



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN

**Efecto del ultrasonido como pre-
tratamiento sobre la pérdida de color y
formación de jugos exudados en carne de
cerdo congelada.**

T E S I S

Que para obtener el título de:

Ingeniera en alimentos

PRESENTA

Karla Manelly Flores Herrera

ASESORAS

Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza

Dra. Rosalía Meléndez Pérez

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

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

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

Efecto del ultrasonido como pre-tratamiento sobre la pérdida de color y formación de jugos exudados en carne de cerdo congelada.

Que presenta la pasante: **Karla Manelly Flores Herrera**

Con número de cuenta: **410083705** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 26 de Septiembre de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. José Jaime Flores Minutti	
VOCAL	Dr. José Luis Arjona Román	
SECRETARIO	Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza	
1er. SUPLENTE	I.A. María Guadalupe López Franco	
2do. SUPLENTE	I.A. Alberto Solís Díaz	

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

A MI FAMILIA:

A mi mamá por siempre apoyarme, ser mi amiga incondicional y darme esos consejos en el momento preciso, agradezco a Dios ser tu hija.

A mi papá, honor a quien honor merece por todo lo que me enseñaste y diste, sé que desde donde estas aun cuidas de mí.

A mis hermanos por cuidar de mí.

A mi compañero de vida por su apoyo incondicional para concluir, pero sobre todo por darme la dicha de tener a una hija maravillosa. Los amo.

Agradecimientos

A LA UNAM:

A la Dra. Marta Elvia Rosas Mendoza, Dra. Rosalía Meléndez Pérez y al Dr. José Luis Arjona Román por el apoyo brindado y las enseñanzas que fueron claves para llevar a cabo el trabajo.

A los sinodales por el tiempo dedicado y su aportación para la realización del trabajo.

Agradecimiento a la DGAPA-UNAM por el apoyo financiero a los proyectos PAPIIT claves IT203314 e IT201417.

CONTENIDO.

INDICE DE TABLAS	3
INDICE DE FIGURAS	3
RESUMEN.	5
INTRODUCCION.	6
1. ANTECEDENTES.....	7
1.1 LA CARNE Y LA ESTRUCTURA DEL MÚSCULO.....	8
Proteínas musculares.....	9
1.2 EL COLOR.	10
Atributos del color.....	10
Factores que afectan el color de la carne.	13
Sistema de color CIELAB.	15
ΔE^*ab (diferencial CIE*a*b).....	16
1.3 PRINCIPIOS DE LA CONGELACION.....	17
Congelación por aire	20
Cambios en la carne durante la congelación.	20
Cambios en la carne durante la descongelación.....	22
Formación de exudado.....	22
1.4 EL ULTRASONIDO.....	23
Principios generales del ultrasonido.	23
Efectos del ultrasonido.	26
Aplicación del ultrasonido.	32
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	33
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	34
OBJETIVOS.....	34
2.1 CUADRO METODOLOGICO.....	35
2.2 EXPERIMENTACION.	36
Aplicación del ultrasonido.....	36
Congelación-descongelación de la carne.....	37
Determinación de color.	37

Cuantificación de jugos exudados.....	39
3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	41
Condiciones adecuadas para la aplicación de ultrasonido.....	42
Condiciones de congelación-descongelación de la carne de cerdo.....	44
Modo de operación para la aplicación del ultrasonido.....	46
Diferencial de color (ΔE^*ab) y formación de exudados.....	48
CONCLUSIONES.....	51
REFERENCIAS.....	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del lomo de cerdo	8
Tabla 2. ΔL^* , Δa^* y Δb^* para diferentes modos de operación.....	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Longissimus Dorsi.	8
Figura 2. Estructura microscópica del músculo.	8
Figura 3. Matiz.....	10
Figura 4. Cromaticidad.	10
Figura 5. Sistema de color tridimensional que muestra la luminosidad.....	11
Figura 6. Molecula de mioglobina (Ranken, 2013).	12
Figura 7. Grupo hem en la mioglobina (Ranken, 2013).....	12
Figura 8. Color aparente de la carne (Ranken, 2013).	13
Figura 9. Grafica de color CIELAB.	15
Figura 10. El valor de L^* se representa en el eje central. Los ejes a^* y b^* aparecen sobre el plano horizontal.	16
Figura 11. Curva típica de congelación de carne porcina (Genot, 2001).	17
Figura 12. Propiedades de onda acústica.	24
Figura 13. Movimiento de partículas (a) longitudinales, (b) ondas transversales. .	25
Figura 14. Formación de un microjet.	25
Figura 15. Creación de microjet a través del colapso de burbujas de cavitación. .	26
Figura 16. Ultrasonido en alimentos congelados (Mason et al., 1996).....	31
Figura 17. Ultrasonificador multifrecuencia ELMA-TI-H-15.	36
Figura 18. Osciloscopio Tektronix serie TDS1000C-EDU.	36
Figura 19. Termómetro digital HH309.	37
Figura 20. Canon EOS Rebel Xs.....	37
Figura 21. Acondicionamiento para la toma de fotografía.	38
Figura 22. Ventana de histograma en Lab.	38
Figura 23. Balanza OHAUS.....	40
Figura 24. Frecuencia vs. Tiempo.	42
Figura 25. Frecuencia vs. Tiempo a 25°C y 60°C a 45kHz.	43
Figura 26. Historia térmica de congelación de placas de carne de cerdo con y sin la aplicación de US.	44
Figura 27. Historia térmica de descongelación de placas de carne de cerdo con y sin la aplicación de US.	45

Figura 28. Diferencial de color para los modos barrido, normal y degasificado en el ultrasonicador.....	47
Figura 29. Cambio de color durante la descongelación de carne de cerdo (expresado en ΔE^*ab).....	48
Figura 30. Parámetro CIE a^* (enrojecimiento) durante la descongelación de carne de cerdo.	49
Figura 31. Porcentaje de exudados durante la descongelación de carne de cerdo.	50

RESUMEN.

El ultrasonido es considerado una tecnología novedosa, la cual ha creado bastante interés debido a sus efectos promisorios en las áreas de procesamiento y conservación de alimentos; el objetivo de éste proyecto consistió en evaluar la aplicación del ultrasonido como pre-tratamiento a la congelación de carne de cerdo y sus efectos sobre el cambio de color y liberación de jugos exudados durante la descongelación de ésta. Para ello, se varió la frecuencia (25 y 45 kHz), temperatura (25 y 60 °C), tiempo (5 y 15 minutos) de aplicación y modo de operación (normal, barrido y degasificado) del equipo para aplicar el ultrasonido. Finalmente se seleccionaron como condiciones de sonicado 45 kHz, 25 °C, 5 minutos y modo degasificado, observándose que los procesos de congelación y descongelación de las muestras fueron acelerados cuando se aplicó el ultrasonido. La evaluación del color se realizó mediante fotografía digital a través del sistema CIE Lab; con los parámetros L* (luminosidad), a* y b* para determinar el diferencial de color (ΔE^*_{ab}), dando como resultado que la aplicación del ultrasonido producía un cambio desfavorable en el color de la carne porcina. La cuantificación de exudados se determinó a partir de diferencia de pesos en las muestras de carne demostrando que en las muestras sonicadas se presentó menor cantidad de exudados durante la descongelación.

INTRODUCCION.

La carne de cerdo está considerada una de las tres principales carnes rojas (junto con la carne de bovino y cordero) en la dieta de los mexicanos su consumo es fundamental para el desarrollo y sano crecimiento del humano en etapas tempranas, ya que es rica en proteínas, minerales (hierro y zinc) y vitaminas del complejo B (Cortés *et al.*, 2012). La práctica de la congelación para prolongar su vida útil se ha practicado durante miles de años y juega un papel esencial en la industria para garantizar la seguridad de los productos cárnicos (Leygonie, 2012). El lograr que un alimento tenga una vida de anaquel mayor, ya no es la única razón por la que las industrias congelan sus productos o utilizan materias primas congeladas. La necesidad de congelar alimentos o materias primas alimenticias para el transporte de alimentos a regiones distantes de su zona de origen, y también el suministro de productos de temporada en todo el año, son dos objetivos muy importantes para congelar alimentos (Machado, 2008). La velocidad de congelación y la formación de pequeños cristales de hielo en la congelación son críticos para minimizar el daño tisular y la pérdida por goteo en la descongelación de la carne (Li, 2002). El exudado contiene proteínas sarcoplásmicas principalmente solubles en agua, que son uno de los principales grupos de proteínas de las proteínas miofibrilares musculares, y contienen una mezcla de nucleótidos, aminoácidos, péptidos, proteínas, y muchas enzimas solubles (Savage *et al.*, 1990), representa generalmente entre un 1 y un 5 % de la masa inicial del producto lo que se traduce en pérdidas económicas cuando el producto se vende descongelado, incluso pudiendo llegar a reducir su aceptabilidad por parte de los consumidores. Hablando entonces de la aceptabilidad del consumidor, los alimentos, tanto en forma natural como procesada, presentan un color característico y bien definido mediante el cual el consumidor los identifica: cualquier cambio que este sufra puede causar el rechazo de los productos. La mioglobina es el principal pigmento que imparte el color a la carne, es una proteína globular sarcoplásmica del músculo, constituida por una parte proteica llamada globina y el grupo prostético hemo (Badui, 2006). En ciertas investigaciones al respecto del color en alimentos, a menudo es necesario analizar el color en la superficie. El método de imagen digital permite realizar mediciones y análisis del color de ésta, se demuestra que Photoshop es capaz de analizar el color de muestras de alimentos, aunque el software no fue diseñado originalmente para este fin (Yam, 2004). Por otro lado, el ultrasonido es aplicado para impartir efectos positivos en el procesamiento de alimentos, induce a cambios mecánicos, físicos, químicos/bioquímicos a través de la cavitación, y apoya muchas operaciones tales como extracción, congelación, secado, emulsificación y la inactivación de bacterias patógenas en superficies de alimentos (Awad *et al.*, 2012).

1. ANTECEDENTES

1.1 LA CARNE Y LA ESTRUCTURA DEL MÚSCULO.

La carne es la estructura muscular estriada esquelética, acompañada o no de tejido conectivo, hueso y grasa, además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos proveniente de los animales que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas, se incluyen las refrigeradas o congeladas (Fraizer, 2001).



Figura 1. Longissimus Dorsi.

La carne tiene una composición química bastante compleja y variable en función de un gran número de factores tanto extrínsecos como intrínsecos. En la tabla 1 se muestra la composición química del lomo de cerdo (figura 1).

Los componentes mayoritarios en la carne son: agua, proteína y lípidos, cuya proporción varía de acuerdo a la actividad desarrollada por el musculo de procedencia y en menor proporción se encuentran los carbohidratos (glucógeno) y minerales (hierro, zinc, magnesio, potasio y sodio)

Tabla 1. Composición química del lomo de cerdo.

COMPONENTE	AGUA	PROTEINA	LIPIDOS	MINERALES
PORCENTAJE (%)	75	20	3.4	1.6

(Rodríguez, 2008)

Las fibras musculares se acomodan y se mantienen en su lugar por medio de componentes del tejido conectivo que actúan como envolturas y divisoras. En la figura 2 se muestra un músculo completo rodeado por una funda de tejido conectivo que se denomina epimisio. El tejido conectivo se interna en el músculo dando lugar a otro nivel de este tejido denominado perimisio que divide al músculo en grupos de fibras llamados haces o fascículos. Una delicada extensión de tejido conectivo, el endomisio, rodea a cada fibra individual y no debe ser confundida con el sarcolema o

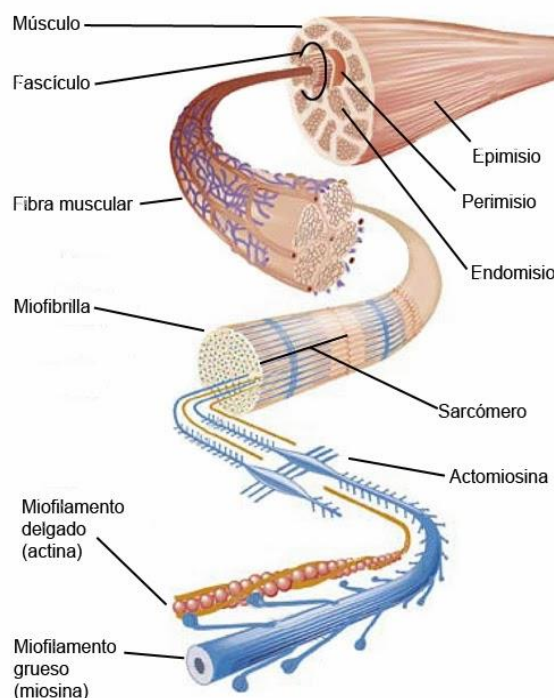


Figura 2. Estructura microscópica del músculo.

membrana de la fibra muscular. Esta estructura ofrece al músculo soporte y organización, y sirve al propósito de conducir el abastecimiento vascular y nervioso hacia y desde el músculo (Rodríguez, 2008).

Proteínas musculares.

Las proteínas desempeñan numerosas funciones en las células de todos los seres vivos. Forman parte de las estructuras básicas de los tejidos (músculos, tendones, piel, uñas, etc.), desempeñan funciones metabólicas y reguladoras: asimilación de nutrientes, transporte de oxígeno y de grasas en la sangre, inactivación de materiales tóxicos o peligrosos, etc., (Nakai & Li-Chan, 1998).

Debido a que las proteínas de la carne son las encargadas de proporcionar la rigidez al músculo, se han clasificado en tres grandes grupos de acuerdo a su función biológica y a su solubilidad (Baduí, 2006).

- **Proteínas sarcoplasmicas o solubles.** Corresponden 30-35% del total de proteínas, se encuentran en el citoplasma de la fibra muscular. Están constituidas en su mayoría por los sistemas enzimáticos del metabolismo celular (Nakai & Li-Chan, 1998). Estos polipéptidos también se conocen con el nombre genérico de miogeno; son fundamentalmente globulinas y albuminas pertenecientes a los sistemas que intervienen en el metabolismo celular. De importancia dentro de este grupo es el pigmento respiratorio llamado mioglobina, responsable del color de la carne.
- **Proteínas contráctiles o miofibrilares.** Las proteínas miofibrilares corresponden hasta el 65-75 % del total de las proteínas del músculo. Las más importantes son la actina (principal componente de los filamentos delgados) y la miosina (principal componente de los filamentos gruesos) (Baduí, 2006).
- **Proteínas del estroma o insolubles.** Este es un grupo muy abundante de polipéptidos, conforman el tejido conectivo fuerte de los tendones, la piel, el hueso y las capas rígidas que envuelven y soportan los músculos, como el endomisio, el perimisio y epimisio. A este tipo de proteínas pertenece el colágeno, la elastina, la reticulina, entre otras. Son proteínas de bajo valor biológico por la difícil digestión si no se les aplica un tratamiento térmico a altas temperaturas previo al consumo (Baduí, 2006).

1.2 EL COLOR.

El color es el resultado de la percepción de la luz después de haber interactuado con un objeto, (Lawless & Heymann, 1998), es una cualidad sugestiva que

depende de la intensidad de la luz, del objeto sobre el que incide y del buen funcionamiento del órgano de la vista, complementando la información del objeto junto con su forma y su textura.

La definición de color engloba tres conceptos:

- **La luz.** Se percibe el color gracias a la existencia de las radiaciones luminosas; sin la luz no percibimos el color. De aquí surge el concepto de color-luz, que es la descomposición cromática de la luz blanca.
- **El objeto.** El color existe gracias a la aglomeración de diversos pigmentos.
- **La vista.** Receptor del color.

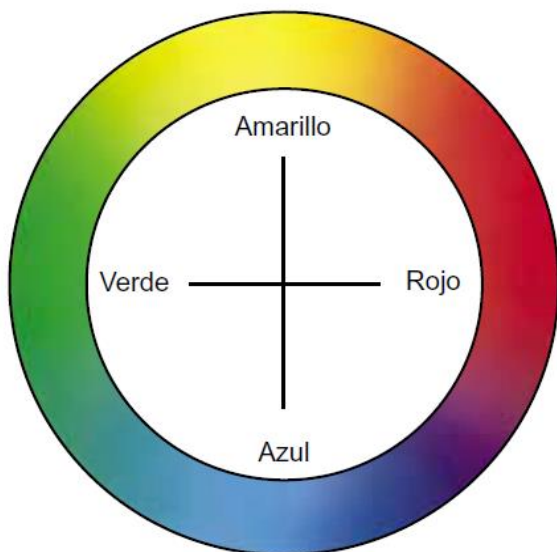


Figura 3. Matiz.

