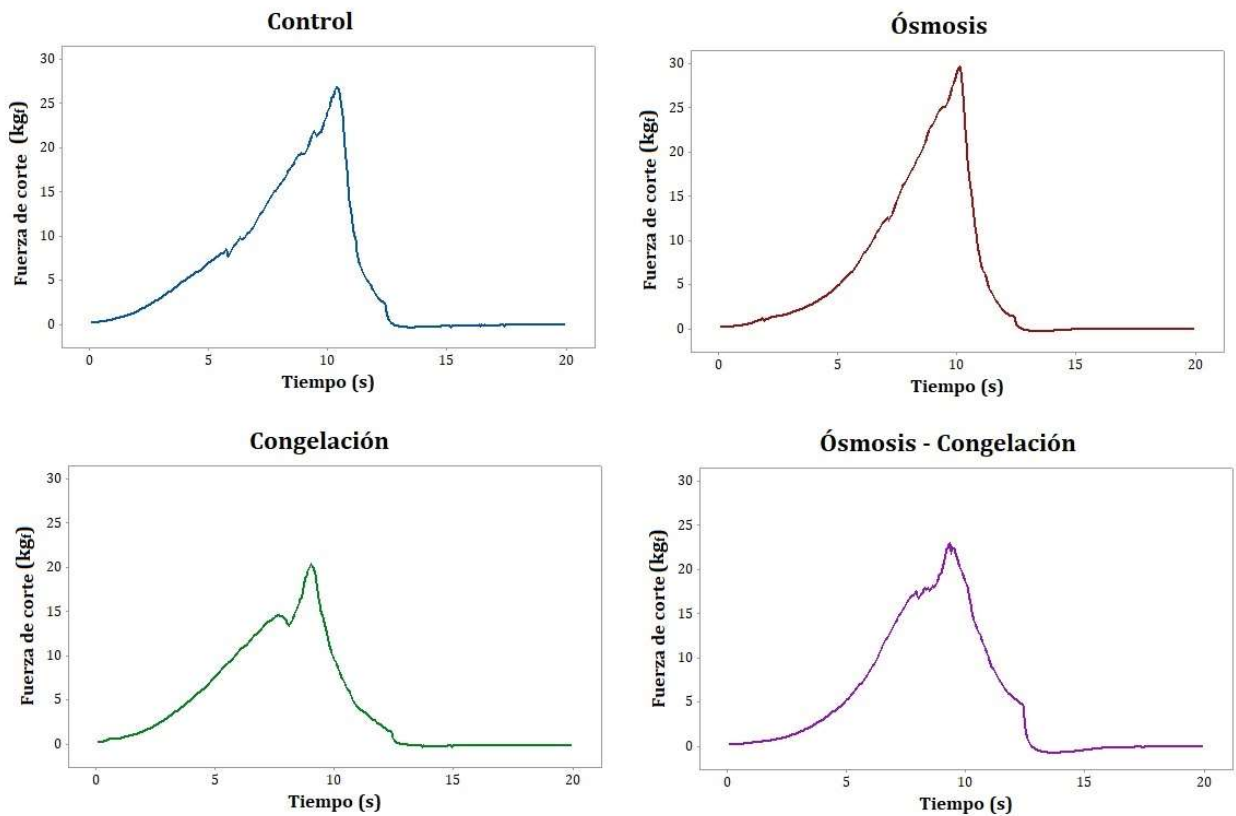


Figura 25. Evaluación de la fuerza de corte de la carne de cerdo sometida a los diversos tratamientos

En la Figura 25 se aprecian dos picos característicos en la curva, el primero indica la fuerza inicial y está asociado con los componentes miofibrilares; y el máximo es causado principalmente por la fuerza del tejido conectivo; como fue observado también por Möller *et al.* (1981) y Girard *et al.* (2012).

Los tratamientos de ósmosis, congelación y ósmosis - congelación afectaron significativamente ($p < 0.05$) la fuerza de corte de las muestras de lomo de cerdo (Tabla 6). El valor mayor fue observado en el lomo de cerdo con tratamiento osmótico en tanto que el menor se presentó en la carne congelada (sin pretratamiento). Asimismo, las placas de lomo de cerdo sometidas a congelación y ósmosis - congelación presentaron valores de fuerza de corte significativamente menores ($p < 0.05$) que sus contrapartes control y ósmosis, respectivamente. Estos resultados se encuentran dentro del intervalo de fuerza de corte en carne de cerdo (2.7 - 30.2 kgf) reportado por Bickerstaffe *et al.* (2001).

