



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**Efecto de la aplicación de ultrasonido como  
pretratamiento en el secado convectivo por  
infrarrojo de lomo de cerdo (*Longissimus thoracis*)**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERO EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A**

JESHUA PAUL ÁLVAREZ

**ASESORES**

DRA. ROSALÍA MELÉNDEZ PÉREZ

DR. JOSÉ LUIS ARJONA ROMÁN

**Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
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 de la aplicación de ultrasonido como pretratamiento en el secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo (Longissimus thoracis).**

Que presenta el pasante: **Jeshua Paul Álvarez.**  
Con número de cuenta: **410089257** para obtener el Título de: **Ingeniero 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 abril de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	
<b>VOCAL</b>	I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
<b>SECRETARIO</b>	M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez	
<b>2do. SUPLENTE</b>	Dr. Jonathan Coria Hernández	

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

LMCF/cnn\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

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

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
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 de la aplicación de ultrasonido como pretratamiento en el secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo (*Longissimus thoracis*).**

Que presenta el pasante: **Jeshua Paul Álvarez.**  
Con número de cuenta: **410089257** para obtener el Título de: **Ingeniero 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 abril de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>	
<b>VOCAL</b>	<u>I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa</u>	
<b>SECRETARIO</b>	<u>M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier</u>	
<b>1er. SUPLENTE</b>	<u>I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez</u>	
<b>2do. SUPLENTE</b>	<u>Dr. Jonathan Coria Hernández</u>	

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

LMCF/cnn\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN



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

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
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 de la aplicación de ultrasonido como pretratamiento en el secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo (Longissimus thoracis).**

Que presenta el pasante: **Jeshua Paul Álvarez.**  
Con número de cuenta: **410089257** para obtener el Título de: **Ingeniero 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 abril de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	
<b>VOCAL</b>	I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
<b>SECRETARIO</b>	M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez	
<b>2do. SUPLENTE</b>	Dr. Jonathan Coria Hernández	

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

LMCF/cnn\*



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

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

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
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 de la aplicación de ultrasonido como pretratamiento en el secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo (Longissimus thoracis).**

Que presenta el pasante: **Jeshua Paul Álvarez.**  
Con número de cuenta: **410089257** para obtener el Título de: **Ingeniero 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 abril de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>	<u></u>
<b>VOCAL</b>	<u>I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa</u>	<u></u>
<b>SECRETARIO</b>	<u>M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier</u>	<u></u>
<b>1er. SUPLENTE</b>	<u>I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez</u>	<u></u>
<b>2do. SUPLENTE</b>	<u>Dr. Jonathan Coria Hernández</u>	<u></u>

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

LMCF/cnn\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.

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

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Titulación  
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 de la aplicación de ultrasonido como pretratamiento en el secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo (Longissimus thoracis).**

Que presenta el pasante: **Jeshua Paul Álvarez.**  
Con número de cuenta: **410089257** para obtener el Título de: **Ingeniero 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 abril de 2021.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	_____
<b>VOCAL</b>	I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa	_____
<b>SECRETARIO</b>	M. en C. Ana María Sabina De la Cruz Javier	_____
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.A. Zaira Berenice Guadarrama Álvarez	_____
<b>2do. SUPLENTE</b>	Dr. Jonathan Coria Hernández	_____

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

LMCF/cnn\*

**AGRADECIMIENTO A PROYECTOS  
UNAM-DGPA:**

**IT201220**

**PIAPI2006**



## **Dedicatorias**

### **A mi madre,**

**Maribel**, quien ha sido el pilar más importante en mi vida, me has enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me has dado todo lo que soy como persona, mis valores, principios, perseverancia y empeño, todo siempre con gran amor.

### **A mi sobrino**

**Carlitos**, mi motor de vida, gracias por compartir conmigo ese amor inmenso que guardas, por ser mi compañerito de aventuras, cómplice de locuras, sorpresas y travesuras.

Con amor tío Befá.

### **A mis amigas**

**Ana**, quien desde nuestros años como estudiantes ha sido una extraordinaria compañera de vida, por apoyarme cuando más la necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias, siempre te llevo en mi corazón.

**Mayela**, quien ha sido incondicional en mi vida, por compartir grandes momentos de felicidad y alegría que sin duda marcaron mi vida para siempre, por tu amor y compañía en cada etapa de mi vida, mil gracias, ocupas un lugar muy especial en mi corazón.

**Ale y Karina**, quienes me han demostrado el verdadero significado de la palabra amistad desde hace 15 años, gracias por estar conmigo en todo momento, por ser leales y tan especiales en mi vida, por motivarme cada día a ser una mejor persona.

Al resto de mi familia por demostrarme su cariño y amor en cada momento; mis hermanas **Kryssel y Pamela**, mis sobrinos **Valeria, Arantza, Yamilet y Eidan**.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y en especial a la **Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán** que me dieron la oportunidad de formar parte de ellas.

## **Agradecimientos**

A la Dra. **Rosalía Meléndez** por su dedicación para la revisión y realización de este proyecto, por motivarme y alentarme a cerrar este capítulo de mi vida, por haberme dado la oportunidad de desarrollar mi tesis profesional en el laboratorio 13: Análisis Térmico y Estructural de Alimentos en la UIM de la FESC- UNAM, por el apoyo y facilidades que me fueron otorgadas, por sus consejos como académica y como persona. Por todo lo que me ha enseñado.

Al Dr. **José Luis Arjona** por su atención y orientación durante la realización de este proyecto, por las sugerencias recibidas y por compartir su conocimiento como investigador y académico.

A la Dra. **Marta Rosas** por su apoyo al inicio de este proyecto, por sus consejos, gran sabiduría, paciencia, apoyo y ánimo brindado durante mi estancia en el laboratorio, donde tuve la oportunidad de aprender y finalizar este proyecto.

Al resto de los miembros del jurado de corrección de tesis y examen profesional, integrado por I.A. **Laura Cortázar**, M. en C. **Ana María Sabina De la Cruz**, I.A. **Zaira Guadarrama** y Dr. **Jonathan Coria**, por su tiempo, por la revisión cuidadosa que han realizado de este proyecto y sus valiosas sugerencias y aportaciones.

Un trabajo de investigación es también fruto del reconocimiento y del apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman, sin el cual no tendríamos la fuerza y energía que nos anima a crecer como personas y como profesionistas.

Todo esto nunca hubiera sido posible sin el amparo y amor incondicional que me inspiro mi madre. Las palabras nunca serán suficientes para testimoniar mi amor y agradecimiento.

A todos ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud.

**Jeshua Paul Alvarez**

# Índice

Introducción	1
Resumen	3
Capítulo I. Antecedentes	4
1.1. Situación actual de la carne de cerdo	4
1.2. Carne de cerdo	8
1.2.1. Estructura de la carne	8
1.2.2. Composición química de la carne	9
1.3. Ultrasonido de alta intensidad	15
1.3.1. Mecanismo de acción del ultrasonido	19
1.3.2. Efectos del ultrasonido	20
1.3.2. Aplicaciones del ultrasonido de alta intensidad en alimentos	25
1.4. Secado	26
1.4.1. Secado de alimentos	27
1.4.2. Secado convectivo por infrarrojo	29
1.5. Fenómeno de contracción durante el secado	33
1.6. Difusión en el secado	35
1.6.1. Coeficiente de difusión efectiva	36
1.6.2. Modelo cinético de Azuara	37
Capítulo II. Metodología Experimental	39
2.1. Objetivo general	39
2.2. Objetivos particulares	39
2.3. Diagrama experimental	40
2.4. Actividades preliminares	41
2.4.1. Caracterización de la materia prima	41
2.4.2. Determinación de humedad de la carne	41
2.5. Diseño experimental	42
2.6 Objetivo 1	43
2.6.1. Pretratamiento ultrasónico	43
2.6.2. Secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo	43

2.6.3. Deformación de las placas de carne	44
2.6.4. Cambio en volumen	44
2.7. Objetivo 2	44
2.7.1. Coeficientes de Difusión Efectiva	44
2.7.2. Cinética de Difusión Efectiva	45
Capítulo III. Resultados y análisis	47
3.1. Actividades preliminares	47
3.1.1. Caracterización de la materia prima	47
3.2. Objetivo particular 1	47
3.2.1. Fuerza para la deformación	47
3.2.2. Pérdida de volumen	48
3.3. Objetivo particular 2	51
3.3.1. Cinética de deshidratación	51
3.5. Coeficientes de difusión	53
Conclusiones	55
Referencias	56
Páginas electrónicas	62

## Índice de Tablas

Tabla 1. Principales países productores de carne de cerdo.	4
Tabla 2. Principales importadores y exportadores de carne de cerdo.	5
Tabla 3. Composición química del lomo de cerdo.	9
Tabla 4. Efectos del ultrasonido en propiedades físicas.	24
Tabla 5. Aplicaciones del ultrasonido.	25
Tabla 6. Diseño factorial.	42
Tabla 7. Humedad para carne fresca.	47
Tabla 8. Fuerza para la deformación de la carne.	47
Tabla 9. Contenido de humedad de la carne después del proceso.	52
Tabla 10. Valores del coeficiente de difusión efectiva.	53

## Índice de Figuras

Figura 1. Principales países consumidores de carne de cerdo en el mundo en 2019.	6
Figura 2. Consumo per cápita por tipo de carne en México 2019.	6
Figura 3. Participación del volumen de producción de carne por especie en México.	7
Figura 4. Estructura del músculo.	9
Figura 5. Corte transversal de miofibrilla y partes que la componen.	12
Figura 6. Esquema de molécula de miosina.	12
Figura 7. Estructura de actina.	13
Figura 8. Estructura del colágeno.	14
Figura 9. Estructura química de la mioglobina.	14
Figura 10. Intervalos de frecuencia del sonido.	16
Figura 11. Ondas ultrasónicas.	18
Figura 12. Principios físicos del ultrasonido.	18
Figura 13. Proceso de cavitación.	19
Figura 14. Creación de microjet a través del colapso de burbujas de cavitación.	21
Figura 15. Espectro de ondas electromagnéticas.	29
Figura 16. Pérdida de volumen por corrida en porcentaje.	48
Figura 17. Humedad eliminada en porcentaje para cada corrida.	50
Figura 18. Curvas de secado para los diferentes tratamientos.	51

## Introducción

El consumo mundial de carne de cerdo ha aumentado en los últimos 10 años. Entre los factores que han favorecido en el consumo destacan: el precio accesible de la carne de cerdo en comparación con su contraparte bovina y el aumento de la confianza del consumidor hacia la carne de cerdo como una fuente saludable de proteína animal.

Al cierre de 2019 se alcanzaron los 69 kg de proteína cárnica *per cápita* en todo el mundo, posicionando a México en el quinto lugar con más de 8.7 millones de toneladas de carne de res, cerdo y pollo consumidas anualmente, representando así el 3.3% del consumo mundial; es por esta razón que la conservación de la carne de cerdo es punto clave para las investigaciones la cual radica principalmente en la remoción de agua por pretratamientos y procesos. El secado es seguramente una de las operaciones unitarias más antiguas, común, diversa e intensiva energéticamente. Sin embargo, no todas las tecnologías de secado son necesariamente eficientes en términos del consumo de energía, de la calidad del producto deshidratado y de la seguridad de operación. Debido a lo anterior, es que se han desarrollado tecnologías avanzadas de secado, tales como el suministro de calor a través de infrarrojo, que permiten disminuir los tiempos de secado.

Actualmente, el empleo de ultrasonidos en el procesamiento de alimentos está basado en la ventaja que representa al reducir tiempos de proceso y conservar atributos de calidad. Además, es considerada una tecnología limpia y de gran potencial para la aplicación de procesos como secado. Fundamentalmente está establecido que el efecto de la cavitación es el que produce el efecto conservador del ultrasonido, ya que de esta manera se promueve la implosión de microburbujas las cuales generan la liberación de energía. Esto permite el aumento de temperatura que producen los diferentes cambios físicos, químicos y bioquímicos en el entorno de las células de los diferentes productos procesados.

Se ha demostrado que un sistema que combina las tecnologías de secado infrarrojo con la de secado convectivo, es más rápido y eficiente que el uso de infrarrojo y aire caliente por

separado. La transferencia de calor y materia es más efectiva desde el punto de vista energético, disminuyendo significativamente los tiempos de proceso, el consumo de energía específica, el costo de operación y se ha comprobado que existen mejoras en la calidad de los productos alimenticios.

Es por ello por lo que resulta interesante el estudio del ultrasonido como pretratamiento en operaciones como el secado convectivo por infrarrojo, que cada vez va teniendo un mayor interés.

## Resumen

En la presente investigación se estudiaron los cambios en volumen, resistencia a la deformación, pérdida de humedad de la carne, así como el coeficiente de difusión efectiva del agua en un proceso de secado convectivo por infrarrojo con un pretratamiento ultrasónico. Las variables seleccionadas en este estudio (pretratamiento ultrasónico y velocidad de aire en el secador de 4.9 y 7.2 m/s), permitieron evaluar los efectos del uso de pretratamiento ultrasónico en la velocidad de transferencia de masa, así como los cambios físicos de la carne después del secado. Los resultados fueron tratados estadísticamente mediante un diseño factorial  $2^2$  con 3 réplicas y 3 repeticiones para cada tratamiento.

Los resultados obtenidos muestran que la pérdida de humedad es la responsable de la disminución del volumen de las muestras y que a una velocidad de aire de 7.2 m/s y pretratamiento ultrasónico, se producen los mayores cambios estructurales.

La fuerza necesaria para causar deformación en la carne de cerdo fue menor en la carne sometida a pretratamiento ultrasónico 2.65 kg<sub>f</sub> en comparación con la carne cruda 4.05 kg<sub>f</sub>.

El uso de pretratamiento combinado con la velocidad de aire alta provocó una disminución del  $37.07 \pm 4.78\%$  de la humedad contenida en la muestra tras un secado de 7 minutos.

La transferencia de masa fue analizada a partir de los coeficientes de difusión efectiva del agua mediante la solución analítica de la segunda Ley de Fick realizada por Azuara en su modelo cinético considerando una placa infinita en estado no estacionario; los valores obtenidos se encontraron en el orden  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s.



## Capítulo I. Antecedentes

### 1.1. Situación actual de la carne de cerdo

El cerdo se encuentra hoy entre los animales más eficientemente productores de carne; sus características particulares, como gran precocidad y prolificidad, corto ciclo reproductivo y gran capacidad transformadora de nutrientes, lo hacen especialmente atractivo como fuente de alimentación. El valor nutritivo de la carne de cerdo la señala como uno de los alimentos más completos para satisfacer las necesidades del hombre (*Morales, 2010*).

De acuerdo con datos del Consejo Mexicano de Carne en 2019 (COMECARNE), la carne de cerdo es la que mayor producción presentó, por arriba del pollo y bovino. En la Tabla 1, se puede apreciar que durante el 2019 China se posicionó como el principal país productor, al generar más del 46.94% de la producción mundial, México en cambio se ubicó en el noveno lugar con una producción del 1.41%.

**Tabla 1. Principales países productores de carne de cerdo.**

País	Producción en miles de toneladas
China	46,500
Unión Europea	23,980
Estados Unidos	12,543
Brasil	3,975
Rusia	3,240
Vietnam	2,400
Canadá	2,020
Filipinas	1,640
México	1,405
Corea del Sur	1,310

**Fuente:** (*Consejo Mexicano de la Carne, 2019*).

Para las importaciones, en 2019 COMECARNE reporta que los principales países importadores son China, Japón y México; mientras que los principales exportadores son Unión Europea, Estados Unidos y Canadá, tal como se aprecia en la Tabla 2.

