



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS ALIMENTOS Y SALUD HUMANA

Tesis doctoral

Diseño de un producto cárnico sin conservadores adicionado con bacteriófagos

Para obtener el grado de Doctora en Ciencias de los Alimentos y
Salud Humana

PRESENTA:

M.S.P. Iracema Islas Vega

Director

Dr. Fabián Ricardo Gómez de Anda

Co-directora

Dra. Nydia Edith Reyes Rodríguez

Comité tutorial:

Dra. Deyanira Ojeda Ramírez

Dr. Eduardo Fernández Martínez

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo, julio 2026.



Asunto: Autorización impresión de tesis

MTRA. OJUKI DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH
PRESENTE

Por medio de la presente se informa que el comité tutorial del trabajo de tesis titulado "*Diseño de un producto cárnico sin conservadores adicionado con bacteriófagos*", realizado por la sustentante Iracema Islas Vega con número de cuenta X00243, perteneciente al programa de Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Salud Humana (DCASH), una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado tiene a bien extender la presente **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**. Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y continuar con lo establecido en el proceso de grado vigente.

ATENTAMENTE

Profesor		Firma
Dr. Fabián Ricardo Gómez de Anda	Director	
Dra. Nydia Edith Reyes Rodríguez	Codirectora	
Dra. Deyanira Cjeda Ramírez	Asesora	
Dr. Eduardo Fernández Martínez	Asesor	

San Agustín Tlaxiaca, Hgo., a 25 de junio de 2026

M. C. José Antonio Hernández Vera
Director del Instituto de Ciencias de la Salud
Dean

Dra. Lydia López Pontigo
Coordinadora del Posgrado ICsA

Dra. Nelly del Socorro Cruz Cansino
Jefa del Área Académica de Nutrición
Chair of Academic Area of Nutrition

Dra. Eva María Santos López
Coordinadora del Programa
DCASH

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento al Sistema de Educación Científica y Tecnológica del Estado de Hidalgo (SECIHTI) por el apoyo brindado mediante la beca otorgada para la realización de esta tesis doctoral. Su respaldo fue fundamental para el desarrollo de mi investigación y para la consolidación de mi formación académica.

Agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, mi casa de estudios que me ha formado desde la licenciatura, maestría y hasta este posgrado, enriquecida por todos los docentes que han marcado mi vida y me han inspirado en el camino de la investigación.

Así mismo agradezco al Instituto de Ciencias Agropecuarias por brindarme todo el apoyo y el respaldo para cumplir con los objetivos de este proyecto, donde pude conocer a grandes amigos y maestros.

De manera especial agradezco al Dr. Fabián Ricardo Gómez de Anda, por guiarme en este camino, por ver no solo a una estudiante, sino a una mamá con ganas de alcanzar su sueño, porque en cada etapa de investigación conté con su apoyo y su respaldo desde el primer día, gracias totales.

Extiendo mi agradecimiento a la Dra. Nydia Edith Reyes Rodríguez, por creer en mí, por enseñarme con paciencia todo lo aprendido este proyecto, gracias por el espacio dentro del laboratorio de genética y provisión de insumos para esta investigación.

Por último, agradezco a la Dra. Deyanira Ojeda Ramírez por la apertura desde que fui seleccionada a este posgrado, por su exigencia para el cumplimiento de mis metas y al Dr. Eduardo Fernández Martínez, que con sus grandes conocimientos científicos enriquecieron y perfeccionaron, esta investigación.

No te rindas de Mario Benedetti

No te rindas, aún estás a tiempo
de alcanzar y comenzar de nuevo,
aceptar tus sombras, enterrar tus miedos,
liberar el lastre, retomar el vuelo.

No te rindas que la vida es eso,
continuar el viaje,
perseguir tus sueños,
destrabar el tiempo,
correr los escombros y destapar el cielo.

No te rindas, por favor no cedas,
aunque el frío queme,
aunque el miedo muerda,
aunque el sol se esconda y se calle el viento,
aún hay fuego en tu alma,
aún hay vida en tus sueños,
porque la vida es tuya y tuyo también el deseo,
porque lo has querido y porque te quiero.

Porque existe el vino y el amor, es cierto,
porque no hay heridas que no cure el tiempo,
abrir las puertas, quitar los cerrojos,
abandonar las murallas que te protegieron.

Vivir la vida y aceptar el reto,
recuperar la risa, ensayar el canto,
bajar la guardia y extender las manos,
desplegar las alas e intentar de nuevo,
celebrar la vida y retomar los cielos.

No te rindas, por favor no cedas,
aunque el frío queme,
aunque el miedo muerda,
aunque el sol se ponga y se calle el viento,
aún hay fuego en tu alma,
aún hay vida en tus sueños,
porque cada día es un comienzo nuevo,
porque esta es la hora y el mejor momento,
porque no estás solo, porque yo te quiero.