Atributos del color.

Cada color tiene su propia apariencia basada en tres elementos: matiz, valor y croma. Al describir un color usando estos tres atributos se identifica con precisión un color específico y se distingue de cualquier otro.

Matiz. El matiz es como se percibe el color de un objeto: rojo, anaranjado, verde, azul, etc. El anillo del color de la figura 3 muestra el continuo de color de un matiz al siguiente. Así como se muestra en el anillo, al mezclar pinturas de azul y verde se obtiene un verde azul. Al mezclar amarillo con verde se obtiene un verde amarillo (Guía para entender la comunicación, 2013).

Croma. El croma describe lo llamativo o lo apagado de un color, en otras palabras, que tan cerca está el color ya sea al gris o al matiz puro.

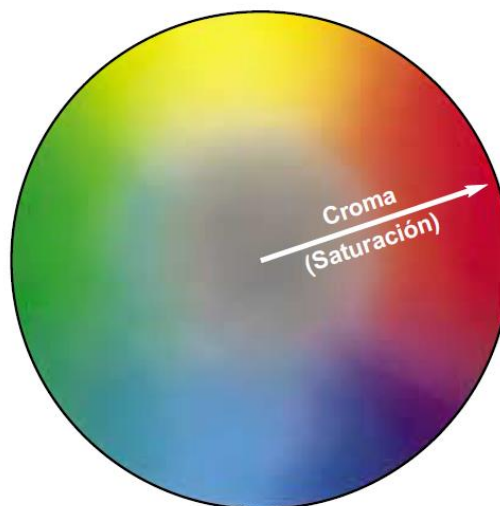
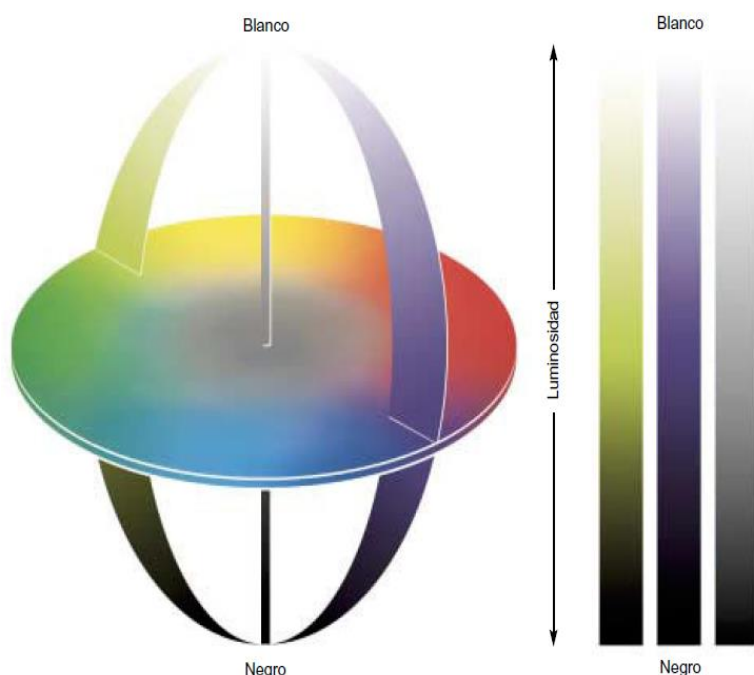


Figura 4. Cromaticidad.

Por ejemplo, al comparar un tomate con un rábano, el rojo del tomate es mucho más llamativo mientras que el rábano parece más apagado. La figura 4 muestra cómo cambia el croma conforme nos movemos del centro a la periferia. Los colores en el centro son grises (apagados o sucios) y conforme avanzamos a la periferia se vuelven más saturados (vivos o limpios). El croma también se conoce como saturación.

Luminosidad. Se llama valor a la intensidad lumínica, es decir, a su grado de claridad. Los colores pueden ser clasificados como tenues u oscuros al comparar sus valores.



Por ejemplo, cuando se colocan lado a lado un tomate y un rábano el rojo del tomate parece ser mucho más tenue. En contraste el rábano tiene un valor de rojo más oscuro. En la figura 5 se representa la claridad o el valor en el eje vertical (Guía para entender la comunicación, 2013).

La identidad y calidad de algunos alimentos es determinada entre otras características por el color, lo que lleva a muchos consumidores a asociar un color con los productos específicos, tal es el caso

Figura 5. Sistema de color tridimensional que muestra la luminosidad.

del café, las espinacas, el jugo de naranja, el vino, los quesos, etc., por mencionar algunos (Jaros *et al.*, 2000). El color es uno de los primeros factores evaluados en los alimentos antes de probarlos. El color forma parte de la apariencia de los alimentos, el cual es un atributo en el que se basa la decisión tomada por el consumidor al momento de la compra (Meilgaard, *et al.*, 1999, Muñoz, *et al.*, 1999) observándose que un cambio en el mismo podría ser suficiente para propiciar el rechazo del producto (Muñoz, *et al.*, 1999, West, *et al.*, 2001), e incluso se ha observado que los consumidores no son capaces de definir claramente el sabor de los alimentos cuando estos no cumplen con las expectativas de color (Jaros, *et al.*, 2000, West, *et al.*, 2001).

Color en la carne.

La mioglobina es la principal proteína responsable del color de la carne, ésta junto con otras hemo proteínas juega un papel importante ya que, estos pigmentos absorben ciertas longitudes de onda y reflejan otras.

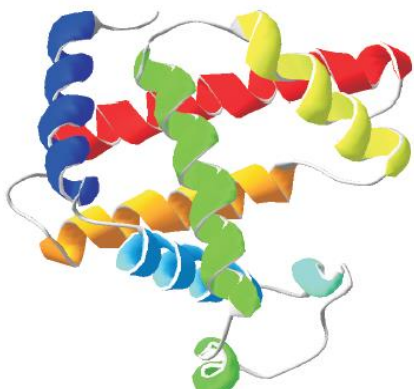


Figura 6. Molécula de mioglobina (Ranken, 2013).

Los pigmentos de la carne están formados en su mayor parte por dos proteínas, la hemoglobina, que es el pigmento sanguíneo y la mioglobina, pigmento muscular. En el tejido muscular bien desangrado la mioglobina constituye un 80-90% del pigmento total y es mucho más abundante que la hemoglobina.

La mioglobina (figura 6) se compone de una porción proteica hidrosoluble llamada globina (ya que se trata de una proteína globular, monomérica, ordenada y plegada específicamente, de forma casi triangular) y una porción no proteica denominada grupo hem o anillo.

En la figura 7 se observa al grupo hem, que es la parte no proteica de la mioglobina; se compone de un anillo de porfirina plano y un átomo de hierro central. El átomo de hierro tiene seis puntos de enlace o uniones de coordinación. Cuatro de estos están ligados a átomos de nitrógeno, uno está unido a la molécula de globina y el enlace restante está libre para ligarse a otras sustancias, ordinariamente agua u oxígeno. El grupo hem es una metalporfirina, estas moléculas se caracterizan por ser muy coloreadas, resultado de su estructura tetrapirrólica cíclica conjugada (Ranken, 2013).

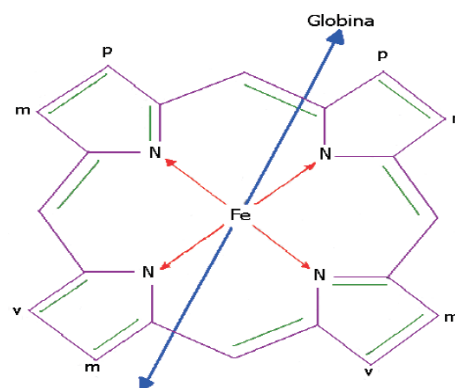


Figura 7. Grupo hem en la mioglobina (Ranken, 2013).

El color de la carne fresca se ve influido por los diferentes estados químicos de la mioglobina, así, el color variará en las tres formas básicas del pigmento, según la proporción relativa y distribución de estos pigmentos.

Las tres formas básicas del pigmento son:

- **Mioglobina reducida o desoximioglobina (Mb).** De color rojo purpura, se encuentra en el interior de las células, principalmente del musculo esquelético y cardiaco, subsiste tras la muerte por la propia actividad reductora del musculo.

- **Oximioglobina o mioglobina oxigenada (MbO₂).** Formada cuando la Mb se pone en contacto con el aire con la consiguiente oxigenación del pigmento, tiene un color rojo brillante y es el color deseado por el consumidor por lo que habrá que intentar alargar su presencia.
- **Metamioglobina o mioglobina oxidada (MetMb).** Se forma por la exposición prolongada de la anterior al oxígeno o directamente desde la mioglobina reducida cuando las presiones de oxígeno son bajas (alrededor de 4mm de Hg). Es de color marrón-pardo y motivo de rechazo por el consumidor.

La mioglobina reducida, oximioglobina y metamioglobina están todas presentes en la carne fresca, en equilibrio unas con otras. La mioglobina es usada en el músculo vivo para almacenar oxígeno. En el interior de una pieza de carne no hay oxígeno y el pigmento está en la forma de mioglobina reducida púrpura (deoximioglobina). En la superficie de una pieza de carne hay un aporte de oxígeno y forma oximioglobina de color rojo brillante. Entre estas dos zonas está una región de baja concentración de oxígeno, que favorece la oxidación del pigmento hasta metamioglobina. Una metamioglobina castaña, por tanto, se forma justamente debajo de la superficie de la carne (figura 8).

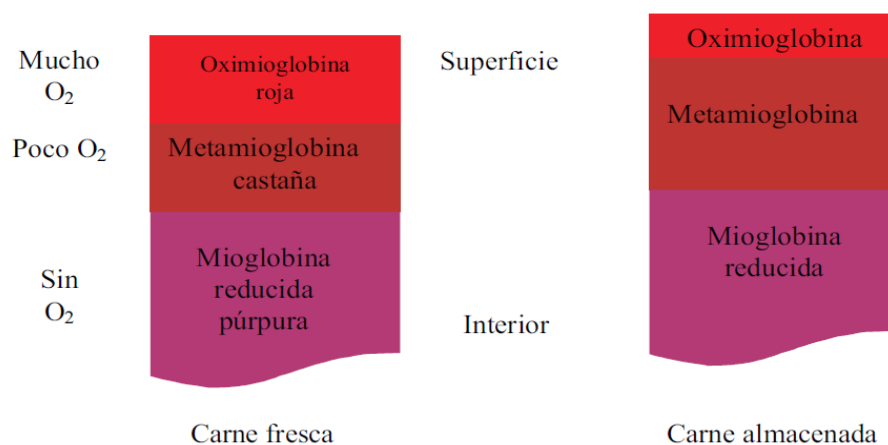


Figura 8. Color aparente de la carne (Ranken, 2013).

Factores que afectan el color de la carne.

La estabilidad de la mioglobina en el tejido muscular, depende de la especie animal, de las características bioquímicas del músculo y de algunos parámetros externos como la presión parcial de oxígeno y temperatura (Prandl, 1994).

Siendo importantes los siguientes factores:

- **Especies animales.** El vacuno, por ejemplo, contiene mucho más mioglobina que el cerdo (0.06 a 0.1 %) (Baduì, 2006)
- **Razas.**
- **Edad.** La concentración del pigmento aumenta con la edad.
- **Sexo.** La carne de los animales machos ordinariamente contiene más pigmento que la de los animales hembras.
- **Función muscular.** La función de la mioglobina es almacenar oxígeno; por lo tanto, los músculos que más trabajan contienen más mioglobina; por ejemplo los músculos de las piernas son de un color rojo más intenso que el lomo.
- **Variaciones dentro de los músculos.**

Las alteraciones que presenta la carne en su color se debe a los distintos factores como la exposición a la luz (tipo de luminosidad e intensidad), crecimiento microbiano, rancidez y exposición al oxígeno. Esto se observa, por ejemplo, cuando existe una congelación rápida de la carne debido a la formación de pequeños cristales de hielo que causan mucha dispersión de la luz, proporcionando a la carne una apariencia pálida y opaca; mientras que para una congelación lenta se tienen cristales de hielo más grandes, que dispersan menos la luz, de tal manera que la carne tiene una apariencia oscura, translúcida. La carne tiene un mejor color en su estado congelado si se permite “florecer” en el aire antes de la congelación (Billmeyer, 1981).

Bajo cualquier circunstancia, la carne congelada puede aparecer más oscura que la fresca. Esto se deriva principalmente de la concentración de los pigmentos en la carne y se compensa en la carne congelada rápidamente por la reflectancia de los cristales de hielo, lo que puede hacer que parezca que la carne tiene un color claro.

La deshidratación de la superficie también concentra los pigmentos y favorece la formación de la metamioglobina. En casos extremos esto da lugar a la quemadura por congelación, que es una consecuencia de la sublimación del hielo desde las superficies desprotegidas y de la deshidratación intensa causada por un inadecuado manejo de las bajas temperaturas durante el almacenamiento del producto congelado (Honikel, 1990).

El pardeamiento de la carne durante su almacenamiento, se debe a la oxidación de la mioglobina oxigenada u oximioglobina (MbO_2), de color rojo vivo, a mioglobina oxidada o metamioglobina (MetMb), de color pardo.

Sistema de color CIELAB.

Se basa en el modelo propuesto en 1931 por la CIE (Commission International de l'Éclairage) como estándar internacional para medir el color. En 1976, este modelo se perfeccionó y se denominó CIE Lab. En la industria alimenticia es el método más utilizado también conocido como L^*a^*b (Mc Caig, 2001); este describe la apariencia del color en lugar de la cantidad de colorante necesario, para que un dispositivo (como un monitor, una impresora o una cámara digital) produzca el color de manera independiente y coherente.

Los componentes de CIE Lab son luminosidad (L) que varía entre 0 y 100, el componente a (eje verde-rojo) y b (eje azul-amarillo) pueden estar comprendidos entre los valores +127 y -128 (Jeffrey, 1999).

En este modelo, las diferencias de color que se perciben son leídas colorimétricamente. El eje (a^*) se extiende desde el verde ($-a^*$) hacia el rojo ($+a^*$) y el eje (b^*) desde el azul ($-b^*$) hacia el amarillo ($+b^*$). La brillantez (L^*) aumenta desde abajo hacia el tope, donde $L^* = 0$ es negro y $L^* = 100$ es blanco, en este modelo tridimensional (figuras 9 y 10).

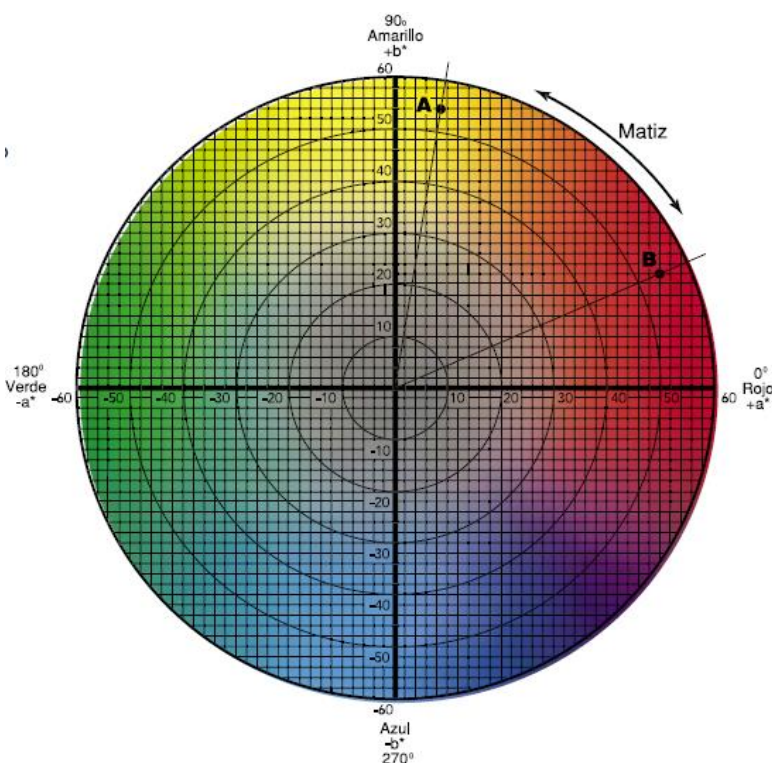


Figura 9. Grafica de color CIELAB.