**Tabla 2. Principales importadores y exportadores de carne de cerdo.**

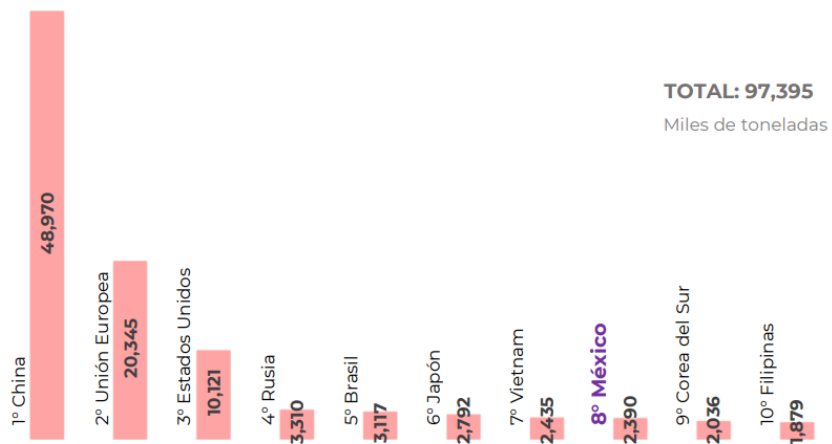
Importaciones en miles de toneladas		Exportaciones en miles de toneladas	
China	2,600	Unión Europea	3,650
Japón	1,510	Estados Unidos	2,856
México	1,200	Canadá	1,330
Corea del Sur	685	Brasil	860
Estados Unidos	434	Chile	240
Hong Kong	335	México	215
Australia	260	China	130
Canadá	250	Rusia	60
Filipinas	240	Australia	40
Colombia	155	Serbia	18

**Fuente:** (Consejo Mexicano de la Carne, 2019).

A nivel mundial, al cierre del 2019 se alcanzaron los 68.6 kg de consumo *per cápita*, posicionando a México en el sexto lugar con más de 8,723 toneladas de carne de res, cerdo y pollo consumidas por año, representando así el 4.08% del consumo mundial de carne. Así mismo, figura como un importante productor de cárnicos, ocupando la séptima posición con más de 7,050 toneladas producidas anualmente, creciendo un 3.20% en relación con 2018.

El consumo de la carne de cerdo alcanzó un crecimiento de 1.9% mientras que la producción incrementó 6.5% contra 2018. El consumo *per cápita* incremento en 4.80%, sin embargo, el consumo en México aún sigue siendo menor comparado con países Asiáticos y Europeos como se puede apreciar en la Figura 1.

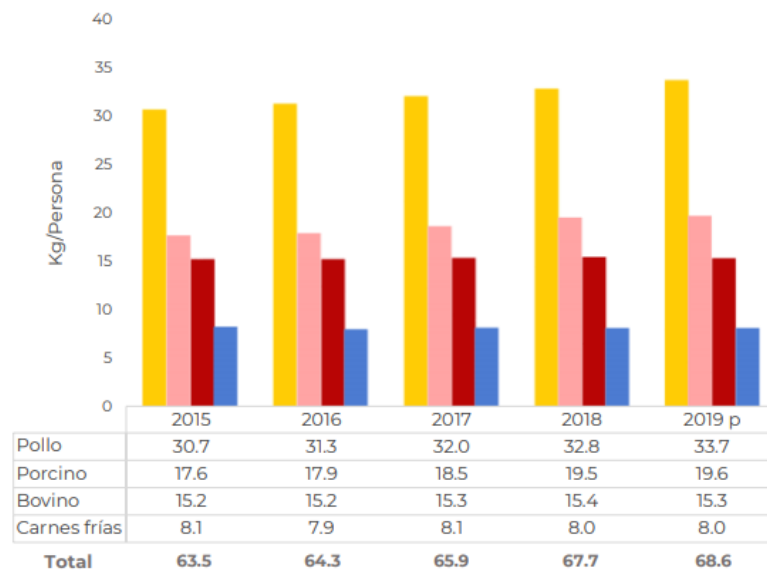
**Principales países consumidores de carne de cerdo en el mundo en 2019**



**Figura 1.** Principales países consumidores de carne de cerdo en el mundo en 2019.

**Fuente:** (Consejo Mexicano de la carne, 2019).

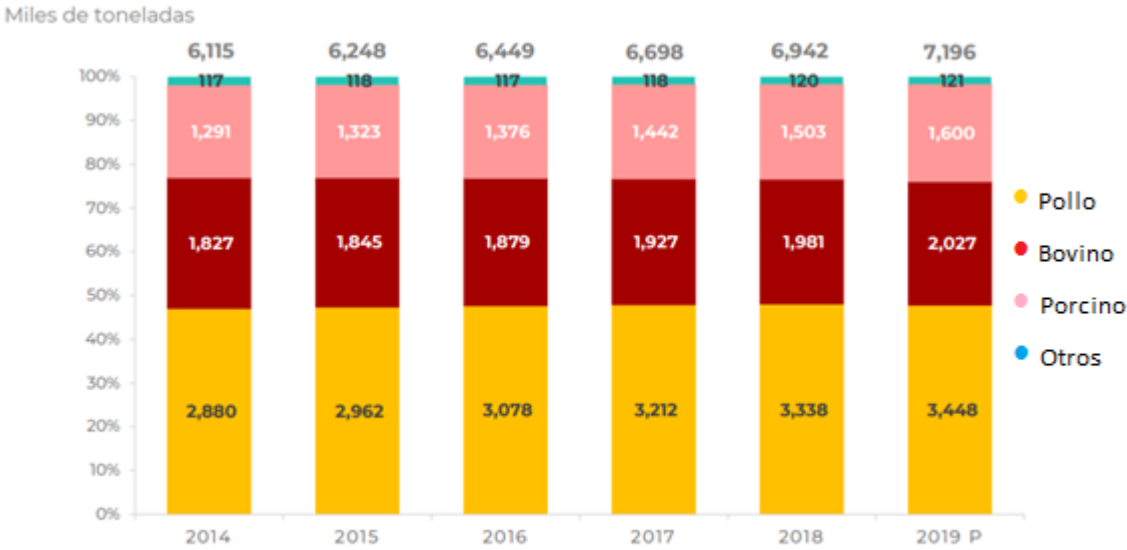
Como se aprecia en la Figura 2, el consumo de *per cápita* de carne de cerdo en México se ha mantenido con incrementos máximos de 1% y se encuentra por debajo del consumo de carne de pollo.



**Figura 2.** Consumo *per cápita* por tipo de carne en México 2019.

**Fuente:** (Consejo Mexicano de la Carne, 2019).

Por otro lado, en la Figura 3 se puede apreciar que la producción de carne de cerdo ocupa el tercer lugar en México.



**Figura 3.** Participación del volumen de producción de carne por especie en México.

**Fuente:** (Consejo Mexicano de la Carne, 2019).

En las Figuras 2 y 3 se puede apreciar que existe una amplia diferencia entre el consumo y la producción Nacional de carne de cerdo. Esta brecha es cubierta con las importaciones mismas que han aumentado considerablemente en los últimos años, estas importaciones provienen principalmente de Estados Unidos, Canadá y una pequeña parte de Chile. México es un importador neto de carne de cerdo estableciéndose como el tercer comprador mundial más importante con una participación del 15.64% del total importado durante el 2019, solo por debajo de Japón y China.

Se espera que la carne de cerdo siga siendo una alternativa de menor costo en relación con la carne de res, y presente precios competitivos respecto a la carne de pollo. Dado que los consumidores son cada vez más conscientes de que los sistemas de producción porcina son

tan fiables como los de la carne de ave y bovino, el cerdo continúa ganando la confianza del consumidor como fuente saludable de proteína animal.

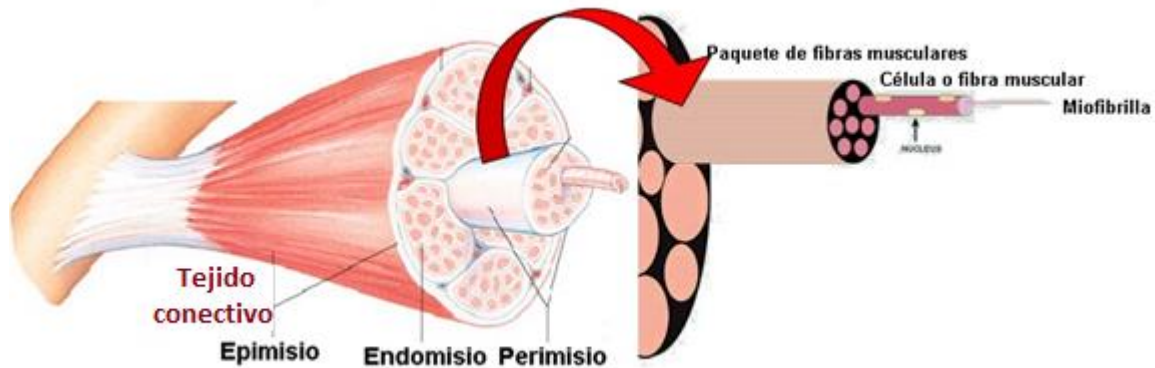
## **1.2. Carne de cerdo**

El *Codex Alimentarius (2005)* define la carne como todas las partes de un animal que han sido dictaminadas como inocuas y aptas para el consumo humano o se destinan para este fin. La carne se compone de agua, proteínas y aminoácidos, minerales, grasas y ácidos grasos, vitaminas y otros componentes bioactivos, así como pequeñas cantidades de carbohidratos.

Por otro lado, la *NOM-194-SSA1-2004* define como carne la estructura muscular estriada esquelética, acompañada o no de tejido conectivo, hueso y grasa. Además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos; proveniente de animales para abasto, que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique de modo irreversible sus características sensoriales y fisicoquímicas.

### **1.2.1. Estructura de la carne**

El conocimiento de la estructura del músculo es esencial para entender las relaciones existentes entre sus propiedades y su empleo como carne. En la Figura 4 se muestra su estructura; las fibras se acomodan y se mantienen por medio del tejido conectivo, que actúa como envoltura, denominado epimisio. El tejido conectivo se adentra en el músculo dando lugar a otro nivel que se denomina perimisio, el cual forma grupos de fibras llamados haces o fascículos. Por último, una pequeña y delgada extensión del tejido conectivo rodea a cada fibra individual, denominada endomisio (*Albisu, Magro y Rodríguez, 2008*). El músculo está formado por fascículos, que no son más que grupos de células alargadas que reciben el nombre de fibras musculares. En el interior de cada una de estas células se encuentran las miofibrillas, estructuras alargadas que están formadas por filamentos (miofilamento fino y miofilamento grueso). Estos filamentos, que son los que hacen posible la contracción muscular, están constituidos por proteínas, sobre todo por actina y miosina (*Amerling, 2001*).



**Figura 4.** Estructura del músculo.

**Fuente:** (Araneda, 2020).

### 1.2.2. Composición química de la carne

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 3 se muestra la composición química del lomo de cerdo. Los componentes mayoritarios son: agua, proteínas y lípidos, cuya proporción varía de acuerdo con la actividad desarrollada por el músculo de procedencia y en menor proporción se encuentran los carbohidratos (glucógeno) y minerales como hierro, zinc, magnesio, potasio y sodio (Albisu, Magro y Rodríguez, 2008).

**Tabla 3.** Composición química del lomo de cerdo.

Nutrimiento	Contenido %
Agua (g)	75
Proteína (g)	20
Lípidos (g)	3.4
Minerales (g)	1.6

**Fuente:** (Albisu, Magro y Rodríguez, 2008).

### **1.2.2.1. Agua**

El mayor constituyente es el agua, aproximadamente de 62 a 78% del tejido muscular. La mayor parte del agua de composición se encuentra en el interior de las células, separadas por la membrana celular y sometida a cambios iónicos por procesos de osmosis. Se puede decir que la cantidad de grasa y proteínas influye en las propiedades físicas, ya que químicamente se encuentran enlazados formando una red que impide el libre movimiento del agua con otro componente (*Martín, 2013*).

El agua en la carne se encuentra presente de dos formas:

- Agua ligada o de constitución: Que se localiza en el interior de las proteínas y está fuertemente ligada a los grupos específicos o ubicada en regiones intersticiales, y agua de interfase que está fuertemente retenida y cuya presión de vapor es menor que la del agua libre; representa del 4-5% del contenido acuoso total en el músculo, donde las moléculas polares reaccionan con proteínas por lo que es difícil de eliminar, ya que depende de la organización espacial de las proteínas miofibrilares, es decir de la disposición de los filamentos actina y miosina.
- Agua libre: Corresponde a las moléculas de agua que se mantienen en el músculo y que se encuentra presente debido a sus enlaces débiles y dadas las cargas en las proteínas pueden generar puentes de hidrógeno, que pueden ser eliminados mediante diversos métodos (*Pearce et al., 2011*).

### **1.2.2.2. Las proteínas de la carne**

Cuando una proteína tiene dos aminoácidos esenciales en cantidad suficiente, y en la proporción adecuada, se denominan proteínas de buena calidad y estas se encuentran en la carne (*Monge, 2005*). Las proteínas en la carne son útiles debido a que por medio de ellas se sintetizan aminoácidos, que participan en múltiples funciones en el organismo (*Badui, 2006*).

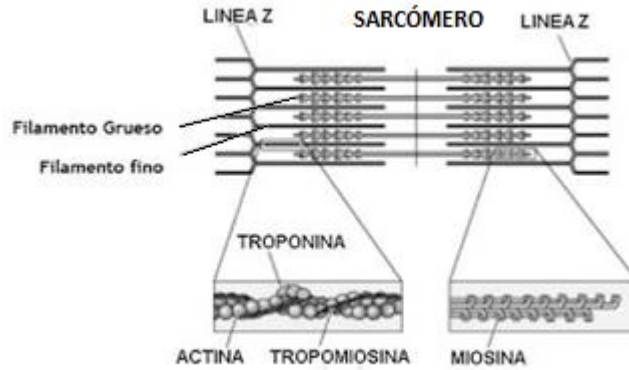
En la carne, las proteínas principales son la actina y miosina, que corresponden a las proteínas del aparato contráctil, la mioglobina que se encuentra en las proteínas sarcoplásmicas y el colágeno que es el responsable de la solubilidad y la digestibilidad de la carne, el cual es una proteína de tejido conectivo (*Albisu, Magro y Rodríguez, 2008*); dichas proteínas son susceptibles a cambios en la temperatura durante diversos procesos. Su desnaturalización implica un cambio de su estructura ya que se alteran las fuerzas de dispersión, los puentes de hidrógeno y los enlaces iónicos (*Acuña, 2006*). La oxidación de proteínas en la carne puede llevar a la disminución de la calidad de ésta debido a la reducción de la ternera, jugosidad, sabor y decoloración (*Rowe et al., 2004*). Estos cambios se deben en parte a la formación de agregados de proteínas a través de enlaces intermoleculares no covalentes y covalentes. Otros cambios comunes en las proteínas incluyen el aumento de la hidrofobicidad de la superficie, la fragmentación de proteínas que conducen a la formación de carbonilos proteicos y modificación de la carga de las proteínas a pH más bajo (*Bombrun et al., 2015*).

Las proteínas desempeñan un papel importante en la calidad de la carne, sobre todo en características como capacidad de hidratación y captación del agua, emulsificación de la grasa propiedades de gelificación, cohesión y viscosidad.

En lo que respecta a las proteínas del aparato contráctil, también llamadas proteínas miofibrilares se encuentran la miosina y la actina que son las principales proteínas estructurales, por lo que el efecto que tiene el calor sobre estas influye principalmente en la textura resultante en la cocción (*Bruton et al., 2006*).

En la Figura 5 puede observarse que tanto la actina como la miosina confieren a la miofibrilla el aspecto estriado, debido a sus filamentos paralelos y alternativamente espesos y delgados.