Tabla 6. Fuerza de corte máxima de los diferentes tratamientos en lomo de cerdo.

Tratamiento	Fuerza de corte máxima (kgf)
Control	26.852
Ósmosis	29.678
Congelación	20.442
Ósmosis - Congelación	23.066

Debido a que la carne fresca presentó mayor cantidad de exudados, esto por la formación de cristales más grandes, es también la que presenta una menor fuerza de corte; en oposición a la muestra sometida a ósmosis, en la que se requiere mayor fuerza para ser cortada, pues la cantidad de agua inicial era menor que en el resto y por lo tanto, se formaron cristales más pequeños y en menor cantidad, lo que conduce también a tener menos exudados y por ende, opone mayor resistencia al corte. Petrović *et al.* (1993) reportaron que la solubilidad de las proteínas miofibrilares y la terneza de la carne incrementan con velocidades de congelación mayores, lo que podría haber resultado de la formación de pequeños cristales de hielo intracelulares, lo que conlleva a una menor desnaturalización de las proteínas en comparación con velocidades de congelación menores. Cabe recordar que la velocidad de congelación mayor se obtuvo con el tratamiento osmótico, por lo que la aseveración anterior concuerda con lo observado en el presente estudio. Todo lo anterior, aunado al proceso de contracción de las proteínas, por la presencia de iones Cl^- , lo que hace más rígida la carne. Adicionalmente, Pietrasik y Janz (2009) concluyeron que la fuerza de corte en la carne es proporcional a la formación de hielo intracelular que conduce a la ruptura de fibras musculares y a la expansión del tejido conectivo. Es decir, que tanto mayor es la cantidad de cristales de hielo intracelular formados durante la congelación, la carne es más propensa a daños en su estructura fibrilar, lo que conlleva a una menor fuerza de corte -lo que coincide con lo analizado en la Figura 24-. Asimismo, los cristales de hielo grandes en la carne sin adición de sal causan mayor

estrés a los componentes celulares no congelados después de la congelación y la habilidad para recuperar la microestructura tisular disminuye después de la congelación (Jiang *et al.*, 2019).

3.7. Evaluación del perfil de color

La Tabla 7 resume los resultados obtenidos de la evaluación del perfil de color en cada uno de los tratamientos empleados de acuerdo con el sistema *CIE* (L^* , a^* y b^*), que coincidieron con los obtenidos por Kim *et al.* (2013) y Xia *et al.* (2009).

Tabla 7. Cambios en el color de la carne de cerdo sometida a diversos tratamientos

	Control	Congelación	Ósmosis	Ósmosis - Congelación
L^*	76.78 ± 0.70^a	73.99 ± 0.93^a	69.19 ± 0.55^b	71.25 ± 1.18^b
a^*	24.50 ± 0.34^a	26.07 ± 1.84^a	17.05 ± 0.83^b	16.57 ± 1.81^b
b^*	6.11 ± 0.38^a	4.29 ± 0.03^b	4.46 ± 1.21^b	9.00 ± 0.63^c

Promedio \pm desviación estándar

a, b, c Los promedios con diferentes letras en la misma fila son significativamente diferentes ($p < 0.05$)

Las placas de carne sin tratamiento osmótico exhiben valores de L^* , a^* y b^* significativamente ($p < 0.05$) mayores que aquellas con presencia de sales.

Donde se observó más notoriamente el cambio fue en los valores de a^* . Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Baublits *et al.* (2006) y por Pietrasik y Janz (2009), quienes reportaron un descenso lineal de los valores a^* a medida que la concentración de sal incrementa. Dichos autores sugirieron que la disminución de la tonalidad roja podría estar en función de un incremento en la retención de agua con el respectivo incremento en la fuerza iónica y, por ende, un decremento en la penetración de oxígeno. Adicionalmente, Leygonie *et al.* (2012) reportaron que la desnaturalización de la molécula de mioglobina ocurre en alguna etapa de la congelación. Dicha desnaturalización incrementa la susceptibilidad de la mioglobina a la autooxidación y subsecuentemente, la pérdida de color. Es debido a esto, que se observan cambios drásticos en el valor de a^* , que representa el color rojo en la escala *CIE*, color característico de la mioglobina.

En cuanto al valor de L^* , las diferencias en luminosidad podrían deberse a las diferencias de pH entre los tratamientos empleados (Figura 23). Robbins *et al.*, (2002) reportaron un color más oscuro en carne de res inyectada con fosfatos, sugiriendo que el efecto sobre el color fue un resultado del incremento del pH. La carne con un pH mayor es más oscura porque su superficie dispersa menos luz que la carne con un pH

bajo (Lawrie, 1998). En el caso del tratamiento de ósmosis, el valor se ve muy reducido con respecto del control debido a la pérdida de aire, un efecto producido por la sustitución total o parcial de aire presente en los poros por la impregnación de la solución hipertónica (Andreou *et al.*, 2018).