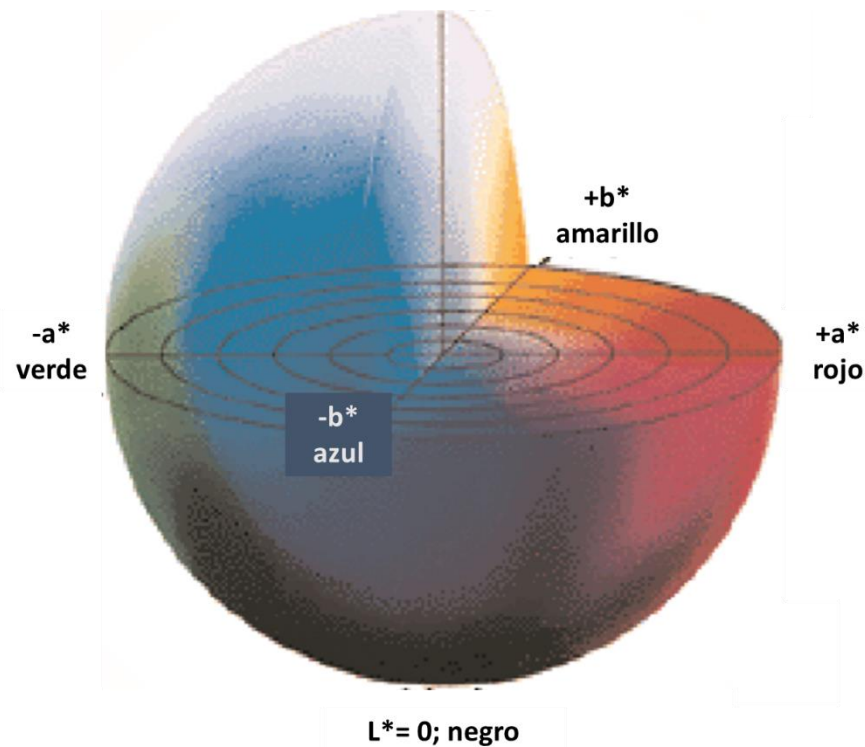


Figura 10. El valor de L^* se representa en el eje central. Los ejes a^* y b^* aparecen sobre el plano horizontal.

ΔE^*_{ab} (diferencial CIE $^*a^*b$)

El análisis de color es más que una expresión numérica. Normalmente es un análisis de la igualdad o diferencia de un color al compararlo con una norma establecida. CIELAB se emplea para comparar los colores de dos objetos.

Las expresiones de esta diferencia de color son ΔL^* , Δa^* , Δb^* o DL^* , Da^* , Db^* (Δ o D provienen del símbolo “delta”, que quiere decir “diferencia”). Dados ΔL^* , Δa^* , Δb^* la diferencia total o distancia en el diagrama CIELAB puede ser expresado como un valor conocido como ΔE^* o DE^* (Guía para entender la comunicación, 2013). Los cambios en cada uno de los parámetros de color se calcularon como lo hizo Tan *et al.* (2001) al deshidratar papa y piña:

$$\Delta L = L - L_0$$

$$\Delta a = a - a_0$$

$$\Delta b = b - b_0$$

La diferencia total de color ΔE es determinada usando la siguiente ecuación:

$$\Delta E^*_{ab} = [\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2]^{1/2}$$

1.3 PRINCIPIOS DE LA CONGELACION.

La congelación es el proceso de preservación originado por la reducción de la temperatura por debajo de aquella en la que se comienzan a formar cristales en un material alimenticio (Orrego, 2003).

Uno de los procesos más utilizados en la conservación de alimentos es la congelación, ello es debido a dos factores fundamentales: el primero, muchos microorganismos no pueden crecer a bajas temperaturas que generalmente se lleva a un valor entre -10 y -20 °C (Orrego, 2003); el segundo es que cuando un alimento se congela, parte del agua se transforma en hielo, por lo que la actividad de agua del alimento desciende, esto influye en el crecimiento de muchos microorganismos y hace que no se puedan desarrollar (Hui, 2006).

El empleo de bajas temperaturas en los alimentos para refrigerar o congelar alarga la vida útil de éstos, ya sean frescos o procesados, durante periodos relativamente largos manteniendo sus propiedades nutritivas y organolépticas (Plank, 2005).

Al bajar la temperatura del alimento, una elevada proporción del agua que contiene cambia de estado y se convierte en cristales de hielo. En un producto alimentario, la congelación se traduce en primer lugar en una evolución de la temperatura, no lineal en función del tiempo y que depende de su localización en la muestra. En la figura 11 se muestra una curva típica del proceso de congelación y se observan las curvas durante el intercambio calórico (enfriamiento) de muestras de carne porcina y el interior de la cámara de congelación.

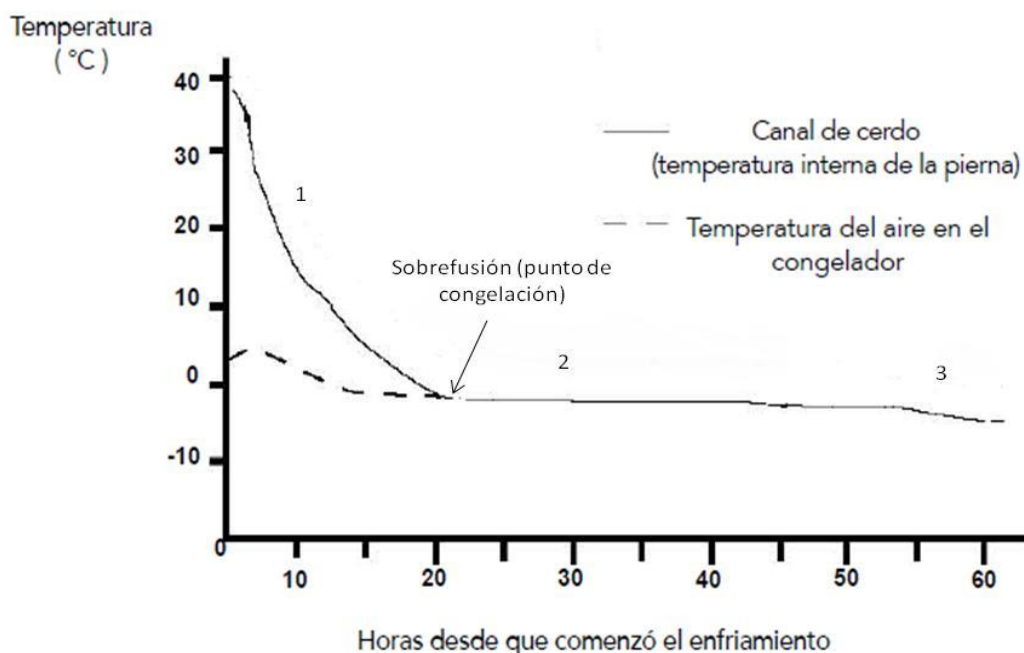


Figura 11. Curva típica de congelación de carne porcina (Genot, 2001).

Esquemáticamente, se puede distinguir la sucesión de tres etapas básicas durante la congelación:

1. **Pre-congelación.** En este periodo durante el cual la temperatura disminuye hasta alcanzar la temperatura a la cual da comienzo la cristalización. El alimento se enfría por debajo de su punto de congelación y es inferior a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, el agua permanece en estado líquido, a esto se le conoce también como sub-enfriamiento el cual puede ser hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por debajo de su punto de congelación; después la temperatura aumenta rápidamente hasta alcanzar nuevamente el punto de congelación, pues al formarse cristales de hielo, se libera calor latente a una velocidad superior a la que éste se extrae del alimento (Genot, 2001).
2. **Congelación.** Consiste en la eliminación de calor latente permaneciendo la temperatura prácticamente constante, pero el incremento de solutos en la fracción de agua no congelada, provoca el descenso del punto de congelación, por lo que la temperatura disminuye ligeramente como se muestra en el punto 2 de la figura 11. Durante esta etapa una gran parte del agua congelable se transforma en hielo.
3. **Sub-enfriamiento.** Es el tiempo necesario para que el alimento pase de la temperatura de congelación a la temperatura de almacenamiento o temperatura final. En esta fase se da la sobresaturación y cristalización de los solutos y del agua, lo que quiere decir que hay liberación de calor latente que provoca un aumento en la temperatura hasta su temperatura eutéctica (Akyurt, 2001).

Durante la congelación se distinguen dos fases: nucleación y velocidad de crecimiento de cristales.

- **Nucleación.** La temperatura a la cual empiezan a formarse los primeros núcleos, el punto de congelación es inferior a la temperatura de congelación inicial, este es conocido como fenómeno de sobrefusión o subrefrigeración. Una vez que la nucleación ha comenzado, el sistema libera más calor latente, muy necesario para el crecimiento de los cristales, y la temperatura aumenta rápidamente hasta la temperatura de congelación inicial. La nucleación puede ser homogénea o heterogénea, siendo la segunda más frecuente en alimentos, donde los núcleos se forman sobre partículas en suspensión o sobre la pared celular (Fernández, 2005).
- **Velocidad de crecimiento de cristales.** Controlada en gran parte por el flujo de calor evacuado de la zona de cristalización y también por la concentración de fluidos intra y extracelulares en curso de congelación, que reduce progresivamente el crecimiento de cristales (Genot, 2001).

El número y distribución de los núcleos de cristalización depende del proceso de congelación. Este puede clasificarse como:

- **Congelación lenta.** La solidificación del agua tiene lugar en torno a pocos núcleos que dan origen a cristales de hielo grandes que destruyen en proporción significativa el tejido del alimento. Puesto que la concentración de solutos es menor en los líquidos intersticiales (entre células) que en interior del citoplasma, la nucleación comienza y se extiende en estos espacios, provocando la destrucción de células, el vaciado del citoplasma por ósmosis y lo que es peor, la sucesiva concentración de fluidos en los solutos que contienen (por congelarse el disolvente y tener tiempo de migrar hacia los núcleos) por lo que se forman cristales de hielo grandes y aumentan los espacios extracelulares; las células plasmolizadas disminuyen su volumen. Este desplazamiento de agua y acción mecánica de los cristales de hielo provocan efectos negativos en la textura y dan lugar a la aparición de exudados durante la descongelación (Fernández, 2005).
- **Congelación rápida.** La temperatura del producto cárnico que va ser congelado cae rápidamente por debajo del punto de congelación inicial, formándose uniformemente por toda la extensión de los tejidos cárnicos numerosos cristales de hielo pequeños que tienen un aspecto como filamentosos, y que se forman tanto intra como extracelularmente, aproximadamente a la misma velocidad. Debido a la rápida caída de la temperatura, a causa de la rápida velocidad de transferir el calor, la velocidad de nucleación aumenta y la masa llega a sobre-enfriarse y congelarse simultáneamente en muchas partes. En este caso la solidificación se produce en torno a muchos microcristales de hielo, por lo que estos tienen muy pocas oportunidades de aumentar de tamaño. Puesto que la mayoría del agua interfibrilar se congela intracelularmente, las pérdidas por goteo durante la descongelación son menores que en caso de la descongelación de la carne congelada lentamente. Por otro lado, el acortamiento y distorsión de la fibra muscular se minimiza durante la congelación rápida, lo que se traduce en una ultra estructura y aspecto estriado del musculo congelado normalmente. Los cambios de volumen son menores y los periodos de cristalización más cortos que en el musculo congelado lentamente, y en consecuencia el deterioro mecánico es correspondientemente menor (Forrest, 1975).

Actualmente los procesos de congelación, tienen variantes de diseño y condiciones de proceso, lo que trae a su vez como consecuencia cambios en propiedades fisicoquímicas. La velocidad con que se congela la carne varía con el método utilizado.

Congelación por aire

En la congelación por aire se utilizan cámaras con o sin circulación forzada de aire. En aquellos espacios donde no existe una adecuada velocidad de circulación del aire, la congelación es lenta y los resultados poco satisfactorios. Este método de congelación depende completamente de la convección, es decir, de la transferencia de calor que es capaz de generar el gas refrigerante y la circulación de aire, de este modo la carne es congelada muy lentamente. Los congeladores domésticos, trabajan basados en la congelación por aire estante. Las temperaturas comerciales corrientemente empleadas en estos congeladores oscilan entre -10 y -30 °C. Debido a la lenta velocidad de congelación de estos, no deben introducirse simultáneamente cantidades grandes de carne (Genot, 2001).

Cambios en la carne durante la congelación.

Un mal control del proceso de congelación tiene influencia directa en la calidad final del producto y si bien la congelación no mejora la calidad, si puede convertir un producto de alta calidad en uno inservible. A continuación, se describen los cambios de calidad asociada al producto (Genot, 2001).

- **Deshidratación superficial por frío.** Durante el almacenamiento congelado, la carne está sometida a fluctuaciones de temperaturas y, debido al calor perdido durante la congelación, se genera entonces una deshidratación o secado superficial de los cortes. Las pérdidas de agua durante la congelación representan generalmente entre el 0.5 y 1.2 % de la masa del producto.
- **Oxidación lipídica.** Es el factor limitante de la carne congelada, limita el periodo de almacenamiento. Dependerá de la especie, si tiene más ácidos grasos insaturados se enrancia más rápido. Todas las formas de oxidación son consideradas como asociadas entre sí. Así, cuando la oxidación lipídica inicia da lugar a la formación de pro-oxidantes capaces de reaccionar con la oximioglobina, que a su vez conduce a la formación de metamioglobina. La misma lógica se refiere a la oxidación de la mioglobina. La oxidación por lo tanto puede ser comparada con una reacción en cadena dentro de la carne, iniciado por la fracción lipídica y traspasada a la fracción de la mioglobina. Por lo tanto, si la oxidación de lípidos se acelera por el almacenamiento congelado, esto aumentaría la cantidad de radicales libres presentes, lo que lleva a una mayor tasa de oxidación de la mioglobina. Leygonie *et al.*, (2012) cita a Livingston y Brown (1981) quienes proponen la existencia de un sistema enzimático capaz de reducir metamioglobina de nuevo a la mioglobina, el cual se denominó la actividad reductora de la metamioglobina (MRA). La teoría es que en el músculo fresco, la enzima es muy activa y la metamioglobina formada se reduce rápidamente a deoximioglobina y oxigena de nuevo a oximioglobina reteniendo así el color florecido. Sin embargo, cuando la carne se congela, la actividad de la MRA se reduce y la metamioglobina comienza a acumularse en la superficie de la carne a un ritmo rápido. Si el MRA se ha vuelto menos eficaz en la lucha contra la oxidación, esto explicaría por qué una disminución más rápida en la estabilidad del color se observa después

congelación de la carne. El pH de la carne que ha sido congelada y descongelada tiende a ser más bajo que antes de la congelación. Como el pH es la medida de la cantidad de iones de hidrógeno libres (H^+) en una solución, es posible que la congelación con producción de exudado posterior podría causar la desnaturalización de proteínas, la liberación de los iones de hidrógeno y una disminución en el pH subsecuente. Alternativamente, la pérdida de líquido del tejido de la carne puede causar un aumento en la concentración de los solutos, lo que resulta en una disminución en el pH (Leygonie *et al.*, 2012).

- **Desnaturalización proteica.** Depende de la temperatura de congelación, cuanto más alta se desnaturalizarán más rápido las proteínas; también de las fluctuaciones de temperatura, si fluctúa mucho se produce una mayor desnaturalización proteica. Por ejemplo, en la miosina que se compone de una parte globular y otra fibrilar, la parte globular se desnaturaliza a lo largo del tiempo, independientemente de los factores ambientales. La parte más importante es la fibrilar y depende de la temperatura y del tiempo. De la parte fibrilar dependerá la capacidad de retención de agua. Si se desnaturalizan las proteínas fibrilares bajará la capacidad de retención de agua y cuando descongelemos aparecerá un gran exudado. La desnaturalización conduce a un aumento de la susceptibilidad de la mioglobina a la auto-oxidación y la posterior pérdida de la presentación óptima del color. Esta teoría ha sido verificada por muchos autores comparando el grado de la floración y la capacidad de la carne para resistir la oxidación a metamioglobina durante el almacenamiento refrigerado posterior a la congelación/descongelación. (Leygonie *et al.*, 2012).

Si la congelación de la carne es lenta, gran parte del agua que presenta se acumula extracelularmente y se congela en espacios grandes. Los bordes agudos de los cristales de hielo que se forman en estos espacios, pueden punccionar las fibras musculares liberando más agua. La alteración física causada por la congelación lenta da lugar a una abundante pérdida de líquidos cuando la carne se descongela; este líquido, se denomina goteo. Un goteo excesivo da lugar a un envasado nada atractivo, a pérdida de nutrientes y desecación o sequedad en un posterior tratamiento como puede ser la carne cocinada (Forrest, 1975). Lo anterior conduce a que durante el almacenamiento congelado se puede sufrir una pérdida de calidad.