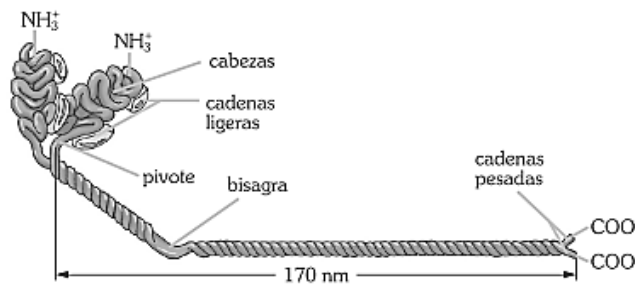




**Figura 5.** Corte transversal de miofibrilla y partes que la componen.

**Fuente:** (Jiménez, 2011).

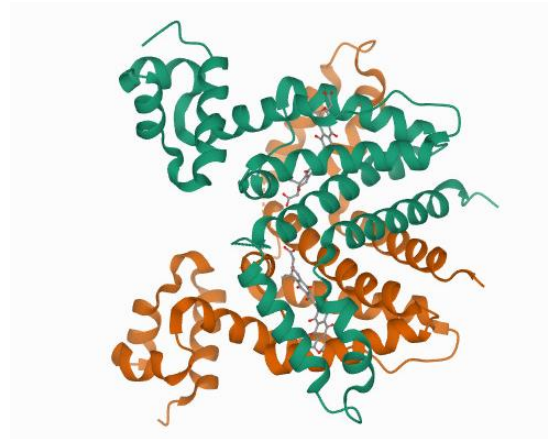
La miosina constituye aproximadamente el 45% del total de proteínas miofibrilares y comparada con la actina es la menos estable al calor, pues se desnaturaliza generalmente a partir de los 35°C (Murrieta *et al.*, 2015). La miosina es una proteína con un peso molecular de 500,000 Da, está formada por 6 subunidades; 4 cadenas delgadas y 2 cadenas gruesas enrolladas entre sí, cuya representación está en la Figura 6. Esta proteína tiene una conformación  $\alpha$ -hélice lo cual le permite libre plegamiento, además de una zona con grupos sulfhidrilo (-SH) que es la parte que actúa con la actina. Está conformada por la secuencia de aminoácidos *Gly – Glu – Ser – Ala – Gly – Lys – Thr*, que son aminoácidos ácidos y básicos, lo que la convierte en una molécula muy cargada, teniendo un punto isoeléctrico de 5.4, presentando una afinidad por los iones, sobre todo calcio y magnesio (Nelson, Lehninger y Cox, 2010).



**Figura 6.** Esquema de molécula de miosina.

**Fuente:** (Teijón y Blanco, 2006).

La actina constituye del 20 al 25% de las proteínas miofibrilares, es una proteína de estructura helicoidal con polaridad en su estructura, rica en prolina que debido a su grupo terminal amino ( $\equiv\text{N-H}$ ), contribuye al plegamiento de las cadenas. Tiene una estructura globular esférica, debida a la unión de monómeros de actina G, que en conjunto forman la actina F como se muestra en la Figura 7; la actina G que es la parte globular constituye la forma monomérica de la actina, mientras que la actina F, es una parte filamentosa (Teijón y Blanco, 2006) que genera una estructura de hélice. Su punto isoeléctrico es de aproximadamente de 4.7 (Forrest et al., 1979) y es más estable al calor, su desnaturalización comienza desde los 71 hasta los 83 °C (Cheftel, Cheftel y Pierre, 1992).



**Figura 7.** Estructura de actina.

**Fuente:** (Protein Data Bank, 2016).

Dentro de las proteínas del tejido conectivo, el colágeno es el constituyente principal. Está formado principalmente por glicina (33%), seguido de prolina, hidroxiprolina e hidroxilisina, sin embargo, un aumento en la proporción de dichos aminoácidos aumenta la resistencia del colágeno. La unidad esencial del colágeno está constituida por tres cadenas de polipéptidos que aparecen entrelazadas formando una triple hélice, constituyendo una unidad macromolecular denominada tropocolágeno, tal como se observa en la Figura 8.

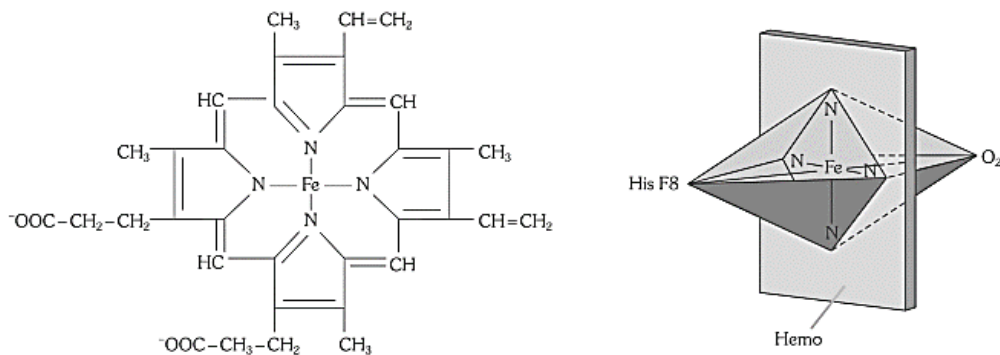


**Figura 8.** Estructura del colágeno.

**Fuente:** (Meisenberg y Simmons, 2018).

Las moléculas de colágeno se agrupan de manera específica y ordenada para formar fibras que son los componentes de la membrana protectora del músculo (epimisio, perimisio y endomisio). Su desnaturalización comienza alrededor de los 64 hasta los 70 °C; sin embargo, factores como especie, raza y edad del animal puede provocar variaciones en la estructura (Forrest et al., 1979).

Se ha mencionado que la mioglobina (Mb) es el compuesto principal que confiere el color, es una proteína sarcoplásmica globular de estructura terciaria y de bajo peso molecular que presenta una afinidad por el oxígeno y está formada de una porción no proteica llamada anillo o grupo *hemo*, representado en la Figura 9. El grupo *hemo* del pigmento tiene especial interés debido a que el color de la carne depende, del estado químico del hierro (estado de oxidación) dentro del núcleo, su desnaturalización completa ocurre alrededor de los 70 °C (Nair et al., 2014).



**Figura 9.** Estructura química de la mioglobina.

**Fuente:** (Teijón y Blanco, 2006).

### **1.2.3. Lípidos**

Su contenido en la carne en canal fluctúa ampliamente y depende de otros factores de la especie, raza, edad, sexo, alimentación y castración del animal.

Las células grasas se encuentran presentes en el tejido conectivo, en la parte externa de los haces musculares primarios; cuando se encuentran en abundancia dan a la carne su apariencia marmoleada. La grasa del tejido adiposo está constituida en su mayoría por triglicéridos, mientras que la grasa intramuscular contiene una proporción de fosfolípidos y colesterol.

Los fosfolípidos desempeñan un papel muy importante en relación con la conservación de la carne y productos cárnicos, porque se oxidan con gran facilidad. El colesterol se encuentra en los tejidos animales en forma libre o esterificada con ácidos grasos de cadena larga (*Amerling, 2001*).

### **1.3. Ultrasonido de alta intensidad**

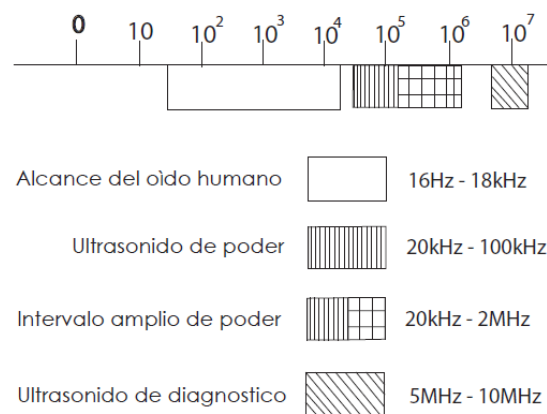
El ultrasonido de alta intensidad representa una tecnología novedosa, la cual ha creado bastante interés debido a sus efectos en las áreas de procesamiento y conservación de alimentos; sin embargo, aunque actualmente es considerada una tecnología emergente, el uso de ultrasonido no se ha promovido para su aplicación en productos comerciales. Sólo se ha reconocido como una tecnología que asiste la modificación de los procesos o mejora de los existentes (*Knorr et al., 2004*).

(*Hoover, 2000*), define el ultrasonido de alta potencia como una forma de energía que viaja en onda de sonido iguales o mayores a 20 kHz; otra definición la realizó (*Leighton, 2007*), en la cual lo establece como una forma de energía de vibración mecánica en un sólido o fluido a una frecuencia superior a la máxima audible al oído humano (16-18 kHz).

El ultrasonido consta de ondas sonoras cuya frecuencia se transmite sobre el umbral del oído humano. Se pueden distinguir tres tipos de ondas: longitudinales, que se desplazan en el sentido del ordenamiento de las partículas; ondas tipo esquiolo, que se mueven de forma perpendicular a tal ordenamiento; y las de tipo Rayleigh, que viajan muy cercanas a la superficie (Mulet et al., 2003).

La absorción de energía acústica es especialmente importante en alimentos, debido al contenido de aire y a la bien lograda estructura que algunos productos poseen. Las frecuencias altas son más fácilmente atenuadas que las bajas, de ahí que el ultrasonido de alta intensidad es aplicado a bajas frecuencias (20-100 kHz) para obtener “niveles de poder altos” (10-1000 W/cm<sup>2</sup>) por lo que se le conoce como ultrasonido de poder. Por otro lado, el ultrasonido de baja intensidad utiliza frecuencias mayores (250 kHz a 1 MHz o superiores) para garantizar una adecuada resolución, pero a “niveles de poder bajos”, típicamente menores a 1 W/cm<sup>2</sup> (Gómez-Díaz y López-Malo, 2009).

Tal y como se aprecia en la Figura 10, los intervalos de frecuencia del sonido, en especial el del ultrasonido de poder que, desde el punto de vista de la conservación de alimentos, es el ultrasonido de interés (Gómez-Díaz y López-Malo, 2009), se presentan cambios físicos y químicos dando lugar a la cavitación.



**Figura 10.** Intervalos de frecuencia del sonido.

**Fuente:** (Gómez-Díaz y López-Malo, 2009)

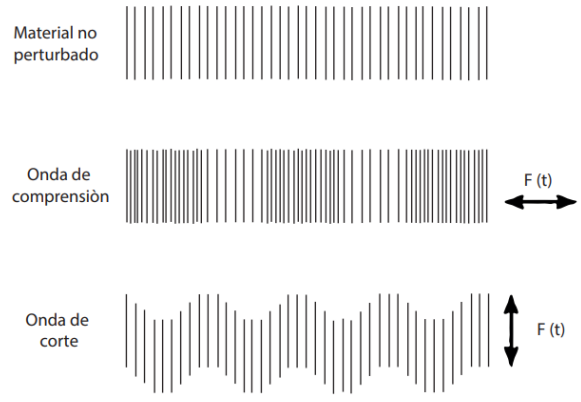
## Ondas y parámetros ultrasónicos

Las ondas ultrasónicas se determinan por medio de distintos parámetros como:

- La amplitud ( $A$ ) expresada en m, definida como el valor máximo que toma una magnitud oscilante en un semiperiodo.
- El coeficiente de atenuación expresado en dB/m ( $\alpha$ ), el cual corresponde al valor de la disminución de la amplitud de la onda a medida que viaja a través del material, generando un esparcimiento que se da generalmente en materiales heterogéneos.
- La velocidad ultrasónica ( $v$ ) expresada en m/s, definida como la velocidad con la que la onda se propaga a través del medio, siendo mayor en sólidos que en fluidos y se puede determinar midiendo el tiempo que tarda la longitud de onda en viajar cierta distancia o midiendo la longitud de onda del ultrasonido a una determinada frecuencia.
- La frecuencia ( $f$ ) expresada en Hz, referida al número de oscilaciones o vibraciones de un movimiento por unidad de tiempo.
- La longitud de onda ( $\lambda$ ) expresada en m, que es la distancia de dos partículas cualesquiera, que estén en la misma fase
- La impedancia acústica expresada en  $\text{m}^3/\text{s}$ , que determina la fracción de la onda ultrasónica que es reflejada de la superficie.

La influencia del medio en estos parámetros es la base de la mayoría de las aplicaciones en alimentos y procesos alimenticios (*Gómez-Díaz y López-Malo, 2009*).

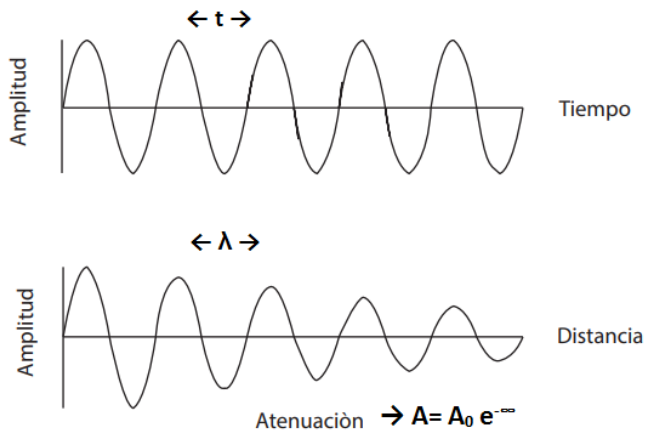
Como se muestra en la Figura 11, cuando la fuerza oscilatoria se aplica a la superficie de un material, se transmite a través del material debido a los enlaces entre las moléculas. Si la fuerza se aplica perpendicular a la superficie, se genera una onda de compresión, mientras que, si se aplica paralelamente a ella, se genera una onda de corte. En presencia de una onda ultrasónica, las capas oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio a una frecuencia igual a la de la onda ultrasónica. Cuando se quita la onda, las capas vuelven a sus posiciones de equilibrio de esta manera, no hay movimiento neto de las capas (excepto a altas intensidades).



**Figura 11. Ondas ultrasónicas.**

**Fuente:** (Mc Clements, 1995).

Se describe una onda ultrasónica en términos de amplitud de desplazamiento de las capas mostrados en la Figura 12, desde sus posiciones de equilibrio. En una posición fija dentro de un material, el desplazamiento varía sinusoidalmente con el tiempo y la distancia entre máximos sucesivos es el periodo “t”. En cualquier instante en el tiempo la amplitud disminuye con el aumento de la distancia debido a la atenuación por la muestra; la distancia entre máximos sucesivos es igual a la longitud de onda (Mc Clements, 1995).



**Figura 12. Principios físicos del ultrasonido.**

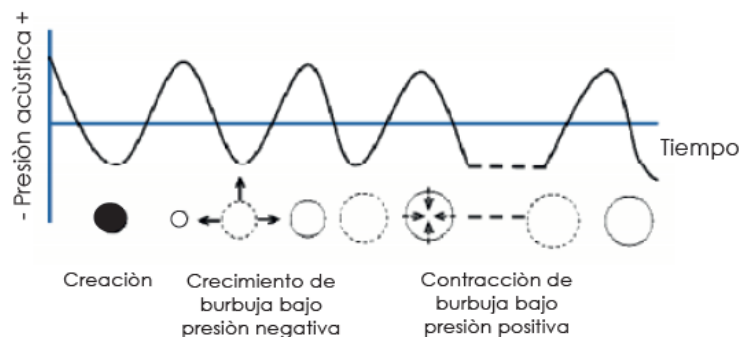
**Fuente:** (Mc Clements, 1995).