Finalmente, en cuanto a los valores de b^* , los valores obtenidos para la carne sometida a ósmosis y congelación no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$) con respecto del control; sin embargo, se observó un incremento significativo ($p<0.05$) en dicho valor para la muestra congelada con tratamiento osmótico previo. Dicho fenómeno fue observado también por Jeong *et al.* (2011), quienes reportaron que en músculos bovinos un incremento en la coloración amarilla estaba acompañado de un decremento en la coloración roja durante el almacenamiento. Aunado a ello, un incremento en la oxidación lipídica en carne de porcino durante el proceso de congelación - descongelación coincide con un incremento en el valor de b^* (Xia *et al.*, 2009). Estos resultados sugieren que la formación del pigmento amarillo en carne de cerdo podría deberse a reacciones de pardeamiento no enzimático entre productos de la oxidación lipídica y el grupo amino de las proteínas. Conjuntamente, la disminución de la coloración rojiza y el incremento de la pigmentación amarilla inducidos por la congelación - descongelación pudieron ser causados por la formación de metamioglobina (Xia *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

El tratamiento osmótico previo a la congelación resultó ser un tratamiento adecuado pues tiene la capacidad de inducir la nucleación a una temperatura más baja y, por lo tanto, la generación de cristales de hielo más pequeños.

La incorporación de NaCl a la carne antes de llevar a cabo la congelación resultó en un ordenamiento compacto y paralelo de las fibras musculares, lo que produjo un menor daño estructural y permitió que hubiera menor cantidad de exudados.

En cuanto a la fuerza de corte, los cambios son también positivos pues la fuerza de corte máxima de las muestras con tratamiento osmótico/congelación es menor que la de el lomo de cerdo sin tratamiento, pero no tan baja como la de la carne que únicamente fue congelada. Sin embargo, contribuye negativamente en los parámetros del perfil de color al reducir significativamente los valores de a^* , color característico de la mioglobina.

El tiempo de descongelación de las placas de carne sometidas a tratamiento osmótico no resultó ser significativamente diferente con respecto del tratamiento control. No obstante, el empleo de agua como medio de descongelación produjo efectivamente que dichos tiempos de descongelación fueran bajos al generar una gran diferencia de temperatura entre esta y las muestras de lomo de cerdo.