En un mal tratamiento por bajas temperaturas se presenta un color pálido en la carne, el cual es un atributo no deseable y esto se debe al tamaño de los cristales. El daño en la congelación se refiere a los cambios que son irreversibles en el tejido debido al proceso mismo de la congelación, los cuales se manifiestan después de descongelar la carne. Este se da como consecuencia de diferentes procesos o mecanismos, como podrían ser el daño por deshidratación y el daño debido a la formación de cristales.

Cambios en la carne durante la descongelación.

Durante la descongelación, la temperatura del hielo sube de manera relativamente rápida para estabilizarse sobre los $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura a partir de la cual, el proceso de difusión del hielo empieza a ser apreciable; este proceso es más lento que la congelación, puesto que la conductividad térmica de los tejidos congelados es menor que la de los no congelados (Genot, 2001).

La capa de hielo se va difundiendo desde el exterior hacia el interior y a medida que va creciendo el grosor de la capa de agua, la velocidad de transmisión de calor se reduce (Aguado, 2001). En la descongelación a escala industrial los productos congelados no se llevan a descongelación completa ya que únicamente se pretende prepararlas para operaciones comerciales subsiguientes. Entonces se realiza un atemperado, que es una descongelación hasta que el producto se ablanda y se puede cortar (Aguado, 2001).

Por naturaleza es un proceso más lento que la congelación y la mayoría de los intentos de acelerar este proceso son dañinos para la carne. Un rápido templado de la carne con agua caliente puede causar la desnaturalización de proteína y, si no está empacada, el contacto directo entre la carne y el agua resultará una mayor pérdida de proteína.

Formación de exudado

La exudación es una pérdida de agua que se manifiesta en la descongelación; representa generalmente entre un 1 y un 5 % de la masa inicial del producto lo que se traduce en pérdidas económicas cuando el producto se vende descongelado, incluso pudiendo llegar a reducir su aceptabilidad por parte de los consumidores. Los exudados de la carne contienen proteínas sarcoplásmicas principalmente solubles en agua, que son uno de los principales grupos de proteínas de las proteínas miofibrilares musculares, y contienen una mezcla de nucleótidos, aminoácidos, péptidos, proteínas, y muchas enzimas solubles (Savage *et al.*, 1990).

El fenómeno de la exudación contribuye a la pérdida de algunos nutrientes (vitamina del grupo B, proteínas sarcoplásmicas, aminoácidos libres, bases nitrogenadas, etc.), y constituye también un factor de riesgo, ya que el agua exudada es un compuesto favorable para el crecimiento de microorganismos (Genot, 2001; Knipe, 1995).

La rapidez con que el exudado emigra al exterior está condicionada por los siguientes factores:

1. Capacidad de retención de agua de las proteínas musculares.
2. Tamaño y forma de las piezas de carne.
3. Orientación del corte con respecto a la posición de las fibras.
4. Presencia de vasos sanguíneos.
5. Naturaleza del proceso de congelación.
6. Tamaño y localización de los cristales de hielo.
7. Velocidades de congelación y descongelación.
8. temperatura y periodo de almacenamiento.
9. Envasado.

El exudado (goteo o pérdida de purga) está estrechamente relacionado con la oxidación de proteínas musculares y la desnaturalización que son responsables de la disminución del pH del músculo, decoloración, y la dureza.

Se acepta generalmente que el control de la capacidad de retención de agua (WHC) es muy importante para reducir al mínimo la formación de exudados en la carne. Sin embargo, la pérdida de exudados de la carne es inevitable, porque se produce una cierta pérdida de humedad debido a la presencia de agua en una forma libre en el tejido muscular. La influencia de la calidad de la carne exudados durante el almacenamiento frío no ha sido identificada. Por lo tanto, la hipótesis de que la presencia de exudados afecta la calidad de la carne, tales como color, pH muscular, sensibilidad, la oxidación de lípidos, y el crecimiento microbiano (Kim *et al.*, 2013).

1.4 EL ULTRASONIDO.

Principios generales del ultrasonido.

El ultrasonido de potencia representa una tecnología novedosa, la cual ha creado bastante interés debido a sus efectos promisorios en las áreas de procesamiento y conservación de alimentos; sin embargo, y aunque actualmente es considerada una tecnología emergente, el uso de la tecnología de ultrasonido no se ha promovido para su aplicación en productos comerciales. Solo se ha reconocido como una tecnología que asiste o ayuda en la modificación de procesos o mejora de los existentes (Knorr *et al.*, 2004). Se define al ultrasonido como una forma de energía que viaja en ondas de sonido iguales o mayores a 20000 vibraciones por segundo; otra definición la realizó Mason (1998), en la cual lo establece como cualquier sonido con frecuencia más allá de lo que el oído humano puede percibir (16 KHz). Las aplicaciones de las ondas ultrasónicas se dividen por lo general en dos grupos: baja y elevada intensidad. Las aplicaciones de baja intensidad son aquellas cuyo objetivo es obtener información acerca del medio de propagación sin producir ninguna modificación en su estado. Por el contrario, las aplicaciones de elevada intensidad

son aquellas en la que la energía ultrasónica se utiliza para producir cambios permanentes en el medio tratado. Por ello, los ultrasonidos de potencia (USP) se asignan a las aplicaciones de elevada intensidad. El límite entre baja y alta intensidad es difícil de fijar, pero puede establecerse de forma aproximada para aquellos valores de la intensidad para los que, dependiendo del medio, varían entre 0.1 W/cm^2 y 1 W/cm^2 . Sin embargo, Mason (1998) establece que como en el caso de otras áreas de procesamiento tecnológico, el intervalo de sonido empleado es muy amplio y se puede dividir en los de alta frecuencia baja energía en el intervalo de MHz, aplicado como ultrasonido de diagnóstico y baja frecuencia alta energía, USP en el intervalo de los KHz.

El ultrasonido es generado por una corriente eléctrica que se transforma mediante transductores, los más empleados son: transductores conducidos por líquidos, de magneto rígido y piezoeléctricos; estos últimos son los más empleados para la generación de sonido y tienen cerca del 95% de eficiencia y pueden operar en todo el intervalo ultrasónico (Mason et al., 1996).

Siendo una onda de sonido, el ultrasonido se transmite a través de cualquier sustancia, sólido, líquido o gas, que posee propiedades elásticas, mencionando algunas de ellas a continuación y presentándose en la figura 12:

- **Frecuencia.** Las ondas del sonido oscilan a una frecuencia específica, esto es número de vibraciones o ciclos por segundo. La mayoría de las aplicaciones ultrasónicas utilizan frecuencias entre 500 000 y 10 000 000 ciclos por segundo (500 KHz a 10 MHz). Las frecuencias altas son menos eficientes en el aire y otros gases, en la mayoría de los líquidos viaja libremente.
- **Longitud de onda.** Cualquier tipo de onda tendrá una longitud asociada a la distancia entre los dos puntos correspondiente de un ciclo de onda.
- **Amplitud.** Es el máximo cambio producido en la presión de la onda, es decir la distancia máxima que alcanza la partícula vibratoria desde su posición inicial de reposo (Santos et al., 2005).

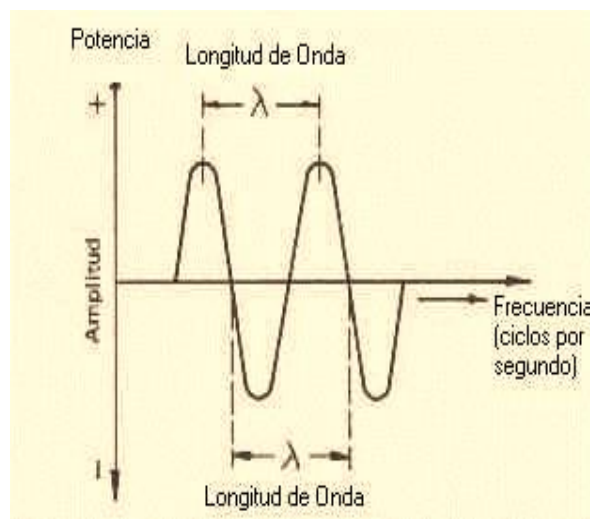


Figura 12. Propiedades de onda acústica.

Siendo una onda sonora, el ultrasonido se transmite a través de cualquier sustancia, sólido, líquido o gas que posea propiedades elásticas. El movimiento del cuerpo vibrante se comunica a las moléculas del medio, cada uno de los cuales transmite el movimiento a una molécula contigua antes de regresar a su posición original.

Para líquidos y gases, la oscilación de la partícula tiene lugar en la dirección de la onda y produce ondas longitudinales, como se muestra en la figura 13(a). Sin embargo, para sólidos pueden también soportar tensiones tangenciales que dan lugar a las ondas transversales, en las que el movimiento de partículas es perpendicular a la dirección de la onda, (figura 13(b)) (Mason & Cordemans, 1996).

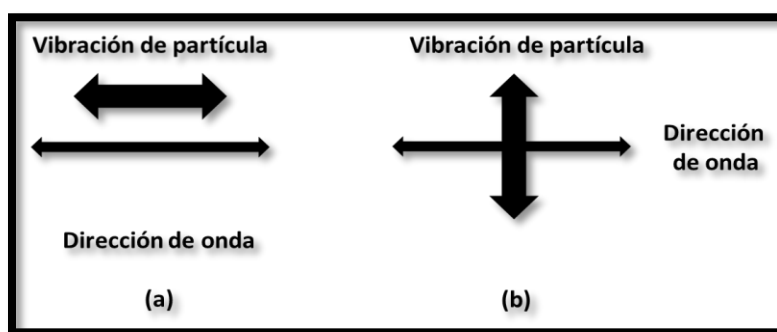


Figura 13. Movimiento de partículas (a) longitudinales, (b) ondas transversales.

Efectos del ultrasonido.

El efecto conservador del ultrasonido está asociado a los fenómenos complejos de cavitación gaseosa, que explican la generación y evolución de microburbujas en un medio líquido. La cavitación se produce en aquellas regiones de un líquido que se encuentran sometidas a presiones de alta amplitud que alternan rápidamente.

El resultado es la formación ininterrumpida de microburbujas cuyo tamaño aumenta miles de veces en la alternancia de los ciclos de presión. Las microburbujas que alcanzan un tamaño crítico implosionan o colapsan violentamente para volver al tamaño original. La implosión supone la liberación de toda la energía acumulada, ocasionando incrementos de temperatura instantáneos y focales, que se disipan sin que supongan una elevación sustancial de la temperatura del líquido tratado. Sin embargo, la energía liberada, así como el choque mecánico asociadas al fenómeno de implosión, afectan la estructura de las células situadas en el microentorno. Las implosiones son asimétricas si se producen cerca de una superficie sólida, generando un microjet (figuras 14 y 15) que golpea el sólido (Mason, 1998). Estos microjets que golpean la superficie del alimento sólido pueden producir

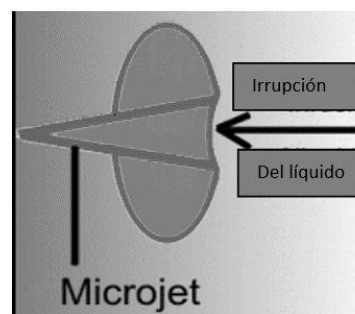


Figura 14. Formación de un microjet.

una inyección de líquido dentro del sólido (Mason & Cordemans, 1996). Se considera que dependiendo de la frecuencia empleada y la longitud de las ondas de sonido, se pueden generar diferentes cambios físicos, químicos y bioquímicos que pueden emplearse en un sin número de aplicaciones en los diferentes campos industriales (Herrero, y Romero, 2006).

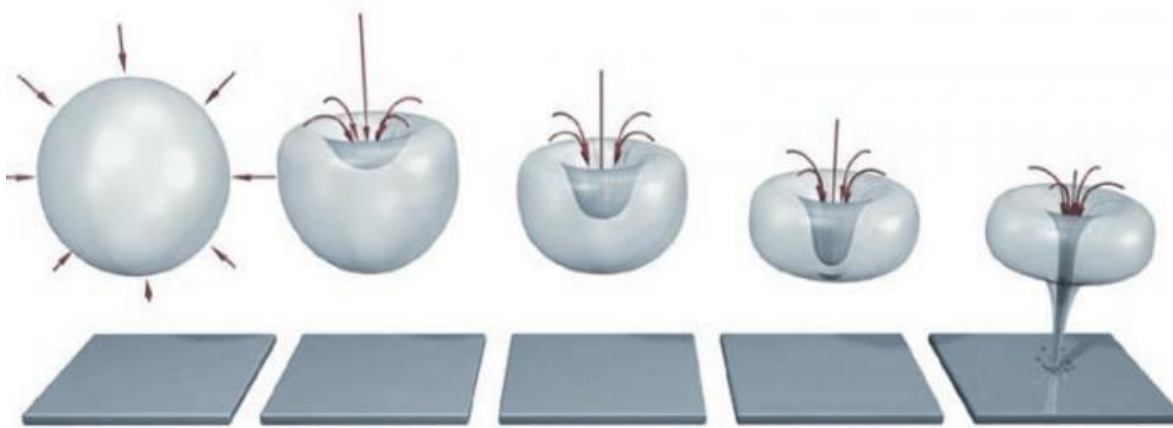


Figura 15. Creación de microjet a través del colapso de burbujas de cavitación.

En medio gaseoso, el principal desafío de la aplicación del ultrasonido es alcanzar una transmisión eficaz de las ondas acústicas a altas frecuencias debido a la diferencia de impedancia acústica entre los transductores y el gas, así como la alta atenuación ultrasónica en medio gaseoso. Sin embargo, cuando el ultrasonido es aplicado en una forma eficiente, puede producir efectos intensos en las interfaces, como variaciones de presión o micro agitación, que pueden afectar a los fenómenos de transferencia de masa (Cárcel *et al.*, 2007) mediante la reducción del espesor de la capa límite.

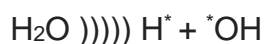
En materiales sólidos, compresiones y expansiones alternativas generadas por ondas ultrasónicas producen un efecto similar al observado cuando una esponja es apretada y soltada repetidamente (De la Fuente *et al.*, 2006). Este “efecto esponja” produce la salida del líquido de la parte interna de la partícula a la superficie del sólido y la entrada del fluido desde afuera. Las fuerzas involucradas en este mecanismo pueden ser más grandes que la tensión superficial que mantiene las moléculas de agua dentro de los capilares del material, creando canales microscópicos (Muralidhara *et al.*, 1985) y realizando los intercambios de materia más fácil. Otros efectos que son considerados son la variación de viscosidad, tensión superficial o la deformación/degradación de la estructura sólida.

Desde un punto de vista general, todos los efectos producidos por el ultrasonido pueden influenciar los fenómenos de transferencia de masa y/o calor, disminuyendo la resistencia externa o interna al transporte. En tratamientos con un sólido inmerso en un fluido, el ultrasonido puede acelerar el transporte interno haciendo más fácil la entrada y/o salida de fluidos en la matriz sólida y también facilitando los intercambios entre la superficie sólida y el fluido.

Los componentes de las proteínas y ácidos nucleicos contenidos en la célula son grandes macromoléculas, fácilmente desnaturalizados por las condiciones extremas de temperatura o la oxidación (Mason *et al.*, 2002).

Durante la cavitación, los radicales hidroxilo pueden ser producidos y estos radicales generados pueden reaccionar con los compuestos de los alimentos fácilmente oxidables. Dependiendo del proceso y la matriz, los efectos químicos de cavitación acústica pueden ser benéficos o perjudiciales. La formación de radicales se considera como una desventaja para la preservación de la bioactividad de los alimentos, tales como fenoles. Sin embargo, puede aumentar la actividad antioxidante de los otros componentes, tales como flavonoides (Ashokkumar *et al.*, 2008).

La generación de varios radicales altamente reactivos se debe a las moléculas de disolvente y soluto presentes dentro de las burbujas se descomponen en condiciones extremas de presión y temperatura, que se presentan durante la cavitación. Por ejemplo, si el medio de agitación es agua, radicales H^* y *OH se generan, como se observa en la siguiente reacción.



Se puede esperar que tanto la cavitación estable y un aumento en el número de burbujas activas aumenten la cantidad de radicales OH generados con un aumento en la frecuencia de ultrasonido (Ashokkumar *et al.*, 2008).

Entonces los efectos producidos por los ultrasonidos de alta potencia cuando viajan a través de un medio son diversos y su importancia relativa depende de las características del medio. En general, el ultrasonido produce alternadamente la compresión y descompresión del medio. En los líquidos, cuando la energía ultrasónica alcanza un umbral, el ciclo de rarefacción puede superar las fuerzas de atracción y, a partir de núcleos de gas existente, pueden aparecer burbujas de cavitación (Soria y Villamiel, 2010).