### 1.3.1. Mecanismo de acción del ultrasonido

Cuando una onda sónica se propaga en un medio líquido de forma longitudinal, se crean ciclos de compresión y expansión alternados. Cuando la presión negativa en el líquido, creada por el ciclo de expansión alternativo, es lo suficientemente menor para superar las fuerzas intermoleculares (fuerza de tensión) se forman pequeñas burbujas. Durante el subsecuente ciclo de expansión-compresión, las burbujas de gas se expanden y contraen simultáneamente. Esta formación y la evolución del tamaño de estas burbujas se conocen como cavitación. La fuerza de tensión en líquidos puros es muy alta y difícil de superar, sin embargo, la mayoría de los líquidos contienen burbujas de gas que pueden actuar como núcleos de cavitación, aun cuando la presión negativa del proceso sea baja.

Los factores que afectan la cavitación son: las propiedades físicas del solvente, la temperatura, la frecuencia de irradiación, la presencia de gases disueltos, la limpieza del sistema de reacción, la frecuencia del ultrasonido, la presión hidrostática, la tensión superficial y la potencia de irradiación.

En la Figura 13 se muestran las modificaciones que sufren las burbujas de líquido durante la cavitación. La presión negativa durante el tratamiento causará un rompimiento en el medio líquido provocando la deformación de burbujas o cavitación. Durante la fase de presión negativa, las burbujas (incluyendo las presentes de forma inherente en el líquido), crecerán y crearán un vacío causando la disolución de gases en el líquido.



**Figura 13.** Proceso de cavitación.

**Fuente:** (Zheng y Sun, 2006).



A medida en que la fase negativa avanza, la presión se reduce hasta alcanzar la atmosférica, encogiéndose las burbujas. Cuando el ciclo de compresión inicia y mientras existe presión positiva, el gas difundido en las burbujas es expelido en el líquido de nuevo, esta difusión gaseosa no se lleva a cabo hasta comprimir las burbujas. Una vez lograda la compresión, la superficie límite de la burbuja para difusión, disminuye, así que la cantidad de gas eliminada es menor a la introducida durante el ciclo negativo. Así las burbujas crecerán más en cada ciclo ultrasónico.

Las aplicaciones de las ondas ultrasónicas se dividen por lo general en dos grupos: baja y alta 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 alta intensidad son aquellas en las que la energía ultrasónica se utiliza para producir cambios permanentes en el medio tratado.

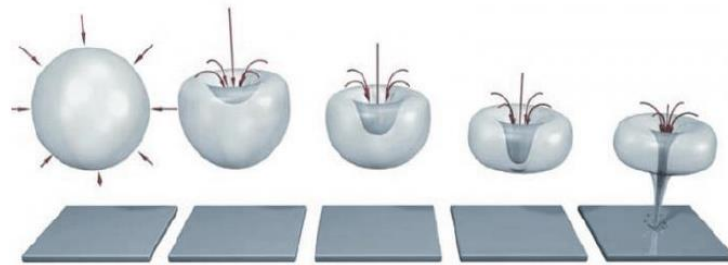
El ultrasonido de alta intensidad puede ser utilizado en la industria de alimentos para limpieza y desinfección al provocar la destrucción microbiana, así como la inactivación enzimática, favorece las reacciones químicas y la extracción de ciertos compuestos (*Gómez-Díaz y López-Malo, 2009*).

### **1.3.2. 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. Durante la mitad negativa del ciclo de presión, el líquido se encuentra sometido a un esfuerzo de tensión y durante la mitad positiva del ciclo experimenta una compresión. 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*, que se observa en la Figura 14; que golpea el sólido (Mason, 1998). Estos *microjets* que golpean la superficie del alimento sólido pueden producir una inyección de líquido dentro del sólido (Mason y 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 14.** Creación de microjet a través del colapso de burbujas de cavitación.

**Fuente:** (Gallego-Juárez y Graff, 2015).

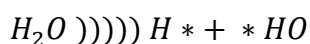
En medio gaseoso, el principal desafío de la aplicación del ultrasonido es alcanzar una transmisión eficaz de las ondas acústicas a altas frecuencias debido a la diferencia de impedancia acústica entre los transductores y el gas, así como la alta atenuación ultrasónica en medio gaseoso, sin embargo cuando 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, mediante la reducción del espesor de la capa límite (Cárcel et al., 2007).

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 líquido. 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 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 (*Muralidhara, Ensminger y Putnam, 1985*).

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.

Durante la cavitación, los radicales hidroxilos pueden ser producidos y éstos pueden reaccionar con los compuestos de los alimentos fácilmente oxidables. Dependiendo del proceso y la matriz, los efectos químicos de la 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 radicales altamente reactivos se debe a las moléculas de disolvente y solutos presentes dentro de las burbujas que se descomponen en condiciones extremas de presión y temperatura 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 incrementen la cantidad de radicales \*OH generados con un aumento en la frecuencia del ultrasonido (*Ashokkumar et al., 2008*).

Existen variables independientes que afectan el fenómeno de cavitación tales como:

- **Efecto de la frecuencia aplicada.** Para las ondas de ultrasonido con altas frecuencias, el tiempo requerido para crear una burbuja puede ser largo, según *Kharisov y Ortíz (1999)*; esto se atribuye al hecho de 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 a frecuencias altas, *Knorr et al., (2004)* sostienen 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.** En general se ha encontrado que el límite del umbral de cavitación aumenta con la disminución de la temperatura. Esto puede ser en parte debido a los aumentos en la tensión superficial o la viscosidad del líquido a medida que disminuye la temperatura, o puede ser debido a la disminución en la presión de vapor del líquido. En general las burbujas de cavitación se producen con mayor facilidad a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, los efectos sonoquímicos de tales burbujas pueden ser reducidos (*Mason y Lorimer, 2002*).

El efecto de las ondas de ultrasonido de alta potencia en las propiedades físicas, bioquímicas y microbiológicas de la carne han sido objeto de interés en los últimos años, se mencionan algunos en la Tabla 4.

**Tabla 4. Efectos del ultrasonido en propiedades físicas.**

<b>Propiedad</b>	<b>Efectos</b>
<b>Terneza</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Es capaz de romper componentes celulares y dañar las fibras musculares.</li> <li>○ Ablandamiento de las membranas celulares.</li> <li>○ Disociación de enlaces moleculares y producción de radicales libres.</li> </ul>
<b>Tejido Conectivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Desfragmentación de macromoléculas de colágeno.</li> <li>○ Ruptura de las cadenas de macromoléculas a enlaces débiles.</li> </ul>
<b>Tejido Miofibrilar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Modificación de estructura y actividad enzimática en el músculo.</li> <li>○ Mejora significativamente la solubilidad de la fracción de miosina.</li> <li>○ Radicales libres significativamente más altos en tejidos musculares, así como cambios en la liberación de aminoácidos de las proteínas.</li> <li>○ Rompimiento de puentes hidrógeno y cambios más destructivos a la estructura tridimensional de las proteínas.</li> <li>○ Ruptura mecánica de la estructura muscular y disociación del complejo actino-miosina para separar actina y miosina.</li> <li>○ Pérdida de la estructura típica, fragmentación miofibrilar y desintegración de otros constituyentes celulares.</li> </ul>
<b>Proteólisis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Degradación de proteínas de músculo esquelético, sarcoplásmico y tejido conectivo.</li> <li>○ Rompimiento de membranas y liberación de enzimas de membranas celulares.</li> <li>○ Estiramiento y torsión de las membranas celulares.</li> </ul>
<b>Ultraestructura Muscular</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Producción de radicales con efectos biológicos.</li> <li>○ Proteínas y componentes ácido-nucleicos contenidos en las células son fácilmente desnaturalizadas por condiciones extremas de temperatura y oxidación.</li> <li>○ Rompimiento de mitocondrias.</li> <li>○ Migración de proteínas, minerales y otras sustancias en la solución.</li> </ul>

**Fuente:** (Paz, 2014).

### 1.3.2. Aplicaciones del ultrasonido de alta intensidad en alimentos

En la Tabla 5 se resumen las principales alternativas que el ultrasonido de alta intensidad ha demostrado tener para el tratamiento, procesamiento y conservación de alimentos, así como los posibles efectos que presenta al combinarse con el calor y la presión.

**Tabla 5. Aplicaciones del ultrasonido.**

<b>Aplicación</b>	<b>Descripción</b>
<i>Efectos antimicrobianos</i>	Destrucción microbiana y limpieza de superficies.
<i>Transferencia de calor</i>	Incremento de la velocidad de congelación, descongelación y cocción.
<i>Transferencia de masa</i>	Incremento de la velocidad de transferencia de masa durante el secado.
<i>Procesado de cárnicos</i>	Tenderización de la carne.
<i>Emulsificación y homogenización</i>	Homogenización y emulsificación de grasas.
<i>Fermentación y maduración</i>	Incremento de la velocidad de fermentación y añejamiento.
<i>Cristalización</i>	Control de nucleación y crecimiento de cristales.
<i>Corte</i>	Cortado de productos frescos y congelados, incluyendo alimentos compuestos y multicapa.
<i>Degaseo y despumante</i>	Despumado de bebidas carbonatadas, despumado de fermentos microbiológicos.
<i>Rompimiento celular y extracción</i>	Mejoramiento de la extracción de compuestos.
<i>Actividad enzimática y desnaturalización de proteínas</i>	Inactivación y mejoramiento de la actividad enzimática; desnaturalización de proteínas.
<i>Polimerización</i>	Aplicación en polímeros alimenticios.

*Fuente: (Gómez-Díaz y López-Malo, 2009).*

La suavidad es la característica más importante que el consumidor busca en la carne cocida, la tenderización de la carne es influida por múltiples factores incluyendo las características del animal (genética, edad y función muscular) manejo antes del sacrificio (estrés y glucógeno en el músculo) y posterior al mismo (velocidad de enfriamiento, estimulación eléctrica y manipulación general). En este sentido, el ultrasonido ofrece características potenciales para lograr la tenderización sin alterar la apariencia que se produce con algunos otros tratamientos.

El ultrasonido puede además dañar las membranas celulares y desnaturalizar las proteínas por medio de la pulsación de las burbujas, la cavitación y la formación de radicales libres incluyendo la fragmentación del colágeno (*Gómez-Díaz y López-Malo, 2009*).

#### **1.4. Secado**

El secado se define como el proceso de remoción de sustancias volátiles (humedad) hasta obtener un producto seco. Es una operación unitaria en la que se presenta el transporte simultáneo de calor y masa: la transferencia de energía (principalmente como energía calórica) desde el medio circundante para evaporar la humedad de la superficie y la transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido y su evaporación posterior.

La remoción de agua en forma de vapor desde la superficie del sólido depende de condiciones extremas de temperatura, flujo y humedad del aire, área de superficie del material expuesta y presión; mientras que el movimiento del agua a través del sólido depende de su composición física, la temperatura y el porcentaje de humedad (*Imre, Solar y Mujumdar, 2006*).

La transferencia de energía puede ocurrir por convección, conducción o radiación, o en combinación; a continuación, se explica brevemente cada mecanismo:

- **Convección:** El calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente (u otro fluido) que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua, es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina del sólido.
- **Conducción:** El calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente con el material a secar. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar el agua.

- Radiación: Es la denominación que se da a la transmisión de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Se basa en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua. Incluye varias fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda desde el espectro solar hasta microondas.

#### **1.4.1. Secado de alimentos**

Todas las variedades de alimentos necesitan de alguna forma ser conservadas, principalmente para reducir o detener deterioros, para mantenerlos disponibles durante un periodo determinado de tiempo, para mantener propiedades nutrimentales por el mayor tiempo posible o para obtener productos de valor agregado. Entre estas causas, el deterioro es la razón principal para el empleo de técnicas de conservación (*Jangam, Law y Mujumdar, 2010*).

El secado de alimentos conlleva una apreciable reducción de su peso y volumen, consiguiéndose así una importante reducción de los costes de transportes y almacenamiento de estos productos (*Fito et al., 2001*).

La operación de secado involucra una serie de cambios físicos, químicos y sensoriales en el alimento, que dependen de la composición de éste, así como de la severidad del método. Ejemplos de estos cambios son: encogimiento, cristalización, despolimerización, variación de color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento.

Estos factores, que están relacionados con la calidad del producto, deben ser analizados cuando se va a diseñar una operación de secado de alimentos, para así provocarle un mínimo daño, sin olvidarse de otros aspectos más tecnológicos relacionados con la eficacia y costo del proceso como la disminución en los tiempos de producción (*Contreras, 2006*).



Todas las operaciones de secado dependen de la aplicación de calor para vaporizar el agua o los constituyentes volátiles. El mecanismo que regula el secado de un producto depende de la estructura de éste y de los parámetros de secado, como contenido de humedad, dimensiones del producto, temperatura del medio de calentamiento, velocidades de transferencia superficiales y contenido de humedad de equilibrio.

Los materiales sólidos presentan cierto contenido de humedad en equilibrio cuando se ponen en contacto con el aire a una temperatura y una humedad particulares. En consecuencia, los materiales tienden a perder o ganar humedad durante un periodo para que alcancen este valor de equilibrio. Si la temperatura o la humedad del aire cambian, entonces se pierde o gana humedad hasta que alcanza un nuevo valor de equilibrio.

La humedad en forma de agua ligada podría ser retenida en capilares finos, o adsorbida sobre la superficie o dentro de una célula o paredes fibrosas o en combinación física/química con el sólido. Por otra parte, el agua libre ejerce una presión de vapor de equilibrio igual a la del agua pura a la misma temperatura. La humedad en forma de agua libre podría estar retenida en los espacios vacíos de los alimentos sólidos.

La distinción entre agua ligada y agua libre es una propiedad del material alimenticio particular en consideración. Si se seca un alimento en aire con cierta humedad relativa, se elimina la mayor parte del agua libre y parte del agua ligada. Esta consiste en la humedad libre por arriba del contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la condición del aire. Por lo tanto, la distinción entre el contenido en equilibrio y contenido de humedad libre depende de la naturaleza de los sólidos por secar y las condiciones del aire de secado. Con base en las consideraciones anteriores, los mecanismos de secado se clasifican en tres categorías:

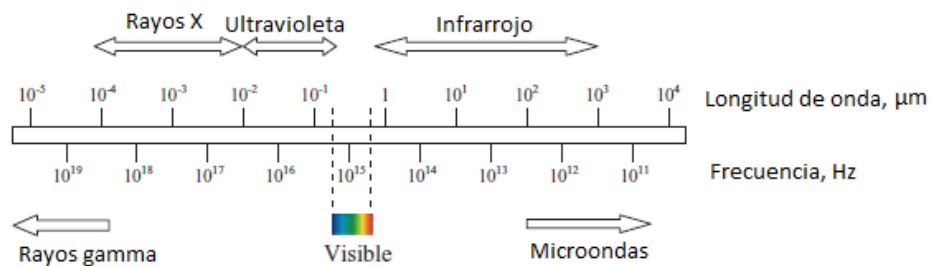
1. Evaporación a partir de una superficie libre, que sigue las leyes de la transferencia de calor y masa desde un objeto húmedo.
2. Flujo líquido en capilares.

### 3. Difusión de líquido o vapor, que sigue la segunda ley de difusión de Fick.

Durante el secado de alimentos en general y de carne en particular, el agua difunde desde el interior del producto hasta la superficie, pasando después al aire que la rodea. Por lo tanto, el agua debe vencer dos resistencias: la resistencia del producto a que difunda en su interior hasta alcanzar su superficie, llamada resistencia interna y la resistencia del aire que rodea al producto a que el agua abandone la superficie de esta denominada resistencia externa. Es decir, el proceso de transferencia de materia que tiene lugar durante el secado de carne está controlado por dos resistencias: la resistencia interna y externa a la transferencia de materia. La resistencia global es la suma de ambas. Entre las propiedades de la carne que determinan su resistencia interna a la transferencia de materia, la difusividad efectiva es la que generalmente suele ser considerada. Esta propiedad es inversamente proporcional a la resistencia interna a la transferencia de materia, de manera que valores elevados de difusividad efectiva se corresponden con resistencias internas pequeñas y viceversa (Mulet, et al., 2003).