Todo ello favorece la disminución del PIC, el tiempo y la velocidad de congelación, lo que supone un menor requerimiento energético y, por lo tanto, menores costos de producción cuando se trata de la comercialización de alimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbarian, M., Ghasemkhani, N., Moayedi, F. (2014). *Osmotic dehydration of fruits in food industrial: a review*. International Journal of Bioscience, 4, 42 – 57.
- Alam, M. M., Islam, M. N. (2013). *Effect of process parameters on the effectiveness of osmotic dehydration of summer onion*. International Food Research Journal, 20, 391 – 396.
- Aliño, M., Grau, R., Fernández – Sánchez, A., Arnold, A., Barat, J. M. (2010). *Influence of brine concentration on swelling pressure of pork meat throughout salting*. Meat Science, 86, 600 – 606.
- Allali, H., Marchal, L., Vorobiev, E. (2009). *Effect of blanching by ohmic heating on the osmotic dehydration behavior of apple cubes*. Drying Technology, 27, 739 – 746.
- Allali, H., Marchal, L., Vorobiev, E. (2010). *Effects of vacuum impregnation and ohmic heating with citric acid on the behaviour of osmotic dehydration and structural changes of apple fruit*. Biosystems Engineering, 106, 6 – 13.
- American Meat Science Association [AMSA]. (2012). *Meat Color Measurement Guidelines*. Illinois, USA.
- Anderson, B. A., Sun, S., Erdogdu, F., Singh, R. P. (2004). *Thawing and freezing of selected meat products in household refrigerators*. International Journal of Refrigeration, 27, 63 – 72.
- Andreou, V., Tsironi, T., Dermesonlouoglou, E., Katsaros, G., Taoukis, P. (2018). *Combinatory effect of osmotic and high – pressure processing on shelf life extension of animal origin products*. Food Packaging and Shelf Life, 15, 43 – 51.
- Bailey, K. (1954). *The proteins*, Part B, vol. II. En Neurath, H., Bailey, K. (Eds.), Academic Press, New York, p. 951.
- Baublits, R. T., Pohlman, F. W., Brown Jr., A. H., Yancey, E. J., Johnson, Z. B. (2006). *Impact of muscle type and sodium chloride concentration on the quality, sensory and instrumental color characteristics of solution enhanced whole – muscle beef*. Meat Science, 72, 704 – 712.
- Bekele, Y., Ramaswamy, H. (2010). *Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings*. Journal of Applied Science and Technology, 1, 1 – 15.
- Bickerstaffe, R., Bekhit, A. E. D., Robertson, L. J., Roberts, N., Geesink, G. H. (2001). *Impact of introducing specifications on the tenderness of retail meat*. Meat Science, 59, 303 – 315.
- Campos, C. D. M., Sato, A. C. K., Tonon, R. V., Hubinger, M. D., Cunha, R. L. (2012). *Effect of process variables on the osmotic dehydration of star – fruit slices*. Ciencia y Tecnología Alimentaria Campinas, 32, 357 – 365.
- Cheng, X., Zhang, M., Adhikari, B., Islam, M. N., Xu, B. (2014). *Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound – assisted immersion freezing of strawberries*. International Journal of Refrigeration, 44, 49 – 55.
- Dér, A., Kelemen, L., Fabián, L., Taneva, S. G., Fodor, E., Páli, T. (2007). *Interfacial water structure controls protein conformation*. Journal of Physical Chemistry B, 111, 5344 – 5350.
- Dermesonlouoglou, E., Bimpilas, A., Andreou, V., Katsaros, G. J., Giannakourou, M. C., Taoukis, P. S. (2016). *Process optimization and kinetic modeling of quality of freshcut strawberry cubes pretreated by high pressure and osmosis*. Journal of Food Processing and Preservation. 1745 – 4549.
- Dixon, G. M. y Jen, J. J. (1977). *Changes of sugar and acid in osmovac dried apple slices*. Journal of Food Science, 42, 1126 – 1131.
- Erle, U., Schubert, H. (2001). *Combined osmotic and microwave – vacuum dehydration of apples and strawberries*. Journal of Food Engineering, 49, 193 – 199.

- Faustman, C., Suman, S. P. (2017). *The Eating Quality of Meat: I – Color*. En Toldrá, F. (Ed.), *Lawrie's Meat Science* (8th ed.), Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 329 – 356.
- Feiner, G. (2016). *Color in cured Meat Products and Fresh Meat*. En *Salami: Practical Science and Processing Technology*, Academic Press, 89 – 101.
- Fellows, P. J. (2017). *Freezing*. En *Food Processing Technology: Principles and Practice*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 885 – 928.
- Fernández – Salguero, J., Gómez, R., Carmona, M. A. (1994). *Water activity of Spanish intermediate – moisture meat products*. *Meat Science*, 38, 341 – 346.
- Fito, P., Andres, A., Chiralt, A., Pardo, P. (1996). *Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation – relaxation phenomena during vacuum treatments in solids porous foods liquid systems*. *Journal of Food Engineering*, 27, 229 – 240.
- Furst, D.O., Osborn, M., Nave, R., Weber, K. (1988). *The organization of titin filaments in the half-sarcomere revealed by monoclonal antibodies in immunoelectron microscopy: a map of ten nonrepetitive epitopes starting at the Z-line extends close to the M line*. *J. Cell Biol.* 106, 1563–1572.
- García, M., Díaz, R., Martínez, Y., Casariego, A. (2010). *Effects of chitosan coating on mass transfer during osmotic dehydration of papaya*. *Food Research International*, 43, 4656 – 1660.
- García – Segovia, P., Pagán – Moreno, M. J., Martínez – Monzó, J. (2014). *Texture in meat and fish products*. En Cruz, R. M. S., Khmelinskii, I., Vieira, M. (Eds.), *Methods in Food Analysis*. CRC Press, Boca Raton, FL, 76 – 109.
- Gheybi, F., Rahman, R. A., Bakar, J. B., Aziz, S. H. A. (2013). *Optimization of osmotic dehydration of honeydew using response surface methodology*. *International Journal of Agriculture and Crop Science*, 5, 2308 – 2317.
- Giancomo, R., Torreggiani, D., Abbo, E. (1987). *Osmotic dehydration of Fruit Part I: sugar exchange between fruit and extracting syrup*. *Journal of Food Processing and Preservation*, 11, 183 – 195.
- Girard, I., Bruce, H. L., Basarab, J. A., Larsen, I. L., Aalhus, J. L. (2012). *Contribution of myofibrillar and connective tissue components to the Warner – Bratzler shear force of cooked beef*. *Meat Science*, 92, 775 – 782.
- Gou, W., Greaser, M.L. (2017). *Muscle structure, proteins, and meat quality*. Purslow, P.P., *New Aspects of Meat Quality – From Genes to Ethics*. Woodhead Publishing. ISBN: 9780081005934 (Chapter 2), 13 – 32.
- Granzier, H.L., Labeit, S. (2004). *The giant protein titin: a major player in myocardial mechanics, signaling, and disease*. *Circ. Res.* 94, 284–295.
- Gregorio, C.G., Trombitás, K., Centner, T., et al. (1998). *The NH2 terminus of titin spans the Z-disc: its interaction with a novel 19-kD ligand (T-cap) is required for sarcomeric integrity*. *J. Cell Biol.* 143, 1013–1027.
- Grujić, R., Petrović, L., Pikula, B., Amidžić, L. (1993). *Definition of the optimum freezing rate – 1. Investigation of structure and ultrastructure of beef M. Longissimus dorsi frozen at different freezing rates*. *Meat Science*, 33, 301 – 318.
- Grzegory, P., Piotrowski, D., Bargiel, K. (2013). *Influence of freezing treatment, osmotic dehydration and storage time on the rehydration of vacuum dried strawberries*. *Polish Society of Agricultural Engineering*, 4, 39 – 47.
- Guo, W., Bharmal, S.J., Esbona, K., Greaser, M.L. (2010). *Titin diversity—alternative splicing gone wild*. *J. Biomed. Biotechnol.* 1–8.