Existen variables independientes que afectan el fenómeno de cavitación:

- **Efecto de la frecuencia aplicada.** Para las ondas de sonido con altas frecuencias, el tiempo requerido para crear una burbuja puede ser largo, según Kharisov & Ortíz, (1999); esto se atribuye al hecho que al aumentar la frecuencia de tratamiento, se disminuye la producción e intensidad de la cavitación en los líquidos; lo que se encuentra relacionado con el tiempo requerido para que la burbuja crezca durante la cavitación a frecuencias altas; Knorr *et al.*, (2004) sostiene que a mayor frecuencia de tratamiento el efecto de la cavitación es menor, ya que el tiempo dado a las burbujas para crecer y afectar el sistema es más corto.
- **Efecto de la temperatura.** Otro factor que afecta el umbral de cavitación es la temperatura. En general, se ha encontrado el límite del umbral a aumentar con la disminución de la temperatura. Esto puede ser en parte debido a los aumentos en ya sea la tensión superficial o la viscosidad del líquido a medida que disminuye la temperatura, o puede ser debido a las disminuciones en la presión de vapor del líquido. En general es que las burbujas de cavitación se producen más fácilmente a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo los efectos sonoquímicos de tales burbujas pueden ser reducidos (Mason & Lorimer, 2002).

El efecto de las ondas de ultrasonido de alta potencia en las propiedades físicas, bioquímicas y microbianas de la carne han sido objeto de un gran interés en los últimos años. Se mencionan algunas:

- **Terneza.** Dickens *et al* (1991), llevaron a cabo un experimento (exposición de ultrasonidos a 40 kHz) con el músculo de pechuga de pollo e informó una disminución significativa en los valores de fuerza de cizallamiento después del tratamiento ultrasónico. Este cambio se relaciona a la descomposición de los componentes miofibrilares por cavitación en y alrededor del músculo. Se observaron aumentos de temperatura de 3 a 4°C durante el curso del tratamiento. Los efectos térmicos de los ultrasonidos en un medio se producen debido a la absorción de ultrasonido, que depende de las propiedades (contenido de gas, viscosidad) del medio. Tales elevaciones de temperatura podrían haber inducido el umbral de cavitación, ya que la temperatura es uno de los muchos factores que afectan al colapso de cavidades. El ultrasonido a altas intensidades es capaz de romper componentes celulares y subcelulares, la oscilación de la presión acústica causa el ablandamiento de las membranas celulares. Los efectos de tenderizado por ultrasonido pueden estar asociados con la naturaleza destructiva de la cavitación. Si bien las burbujas y cavidades estables crecen lentamente y oscilan dentro de un medio biológico (por ejemplo, el músculo)

la producción de cavitación transitoria hace el daño principal a través de altas temperaturas y presiones. Las altas temperaturas pueden disociar enlaces moleculares y producir radicales libres. El colapso de tal cavitación es capaz de dañar la integridad de las fibras musculares en los músculos intactos, dando como resultado una carne tierna.

- **Tejido conectivo.** durante la exposición ultrasónica, la degradación molecular en la fase temprana de la cavitación es debido a fuerzas mecánicas y de larga exposición que conducen a la modificación de los polímeros por influencia sonoquímica. Nishihara y Doty (1985) estudiaron la fragmentación ultrasónica de macromoléculas de colágeno soluble extraídas de piel de ternera. Los autores sugirieron que la exposición de colágeno soluble de piel de ternera a un tratamiento de 9 kHz de ultrasonido a baja temperatura causó la fragmentación de macromoléculas de colágeno, aunque las piezas de colágeno todavía conservaban su estructura helicoidal de tres cadenas. Explican la dependencia temporal de la ruptura ultrasónica de la molécula y que hay posiciones preferenciales de escisión aproximadamente en el punto medio, a un cuarto y tres cuartos de la distancia a lo largo de la macromolécula de colágeno. Sostienen que la escisión de las cadenas macromoleculares se puede producir a enlaces débiles por la pulsación de burbujas y de colapso de estas (cavitación).
- **Tejido miofibrilar.** La despolimerización es un ejemplo particular de la ruptura de las macromoléculas por ultrasonidos. Zayas y Strokova (1972), sugieren que el ultrasonido es capaz de cambiar las propiedades de las proteínas, como la estructura y la actividad enzimática. Por ejemplo, una mejora significativa en la solubilidad de la fracción de miosina se produjo sólo después de 3 min de exposición ultrasónica. Además, concluyen que los niveles de radicales libres son significativamente más altos en los tejidos musculares, así como cambios en la liberación de aminoácidos de las proteínas musculares también fueron detectados. Los cambios químicos, que resultan en la formación de radicales libres, conducen a reacciones de radicales libres y fragmentos de macromoléculas de proteínas. Dichas proteínas son muy sensibles a los radicales libres, que son capaces de romper los enlaces de hidrógeno y causar cambios más destructivos a la estructura tridimensional de las proteínas. El ultrasonido de potencia es capaz de producir cavitación en el tejido muscular cuando se propaga y presiones extremas resultantes inducen la rotura mecánica de la estructura muscular y disocian el complejo actomiosina para producir actina y miosina.

En general, la aplicación de ultrasonido a la carne intacta provoca alteraciones en la estructura del músculo, particularmente las miofibrillas con la pérdida de la estructura típica miofibrilar, la fragmentación de las miofibrillas y desintegración de otros constituyentes celulares.

- **Proteólisis.** La proteólisis de proteínas asociadas son la causa de la terniza de la carne. De las tres categorías de proteínas del músculo esquelético (sarcoplásmico, tejido conectivo, y miofibrilares), la degradación proteolítica de la proteína miofibrilar parece ser el principal mecanismo de tenderización. Tales proteínas mantienen la integridad estructural de las miofibrillas y la degradación de estas proteínas a través de la proteólisis sería, por lo tanto, causa del debilitamiento de las miofibrillas resultando la tenderización. La capacidad de los ultrasonidos de alta potencia para romper las membranas y liberar las enzimas de las paredes celulares y compartimentos subcelulares está bien documentada. Muchos de estos efectos tienen lugar sin colapso tipo cavitación, es decir, es causada por la vibración de burbujas que producen enormes ondas de choque. Este tipo de vibración puede causar estiramiento y torsión de las delicadas membranas celulares antes de la ruptura de la pared celular. El tratamiento ultrasónico es extremadamente eficaz en la liberación de enzimas lisosomales. Got et al. (1999), estudiaron los efectos combinados de alta frecuencia y alta intensidad (2.6MHz, 10Wcm⁻²) de ultrasonidos sobre el envejecimiento de la carne y la terniza. Estos autores observaron un aumento inmediato en la liberación de calcio en el citosol, probablemente inducida por un debilitamiento de las estructuras membranosas y celulares, pero no pudieron encontrar efectos concluyentes sobre el envejecimiento de la carne o la proteólisis, o las modificaciones estructurales significativas. Tales resultados son probablemente debido a la falta de la rotura mecánica de la estructura del músculo, ya que la cavitación no se produce a altas frecuencias.
- **Ultraestructura del músculo.** Se entiende bien que la cavitación, en concreto cavitación transitoria, es capaz de producir radicales libres que tienen efectos biológicos significativos. Además, las proteínas y componentes de ácido nucleico contenidas dentro de las células son grandes macromoléculas que son fácilmente desnaturalizadas por condiciones extremas de temperatura o la oxidación. El ultrasonido rompe rápida y completamente mitocondrias. Durante la destrucción del tejido, hay una migración de proteínas, minerales y otras sustancias en la solución (Jayasooriya, 2004).

Aplicación del ultrasonido.

Como ya se ha mencionado, la intensidad de cavitación y sus efectos depende de las características del medio, como la viscosidad, y/o variables del proceso, como intensidad ultrasónica, frecuencia ultrasónica o presión.

Una característica de las ondas ultrasónicas de elevada intensidad es su capacidad para trabajar de manera que actúan en sinergia con otras formas de energía estimulando, acelerando, o mejorando muchos procesos. Esta es la razón por la que varias aplicaciones prácticas de los ultrasonidos no son exclusivamente procesos ultrasónicos sino procesos asistidos ultrasónicamente. Tal situación es particularmente importante en aquellos procesos relacionados con la industria alimentaria donde la aplicación de las ondas ultrasónicas impone la utilización de una energía limpia, no contaminante (Knorr *et al.*, 2004; Chemat *et al.*, 2011; Mason *et al.*, 1996).

Se considera como efectos ventajosos de esta tecnología lo siguiente:

- Efectiva contra células vegetativas, esporas y enzimas
- Reducción de los tiempos y temperaturas de proceso
- Pocos requerimientos de adaptación en plantas ya establecidas
- Incrementos de los fenómenos de transferencia de calor
- Posible modificación de la estructura y textura en alimentos
- Puede emplearse en procesos continuos o intermitentes

Por ejemplo, la congelación de alimentos asistida por ultrasonido es común. La calidad de los alimentos descongelados frescos conservados a través de la congelación convencional puede ser algo decepcionante en términos de textura. Esto es particularmente cierto de los frutos blandos, tales como fresas. El problema surge debido a que los pequeños cristales de hielo que se forman inicialmente en el interior del material celular de los alimentos continúan creciendo. Como estos cristales aumentan de tamaño, se rompen algunas de las paredes celulares que conducen a la destrucción parcial de la estructura del material. Hay un considerable "tiempo de permanencia" entre el inicio de la cristalización (por lo general aproximadamente a -3°C) y la congelación completa, momento en el que la temperatura del elemento entero puede descender (figura 16).

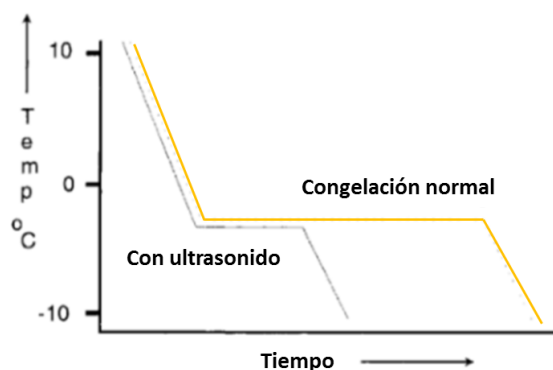


Figura 16. Ultrasonido en alimentos congelados (Mason *et al.*, 1996).

Bajo la influencia de ultrasonidos se produce un enfriamiento mucho más rápido y esto conduce a un tiempo de permanencia mucho más corto. Además, el tamaño final de los cristales de hielo es más pequeño y el daño celular se reduce. La sonicación genera cristales de hielo de un tamaño reducido de forma significativa con una distribución más uniforme a través del sólido (Mason et al., 1996).

El congelado inicia con la respectiva nucleación y posterior cristalización, en ese caso el ultrasonido mejora la velocidad de crecimiento de cristales en un medio saturado o sobre enfriado de tal manera que se forma una gran cantidad de sitios de nucleación en el medio cuando se expone a ultrasonido. Esto probablemente se deba a la cavitación de las burbujas que actúan como un núcleo para los cristales y su crecimiento o en su momento para destruir los centros o cristales presentes en el interior del medio.

Sun and Li (2003) reportan que bajo la influencia del ultrasonido, el congelado convencional es mucho más rápido, debido al gran número de núcleos y es posible un descongelado más corto y el daño al producto es menor.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Efecto del ultrasonido como pre-tratamiento sobre la pérdida de color y formación de jugos exudados en carne de cerdo congelada.

OBJETIVOS.

Objetivo general.

Determinar la influencia del ultrasonido como pre-tratamiento en lomo de cerdo evaluando el cambio de color y cuantificando la cantidad de exudados liberados para aplicarlo previo a la congelación.

Objetivo particular 1.

Seleccionar el modo de aplicación (normal, desgasificado, barrido) del ultrasonido en la carne de cerdo, a partir de los parámetros de color (L^* , a^* y b^*) obtenidos por análisis de imagen digital para utilizar el ultrasonido como pre-tratamiento a la congelación.

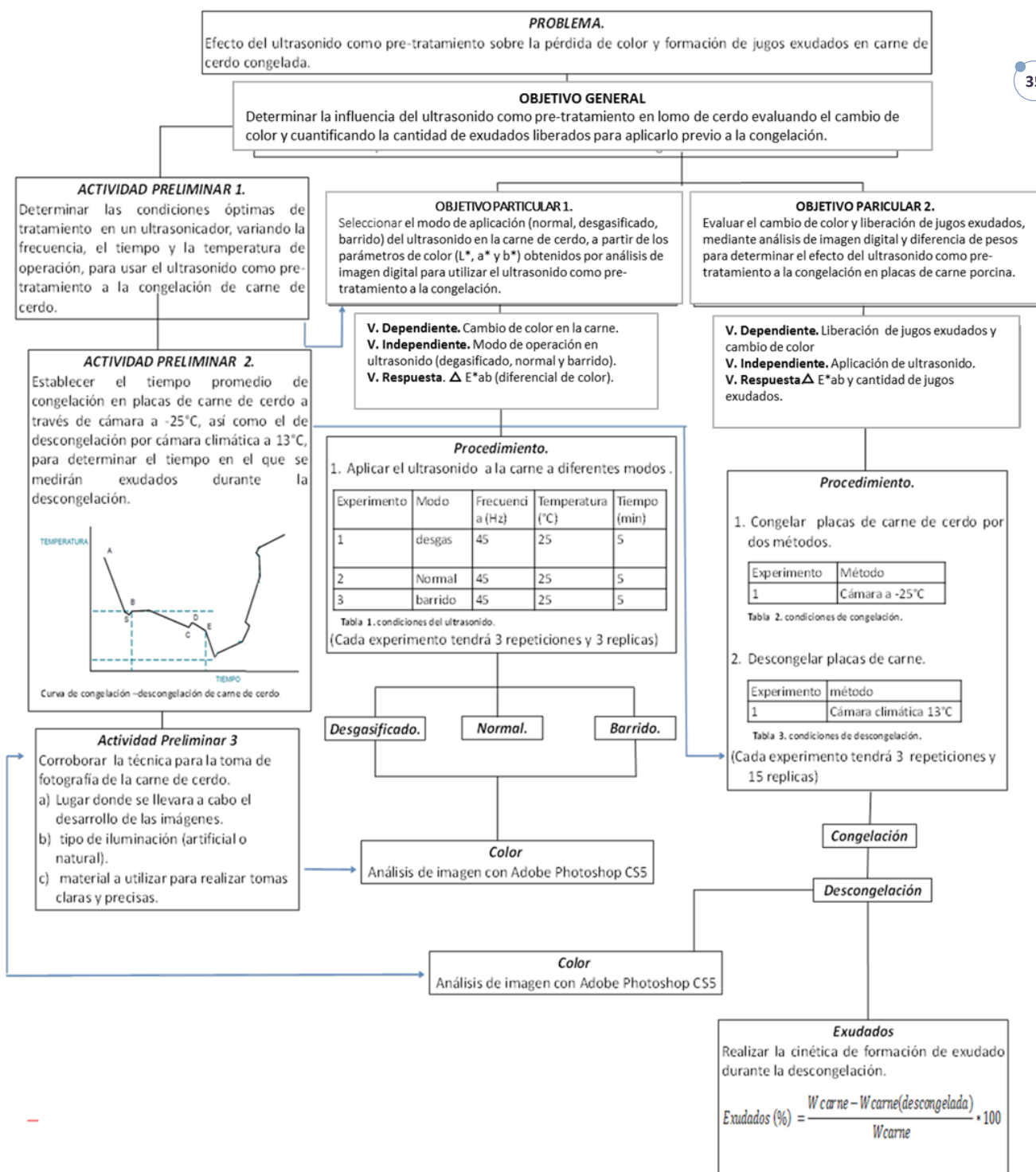
Objetivo particular 2.

Evaluar el cambio de color y liberación de jugos exudados, mediante análisis de imagen digital y diferencia de pesos para determinar el efecto del ultrasonido como pre-tratamiento a la congelación en placas de carne porcina.

Hipótesis.

Al aplicar el ultrasonido se verá favorecida tanto la velocidad de congelación como la de descongelación, asimismo se producirán menor cantidad de exudados, aunque se ocasionará un cambio mayor en el color de la carne debido a la desnaturalización y oxidación de las proteínas presentes en la carne de cerdo.

2.1 CUADRO METODOLOGICO.



2.2 EXPERIMENTACION.

Aplicación del ultrasonido.

Se seleccionarán las condiciones adecuadas para el uso del ultrasonificador, variando la frecuencia, el tiempo y la temperatura de operación para usarlo como pre-tratamiento a la congelación de carne de cerdo.