#### 1.4.2. Secado convectivo por infrarrojo

El infrarrojo es un tipo de radiación electromagnética cuya longitud de onda es más larga que la luz visible pero más corta que la de las microondas como se muestra en la Figura 17 (Pan y Atungulu, 2011). La radiación infrarroja puede ser clasificada en tres regiones llamadas cercana (NIR), media (MIR) y lejana (FIR), cuyas longitudes de onda se encuentran entre 0.75 a 1.4  $\mu\text{m}$ , 1.4 a 3.0  $\mu\text{m}$  y 3 a 1000  $\mu\text{m}$ , respectivamente (Krishnamurthy et al., 2008).



**Figura 15.** Espectro de ondas electromagnéticas.

**Fuente:** (Espinoza, 2011).

Esta radiación tiene una dependencia tanto espectral como direccional. La dependencia espectral del infrarrojo necesita ser considerada, debido a que la energía que sale de un emisor está compuesta por diferentes longitudes de onda y la fracción de la radiación en cada banda es dependiente de un número de factores como la temperatura del emisor y la emisividad de la lámpara. El fenómeno de la radiación se vuelve más complejo debido a que la radiación que incide en una superficie no sólo tiene una dependencia espectral, sino que también una dependencia direccional. La longitud de onda a la cual la máxima radiación ocurre es determinada por la temperatura del emisor (*Pan y Atungulu, 2011*).

La transmisión de la radiación electromagnética no necesita un medio para su propagación. El espectro de longitud de onda depende de la naturaleza y de la temperatura de la fuente de calor. Todos los cuerpos emiten radiación debido a su nivel de temperatura, lo cual se conoce como “radiación térmica” debido a que se genera calor. La radiación térmica que incide en un cuerpo puede ser absorbida, y su energía ser convertida en calor, reflejada desde la superficie o transmitida a través del material (*Ratti y Mujumdar, 2006*).

Los materiales pueden ser clasificados con base en su transmisión, dependiendo del estado físico del cuerpo donde la radiación incide. Un cuerpo que no permite que la radiación se transmita a través de él se llama “opaco” y su transmisión ( $\tau$ ) es igual a cero. Ejemplos de esto son la mayoría de los sólidos. Por otra parte, líquidos y algunos sólidos como rocas de sal o vidrio se consideran como translúcidos a la radiación. Generalmente los sólidos absorben toda la radiación en una capa muy delgada cercana a la superficie. Esta es una consideración muy importante en el modelamiento de la transferencia de calor. Un cuerpo ideal que absorbe toda la energía incidente sin reflejarla o transmitirla, se llama “cuerpo negro” (*Ratti y Mujumdar, 2006*).

Con respecto a los alimentos, se sabe que éstos son complejas mezclas de diferentes macromoléculas bioquímicas, polímeros biológicos, sales inorgánicas y agua. Cuando la radiación electromagnética incide en la superficie de un alimento, puede provocar cambios en

los estados electrónicos vibracionales y rotacionales de átomos y moléculas. El nivel de absorción a diferentes longitudes de onda varía dependiendo de los componentes del alimento. El tipo de mecanismo de absorción de energía, determinado por el intervalo de longitudes de onda de la energía radiante, puede ser categorizada en:

1. Cambios en el estado electrónico, cuando la longitud de onda varía de 0.2 a 0.7  $\mu\text{m}$  (ultravioleta e intervalo visible).
2. Cambios en el estado vibracional, cuando la longitud de onda varía de 2.5 a 1000  $\mu\text{m}$  (radiación infrarroja lejana o FIR).
3. Cambios en el estado rotacional, cuando la longitud de onda es mayor a 1000  $\mu\text{m}$ .

En general, los alimentos absorben radiación infrarroja lejana (FIR) más eficientemente a través de los mecanismos de cambio en el estado vibracional de las moléculas, lo que puede llevar a calentamiento por radiación. El agua y los compuestos orgánicos como proteínas y almidón, (principales componentes de los alimentos), absorben la energía FIR a longitudes de onda mayores a 2.5  $\mu\text{m}$ . Dentro de estos componentes, el agua tiene un rol predominante en la absorción de la energía radiante en todas las longitudes de onda (*Krishnamurthy et al., 2008*). Los enlaces O-H en el agua absorben la energía infrarroja y comienzan a rotar con la misma frecuencia que la radiación incidente. La transformación de la radiación infrarroja en energía rotacional causa la evaporación del agua (*Pan y Atungulu, 2011*).

La energía infrarroja (IR) es la fuente de energía más antigua utilizada para el secado, al considerar la energía radiante del sol utilizada con este fin. El secado por radiación artificial involucra el uso de generadores de radiación IR, como lámparas eléctricas, paneles de metal o cerámica calentados por electricidad o gas. La principal característica que distingue al secado IR por sobre el resto de los procesos de secado, es que no necesita un medio para la transmisión de la energía desde la fuente emisora al producto a secar; ya que es el propio producto el que absorbe la radiación IR (*Pan y Atungulu, 2011*).

A pesar de que el secado infrarrojo de materiales porosos de gran espesor no ha sido desarrollado totalmente, estudios como el de *(Ratti y Mujumdar, 2006)* indican que esta tecnología puede ser aplicada en la deshidratación de alimentos. Se espera que la aplicación de infrarrojo en la industria alimentaria represente un nuevo proceso para la elaboración de productos deshidratados de alta calidad a bajos precios. Algunas de las ventajas que tiene esta tecnología son la reducción del tiempo de secado, aumento de la eficiencia energética, temperatura homogénea en el producto mientras se seca, productos terminados de mejor calidad, alto control del proceso, ahorro en espacio y menor impacto medio ambiental *(Krishnamurthy et al., 2008)*.

La aplicación combinada de radiación electromagnética y calentamiento convencional convectivo es considerada más eficiente que la aplicación de ambas técnicas por separado *(Pan y Atungulu, 2011)*. *Azfal, Abe y Hikida (1999)*, demostraron que se pueden lograr importantes ahorros de energía aplicando un secado asistido por infrarrojo.

Cuando el material es expuesto a radiación infrarroja, se afecta la superficie del material y la radiación penetra. El aumento en la vibración molecular debida a la absorción de radiación genera calor en el material tanto en la superficie como en las capas internas en forma simultánea. El rápido calentamiento del material aumenta la tasa de movimiento de humedad hacia la superficie. El flujo de aire convectivo remueve la humedad de la superficie y disminuye su temperatura, lo que resulta en una transferencia de calor mayor *(Hebbar, Vishwanatha y Ramesh, 2004)*.

Respecto a la calidad final de los productos obtenidos, existen evidencias que demuestran que parámetros como color, textura y composición química en alimentos no sufren modificaciones significativas durante el secado asistido por infrarrojo. *Tuncel et al., (2010)* demostraron que la radiación infrarroja aplicada en el secado asistido de maíz no tuvo ningún impacto negativo en el contenido total de carotenoides, color o presencia de ácido fenólicos. Por otra parte, *Boudhrioua et al., (2009)* obtuvieron resultados que indican una conservación y/o mejora en

el color verde de hojas de oliva deshidratadas con esta técnica, además de la preservación y/o aumento de compuestos antioxidantes. *Shi et al., (2008)* concluyeron que aplicando un secado infrarrojo se obtenían arándanos mucho más firmes en comparación a los obtenidos con un secado convencional por aire. *Hebbar, Vishwanatha y Ramesh (2004)*, demuestran que aplicando un secado asistido por infrarrojo se obtienen mayores velocidades de transferencia de materia, reducción de los tiempos de secado en forma drástica (48%) y menor consumo de energía (63%) en comparación al secado convencional. *Kumar et al., (2005)* aplicaron el secado asistido en rodajas de cebollas y demuestran que si bien, existe una variación considerable en el color y porcentaje de ácido pirúvico en el producto deshidratado, estas variaciones son aún mayores en el secado convencional por aire caliente.

Los IR corresponden a una radiación con longitud de onda que se encuentra entre los 0.89 y 1000  $\mu\text{m}$ , situándose entre el espectro de luz visibles y microondas. La radiación infrarroja penetra directamente en los productos a secar con una transferencia directa de energía térmica, donde la profundidad de penetración depende generalmente de la absorbancia del producto, siendo el agua el componente que más absorbe la radiación infrarroja (*Puente-Díaz, Echegaray-Pacheco y Di-Scala, 2013*).

### **1.5. Fenómeno de contracción durante el secado**

Durante el secado de alimentos se producen en estos diversos cambios físicos y químicos. Uno de los cambios físicos más importantes es la variación del volumen que experimentan los alimentos durante su deshidratación por aire caliente.

La contracción sufrida por los alimentos deshidratados puede tener efectos negativos en la calidad de estos. En algunos casos, las variaciones de forma, pérdida de volumen o aumento de la dureza indican una sensación negativa al consumidor.

La pérdida de agua y las variaciones de temperatura que experimentan los alimentos durante su deshidratación provocan estrés en las estructuras celulares lo que les provoca deformaciones y reducción de sus dimensiones (*Mayor y Sereno 2004*).

La contracción de alimentos no es perfectamente homogénea. Al principio del secado, las partículas mantienen su forma inicial, aunque la contracción es importante, la cual puede estar influida por diferentes factores como:

- **Movilidad de la matriz sólida:** Está directamente relacionada con su estado físico. Con el objetivo de conferir estabilidad a los alimentos, se realizan tradicionalmente algunas operaciones como la congelación y la deshidratación, que generan un rápido incremento en la viscosidad del agua y por ende una disminución de la movilidad molecular, dificultando que se alcancen en los solutos configuraciones de equilibrio. En lugar de ello se obtienen estructuras metaestables, conocidas como el estado vítreo. El paso de un estado amorfo desordenado a uno vítreo más estable se conoce como transición vítrea, y se produce a una temperatura  $T_g$  que es la temperatura a la que se da una transición termodinámica y es específica de cada componente (*Mosquera et al., 2014*).

A una elevada movilidad, le corresponde un comportamiento viscoelástico típico del estado gomoso; mientras que una baja movilidad corresponde a un comportamiento elástico de tipo vítreo. Para contenidos de humedad elevados, cuando el alimento está en estado gomoso, la contracción compensa por completo la pérdida de humedad. Cuando el contenido de humedad es bajo, la temperatura de transición vítrea aumenta, provocando que el alimento pase de un estado gomoso a estado vítreo, por lo que la contracción disminuye (*Mayor y Sereno, 2004*).

- **Velocidad del secado:** En el secado de alimentos, la transferencia de materia tiene lugar debido conjuntamente a un control interno como externo, mientras que el transporte de energía se controla externamente. La contracción puede cambiar con la variación de las resistencias a la transferencia de materia. Así, para bajas velocidades de secado

prevalece la resistencia externa, los perfiles de humedad en la muestra son bastante planos y los esfuerzos internos son mínimos con lo que el sólido encoge de un modo relativamente uniforme. Para velocidades elevadas, la resistencia interna controla la velocidad de transferencia de materia, sobre todo para contenidos en agua bajos. La superficie seca más que el centro y el cuerpo sufre contracción desigual. Por otro lado, hay que considerar que, si la velocidad de aire y temperatura son muy elevadas, en la superficie del alimento habrá un contenido de humedad muy bajo, lo que hará que se forme una costra que limite la contracción. En esta costra pueden tener lugar transiciones de fase y puede formarse una matriz vítrea que impida al sólido contraerse durante el resto del proceso de secado (*Mayor y Sereno, 2004*).

## **1.6. Difusión en el secado**

La difusión es el movimiento, bajo la influencia de un estímulo físico, de un componente individual a través de una mezcla. La causa más frecuente de la difusión es un gradiente de concentración del componente que difunde. Un gradiente de concentración tiende a mover el componente en una dirección tal que iguale las concentraciones y anule el gradiente. Cuando el gradiente se mantiene mediante el suministro continuo de los componentes de alta y baja concentración, existe un flujo en estado estacionario del componente que difunde.

En todas las operaciones de transferencia de masa, la difusión ocurre por lo menos en una fase y con frecuencia en dos fases. En el secado no existe difusión a través de la fase líquida debido a que la fase líquida es pura y no existe gradiente de concentración a través de ella; pero el vapor difunde hacia o desde la superficie de contacto líquido-gas dentro o fuera de la fase gaseosa.

A la vista de la complejidad de la transferencia de materia en un equipo dado, las ecuaciones fundamentales para la transferencia de masa rara vez son aplicables al equipo en cuestión, y se utilizan métodos empíricos, basados en el análisis dimensional y en analogías semiteóricas, con el fin de obtener ecuaciones válidas.



Es común observar que siempre que existe una falta de equilibrio de un producto en un medio, la naturaleza tiende a redistribuirlo hasta que se establece un “equilibrio”. Con frecuencia a esta tendencia se le denomina fuerza impulsora, mecanismo que se encuentra detrás de muchos fenómenos de transporte que ocurren en forma natural.

Si se define la cantidad de un producto por unidad de volumen como la concentración de éste, puede decirse que el flujo siempre se presenta en la dirección de la concentración decreciente; es decir desde la región de alta concentración hacia la de baja concentración. El producto sencillamente se escurre en el curso de la redistribución y de este modo el flujo es un proceso de difusión. La razón del flujo es proporcional al gradiente de concentración,  $dC/dx$  (el cual representa el cambio en la concentración  $C$  por unidad de longitud en la dirección  $x$  del flujo) y el área  $A$  normal a la dirección de ese flujo y se expresa como:

$$\dot{Q} = -k_{dif} A \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

Aquí la constante de proporcionalidad  $k_{dif}$  ( $m^2/s$ ) es el coeficiente de difusión del medio, el cual es una medida de la rapidez con la que se difunde el producto en ese medio; se tiene el signo negativo para hacer que el flujo en la dirección positiva sea una cantidad positiva;  $dC/dx$  es una cantidad negativa, ya que la concentración decrece en la dirección del flujo (*Çengel, 2007*).

El secado de alimentos húmedos es un proceso complicado que envuelve fenómenos de transferencia de masa y calor simultáneamente y acoplados que ocurre dentro del alimento. El transporte del agua en los alimentos, desde su interior hasta la superficie durante el secado, varía ampliamente debido principalmente a las diferentes estructuras físicas existentes en ellos (*Corzo et al., 2011*).

### **1.6.1. Coeficiente de difusión efectiva**

El coeficiente de difusión es una variable de respuesta que permite inferir como se está llevando a cabo el proceso. *Crank (1979)*, lo define como la velocidad de transferencia de la

sustancia que se difunde a través del área de una sección de espacio que divide un gradiente de concentración.

Entonces el coeficiente de difusión efectiva permite saber que facilidad, o dificultad, está teniendo la sustancia estudiada, para viajar a través del espacio, sus unidades son  $m^2/s$  y su magnitud depende de ciertas características como su composición química, su porosidad o dirección de las fibras y pH. Determinar el coeficiente de difusión del agua o difusión efectiva es importante para analizar o modelizar un sistema (Ruiz-Cabrera et al., 2004).

### 1.6.2. Modelo cinético de Azuara

Existen varios modelos matemáticos para obtener el coeficiente de difusión de agua, uno de ellos es el modelo cinético de Azuara y col., en el cual se encuentra una ecuación de dos parámetros basada en balances de masa. Con esta ecuación se puede predecir la cinética de secado, sin necesidad de llegar al equilibrio experimental, usando solamente un corto periodo de proceso descrito en la Ecuación 2 (Tortoe, 2010).