Con cariño para mi esposo, mi hijo y mis padres que me ayudaron a no rendirme.

Alfredo, gracias por estar todos esos días grises y por los llenos de sol, por nunca dudar de mí, por impulsarme y por apoyarme en este proyecto, pero, sobre todo, agradezco tu apoyo en este camino de mamá investigadora que marco mi vida y profesión, te amo.

Román, gracias por llegar a mi vida, por darle el motivo más grande y por darme esos días de cansancio y de desvelos, de amor y de alegrías, porque un logro tuyo también fue mío, y sé que todo este esfuerzo valdría la pena, para darte un mejor futuro, a lado de tu papá y recuerdes que nunca debes rendirte para cumplir tus sueños, te amo mi corazón.

Papá y mamá, gracias por seguir en mi vida, por poder ver este logro conmigo, también es de ustedes, porque es el fruto de lo que han sembrado, gracias por todo, los amo. A mi hermano *Wero*, por seguir inspirándome con su ejemplo, te quiero.

A mis compañeras del doctorado, les agradezco por sus consejos, por sus porras, porque con su trabajo también me demostraron que somos mujeres soñadoras y que tenemos un fin en común; crear, desarrollar e investigar, las quiero.

Gracias Oscar, por no solo ser un compañero en el laboratorio, sino un amigo en este camino, gracias por decirme “ahorita vemos como le hacemos, no se preocupe” y por estar en cada reto y poderlo compartir.

Gracias a todos los que sumaron en este proyecto y en mi camino de formación, hicieron que esto también me hiciera feliz.

Índice

Índice de tablas.....	8
Índice de figuras	1
Tabla de abreviaturas	2
Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. Marco teórico	5
1.1 Industria cárnica y tendencias actuales de consumo.....	5
1.1.1 Importancia de los productos cárnicos en la alimentación de las personas.	5
1.1.2 Panorama de la industria cárnica nacional.....	6
1.2. Productos cárnicos	6
1.2.1 Definición de carne.....	7
1.2.2 Composición fisicoquímica de la carne.....	8
1.2.3 Clasificación de los productos cárnicos en el mercado mexicano.....	8
1.2.4 Carnes frías	10
1.2.4.1 Salchicha	10
1.2.4.2.1 Estrategias para la disminución en el consumo de sodio	14
1.2.5 Deterioro microbiológico en productos cárnicos.....	19
1.2.6 Riesgos sanitarios asociados al consumo de productos cárnicos	19
1.2.7 Microorganismos patógenos asociados a producto cárnico.....	20
1.1.3 Uso de productos "clan-label"	21
1.3 Bacteriófagos.....	23
1.3.1 Aspectos generales de los bacteriófagos.....	23
1.3.2 Morfología de los fagos	23
1.3.3 Ciclos de replicación	26
1.3.4 Marco legal y regulatorio de los bacteriófagos en los alimentos.	31
2. Objetivos.....	32
2.1 Objetivo general	32
2.2 Objetivos específicos	32
3. Material y métodos.....	33
3.1 Aislamiento de <i>E. coli</i>	33
3.2 Cinética de crecimiento de <i>E. coli</i>	34

3.2.1 Preparación del inóculo	34
3.2.2 Configuración del experimento y dilución	34
3.2.3 Medición de la cinética de crecimiento	35
3.3 Aislamiento, enriquecimiento y titulación de los bacteriófagos	35
3.3.1. Recolección de muestra.....	36
3.3.2. Filtración de bacteriófagos.....	36
3.3.3 Prueba de esterilidad	36
3.3.4 Detección de lisis <i>in vitro</i> (Spot Test) en agar doble capa.....	37
3.3.5 Purificación del filtrado.....	37
3.3.6 Suspensión de bacteriófagos en PEG 8000	37
3.3.6.1 Precipitación con PEG 8000.....	38
3.3.6.2. Recuperación del precipitado (centrifugación)	38
3.4 Almacenamiento de bacteriófagos a corto plazo: 4°C	39
3.5 Caracterización morfológica de los fagos mediante MET	39
3.6 Elaboración de la salchicha y tratamientos de sodio	40
3.6.1 Elaboración del embutido.....	40
3.6.2 Empaquetamiento del embutido	40
3.7 Evaluación sensorial de la salchicha.....	40
3.8 Análisis bromatológico de la salchicha.....	42
3.9 Análisis microbiológico de la salchicha.	42
4. Resultados y discusión	43
4.1 Cinética de crecimiento bacteriano de <i>E. coli</i>	43
4.2 Aislamiento de bacteriófagos.....	45
4.3 Caracterización del bacteriófago.....	47
4.4 Elaboración del embutido	48
4.5 Evaluación sensorial de la salchicha.....	49
4.6 Análisis microbiológico.....	51
4.7 Análisis bromatológico	52
5. Conclusiones	54
6. Referencias	55