Esta actividad se llevará a cabo en un baño ultrasónico multifrecuencia TI-H-15 (ELMA, Alemania) (figura 17); se usará un osciloscopio serie TDS1000C-EDU (Tektronix, EUA) (figura 18) así como un Hidrófono H1a (AQUARIAN AUDIO, EUA) el cual será colocado en un soporte en el centro del baño del ultrasonificador para obtener los voltajes de amplitud pico a pico, usando los siguientes niveles de variación:

- Frecuencia: 25 y 45 kHz
- Temperatura: 25°C y 60°C
- Tiempo: 5 y 15 minutos



Figura 17. Ultrasonificador multifrecuencia ELMA-TI-H-15.

Durante la experimentación se evaluará el comportamiento de las ondas ultrasónicas a diferentes condiciones de operación en el ultrasonificador multifrecuencia. Las mediciones de voltaje pico-pico, es decir de la amplitud, se realizarán a través del hidrófono en un ordenador, obteniéndose los valores en Microsoft Excel. El osciloscopio registrará valores de amplitud pico-pico cada tres segundos. Los datos obtenidos se graficarán en OriginPro 8, y se analizarán los gráficos obtenidos de frecuencia vs tiempo.

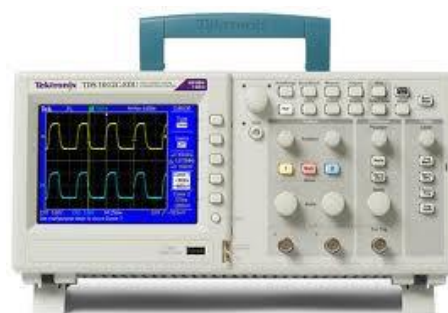


Figura 18. Osciloscopio Tektronix serie TDS1000C-EDU.

Congelación-descongelación de la carne.

Se establecerá el tiempo promedio de congelación en placas de carne de cerdo en una cámara a -25°C , así como el de descongelación por cámara climática a 13°C para determinar el tiempo en el que se medirían exudados durante la descongelación.



Figura 19. Termómetro digital HH309.

La carne será de un cerdo joven y se tomaran muestras del lomo (longissimus dorsi), esta será cortada en placas de $5 \times 2 \times 1$ cm. Para poder llevar el control sobre el cambio de temperatura se usarán 3 muestras y un termómetro digital HH309 (HANNA instruments, EUA) (figura 19) con termopares tipo "K" los cuales se colocarán en el centro geométrico de éstas, considerando dicho punto como el centro térmico. Las muestras se congelarán en bolsas de plástico con cierre hermético en una cámara de congelación modelo CV (Tor.Rey, México); los datos de temperatura se registrarán hasta alcanzar -18°C a través del software SE309.

Una vez congelada la carne, las muestras serán llevadas a una cámara climática CH-6090 (Figursa, EM, México), la cual tendrá una temperatura de 13°C para llevar a cabo el proceso de descongelación; durante este proceso también se estará monitoreando la temperatura de las muestras. La descongelación se terminará cuando las muestras alcancen 5°C . Para realizar la cinética de exudados durante la descongelación se seccionará el tiempo total de descongelación. Esta actividad será realizada por triplicado.

Determinación de color.

Para realizar esta actividad se usará una cámara digital EOS Rebel Xs 10.1 Ds (Canon, EUA) (figura 20) con ayuda de un trípode, banco óptico, dos lámparas con foco luz de día y un photobox.

Esta actividad se hará por triplicado de acuerdo a las condiciones descritas por Yam (2004) para la toma de fotografía.

A continuación se presentan los materiales y condiciones que se utilizarán:



Figura 20. Canon EOS Rebel Xs.

- 1) Distancia del lente de la cámara al plano de muestra de la carne: 30.5 cm

2) Configuración de la cámara:

- Modo de prioridad de apertura: con apertura f11.
 - Sin flash
 - Luz de día.
 - Lente macro
- 3) 1 photobox
 4) 2 lámparas con focos luz de día.
 5) 1 Tripié
- 6) Banco óptico



Figura 21. Acondicionamiento para la toma de fotografía.

*El acondicionamiento se muestra en la figura 21.

Una vez que las condiciones adecuadas para la toma de fotografía sean establecidas, se procederá a determinar el color de la carne antes de ser sometidas a cualquier tipo de tratamiento, para tener este parámetro de color como referencia y así poder ser comparado con los cambios de color que se presenten al aplicar el ultrasonido o la congelación de las placas de carne.

Estas fotografías se analizarán en Adobe Photoshop CS5, a partir de la herramienta “histograma” usando el canal Lab (figura 22).

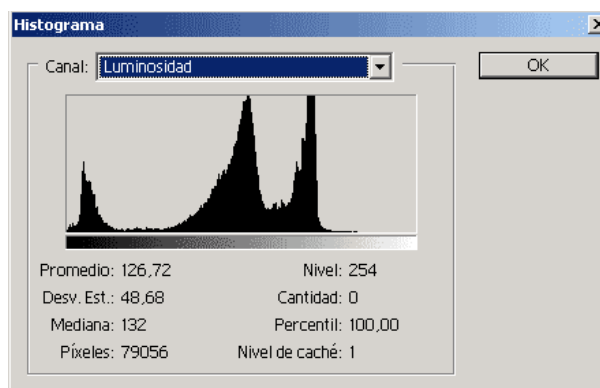


Figura 22. Ventana de histograma en Lab.

La luminosidad, a, y b en la ventana del histograma no son valores de color estándar. Sin embargo, pueden convertirse en valores L^* , a^* , b^* usando las fórmulas (Yam, 2004):

$$L^* = \frac{\text{Luminosidad}}{255} \times 100$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120$$

Después de realizar las actividades preliminares se continuará con la experimentación para cubrir con el objetivo particular 1. Se utilizará el baño ultrasónico multifrecuencia ELMA a 45 kHz durante 5 minutos y se trabajará con los tres modos de operación (barrido, normal y desgasificado), este experimento tendrá un total de tres repeticiones con tres replicas cada una en cada modo.

Para determinar el diferencial de color se tomarán fotos de las muestras antes y después del sonicado; con los valores de estas fotografías ya analizadas en la escala de color CIELAB ($L^*a^*b^*$), se utilizarán las siguientes ecuaciones para determinar el diferencial de color (ΔE).

$$\Delta L = L - L_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta a = a - a_0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta b = b - b_0 \dots\dots\dots (3)$$

Donde L, a y b son los valores para las muestras sonicadas y L_0 , a_0 y b_0 son los valores para la muestra fresca (Machado, 2008).

$$\Delta E^*_{ab} = [\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

ΔL^* = diferencia en el valor de claridad/obscuridad

Δa^* = diferencia en el eje rojo/verde

Δb^* = diferencia en el eje amarillo/azul

De aquí se partirá para determinar el modo de operación que se usará como tratamiento previo a la congelación en las placas de carne de cerdo, eligiendo el modo que cause el menor cambio en el color de la carne.

Cuantificación de jugos exudados.

Para la cuantificación de los jugos exudados de la carne será necesario pesar las placas de carne usando una balanza Scout Pro (OHAUS, EUA) de 200g (figura 23) antes de ser sonicadas y/o congeladas según sea el caso. Durante la descongelación se tomará una muestra cada 7 minutos a las cuales se les determinará la cantidad de jugos exudados que se forman realizando una cinética

de exudados. Los valores para la cinética de exudado se obtendrán con toallas absorbentes que se colocarán debajo de la placa de carne con el fin de que todo líquido expulsado de la carne, sea absorbido por la toalla. Para determinar el porcentaje de exudados se utilizó la ecuación usada por Kim (2013):



Figura 23. Balanza OHAUS.

$$Exudados (\%) = \frac{W_{carne} - W_{carne (descongelada)}}{W_{carne}}, \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

W carne = peso de la placa de carne

W carne (descongelada) = peso de la placa de carne descongelada.

Al mismo tiempo después de la determinación de exudados, a las muestras se les tomará fotografía para determinar la pérdida del color a través de Adobe Photoshop CS5, usando la escala de color CIELAB (L*a*b), a partir de la ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

Posteriormente se aplicará el ultrasonido a 45 kHz, en modo desgasificado, durante 5 minutos previamente a la congelación para evaluar tanto el efecto en el cambio de color, como su influencia en la producción de jugos exudados durante la descongelación. Esta experimentación tendrá un total de 3 repeticiones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de haber llevado a cabo la experimentación pertinente para cubrir cada una de las actividades preliminares y los objetivos, a continuación se presentan los resultados obtenidos:

Condiciones adecuadas para la aplicación de ultrasonido.

Los gráficos obtenidos de frecuencia vs tiempo a partir de OriginPro 8 se presentan a continuación en las figuras 24 y 25:

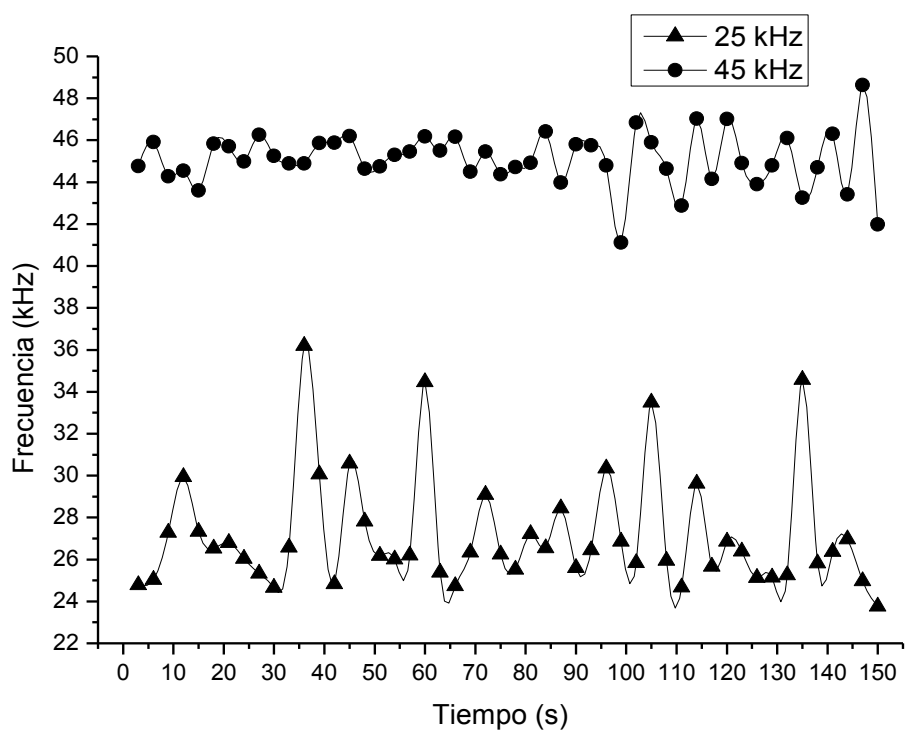


Figura 24. Frecuencia vs. Tiempo.

Se observa en la figura 24 que al usar la frecuencia de 25 kHz la amplitud de onda es mayor en relación con la de 45 kHz, haciendo referencia a que causará un menor daño a la estructura original de la carne y por lo tanto menos cambios respecto a las características fisicoquímicas y nutricionales, en general a la calidad del producto incluyéndose el color, uno de los más importantes para el consumidor. Esto también se debe a que al aumentar la frecuencia de operación se disminuye la producción y la intensidad de cavitación en los líquidos, además de que menor es la profundidad de la onda sobre el alimento. (Knorr *et al.*, 2004). Entendiéndose que a menor cavitación, menor será el impacto sobre la carne de cerdo sometida al ultrasonido, causando entonces un grado menor en la oxidación de la mioglobina

que es la proteína principalmente responsable del color de ésta, por lo que se eligió la frecuencia de 45 kHz y no la de 25 kHz.

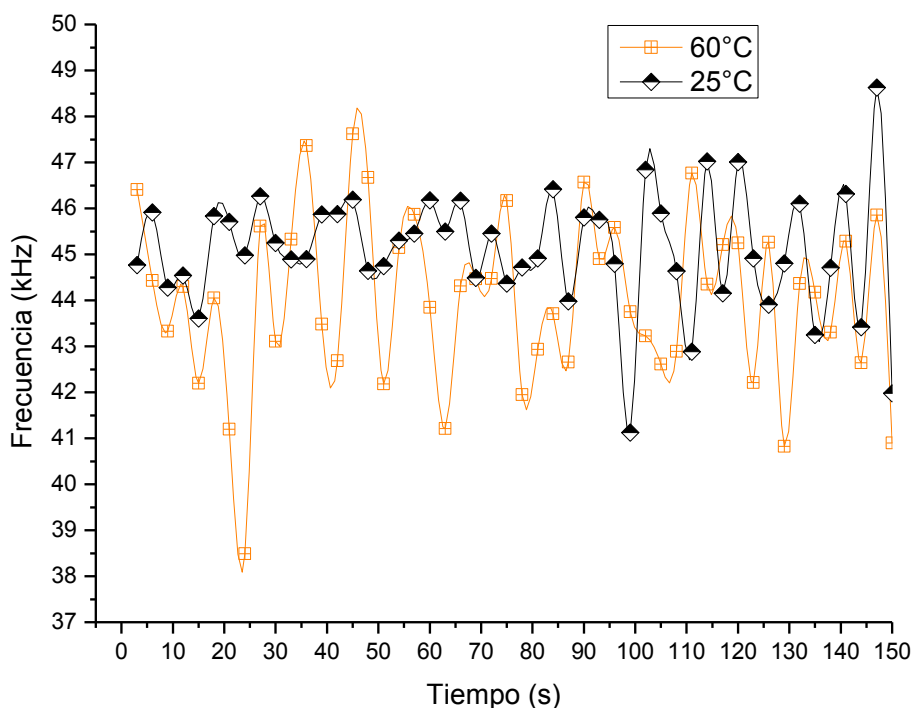


Figura 25. Frecuencia vs. Tiempo a 25°C y 60°C a 45kHz.

Se observa en la figura 25 que la frecuencia a 25°C es mayor que cuando se sonicó a 60°C, en relación a esto se optó por trabajar a 25°C pues como se mencionó anteriormente, al tener una mayor frecuencia menor será la profundidad de la onda sobre la carne. Este comportamiento de las ondas se atribuye a que al aumentar la temperatura, las burbujas de cavitación se producen fácilmente. Tales elevaciones de temperatura pueden inducir el umbral de cavitación, ya que la temperatura es uno de los muchos factores que afectan al colapso de cavidades Dickens et al (1991) y puede entonces ocasionar un mayor grado de daño sobre la carne, como proteólisis, daño en el tejido conectivo y miofibrilar, ultraestructura y/o terniza de esta por mencionar algunos efectos.

Respecto al tiempo no se presentó gráfico del comportamiento de las ondas, debido a que a menor tiempo de exposición, menor será el daño causado sobre la estructura del alimento y por lo tanto se causará una menor pérdida en el color de la carne.

Condiciones de congelación-descongelación de la carne de cerdo.

El tiempo promedio de congelación fue de 1 hora con 30 minutos sin sonicación, mientras que el tiempo promedio de congelación cuando se aplicó el ultrasonido fue de 46 minutos (figura 26).

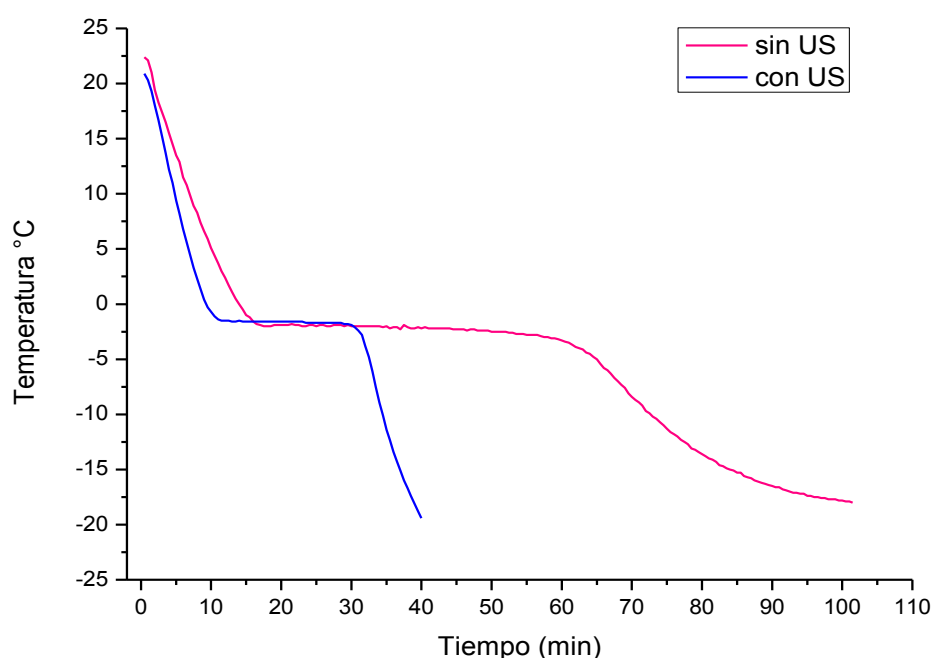


Figura 26. Historia térmica de congelación de placas de carne de cerdo con y sin la aplicación de US.