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{S_1 WL_{\infty}^m} + \frac{1}{WL_{\infty}^m} \quad (2)$$

Donde:

- |                 |  |                         |
|-----------------|--|-------------------------|
| $WL_{\infty}^m$ | Perdida de agua en el equilibrio.                        | kg agua /kg sólido seco |
| $WL$            | Perdida de agua a tiempo determinado, t.                 | kg agua /kg sólido seco |
| $S_1$           | Constante de velocidad relativa para la pérdida de agua. |                         |

Este modelo requiere el ajuste de dos parámetros y está basado en el balance de masa para predecir la cinética de secado y además determinar el punto de equilibrio final.

Los modelos de difusión son fáciles de formular y normalmente proporcionan resultados razonables. La formulación y complejidad de la resolución del modelo depende de las suposiciones que se toman en cuenta. Generalmente, se asume una difusividad efectiva que incluye todos los efectos relacionados con la cinética; tanto fenómenos conocidos como desconocidos (García, 2007).

Al considerar que el fenómeno difusivo es predominante en la transferencia de masa durante el secado y que el comportamiento del producto durante el proceso puede ser descrito adecuadamente mediante la aplicación de la ley particular de Fick, entonces a partir de la solución de la Segunda Ley de Fick considerando que la difusión se efectúa de forma unidireccional y en estado transitorio, puede describirse matemáticamente como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

En la ecuación 3, tanto el flujo, como la concentración (C) varían con el tiempo (t) y el coeficiente de difusión (D) no depende de la concentración y por tanto tampoco de la posición. La solución a esta ecuación diferencial se ha obtenido suponiendo que el material es homogéneo e isótropo y que la difusividad es constante. También se ha dado solución para la difusión de humedad en distintas geometrías, como placa infinita en estado no estacionario y de esta obtenemos la ecuación 4 para la transferencia de masa (*Rastogi et al., 2002*).

$$M_r = \frac{(m_t - m_\infty)}{(m_0 - m_\infty)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2n+1)^2} \right] \exp\left[-\left(n+\frac{1}{2}\right)\pi^2 \frac{D_{ew} t}{L^2}\right] \quad (4)$$

Donde:

		Unidades
$M_r$	Proporción de humedad.	kg agua /kg sólido seco
$m_t$	Humedad a tiempo determinado, t.	kg agua /kg sólido seco
$m_\infty$	Humedad de equilibrio.	kg agua /kg sólido seco
$m_0$	Humedad inicial.	kg agua /kg sólido seco
$D_{ew}$	Coficiente de difusión efectiva.	m <sup>2</sup> /s
$t$	Tiempo.	s
$L$	Espesor de la placa infinita.	m

## **Capítulo II. Metodología Experimental**

Esta investigación se realizó en el laboratorio 13: “Análisis Térmico y Estructural de Alimentos”, de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán campus 4, de la Universidad Nacional Autónoma de México; bajo la siguiente metodología experimental.

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar el efecto de la aplicación de ultrasonido como pretratamiento, así como la velocidad del aire en el secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo, mediante el análisis de los cambios en volumen, resistencia a la deformación de la carne y coeficiente de difusión del agua para establecer la viabilidad del pretratamiento.

### **2.2. Objetivos particulares**

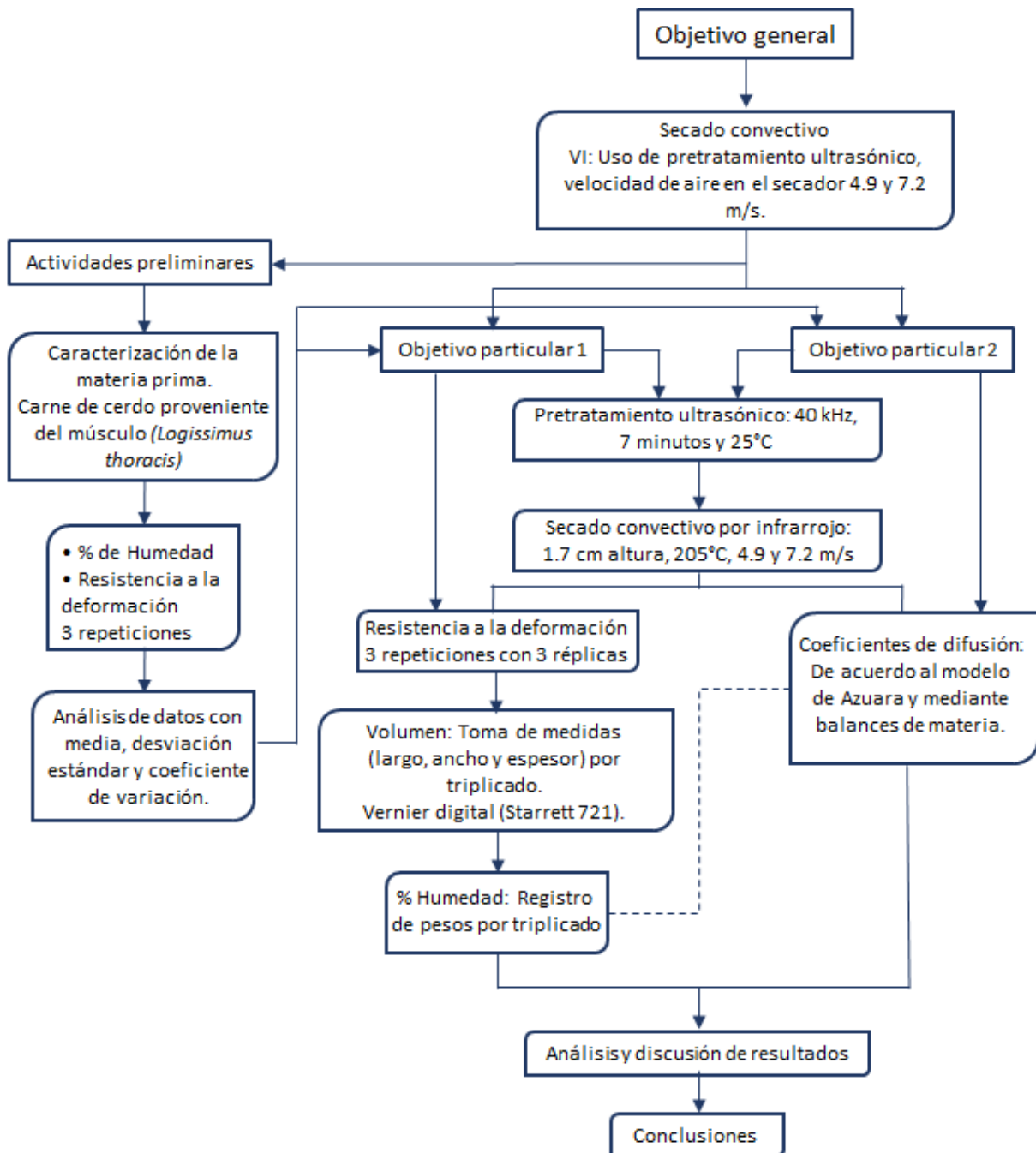
#### **Objetivo Particular 1**

Analizar el efecto de la aplicación de ultrasonido sobre cambios en la resistencia a la deformación de la carne y su relación con los cambios en volumen y la pérdida de humedad para determinar la eficiencia del pretratamiento.

#### **Objetivo Particular 2**

Evaluar el efecto del ultrasonido en el secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo a partir de su relación con la pérdida de agua y el coeficiente de difusión del agua, para determinar su influencia en los parámetros de transferencia de masa.

### 2.3. Diagrama experimental



## **2.4. Actividades preliminares**

### **2.4.1. Caracterización de la materia prima**

Para toda la experimentación se trabajó con carne de cerdo fresca de machos castrados de seis meses de edad de la raza Pietrain, obtenida siempre del mismo proveedor 48 h después de la matanza. El corte sobre el que se realizó el estudio fue del músculo *Longissimus thoracis*; del mismo se obtuvieron placas de 5 cm de largo, 2 cm de ancho y 1 cm de espesor.

Para el desarrollo de esta investigación se continuó con el trabajo de tesis de Flores (2014), se tomaron los siguientes parámetros que definen las condiciones experimentales de secado:

- Altura del secador 1.7 cm.
- Temperatura del secador de  $205 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de secado de 7 min
- Velocidad de aire en el secador de 4.9 y 7.2 m/s

Ya que es a estas condiciones cuando se presentan menores cambios estructurales en la carne y los atributos de calidad son mejores, como  $A_w$ , pH y cambios en volumen.

### **2.4.2. Determinación de humedad de la carne**

Para la determinación de humedad de la carne fresca, de acuerdo con la *NOM-116-SSA1-1994*, se pesaron en una balanza analítica APX 200 (Denver Instruments, Göttingen Alemania) 5 charolas de aluminio con una capa de gasa simple y se colocaron en una estufa (9023A-ECOSHEL) a  $100^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante; posteriormente se pesaron  $3 \pm 0.3$  g de carne y se colocaron en las charolas de aluminio con la gasa, mismas que se secaron en la estufa a  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 4 h.

El porcentaje de humedad se determinó con la siguiente ecuación:

$$\% Humedad = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} * 100 \quad (5)$$

Donde:

$M_1$     Peso de la charola con gasa. (g)

$M_2$     Peso de la muestra húmeda. (g)

$M_3$     Peso de la muestra seca. (g)

Las actividades descritas anteriormente se realizaron en tres lomos diferentes por triplicado y se analizaron con medidas de tendencia central y de dispersión.

## 2.5. Diseño experimental

De acuerdo con las variables en estudio y a los niveles de variación, se trabajó con un diseño factorial  $2^2$ , el cual permite experimentar con todas las combinaciones de variables y niveles; mismo que se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6. Diseño factorial.**

Corrida	Pretratamiento US	V. del aire (m/s)
1	NO	4.9
2	NO	7.2
3	SI	4.9
4	SI	7.2

Para esta experimentación se llevaron a cabo 4 corridas con 3 réplicas, dando un total de 12 experimentaciones.

## **2.6 Objetivo 1**

Para este objetivo se aplicó el pretratamiento ultrasónico a las corridas experimentales de acuerdo con el diseño de experimentos, posteriormente se llevó a cabo la siguiente secuencia experimental.

### **2.6.1. Pretratamiento ultrasónico**

Para la aplicación de US se usó un baño ultrasónico (Cole Parmer, IL, EUA.) a 40 kHz, donde las muestras fueron colocadas en un recipiente con 400 mL de agua destilada a  $25 \pm 2$  °C, las cuales fueron sumergidas en el baño por 7 min.

Las muestras se colocaron sobre una toalla absorbente para eliminar el exceso de agua en la superficie. Se pesaron y midieron las dimensiones de las placas (largo, ancho y espesor) con un Vernier digital (Starrett 721, MA, EUA).

Después de aplicar el pretratamiento ultrasónico se realizó el secado por infrarrojo de las placas de lomo de cerdo.

### **2.6.2. Secado convectivo por infrarrojo de lomo de cerdo**

Se colocaron placas de carne para cada condición dentro del horno de convección marca FlavorWave Oven Turbo (Thane Housewares, EUA), a una altura de 1.7 cm, una temperatura de  $205 \pm 5$  °C, a dos diferentes velocidades del aire: 4.9 y 7.2 m/s.

Las placas se distribuyeron en el interior del equipo numeradas, cada 30 segundos se sustrajo una muestra por orden para pesarlas con una balanza analítica APX 200 (Denver Instruments, Göttingen Alemania). Con los valores de peso se obtuvieron las humedades a los diferentes tiempos experimentales.



### 2.6.3. Deformación de las placas de carne

La deformación de la carne fresca se tomó antes y después de aplicar pretratamiento ultrasónico y de acuerdo con el diseño experimental, se obtuvo con un Penetrómetro Fruit Pressure Tester modelo FT327 con punta de 1.1 cm de diámetro.

La fuerza de deformación se leyó directamente en la escala del instrumento.

### 2.6.4. Cambio en volumen

Durante el secado se tomaron las medidas de las placas (largo x ancho x espesor) por triplicado, con un Vernier digital (Starrett 721, MA, EUA) cada 30 segundos.

El volumen fue calculado de acuerdo con la siguiente relación:

$$Volumen = \frac{largo \times ancho \times espesor}{1000} \quad (6)$$

## 2.7. Objetivo 2

Para este objetivo se aplicó la siguiente secuencia de cálculo en todas las corridas experimentales.

### 2.7.1. Coeficientes de Difusión Efectiva

A partir de los datos de cinética de secado, de humedad contra tiempo, se obtuvieron los puntos intermedios no experimentales, haciendo un ajuste de la curva con el programa Sigma-Plot 10 para obtener la humedad crítica.

La humedad en equilibrio se obtuvo considerando una cinética de primer orden, de acuerdo con lo propuesto por *Rastogi y Raghavarao (2004)*.

Con los valores de humedad crítica y humedad de equilibrio, se determinó la difusión efectiva ( $D_{ew}$ ); teniendo en cuenta una geometría de placa infinita.

En el periodo de velocidad decreciente donde la humedad del producto sigue disminuyendo hasta alcanzar la humedad de equilibrio y la difusión es el mecanismo físico dominante que gobierna el movimiento de la humedad en secado y cuando  $M_r \leq 0.6$ , solo el primer término de la ecuación 4 es significativo y los otros términos se pueden despreciar, cuando se aplica a la difusión dependiente de la concentración estando relacionada con las características estructurales del alimento (Crank, 1979).

Considerando que el secado se realizó por dos caras y con las condiciones límites  $C_0=0$   $t=0$ ;  $C_1=$ Constante  $t>0$  y el espesor se sustituyó por  $L$  en la siguiente ecuación.

$$M_r = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{ew} t}{2L^2}\right) \quad (7)$$

El coeficiente de difusión se determinó a partir de la pendiente de la curva ( $m$ ) obtenida de la regresión lineal de la ecuación 9 (Rastogi y Raghavarao, 2004).

$$\ln M_r = \ln \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{-\pi^2 D_{ew} t}{2L^2}\right) \quad (8)$$

La pendiente de la curva de  $\ln M_r$  contra  $t$  se resolvió por triplicado y se obtuvo el promedio y la desviación estándar de los valores; para el coeficiente de difusión de la siguiente forma:

$$m = -\frac{D_{ew} \pi^2}{2L^2} \quad (9)$$

$$D_{ew} = -\frac{2L^2 m}{\pi^2} \quad (10)$$

### 2.7.2. Cinética de Difusión Efectiva

El modelo cinético propuesto por Azuara y col. (Tortoe, 2010) y ajustado al secado convectivo, desglosa a partir de la ecuación 12, donde es necesario obtener los valores de los parámetros  $S_1$  y  $WL_\infty$ , los cuales representan la constante del modelo de Azuara relacionada con la pérdida de agua, así como la humedad de equilibrio respectivamente.

$$WL = \frac{S_1 t (WL_\infty)}{1 + S_1 t} \quad (11)$$

Donde WL representa los datos obtenidos de los respectivos parámetros y pueden determinarse utilizando los datos experimentales, a partir de la pendiente y la ordenada al origen de la recta (t/WL) contra t, utilizando la ecuación 3.

Basada en la solución de la segunda Ley de Fick para una placa infinita en relación con el modelo de Azuara y col. (Tortoe, 2010), la ecuación para la determinación de la difusión efectiva a cada tiempo queda de la siguiente manera:

$$D_{efw} = \frac{2L}{\pi t} \left[ \left( \frac{s_1 t}{1 + s_1 t} \right) \left( \frac{WL_\infty^m}{WL_\infty^e} \right) \right] \quad (12)$$

Donde:

$D_{efw}$	Coeficiente de difusión efectiva.	$m^2/s$
$WL_\infty^m$	Humedad de equilibrio obtenida por el método.	Fracción de agua
$WL_\infty^e$	Humedad de equilibrio experimental.	Fracción de agua
$L$	Mitad del espesor de la placa.	m
$t$	Tiempo.	s
$s_1$	Constante de velocidad relativa para la pérdida de agua.	