- Gupta, R., Singh, B., Shivhare, U. S. (2012). *Optimization of osmo – convective dehydration process for development of honey – ginger candy using response surface methodology*. Drying Technology, 30, 750 – 759.
- Gutzke, D., Trout, G. R. (2002). *Temperature and pH dependence of the autoxidation rate of bovine, ovine, porcine, and cervine oxymyoglobin isolated from three different muscles – Longissimus dorsi, Gluteus medius, and Biceps femoris*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50, 2673 – 2678.
- Honikel, K. O. (1998). *Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat*. Meat Science, 49(4), 447 – 457.
- Horowitz, R., Kempner, E.S., Bisher, M.E., Podolsky, R.J. (1986). *A physiological role for titin and nebulin in skeletal muscle*. Nature 322, 160–164.
- Hribar, B., Southall, N. T., Vlachy, V., Dill, K. A. (2002). *How ions affect the structure of water*. Journal of the American Society, 124, 12302 – 12311.
- IIR. (1986). *Recommendations for the Processing and Handling of Frozen Foods*, 3rd ed. International Institute of Refrigeration, París, Francia.
- James, C., Lejay, N., Tortosa, N., Aizpurua, X., James, S. J. (2005). *The effect of salt concentration on the freezing point of meat simulants*. International Journal of Refrigeration, 28, 933 – 939.
- Jeong, J.Y., Kim, G. D., Yang, H. S., Joo, S. T. (2011). *Effect of freeze – thaw cycles on physicochemical properties and color stability of beef semimembranous muscle*. Food Research International, 44, 3222 – 3228.
- Jiang, Q., Nakazawa, N., Hu, Y., Osako, K., Okazaki, E. (2019). *Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze – thaw cycles*. Food Chemistry, 293, 178 – 186.
- Kauffman, R. G. (2001). *Meat composition*. In Y. H. Hui, W. K. Nip, R. W. Rogers, & O. A. Young (Eds.), Meat Science and Applications (pp. 1–19). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Kim, G. D., Jung, E. Y., Lim, H. J., Yang, H. S., Joo, S. T. (2013). *Influence of meat exudates on the quality characteristics of fresh and freeze – thawed pork*. Meat Science, 95, 323 – 329.
- Kim, H. W., Kim, J. H., Seo, J. K., Setyabrata, D., Brad, Y. H. (2018). *Effects of aging/freezing sequence and freezing rate on meat quality and oxidative stability of pork loins*. Meat Science, 139, 162 – 170.
- Labeit, S., Kolmerer, B. (1995). *Titins: giant proteins in charge of muscle ultrastructure and elasticity*. Science 270, 293–296.
- Lawrie, M. A. (1998). *Lawrie's meat science*. (6a ed.). Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing Limited.
- Lawson, M. (2004). *The role of integrin degradation in post-mortem drip loss in pork*. Meat Science 68, 559-566.
- Lee, S., Kim, E. J., Park, D. H., Choi, M. (2021). *Two-stage air thawing as an effective method for controlling thawing temperature and improving the freshness of frozen pork loin*. LWT – Food Science and Technology, 140, 1 – 9.
- León, K., Mery, D., Pedreschi, F., León, J. (2006). *Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images*. Food Research International, 39(10), 1084 – 1091.
- Lerici, C. L., Pinnavaia, G., Dalla Rosa, M., Bartolucci, L. (1985). *Osmotic dehydration of fruit: influence of osmotic agents on drying behavior and product*. Quality Journal of Food Science, 50, 1217 – 1219.
- Levy, F. L. (1982). *Calculating the thermal conductivity of meat and fish in the freezing range*. International Journal of Refrigeration, 5, 149 – 154.