Se observa en la figura 26, que el punto inicial de congelación fue de -1.5°C , en las muestras con ultrasonido alrededor de los 9 minutos, mientras que para las muestras sin la aplicación de ultrasonido el punto inicial de congelación fue de -2°C , ocurriendo esto alrededor de los 20 minutos. Esto es debido a que la congelación asistida por ultrasonido mejora la velocidad de nucleación y velocidad de crecimiento de cristales, de tal manera que se forma una gran cantidad de sitios de nucleación y huecos intracelulares en el medio cuando se expone a ultrasonido (Robles & Ochoa, 2012), además de que se aumenta la transferencia de calor, es por ello que la velocidad de congelación se hace más rápida que en la congelación convencional (Petzold, 2009).

Los tiempos promedio de descongelación fueron de 1 hora 40 minutos sin ultrasonido y de 45 minutos cuando se aplicó el ultrasonido (figura 27).

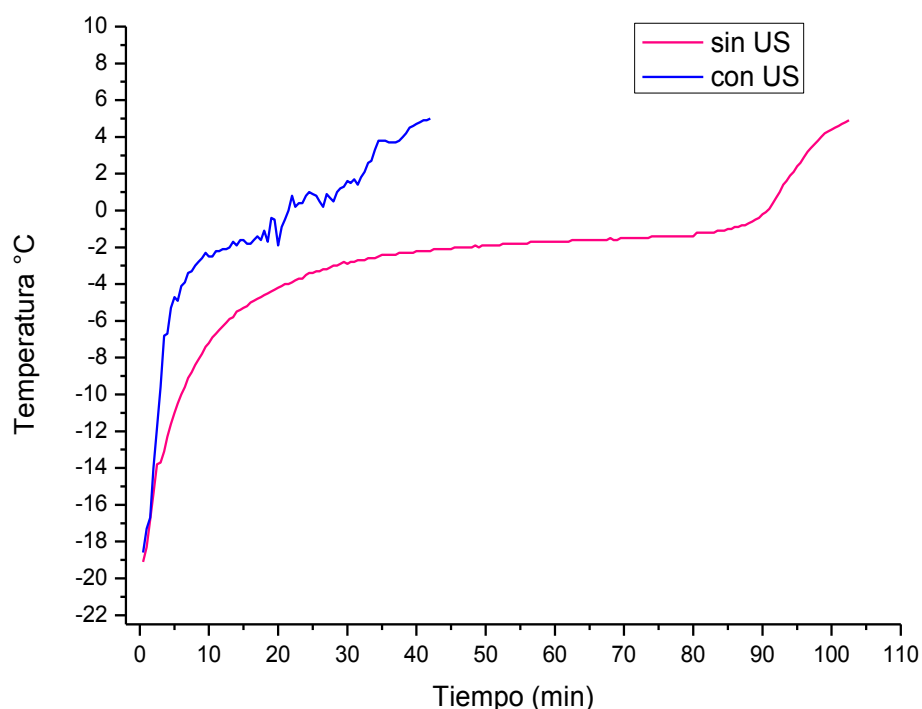


Figura 27. Historia térmica de descongelación de placas de carne de cerdo con y sin la aplicación de US.

En la figura 27, se observa que el tiempo de descongelación de las muestras asistidas por ultrasonido fue menor que para las muestras a las que no se les aplicó ultrasonido, esto se debe a la cavitación de las burbujas que actúan como un núcleo, en este caso, para destruir los centros o cristales presentes en el interior de la carne (Mason, 1996).

El objetivo de esta actividad consistió en establecer cada cuanto tiempo se sacarían las muestras durante la descongelación, con y sin ultrasonido. Las muestras que se sometieron al ultrasonido durante la descongelación se sacaron cada 3 minutos debido a que a que dicho proceso duró 45 minutos en promedio, mientras que las muestras a las que no se les aplicó ultrasonido se sacaron cada 7 minutos, pues el proceso de congelación fue de 100 minutos en promedio. Lo anterior fue para realizar la cinética de exudados y de parámetros de color en ambos casos.

Modo de operación para la aplicación del ultrasonido.

Una vez que se determinó ΔE^*_{ab} a partir de las fotografías adquiridas antes y después del sonicado se obtuvieron los siguientes resultados de ΔL^* , Δa^* y Δb^* para los modos barrido, normal y degasificado aplicados en el sonicador multifrecuencia.

Tabla 2. ΔL^ , Δa^* y Δb^* para diferentes modos de operación.*

Modo	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
Barrido	2.777	-4.888	-1.555
Normal	1.111	-3.777	-2
Degas	1.111	-2.222	-1.666

Δa^* nos indica la pérdida de color rojo en la carne, se observa que en los tres casos es negativo lo que indica que en los tres modos de operación hubo pérdida de este color, recordando que el eje verde comprende valores de (-a) y el eje rojo valores de (+a). En el modo en el que menos rojas son las muestras es en el modo barrido cuyo valor es de -4.888, seguido del modo normal en el que el valor de Δa^* es de -3.777 y finalmente en el modo en el que se pierde menos color es en el de degasificado, pues es el modo cuyo valor en el eje está más cercano al 0.

ΔL^* en los tres modos es positivo, lo que significa que en cualquiera de estos modos las muestras son más claras después del sonicado, aunque en el modo barrido es mayor comparándolo con los otros dos modos de operación haciendo referencia que en este modo las muestras son ligeramente más claras.

Δb^* en los tres casos resultó negativo lo que indica que en los tres modos las muestras se presentaron tonalidades más azules que amarillas, recordando que el eje azul comprende valores de (-b) y el eje amarillo comprende valores de (+b).

Posteriormente se determinó el ΔE^*_{ab} para cada modo de operación y así seleccionar el que tuviese el valor más pequeño, pues esto indicaría que existe un menor cambio de color en dicho modo.

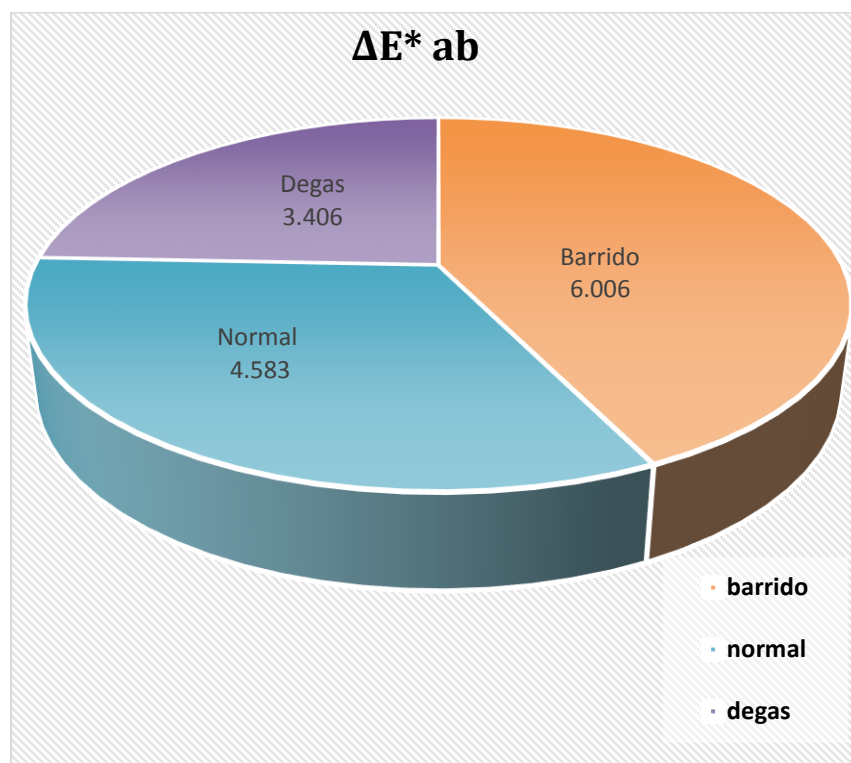


Figura 28. Diferencial de color para los modos barrido, normal y degasificado en el ultrasonicador.

A partir de los valores de ΔE^*_{ab} obtenidos, el modo de operación que se usó en el ultrasonicador como pre-tratamiento a la congelación de las placas de carne, fue el degasificado, puesto que es el que presenta la menor ΔE^*_{ab} , como se observa en la figura 28, atribuyendo a que en este modo se genera una menor pérdida de color entre las placas de carne fresca y las ultrasonicadas. Esto se debe a que por lo general este modo se usa para eliminar aire o cualquier gas presente en la solución contenida en el baño del ultrasonicador. La limpieza por ultrasonidos se realiza mediante la energía liberada por el colapso violento de pequeñas burbujas. Las burbujas de aire y aire disuelto en el líquido de limpieza absorben energía ultrasónica e inhiben la implosión de las burbujas de cavitación, reduciendo significativamente el efecto del ultrasonido (tovatech, 2013). Lo anterior puede ser la razón por la que en ese modo de operación se produce una menor pérdida en el color de la carne.

Diferencial de color (ΔE^*ab) y formación de exudados.

Se determinó ΔE^*ab durante la descongelación tanto para las muestras sin ultrasonido como para las sonicadas en modo degasificado, a continuación se muestran en la figura 29 los resultados.

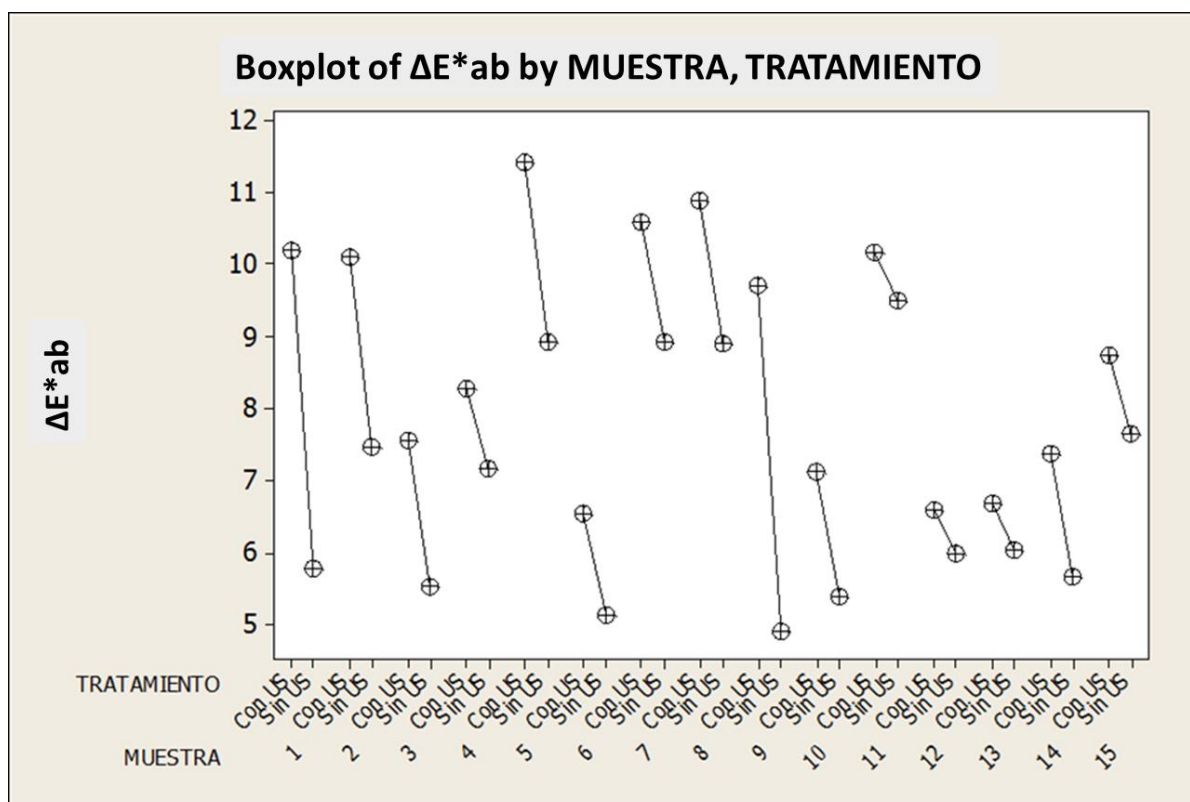


Figura 29. Cambio de color durante la descongelación de carne de cerdo (expresado en ΔE^*ab).

Se observa que para las muestras a las que se les aplicó el ultrasonido la pérdida de color (ΔE^*ab) es mayor. Esto se debe a que durante el sonicado en la carne se presenta cierta ruptura estructural de las proteínas. Específicamente la mioglobina que es la responsable del color rojo de la carne, se oxida y desnatura por las condiciones de presión y temperatura durante el ultrasonido (Mason, 2002). Por otro lado se desnatura la fracción de globina de la mioglobina durante la congelación/descongelación debido al aumento de la concentración de soluto, aumentando la susceptibilidad para su desnaturación conduciendo a una pérdida en la estabilidad del color (Leygonie, 2012). En contraste con las muestras a las que no se les aplicó ultrasonido, ΔE^*ab es menor pues previo a la congelación las placas de carne no sufrieron ningún tipo de daño y se podría decir que su estructura estaba “íntegra” al ser congeladas.

A continuación se muestra el comportamiento del parámetro a^* (enrojecimiento) que fue presentando la carne durante la descongelación.

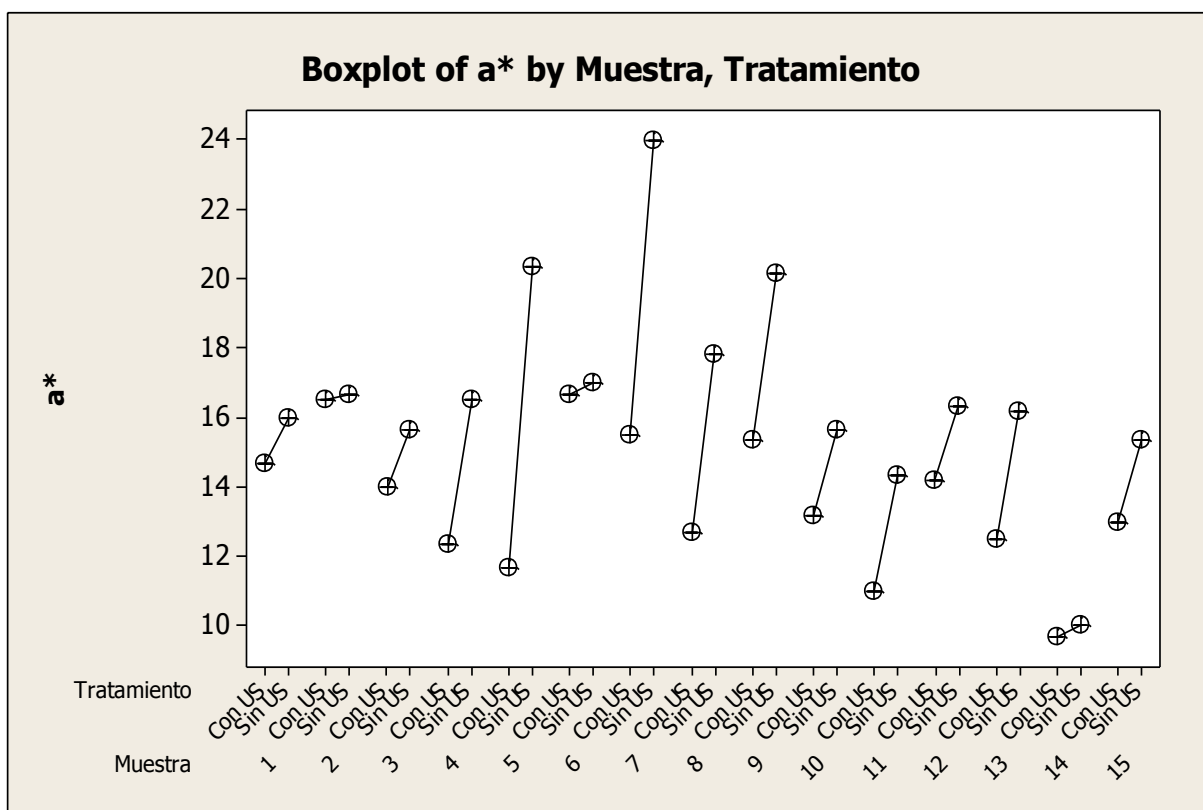


Figura 30. Parámetro CIE a^* (enrojecimiento) durante la descongelación de carne de cerdo.