El valor de la humedad en el equilibrio se obtuvo de la ecuación 12, es decir la inversa de la pendiente del gráfico t/WL contra t.

## Capítulo III. Resultados y análisis

### 3.1. Actividades preliminares

#### 3.1.1. Caracterización de la materia prima

Para la caracterización de la materia prima, se obtuvo el valor promedio de humedad de la carne fresca de 3 lomos distintos, el cual se presenta en la Tabla 7.

**Tabla 7. Humedad para carne fresca.**

Prueba de Humedad	
Media	74.14%
Desv. St	0.33
C. V.	0.44%

La humedad obtenida fue de 74.14% que es cercana a los valores señalados por *Albisu, Magro y Rodríguez (2008)* y *Amerling (2001)*, quienes reportan una humedad de  $75 \pm 0.86\%$ , así como *León, Orduz y Velandia (2017)*, con un valor de  $74.9 \pm 0.76\%$ , por lo tanto, se puede establecer que la carne utilizada para este estudio fue de buena calidad. Como se observa en la Tabla 7, el coeficiente de variación, indica que existe una homogeneidad en los resultados, con un valor inferior al 10%.

### 3.2. Objetivo particular 1

#### 3.2.1. Fuerza para la deformación

Los resultados de la deformación de la carne fresca antes y después de aplicar el pretratamiento ultrasónico se presentan en la siguiente tabla.

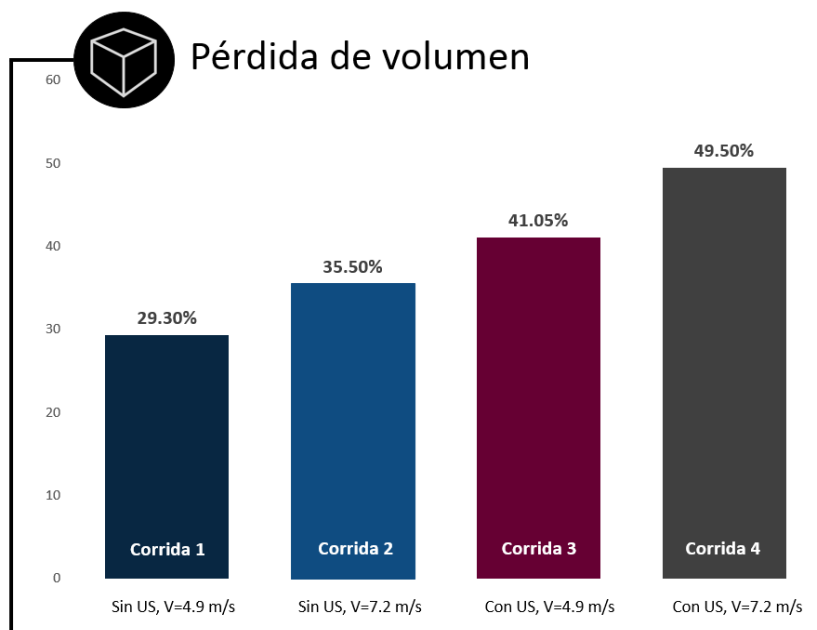
**Tabla 8. Fuerza para la deformación de la carne.**

Muestra	Fresca (kgf)	Después del Pretratamiento (kgf)
Media	4.05	2.65
Desv. St.	0.31	0.18
C. V.	7.87%	7.05%

En la Tabla 8 se observa que la fuerza necesaria para causar deformación en la carne de cerdo es menor en la carne sometida a pretratamiento ultrasónico 2.65 kg<sub>f</sub> en comparación con la carne fresca 4.05 kg<sub>f</sub>, ya que el ablandamiento de la carne es mayor después de aplicar el ultrasonido. *Dickens, Lyon y Wilson (1991)*, reportaron que una exposición ultrasónica a 40 kHz, en pechuga de pollo provocó una disminución significativa en los valores de resistencia a la deformación y corte, dicho cambio relacionado con la descomposición de los componentes miofibrilares por cavitación en el músculo, así como la desfragmentación del colágeno, proteína responsable de la dureza del músculo y a la desnaturalización de las proteínas miofibrilares, las cuales se encargan de la contracción muscular y que provocan un ablandamiento del músculo.

### 3.2.2. Pérdida de volumen

El cambio en volumen de la carne es de las características físicas que se pueden observar fácilmente después de aplicar tanto el pretratamiento ultrasónico, como el secado. Los resultados de pérdida de volumen en porcentaje de la carne se presentan en la Figura 16.



**Figura 16.** Pérdida de volumen por corrida en porcentaje.

En la Figura 16 se observa que la pérdida de volumen es menor 29.30% para la corrida 1, cuyas condiciones fueron: sin pretratamiento y velocidad del aire 4.9 m/s, mientras que la corrida 3 presenta una pérdida de volumen de 49.50% debido a que se sometió al pretratamiento ultrasónico y una velocidad de aire 4.9 m/s. *Fito et al., (2001)*, reporta que el secado conlleva una apreciable reducción de peso y volumen de los alimentos que se deshidratan e involucran una serie de cambios físicos y químicos en el alimento que dependen de la composición de éste, un ejemplo de estos cambios es el encogimiento.

El encogimiento ocurre como consecuencia de que el tejido no es capaz de retener su malla estructural cuando los espacios que contienen agua son continuamente vaciados y luego rellenos por aire, y la estructura externa colapsa (*Panyawong y Devahastin, 2007*).

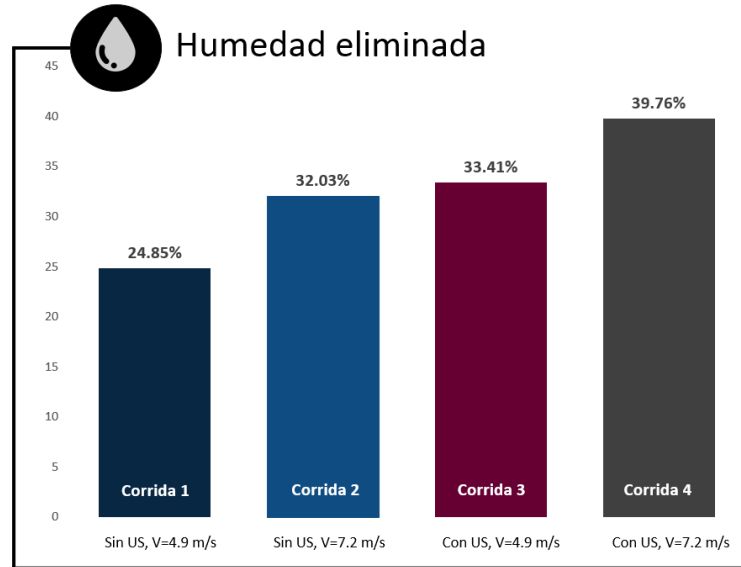
Durante el secado la pérdida de agua produce tensiones en la estructura celular de la carne, lo que lleva a un cambio en la forma y disminución del volumen. Estas modificaciones se llevan a cabo de forma continua durante el proceso y afectan las propiedades elásticas y mecánicas.

*Flores (2014)*, reporta una disminución considerable del 48.57% en el volumen final de la carne de cerdo tras un secado con una velocidad de aire de 7.2 m/s a 205 °C.

El daño en la estructura del músculo luego de aplicar ultrasonido es el responsable de la contracción muscular y con ello la movilidad del agua interna del alimento hacia la superficie.

De esta forma cuando la carne de cerdo es sometida a ultrasonido y secado, las proteínas estructurales se desnaturalizan y a una velocidad de aire de 7.2 m/s, el tejido estructural se deforma, con ello la disminución del volumen aumenta bajo estas condiciones.

Tal y como se observa en la Figura 17, el volumen perdido por las placas de carne es similar al porcentaje de agua eliminada durante el secado, por lo tanto, podría considerarse que, en las condiciones de trabajo aplicadas en este estudio, que la disminución del contenido de humedad es la responsable de la disminución del volumen de las muestras y que a una velocidad de aire de 7.2 m/s y pretratamiento ultrasónico, se producen los mayores cambios estructurales.



**Figura 17.** Humedad eliminada en porcentaje para cada corrida.

La contracción de la carne aumenta al aumentar el volumen de agua eliminada, de manera que en cuanto mayor es la cantidad de agua eliminada mayor es la contracción que se origina en el material. En algunos casos, el equilibrio mecánico se alcanza cuando el encogimiento del material es igual al volumen de agua eliminada (Mayor y Sereno 2004).

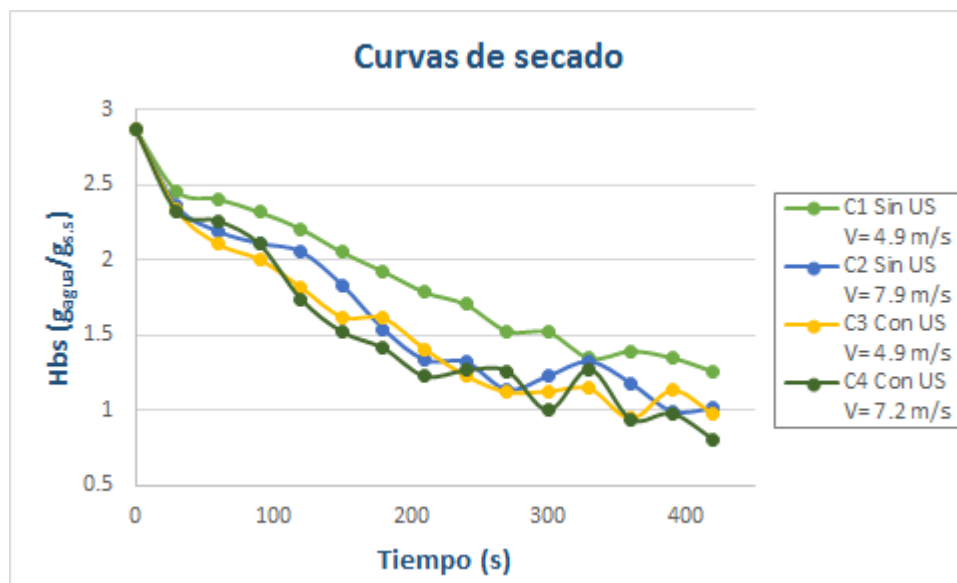
En la bibliografía existen estudios sobre la relación entre el volumen perdido y la cantidad de agua eliminada. Clemente (2003), reporta un volumen perdido similar al volumen de agua eliminada en el secado convectivo de carne de cerdo. En otros estudios se observó que el agua eliminada durante las últimas etapas de secado era superior que la reducción del volumen de las muestras para calamar (Rahman y Potluri, 1990; Rahman, et al., 1996). Este comportamiento puede explicarse por la disminución de la movilidad de la matriz sólida para contenidos bajos de humedad. La movilidad de la matriz sólida se encuentra directamente relacionada con su estado físico. A una elevada movilidad le corresponde un comportamiento viscoelástico típico del estado gomoso, mientras que una baja movilidad le corresponde un comportamiento elástico típico del estado vítreo. Cuando en el proceso de secado se alcanzan contenidos bajos de humedad, en los cuales se produce la transición vítrea, la rigidez del material frena la pérdida de volumen (Mayor y Sereno, 2004), lo que conlleva que al ser la

matriz sólida más rígida ésta resiste las tensiones creadas por la disminución de humedad y por lo tanto la pérdida de volumen depende directamente de la cantidad de agua eliminada durante el proceso.

### 3.3. Objetivo particular 2

#### 3.3.1. Cinética de deshidratación

En la Figura 18 se observan las curvas de secado para los 4 tratamientos. *Lazarides, Mitrakas y Matsos (2007)*, demostraron que la transferencia de masa durante un proceso de deshidratación está fuertemente ligada a la naturaleza del alimento, así como a las variables de procesamiento.



**Figura 18.** Curvas de secado para los diferentes tratamientos.

Se observa la influencia de la aplicación de ultrasonidos en las cinéticas. Ya que para las corridas 3 (pretratamiento ultrasónico y velocidad de aire 4.9 m/s) y 4 (pretratamiento ultrasónico y velocidad de aire de 7.2 m/s) al aplicar pretratamiento ultrasónico la pérdida de humedad se produjo mucho más rápido.



Para la corrida 4 se observa que la velocidad de secado fue mayor comparada con las otras tres corridas, esto debido a una aplicación de aire más elevada, la cual fue de 7.2 m/s que favorece la movilidad del agua a la superficie.

*Clemente (2003)*, reporta comportamientos similares para el secado convectivo de *Bíceps femoris* de cerdo, a velocidades de secado de 0.6 y 2.8 m/s.

Se sabe que durante los primeros minutos del secado ocurre la evaporación del agua, debido a que la diferencia entre las presiones internas en el alimento y el aire en el secador es mayor, teniendo esto en cuenta se analizan los resultados a partir del segundo 90, tiempo en el que se observaron los mayores cambios en la humedad de la carne.

Se observa también que en el segundo 330 de secado existe un punto de inflexión en la gráfica, el cual demuestra un aumento en la humedad de ese punto comparado con el anterior, esto debido a la naturaleza de las fibras musculares y a la matriz gomosa del material.

En la Tabla 9 podemos observar que el porcentaje de agua eliminada fue mayor en las corridas 3 y 4, las cuales fueron sometidas a pretratamiento ultrasónico.

**Tabla 9. Contenido de humedad de la carne después del proceso.**

Corrida	Humedad %	
	Inicial	Final
1	74.14	55.71
2		50.39
3		49.46
4		44.66
Corrida 1: Sin US, Vel. 4.9 m/s.		
Corrida 2: Sin US, Vel. 7.2 m/s.		
Corrida 3: Con US, Vel. 4.9 m/s.		
Corrida 4: Con US, Vel. 7.2 m/s.		

La combinación de ultrasonido y secado infrarrojo permitieron que la cantidad de agua eliminada fuera mayor en las corridas 3 y 4 las cuales fueron sometidas a pretratamiento ultrasónico, ya que durante la cavitación se producen radicales hidroxilos, los cuales pueden

reaccionar con los compuestos de la carne. Los enlaces O-H en el agua absorben energía infrarroja y comienza a rotar con la misma frecuencia que la radiación incidente. La transformación de la radiación infrarroja en energía rotacional causa la evaporación del agua.

La aplicación de ultrasonido juega un papel muy importante en el contenido final de agua en las muestras, siendo menor para las corridas 3 y 4, con una humedad de 49.46% y 44.66%, en comparación con la humedad de 55.71% y 50.39% para la corrida 1 y 2, en las que no se utilizó pretratamiento ultrasónico. Esto indica que el uso de pretratamiento combinado con la velocidad de aire alta provoca una disminución del  $37.07 \pm 4.78\%$  de la humedad contenida en la muestra tras un secado de 7 minutos, así mismo los resultados coinciden con lo reportado por *Robles y Ochoa-Martínez (2012)*, quienes indican que el uso de ultrasonidos de potencia en el procesamiento de alimentos favorece la intensificación del secado, principalmente en la eliminación de agua en el menor tiempo.

### 3.5. Coeficientes de difusión

Después de realizar la metodología correspondiente, se muestra en la Tabla 10 el valor promedio del coeficiente de difusión efectiva para cada tratamiento.

**Tabla 10. Valores del coeficiente de difusión efectiva.**

Corrida	Coeficientes de difusión efectiva (m <sup>2</sup> /s)
1	$2.18 \times 10^{-8}$
2	$2.24 \times 10^{-8}$
3	$2.32 \times 10^{-8}$
4	$2.37 \times 10^{-8}$
Corrida 1: Sin US, Vel. 4.9 m/s.	
Corrida 2: Sin US, Vel. 7.2 m/s.	
Corrida 3: Con US, Vel. 4.9 m/s.	
Corrida 4: Con US, Vel. 7.2 m/s.	