- Leygonie, C., Britz, T. J., Hoffman, L. C. (2011). *Oxidative stability of previously frozen ostrich Miliofibularis packaged under different modified atmospheric conditions*. International Journal of Food Science and Technology, 46, 1171 – 1178.
- Leygonie, C., Britz, T. J., Hoffman, L. C. (2012). *Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review*. Meat Science, 91, 93 – 98.
- Li, B., Sun, D. (2002). *Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – a review*. Journal of Food Engineering, 54, 175 – 182.
- Li, C., Zhou, G., Xu, X., Lundstrom, K., Karlsson, A., Lametsch, R., (2015). *Phosphoproteome analysis of sarcoplasmic and myofibrillar proteins in bovine Longissimus muscle in response to postmortem electrical stimulation*. Food Chemistry 175, 197-202.
- Listrat, A., Lebret, B., Louveau, I., Astruc, T., Bonnet, M., Lefaucheur, L., Bugeon, J. (2016). *How muscle structure and composition influence meat and flesh quality*. Scientific World Journal, vol. 16, no. 1, pp. 1 – 14.
- Lo Nostro, P., Ninham, B. W., Milani, S., Lo Nostro, A., Pesavento, G., Baglioni, P. (2006). *Hofmeister effects in supramolecular and biological systems*. Biophysical Chemistry, 124, 208 – 213.
- López – Bote, C. (2017). *Chemical and Biochemical Constitution of Muscle*. Lawrie's Meat Science, 8th ed. 99–158.
- Maruyama, K., Kuroda, M., Nonomura, Y. (1985). *Association of chicken pectoralis-muscle phosphorylase with the Z-line and the M-line of myofibrils e comparison with amorphin, the amorphous component of the Z-line*. Biochimica et Biophysica Acta 829, 229-237.
- McCaig, T. N. (2002). *Extending the use of visible/near – infrared reflectance spectrophotometers to measure colour of food and agricultural products*. Food Research International, 35(8), 731 – 736.
- McCornick, R. (1994). *The flexibility of the collagen compartment of muscle*. Meat Science 36, 79-91.
- Mélendez – Martínez, A. J., Vicario, I. M., Heredia, F. J. (2005). *Instrumental Measurement of Orange Juice Colour: A Review*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 85 (6), 894 – 901.
- Moelbert, S., Normand, B., De Los Ríos, P. (2004). *Kosmotropes and chaotropes: Modelling preferential exclusion, binding and aggregate stability*. Biophysical Chemistry, 112, 45 – 57.
- Mokhtarian, M., Majd, M. H., Koushki, F., Bakhshabadi, H., Garmakhany, A. D., Rashidzadeh, S. (2014). *Optimisation of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling*. Quality Assurance and Safety of Crops and Foods, 6, 201 – 214.
- Möller, A. J., Sorensen, S. E., Larsen, M. (1981). *Differentiation of myofibrillar and connective tissue strength in beef muscles by Warner – Bratzler shear parameters*. Journal of Texture Studies. 12 (1), 71 – 83.
- Moreno, J., Simpson, R., Sayas, M., Segura, I., Aldana, O., Almonacid, S. (2011). *Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. Packhams's triumph)*. Journal of Food Engineering, 104, 621 – 627.
- Narang, G., Pandey, J. P. (2013). *Optimization of osmotic dehydration process of grapes using response surface methodology*. Focusing on Modern Food Industry, 2, 78 – 85.
- Nieuwenhuijzen, N. H., Zareifard, M. R., Rasmuswamy, H. S. (2001). *Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes*. Drying Technology, 19, 525 – 545.
- Nishimura, T., Fang, S., Wakamatsu, J., Takahashi, K. (2009). *Relationships between physical and structural properties of intramuscular connective tissue and toughness of raw pork*. Animal Science Journal 80, 85-90.
- Nishimura, T. (2015). *Role of extracellular matrix in development of skeletal muscle and postmortem aging of meat*. Meat Science 109, 48-55.