Se observa en la figura 30 que el parámetro CIE a^* en todas las muestras en las que se aplicó ultrasonido es menor que en las muestras que no fueron sometidas a ultrasonido, haciendo referencia a que en las primeras muestras mencionadas se presentó una mayor pérdida de ese color rojo característico de la carne, a causa del efecto culminante de la oxidación y desnaturalización de esa fracción de globina de la molécula de mioglobina inicialmente causado en el ultrasonido y posteriormente durante la congelación/descongelación (Mason, 2002., Leygonie, 2002).

Respecto al porcentaje de exudados se presentan los resultados en la siguiente figura.

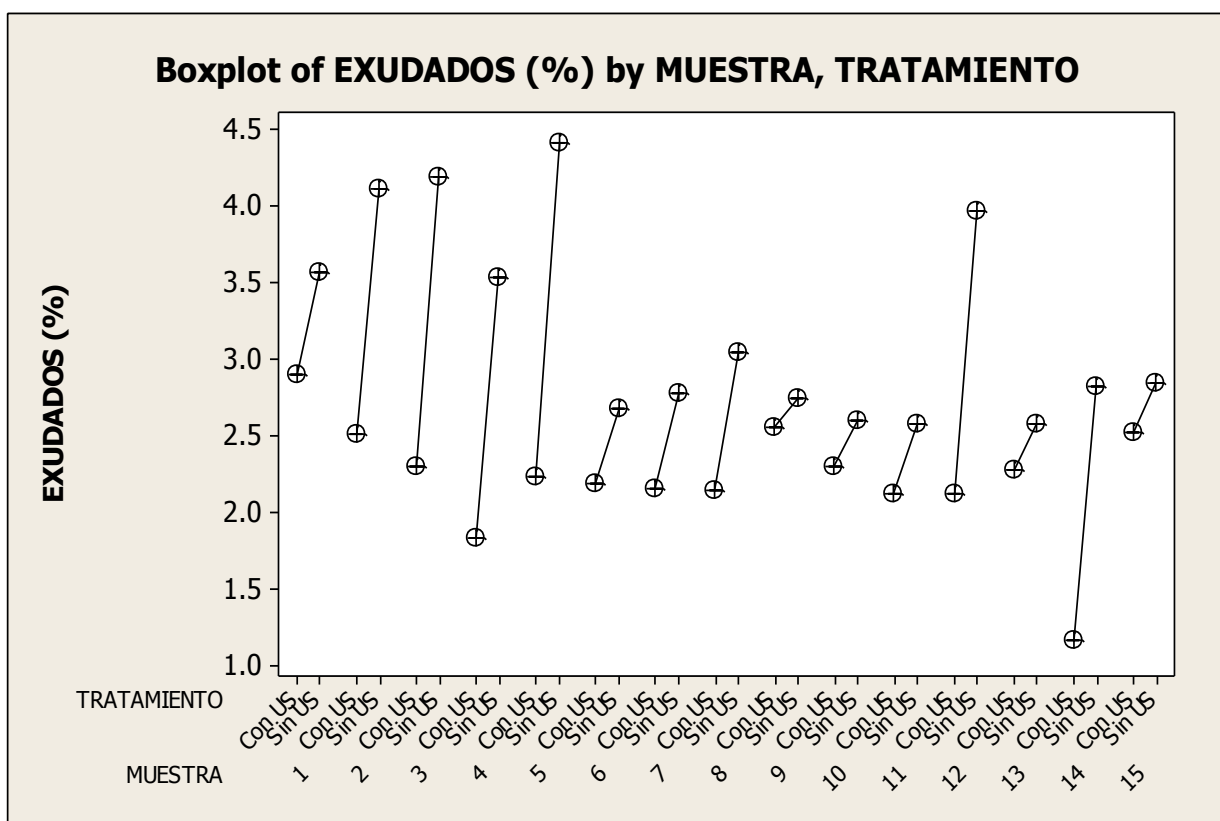


Figura 31. Porcentaje de exudados durante la descongelación de carne de cerdo.

La cantidad de exudados fue menor cuando se aplicó ultrasonido, como se observa en la figura 31, atribuyendo esto a que la aplicación del estrés acústico permite la formación de cristales de hielo más pequeños causando un menor grado de daño a la estructura de la carne (Mason, 1996), mientras que el porcentaje de exudado es superior en las muestras en las que no se aplicó ultrasonido, este es un resultado directo de la pérdida de la capacidad de retención de agua debido a la oxidación y desnaturalización de proteínas, ocasionado por la formación de cristales de hielo más grandes durante la congelación que penetran y perforan las membranas celulares, con la consiguiente fuga de humedad desde el espacio intracelular al espacio extracelular (Sun & Li, 2003).

CONCLUSIONES.

La aplicación del ultrasonido a la carne de cerdo genera una alternativa ventajosa en el proceso de congelación y descongelación, pues aceleró ambos procesos, como consecuencia de la formación de gran cantidad de núcleos debido a la cavitación, por lo que se comprueba que es una tecnología novedosa en la conservación de alimentos. Se comprobó que utilizar la frecuencia de 45 kHz durante el sonicado resulta mejor que utilizar la de 25 kHz, pues al aumentar la frecuencia de operación se disminuye la producción y la intensidad de cavitación en los líquidos, además de que menor es la profundidad de la onda sobre el alimento. Las muestras sonicadas tuvieron menor presencia de exudados, lo que resulta beneficioso en la industria, pues provocaría menores pérdidas económicas por la disminución de exudados. Se detectó un mayor cambio en la apariencia del color, especialmente en términos del parámetro a^* (enrojecimiento) consecuencia de la oxidación de la mioglobina debido a la formación de radicales libres. Hablando entonces del color en los alimentos, utilizar una imagen digital podría convertirse en una herramienta práctica para detectar cambios en el color de la carne y otros alimentos musculares, aunque no es un sustituto de los instrumentos de medición de color sofisticados, es alternativa atractiva debido a su versatilidad y bajo costo. Se demuestra que Photoshop es un software potente para el análisis de color, pues es capaz de analizar el color de las muestras de alimentos, aunque no haya sido diseñado para dicha función.

REFERENCIAS.

1. Aguado, J.A. (2001). Ingeniería de la industria alimentaria. 3. Operaciones de conservación de alimentos. Ed. Síntesis. España.
2. Akyurt, M. *et. al.* (2001). Freezing Phenomena in ice-water systems. Energy Conversion and Management. Vol. 43. Ed. Pergamon, p. 1783-1787.
3. Ashokkumar, M., Sunartio, D., Kentish, S., Mawson, R., Simons, L., Vilkhov, K., Versteeg, C.K. (2008). Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system. Innovative Food Science and Emerging Technologies 9, 155-160.
4. Awad, T.S; Moharran, H.A.; Shaltout, O.E.; Asker, D.; Youssef, M.M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. Food Research International 48, 410-427.
5. B. Kadomtsev. (2000). Ondas a Nuestro Alrededor (Física al Alcance de Todos). Mir Editorial. P 35-42.
6. Amerling, C. (2004). Tecnología de la carne. Editorial Gandhi, Berlin, p. 114.
7. Badui, D. (2006). Química de los alimentos. 4ta ed. México. Ed. Pearson Educación.
8. Billmeyer, F. & Saltzman. (1981). Principles of color technology. 2ed. Ed. John Wiley & Sons. USA.
9. Bolin, H. and Connick, E. (1976). "Phosphates offer multifunctional advantages in meat". Food processing. 44:184
10. Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Riera, E., Mulet, A. (2007). Influence of high intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. Drying Technology 25, 185–193.
11. Chemat F., Zill-e-Huma, Muhammed Kamran Khan. (2011). Applications of ultrasound in food technology. Processing, preservation and extraction. Ultrasonic Sonochemistry. 18:813-835.
12. Cortés Tinoco, Guillermo Felipe, Mora Flores, Jose Saturnino, Garcia Mata, Roberto, & Ramirez Valverde, Gustavo. (2012). Estudio del consumo de la carne de cerdo en la zona metropolitana del Valle de Mexico. Estudios Sociales (Hermosillo, Son.) 20 (40), 315-351. Recuperado el 15 de Marzo de 2016, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572012000200013&lng=es&tlng=es.
13. D. Julian McClements. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. Trends in Food Science & Technology. 6: 293 – 299.
14. De la Fuente, S., Riera, E., Acosta, V.M., Blanco, A., Gallego-Juárez, J.A. (2006). Food drying process by power ultrasound. Ultrasonics 44, e523–e527.
15. Dickens, J.A.; Lyon, C.E.; Wilson, R.L. (1991). Effect of ultrasonic radiation on some physical characteristics of broiler breast muscle and cooked meat. Poultry Sci. 70, 389–396

16. Fernández, J. M. (2005). Apuntes de Ingeniería Química. Congelación, Depto. Ingeniería, UNAM, México.
17. Forrest, J.C. (1975). Fundamentos de la ciencia de la carne. Ed. Acribia, España.
18. Fraizer, W.C. (2001). Microbiología de los alimentos. 6ª edición Española. Ed. Acribia, España.
19. Genot, C. (2001). Congelación y calidad de la carne. Ed. Acribia. España.
20. Got, F.; Culioli, J.; Berge, P.; Vignon, X.; Astruc, T.; Quideau, J.M.; Lethiecq, M. (1999). Effects of high-intensity high-frequency ultrasound on ageing rate, ultrastructure and some physico-chemical properties of beef. *Meat Sci.* 51, 35–42.
21. Guía para entender la comunicación. (n.d). Recuperado el 20 de octubre 2013, de: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/comunicacion-del-color-artes-graficas/comunicacion-del-color-artes-graficas.pdf>
22. Herrero A.M. & Romero de Ávila M.D. (2006). Innovaciones en el procesado de Alimentos: Tecnologías no térmicas *Rev. Med. Univ. Navarra* 50(4): 71-74.
23. Hui, Y. H. (2006). Ciencia y tecnologías de carnes. México, D.F. Limusa.
24. Honikel, K. O. (1990). The meat aspects of water and food quality, *Water and Food Quality*. Ed. T.M. Hardman, Elsevier, p. 277-304. Inglaterra.
25. Jaros D., Rohm H. & Strobl M. (2000). Appearance Properties- A Significant Contribution to Sensory Food Quality? *Wiss. U. Technol.* Vol. 33, No. 4.
26. Jayasooriya, S.D., Bhandari, B.R., Torley, P. & D'Arcy, B.R. (2004) Effect of High Power Ultrasound Waves on Properties of Meat: A Review, *International Journal of Food Properties*, 7:2, 301-319, DOI: 10.1081/ JFP-120030039
27. Jeffrey, Ian. (1999). *La Fotografía: Una Breve Historia*. Barcelona. Ediciones Destino.
28. Joyce A.M. & T.J. Mason. (2008). Sonication used as a biocide. A review: Ultrasound alternative to chemical biocides. *Chemistry Today*. 26(6):22---26
29. Kharisov, B., Ortiz, U. (1999). Uso del Ultrasonido en procesos químicos. *Revista de Ingenierías. UANL*. II, (5). 14.
30. Kim, G.D; Jung, E.Y; Lim, H.J; Yang, H.S; Joo, S.T; Jeong, J.Y. (2013) Influence of meat exudates on the quality characteristics of fresh and freeze-thawed pork. *Meat Science* 95, 323-329.
31. Knipe, C. L. (1995). Improving fresh pork shelf-life. *Meat and Poultry*. September.
32. Knorr D., M. Zenker, V. Heinz and D.U Lee. (2004). Applications and potential of ultrasonic in food processing. *T. Food Science & Technol.* 15:261---266.
33. Lawless, H., T. & Heymann H., (1998). *Sensory Evaluation of Food Principles and Practices*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, USA.

34. Leygonie, Coleen.; Britz, Trevar. J.; Hoffman, Lowrens.C. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science* 93-98.
35. Li, Bing; Da-Wen Sun. (2002). Novel methods for rapid freezing and thawing of foods- a review. *Journal of Food Engineering* 54, 175-182.
36. Machado-Velasco, K.M.; Vélez- Ruíz, J.F. (2008). Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y almacenamiento congelado, Vol. 7. Pp. 41-54. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Distrito Federal, México.
37. Mason, T.J. (1998). Power ultrasound in food processing. The way forward. In: Povey, M.J.W., Mason, T.J. (Eds.), *Ultrasound in Food Processing*. Chapman & Hall, London, pp. 105–126.
38. Mason, T.J., Cordemans, E.D. (1996). Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: a review. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 74, 511–516.
39. Mason T.J., & Lorimer.J.P. (2002). *Applied sonochemistry*. Wiley online library.
40. Mason T.J., Paniwnyk L., Lorimer J.P. (1996). The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry* 3, S253-S260.
41. McCaig, T.N. (2001). Extending the use of visible/near-infrared reflectance spectrophotometers to measure colour of food and agricultural products. *Food Research International*, 35.
42. Meilgaard M., Civille G. V. & Carr T. B. (1999). *Sensory Evaluation Techniques*. Imp. Boca Raton, Florida: CRC.
43. Muñoz, H. R. A., Calderón A., Cruz O. A., Tomas S.A., Sánchez, S & Peña R. G. (1999). Caracterización Óptica de Centros Absorbentes de Películas Biopoliméricas Obtenidas de Pericarpio de Maíz. *Superficies y vacío*. 8, 89-93.
44. Muralidhara, H.S., Ensminger, D., Putnam, A. (1985). Acoustic dewatering and drying (low and high frequency): state of the art review. *Drying Technology* 3, 529– 566.
45. Nakai S. & Li-Chan E. (1998). *Hydrophobic interactions in food systems*. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, U.S.A: 192.
46. Nishihara, T.; Doty, P. (1985). The sonic fragmentation of collagen macromolecules. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 44, 411–417.
47. Orrego Alzate, C. E. (2003). *Procesamiento de alimentos*. Colombia.
48. Petzold, G., Aguilera, J.M. (2009). Ice Morphology: Fundamentals and Technological Applications in Foods. *Food Biophysics*. 4:378–396. DOI 10.1007/s11483-009-9136-5
49. Prandl, O. (1994). *Tecnología e higiene de la carne*. Ed. Acribia. España.
50. Plank, Rudolf. (2005). *Empleo del frio en la industria de la alimentación*. REVERTÉ. España.
51. Ranken, M. D. (2013). *Manual de industrias de la carne*. Ed. Mundi-Prensa. España.

52. Robles-Ozuna L. E, Ochoa-Martinez L.A. (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13,2, pp. 109-122.
53. Rodríguez, R. M. (2008). Bases de la alimentación humana. Ed. Cedro, Madrid España.
54. Santos, D.E., Cancino, V.N., Yenque, D.J., Ramirez, M.D., Palominio, P.M. (2005). El ultrasonido y su aplicación. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*. Vol (8), pp. 25-28.
55. Savage, A. W., Warriss, P.D., & Jelley, P. D. (1990). The amount and composition of the proteins in drip from stored pig meat. *Meat Science*, 27, 289-303.
56. Soria, A.C., Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology* 21, 323-331.
57. Sun D.W & Li B. (2003). Microstructural change of potato tissue frozen by ultrasound- assisted immersion freezing. *Journal of Food Engineering* 57, 337-345.
58. Tan M., Chua K. J, Muhumdar A. S, Chou S. K. (2001). Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. *Drying Technology*, (19) (9), 2193-2207.
59. *Tovatech*. (n.d). Recuperado el 19 Octubre 2013, de: <http://www.tovatech.com/blog/399/ultrasonic-cleaner/how-to-degas-ultrasonic-cleaner-solution>
60. West G. E., Larue B., Touil C. & Scout S. L., (2001). The Perceived Important of Veal Meat Attributes in Consumer Choice Decisions , *Agribusiness*, Vol. 17 (3) 365-382
61. Yam Kit L., Spyridon E. Papadakis. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering* 61, 137–142
62. Zayas, J.F.; Strokova, N.D. Influence of ultrasound on properties of meat proteins. XVIII Eur. Congr. Meat Res. Workers 1972, 206–213.