Se observa que la corrida 4, la cual se sometió a pretratamiento ultrasónico y secado a una velocidad de aire de 7.2 m/s, es la que presentó el valor más alto en el coeficiente de difusión siendo de  $2.37 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , esto debido a que el ultrasonido facilita el rompimiento del complejo

actino-miosina que es responsable de la unión de las fibras de la carne, el rompimiento de células musculares y la separación de miofibrillas (*Chemat, Zill-E y Muhammed, 2011*).

Los efectos del ultrasonido son causados por el colapso de las burbujas de cavitación. Estas burbujas al colapsar generan altas temperaturas y ondas de choque de presión internas, estos efectos aceleran el transporte de sustancias y favorecen la transferencia de masa (*Haydock y Yeomans, 2003; Knorr et al., 2004*).

Aunado a esto el efecto sinérgico de infrarrojos y aire caliente condujo a un rápido calentamiento de los materiales, lo que resulta en una mayor tasa de transferencia de masa (*Krishnamurthy et al., 2008*) y con ello una mayor eliminación de agua.

Cabe señalar que la velocidad de aire influye en la resistencia a la transferencia de materia. Si la resistencia controlante es la interna, la velocidad de aire de secado no influiría en la resistencia global por lo que no se observaría una influencia en la difusividad efectiva. En cambio, si la resistencia externa a la transferencia de materia es más importante, un aumento en la velocidad del aire de secado provoca un aumento en el valor de la difusividad efectiva (*Mulet, et al., 1987*). Variaciones de la difusividad efectiva con respecto a la velocidad de aire de secado han sido observadas por *Clemente, (2003)*, en el secado convectivo de carne de cerdo, quién reporta valores de coeficientes de difusión efectiva de  $2.39 \times 10^{-10}$  m/s, a una velocidad de aire de 2.8 m/s, así como  $1.26 \times 10^{-10}$  m/s, a una velocidad de aire de 0.6 m/s, que comparados con  $2.37 \times 10^{-8}$ , que representa el valor más alto obtenido en esta experimentación, es 20 veces menor esto debido a la influencia que tiene el aumento de la velocidad de aire en el secador, así como el uso del pretratamiento ultrasónico.

Considerando que el ultrasonido facilita la modificación a la estructura interna de la carne y que la difusividad depende la resistencia interna que existe en el alimento, la aplicación combinada de ambos procesos facilita la movilidad de agua en el alimento.

## Conclusiones

El estudio fue concluido satisfactoriamente de acuerdo a los objetivos propuestos y los resultados obtenidos.

El ultrasonido tiene la capacidad de modificar la resistencia a la deformación, como resultado del rápido movimiento molecular causado por la cavitación y el desarrollo del radical hidroxilo de la hidrólisis del agua que aumenta las reacciones químicas y modifica otras moléculas; lo que para este proyecto facilitó la reducción de volumen, así como la difusión en el secado.

Los valores de volumen perdido, así como de humedad eliminada fueron similares para cada tratamiento. Este hecho indica que la contracción que sufrieron las muestras durante su secado se debió principalmente a la pérdida de agua que experimentaron. Lo que da como resultado la relación de que el encogimiento de la carne es directamente proporcional a la cantidad de agua eliminada durante el secado y que, a una exposición de pretratamiento ultrasónico y velocidad de aire alta, las dos propiedades incrementan su pérdida.

Durante el secado prevalecen resistencias internas en la carne, lo que facilitó la transferencia de masa. Para el coeficiente de difusión, el uso de ultrasonido como pretratamiento, así como una velocidad de aire mayor en el secado (7.2 m/s), aceleraron el proceso, ya que la combinación de las tecnologías produjo un mayor coeficiente de difusión, el cual fue 8.71% más alto bajo esas condiciones.

El ultrasonido al ser una tecnología emergente puede aplicarse para desarrollar procesos modernos mejorando la calidad y propiedades de la carne y utilizarse como un método novedoso para el ablandamiento de la carne.

## Referencias

- Acuña, A. F. (2006). Química Orgánica. EUNED. Costa Rica.
- Albisu, A. M., Magro, S. E., & Rodríguez, R. V. M (2008). Bases de la alimentación humana. Netbiblo. España.
- Amerling, Q. C. (2001). Tecnología de la carne y de los productos cárnicos. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Ashokkumar, M., Sunartio, D., Kentish, S., Mawson, R., Simons, L., Vikhu, K., & Versteeg, C. (2008). Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9(2), 155-160.
- Azfal, T. M., Abe, T., & Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 177-182.
- Badui, D. S. (2006). Química de los alimentos. 4ª ed. Pearson Education. México.
- Bombrun, L., Gatelier, P., Portanguen, S., & Kondjoyan, A. (2015). Analysis of the juice and water losses in salted and unsalted pork samples heated in water bath. Consequences for the prediction of weight loss by transfer models. *Meat Science*, 99, 113-122.
- Boudhrioua, N., Bahloul, N., Ben Slimen, I. B., & Kechaou, N. (2009). Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves. *Industrial Crops and Products*, 29(2-3), 412-419.
- Bruton, N. P., Lying, J. G., Zhang, L., & Jacquier, J. C. (2006). The use of dielectric properties and other physical analyses for assesing protein denaturation in beef *biceps femoris* muscle during cooking from 5 to 85 °C. *Meat Science*, 72(2), 236-244.
- Cárcel, J. A., Bedito, J., Bon, J., & Mulet, A. (2007). High intensity ultrasound effects in meat brining. *Meat Science*, 76(4), 611-619.
- Çengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa. Mc Graw Hill Interamericana. México.
- Cheftel, J., Cheftel, H., & Pierre, D. (1992). Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. (Cuarta edición). España. Acribia.

- Chemat, F., Zill-E, H., & Muhammed, K. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835.
- Clemente, G. (2003). Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Codex Alimentarius* (2005). Código de prácticas de higiene para la carne. CAC/RCP, 58, 55.
- Contreras, M. C. (2006). Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Corzo, O., Bracho, N., Rodríguez, J., Pereira, A., & Vásquez, A. (2011). Determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de coroba. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 23(1), 36-42.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press.
- De la Fuente, B. S., Riera, F. E., Acosta, A. V. M., Blanco, B. A., & Gallego, J. J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.
- 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 Science*, 70(2), 389-396.
- Espinoza, S. J. L. (2011). Aplicación de un proceso de secado asistido infrarrojo para la deshidratación del fruto de murtilla. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Chile. Chile.
- Fito, M. P., Andrés, G. A., Barát, B. J., Albors, S. A. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Flores, E. (2014). Efecto de la congelación-cocción evaluado en atributos de calidad en carne de cerdo (Tesis Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Forrest, J. C., Aberle, E. D., Hedrick, H. D., Judge, M. D., & Merkel R. A. (1979). *Fundamentos de la ciencia de la carne*. Acribia. Zaragoza
- Gallego-Juárez, J., & Graff, K. (2015). *Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound*. Elsevier.

- García, P. J. V. (2007). Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Gómez-Díaz J., & López-Malo, A. (2009). Aplicaciones del ultrasonido en el tratamiento de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería en Alimentos*, 3-1, 59-79.
- Haydock, D., & Yeomans, J. (2003). Acoustic enhancement of diffusion in a porous material. *Ultrasonics*, 41(7), 531-538.
- Hebbar, H. U., Vishwanatha, K. H., & Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 557-563.
- Herrero, A. M., & Romero de Ávila, M. D. (2006). Innovaciones en el procesado de alimentos: Tecnologías no térmicas. *Revista de Medicina de la Universidad Navarra*, Vol. 50, Nº 4, 71-74.
- Hoover, D. G. (2000). Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies. *Journal of Food Science*, 65(8), 93-95.
- Imre, L., Solar, D., & Mujumdar, A. S. (2006) Solar Drying. In *Handbook of industrial drying*. 3<sup>a</sup> ed. Taylor & Francis LLC. Estados Unidos de América.
- Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2010). *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. Vol 1. Sachin Vinayak Jangam, NUS. Chung Lim Law, Nottingham University, Malasya Campus Arun, Sadashiv Mujumdar, NUS, Singapur.
- Kharisov, B. I., & Ortiz M. U. (1999). Uso del ultrasonido en procesos químicos. *Ingenierías*, 2(5), 13-21.
- Knorr D., Zenker, M., Heinz, V., & Lee D. (2004). Applications and potential of ultrasonic in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(5), 261-266.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H., Jun, S., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Food Sciences and Food Safety*, 7(1), 1-13.
- Kumar, D.G., Hebbar, U., Sukumar, D., & Ramesh, M.N. (2005). Infrared and hot-air drying of onions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 29(2), 132-150.
- Lazarides, H. N., Mitrakas, G. E., & Matsos, K. I. (2007). Edible coating and counter-current product/solution contacting: A novel approach to monitoring solids uptake during

- osmotic dehydration of a model food system. *Journal of Food Engineering*, 82(2), 171-177.
- Leighton, T. G. (2007). What is ultrasound? *Progress in Biophysics and Biomolecular Biology*, 93, 3-83.
- León, M., Orduz, A., & Velandia, M. (2017). Composición fisicoquímica de la carne de oveja, pollo, res y cerdo. *Limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 15(2), 62-75.
- Martín, E. D. (2013). *Acondicionamiento de la carne para su comercialización*. IC Editorial. España.
- 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*. Blackie Academic & Professional, London.
- Mason, T. J., & Cordemans, E. D. (1996). Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: a review. *Chemical Engineers Research & Design*, 74(5), 511-516.
- Mason, T. J., & Lorimer, J. (2002). *Applied sonochemistry: The uses of power ultrasound in chemistry and processing*. Weinheim, Wiley online library.
- Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373-386.
- Mc Clements, D. J. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science & Technology*, 6(9), 293-299.
- Meisenberg, G., & Simmons, W. H. (2018). *Principios de Bioquímica Médica*. 4ª ed. Elsevier Health Sciences. Barcelona.
- Monge, J. D. (2005). *Producción Porcina*. EUNED. Costa Rica.
- Morales, B. E. (2010). *Diseño de un modelo de gestión para el incremento de la comercialización porcina en la zona rural de Canton Turqui (Tesis de Licenciatura)*. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.
- Mosquera, G. L. F, Giraldo, A. S., Jiménez, G. D., Velasco, L. D. M., & Alturo, O. A. (2014). *Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos*. Grupo de Alimentos y Agroindustria. Colombia.



- Mulet, A., Cárcel, J. A., Sanjuan, N., & Bon, J. (2003). New food drying technologies-Use of ultrasound. *Food Science and Technology International*, 9(3), 215–221.
- Muralidhara, H. S., Ensminger, D., & Putnam, A. (1985). Acoustic dewatering and drying (low and high frequency): State of the art review. *Drying Technology*, 3(4), 529-566.
- Murrieta, C. L., Ezquerro, J. M., Ocaño, V. M., Cinco, F. J., Torres, W., & Márquez, E. (2015). Aislamiento y caracterización parcial de miosina del manto de calamar gigante (*Dosidicus gigas*). *CyTA: Journal of Food*, 13(3), 392-399.
- Nair, M. N., Suman, S. P., Li, S., Ramanathan, R., & Mancini, R. A. (2014). Temperature-and pH-dependent effect of lactate in vitro redox stability of red meat myoglobins. *Meat Science*, 96(1), 408-412.
- Nelson, D. L., Lehninger, A. L., & Cox, M. (2010). *Lehninger principles of biochemistry*. Macmillan. Estados Unidos de América.
- Norma Oficial Mexicana NOM-116-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico mediante método por arena o gasa. (29 de Junio de 1995). *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México. México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-194-SSA1-2004. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos. (25 de Agosto 2004). *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México. México.
- Pan, Z., & Atungulu, G. G. (2011). *Infrared heating for food and agricultural processing*. CRC Press, Taylor & Francis LLC. Estados Unidos de América.
- Panyawong, S., & Devahastin, S. (2007). Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 151-161.
- Paz, D. M. (2014). *Uso de ultrasonido como pretratamiento en la deshidratación osmótica de carne de cerdo *Longissimus thoracis** (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. México.

- Pearce, K. L., Rosenvold, K., Andersen, H. J., & Hopkins, D. L. (2011). Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—A review. *Meat Science*, 89(2), 111-124.
- Puente-Díaz, L., Echegaray-Pacheco, E., Castro-Montero, E., & Di-Scala, K. (2013). Aplicación de modelos matemáticos al proceso de secado asistido por infrarrojos de descartes de limón (*Citrus limón (L) Burum. F. Cv. Genova*). Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 80(181), 91-97.
- Rahman, M. S., & Potluri, P. L. (1990). Shrinkage and density of squid flesh during air drying. *Journal of Food Engineering*, 12(2), 133-143.
- Rahman, M. S., Perera, C. O., Chen X. D., Driscoll, R. H., & Potluri, P. L. (1996). Density shrinkage and porosity of calamari mantle met during air drying in a cabinet dryer as a function of water content. *Journal of Food Engineering*, 30(1-2), 135.145.
- Rastogi, N. K., & Raghavarao, K. S. M. S. (2004). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering fickian diffusion in cubical configuration. *LWT-Food Science and Technology*, 37(1), 43-47.
- Rastogi, N., Raghavarao, K., Niranjana, K., & Knorr, D. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 13(2), 51-52.
- Ratti, C., & Mujumdar, A. (2006). Infrared drying. In *Handbook of industrial drying*. 3<sup>a</sup> ed. Taylor & Francis LLC. Estados Unidos de América.
- Robles, O. L. E., & Ochoa-Martínez, L. A. (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(2), 109-122.
- Rowe, L. J., Maddock, K. R., Lonergan, S. M., & Huff-Lonergan, E. (2004). Influence of early *postmortem* protein oxidation on beef quality. *Journal of Animal Science*, 82(3), 785–793.
- Ruiz-Cabrera, M. A., Gou, P., Foucat, L., Renau, J. P., & Daudin, J. D. (2004). Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging. *Meat Science*, 67(1), 169-178.

- Sharma S. K., & Mulvaney S. J. (2003). *Ingeniería de Alimentos: Operaciones Unitarias y prácticas de laboratorio*. Limusa. México.
- Shi, J., Pan, Z., McHugh, T. H., Wood, D., Hirschberg, E., & Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT- Food Science and Technology*, 41(10), 1962-1972.
- Teijón, J. M., & Blanco, M. D. (2006). *Fundamentos de la bioquímica estructural*. Tébar. España.
- Tortoe, C. (2010). A review of osmodehydration for the food industry. *African Journal of Food Science*. 4(6), 303-324.
- Tuncel, N. B., Yilmaz, N., Kocabiyik, H., Ozturk, N., & Tuncel, M. (2010). The effects of infrared and hot air drying on some properties of corn (*Zea mays*). *Journal of Food Agriculture & Environment*, 8(1), 63-68.
- Zheng, L., & Sun, D. W. (2006). Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 17(1), 16-23.

## **Páginas electrónicas**

- Araneda, M. (Junio de 2020). Carnes y derivados. Composición y propiedades. Obtenido de Educación Alimentaria y Nutricional: URL <https://www.edualimentaria.com/aliimag/1-aliimag/detail/52-plato-saludable-harvard.html?tmpl=component>.
- Consejo Mexicano de la Carne, 2019, Compendio estadístico 2019. Obtenido de Consejo Mexicano de la carne: URL <https://www.comecarne.org/>
- Jiménez, M. (2011). El Tejido Muscular. Obtenido de Contracción muscular: URL <http://mariadoloresbioygeoiesarrojo.blogspot.com/2011/05/el-tejido-muscular.html>
- Protein Data Bank. (Marzo de 2000). Structural Protein 1YVN. Obtenido de Protein Data Bank: URL <http://www.rcsb.org/structure/1YVN>