- Nowicka, P., Wojdylo, A., Lech, K., Figel, A. (2015). *Influence of osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits*. Food Bioprocess Technology, 8, 824 – 836.
- Obermann, W.M.J., Gautel, M., Steiner, F., van der Ven, P.F.M., Weber, K., Fürst, D.O. (1996). *The structure of the sarcomeric M band: localization of defined domains of myomesin, M protein, and the 250-kD carboxy-terminal region of titin by immunoelectron microscopy*. J. Cell Biol. 134, 1441–1453.
- Offer, G., Knight, P. (1988). *The structural basis of water – holding in meat*. En R. A. Lawrie (Ed.). Developments in Meat Science – 4. Capítulos 3 – 4 (pp. 63 - 243), Londres: Elsevier Applied Science.
- Oladejo, D., Ade – Omowaye, B. I. O., Adekanmi, A. O. (2013). *Experimental study on kinetics, modelling and optimization of osmotic dehydration of mango (Mangifera indica L)*. International Journal of Engineering and Science, 2, 1 – 8.
- Pekoslawska, A., Lenart, A. (2009). *Osmotic dehydration of pumpkin in starch syrup*. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 17, 107 – 113.
- Petrović, L., Grujić, R., Petrović, M. (1993). *Definition of the optimal freezing rate – 2. Investigation of the physicochemical properties of beef M. Longissimus dorsi frozen at different freezing rates*. Meat Science, 33, 319 – 331.
- Pham, Q. T. (2014). *Thawing*. En Encyclopedia of Meat Sciences (Second Edition). Reference Module in Food Science, 202 – 208.
- Pham, Q. T. (2016). *Freezing Theory*. En Encyclopedia of Food and Health, 110 – 118.
- Phisut, N. (2012). *Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits*. International Food Research Journal, 19, 7 – 18.
- Pietrasik, Z., Janz, J. A. M. (2009). *Influence of freezing and thawing on the hydration characteristics, quality and consumer acceptance of whole muscle beef injected with solutions of salt and phosphate*. Meat Science, 81, 523 – 532.
- Pisalkar, P. S., Jain, N. K., Jain, S. K. (2011). *Osmo – air drying of aloe vera gel cubes*. Journal of Food Science Technology, 48, 183 – 189.
- Puolanne, E., Halonen, M. (2010). *Theoretical aspects of water – holding in meat*. Meat Science, 86, 151 – 165.
- Purslow, P. (2017). *The Structure and Growth of Muscle*. Lawrie's Meat Science, 8th ed. 49–97.
- Qi, J., Li, C., Chen, Y., Gao, F., Xu, X., Zhou, G. (2012). *Changes in meat quality of ovine Longissimus dorsi muscle in response to repeated freeze and thaw*. Meat Science, 92, 619 – 626.
- Rahman, M. S., Guizani, N., Al – Khaseibi, M., Al – Hinai, S. A., Al – Maskri, A. A., Al – Hamhami, K. (2002). *Analysis of cooling curve to determine the end point of freezing*. Food Hydrocolloids, 16, 653 – 659.
- Ramya, V., Jain, N. K. (2016). *A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: and integrated approach*. Journal of Food Process Engineering, 40 (3), 1 – 22.
- Raoult – Wack, A. L. (1994). *Advances in osmotic dehydration of foods*. Trends in Food Science and Technology, 5, 255 – 260.
- Rastogi, N. K., Angersbach, A., Knorr, D. (2000). *Evaluation of mass transfer mechanisms during osmotic treatment of plant materials*. Journal of Food Science, 65, 1016 – 1021.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjana, K., Knorr, D. (2002). *Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer*. Trends in Food Science and Technology, 13 (2), 58 – 69.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Niranjana, K. (2014). *Recent Developments in Osmotic Dehydration*. Emerging Technologies for Food Processing, 2 (11), 181 – 212.

- Robbers, M., Singh, R. P., Cunha, L. M. (2006). *Osmotic – Convective Dehydrofreezing Process for Drying Kiwifruit*. Journal of Food Science, 62 (5), 1039 – 1042.
- Robbins, K., Jensen, J., Ryan, K. J., Homco – Ryan, C., McKeith, F. K., Brewer, M. S. (2002). *Enhancement effects on sensory and retail display characteristics of beef rounds*. Journal of Muscle Foods, 13, 279 – 288.
- SAGARPA (2013). *Carne Fresca. Consideraciones para su compra y manejo*. <http://www.sagarpa.gob.mx/ganaderia/Documents/MANUALES%20INIFAP/Carne%20Fresca.%20Consideraciones%20para%20su%20compra%20y%20manejo%20Baja%20Res.pdf> Consultado: octubre de 2020.
- SAGARPA (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Panorama Agroalimentario*. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2019/Atlas-Agroalimentario-2019 Consultado: octubre de 2020.
- Shi, J., LeMaguer, M. (2002). *Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects*. Food Reviews International, 18, 305 – 335.
- Singh, R. P., Heldman, D. R. (2014). *Food Freezing* en Introduction to Food Engineering (5th ed.). Food Science and Technology, 521 – 563.
- Spiazzi, E. A., Raggio, Z. I., Bignone, K. A., & Mascheroni, R. H. (1998). *Experiments on dehydrofreezing of fruits and vegetables: mass transfer and quality factors*. Advances in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold Chain, IIF/IIR, 6, 401–408.
- Sutar, N., Sutar P. P. (2013). *Developments in osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review*. Trends Post Harvest Technology, 1, 20 – 36.
- Swartz, D.R., Greaser, M.L., Cantino, M.E., (2009). *Muscle structure and function*. En: Du, M., McCormick, R.J. Applied Muscle Biology and Meat Science. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 1–40.
- Tang, J., Shao, S., Tian, C. (2019). *Effects on the magnetic field on the freezing parameters of the pork*. International Journal of Refrigeration, 107, 31 – 38.
- Toldrá, F. (2006). *Meat: Chemistry and biochemistry*. En Y. H. Hui, J. D. Culbertson, S. Duncan, I. Guerrero-Legarreta, E. C. Y. Li-Chan, & C. Y. Ma, et al. (Eds.), Handbook of food science, technology and engineering (pp. 28). Boca Raton, FL: CRC Press. vol. 1.
- Toldrá, F., & Reig, M. (2011). *Innovations for healthier processed meats*. Trends in Food Science & Technology, 22, 517–522.
- Torreggini, D. (1993). *Osmotic dehydration in fruits and vegetable processing*. Food Research International, 26, 59 – 68.
- Tortoe, C. (2010). *A review of osmo – dehydration for food industry*. African Journal of Food Science, 4, 303 – 324.
- Trinick, J., Cooper, J. (1982). *Amp deaminase e its binding and location within rabbit psoas myofibrils*. Journal of Muscle Research and Cell Motility 3, 486-487.
- Trinick, J., Tskhovrebova, L. (1999). *Titin: a molecular control freak*. Trends Cell Biol. 9, 377–380.
- Tskhovrebova, L., Trinick, J. (2003). *Titin: properties and family relationships*. Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 4, 679–689.
- United States Department of Agriculture [USDA]. (2009). *USDA Nutrient Data Set for Fresh Pork (From SR)*, Release 2.0. <https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/80400525/Data/Meat/Pork09.pdf> Consultado: octubre de 2020.

- United States Department of Agriculture [USDA]. (2013). *Longissimus Slice Shear Force Measurement*. Recuperado de:
<https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/30400510/protocols/shearforceprocedures.pdf>
Consultado: octubre de 2020.
- Verma, D., Kaushik, N., Rao, P. S. (2014). *Application of high hydrostatic pressure as pretreatment for osmotic dehydration of banana slices (Musa cavendishii) finish – dried by dehumidified air drying*. Food Bioprocess Technology, 7, 1281 – 1297.
- Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M., Chudoba, T., Witrowa – Rajchert, D. (2014). *Pulsed electric field pretreatment for osmotic dehydration of apple tissue: Experimental and mathematical modelling studies*. Drying Technology, 32, 408 – 417.
- Wiggings, P. M. (1995). *Microosmosis, a chaotic phenomenon of water and solutes in gels*. Langmuir, 11, 1984 – 1986.
- Wu, D., Sun, S. W. (2013). *Food colour measurement using computer vision*. En Instrumental Assessment of Food Sensory Quality: A Practical Guide. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 165 – 194.
- Xia, X., Kong, B., Liu, Q. Liu, J. (2009). *Physicochemical change and protein oxidation in porcine longissimus dorsi as influenced by different freeze – thaw cycles*. Meat Science, 83, 239 – 245.
- Zequan, X., Zirong, W., Jiankun, L., Xin, M., Hopkins, D. L., Holman, B. W. B., Bekhit, A. E. A. (2019). *The effect of freezing time on the quality of normal and pale, soft and exudative (PSE) – like pork*. Meat Science, 152, 1 – 7.