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación principal de productos cárnicos	9
Tabla 2. Clasificación productos cárnicos por contenido de carne	10
Tabla 3. Especificaciones de cumplimiento para productos denominados salchicha	12
Tabla 4. Acciones en México para la reducción en el consumo de sodio	18
Tabla 5. Criterios microbiológicos para productos cárnicos	22
Tabla 6. Marcas comerciales de bacteriófagos aprobadas por la FDA	29
Tabla 7. Formulaciones para la elaboración de la salchicha	42
Tabla 8. Resultados de evaluación microbiológica en la salchicha	53
Tabla 9. Análisis bromatológico de los tipos de formulaciones de embutido	54

Índice de figuras

Figura 1. Mapa mundial de la reducción de ingesta de sodio del 2022	16
Figura 2. Representación esquemática de los principales grupos de fagos	25
Figura 3. Aspectos estructurales de bacteriófago T	26
Figura 4. Fases de adherencia e inyección del material genético a la bacteria hospedera	26
Figura 5. Ciclo de vida del bacteriófago	28
Figura 6. Técnica de McFarland 0.5	36
Figura 7. <i>E. coli</i> en Agar MacConkey	44
Figura 8. Cinética 1 de crecimiento bacteriano de <i>E. coli</i> .	45
Figura 9. Cinética 2 de crecimiento bacteriano de <i>E. coli</i> .	46
Figura 10. Placas de lisis originadas de la interacción entre un bacteriófago	47
Figura 11. Bacteriófago identificado de la Familia <i>Myoviridae</i>	49
Figura 12. Demostración gráfica de elaboración del embutido	50
Figura 13. Resultados de aceptación del análisis sensorial	52

Tabla de abreviaturas

°C:	Centígrados
μL:	Microlitros
μm:	Micrómetros
ADN:	Ácido desoxirribonucleico
AMR:	Microorganismos resistentes a los antimicrobianos
ARN:	Ácido ribonucleico
BHI:	Infusión de Cerebro y Corazón
COFEPRIS:	Comisión Federal para la Protección contra el Riesgo Sanitario
DO _{600nm} :	Densidad óptica a 600 nm
EFSA:	Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria
ENT:	Enfermedades no transmisibles
ETAs:	Enfermedades transmitidas por alimentos
FDA:	Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos
FSP:	Alianza para la Inocuidad Alimentaria
LB:	Luria-Bertani
MET:	Microscopio electrónico de transmisión
mg:	Miligramos
min:	Minutos
mL:	Mililitros
mM:	Milimolar
Na:	Sodio
Nm:	Nanómetros
NMP/g:	Número más probable/g
OMS:	Organización Mundial de la Salud
PEG 8000:	Polietilenglicol de peso molecular 8,000
RPM:	Revoluciones por minuto
TSA:	Agar Tripticasa de Soya
UFC/mL:	Unidades formadoras de colonia por mililitro
UFP/mL	Unidades formadoras de placa por mililitro

Resumen

El elevado consumo de embutidos en México, especialmente entre población infantil y adolescente, junto con su alto contenido de sodio y el riesgo de contaminación por *E. coli*, representa un problema de salud pública. En este estudio se aislaron y caracterizaron bacteriófagos líticos a partir de aguas residuales, demostrando actividad frente a cepas de *E. coli* A115 y O157:H7 mediante la técnica de spot test. La caracterización morfológica por microscopía electrónica de transmisión permitió clasificar al fago dentro de la familia *Myoviridae*. Se formularon tres versiones de salchicha con distintas proporciones de NaCl y KCl, encontrando que la sustitución del 50% de NaCl por KCl mantuvo características sensoriales aceptables y cumplió con los parámetros microbiológicos y bromatológicos establecidos por la normativa mexicana vigente (NOM-213-SSA1-2018 y Dirección General de Normas, 1984). Los resultados posicionan a los bacteriófagos como conservadores biológicos naturales y una estrategia dual para mejorar la seguridad microbiológica de los productos cárnicos y contribuir a la prevención de enfermedades no transmisibles.

Abstract

The high consumption of processed meats in Mexico, especially among children and adolescents, along with their high sodium content and the risk of *E. coli* contamination, represents a public health problem. In this study, lytic bacteriophages were isolated and characterized from wastewater, demonstrating activity against *E. coli* strains A115 and O157:H7 using the spot test technique. Morphological characterization by transmission electron microscopy allowed the phage to be classified within the *Myoviridae* family. Three sausage versions were formulated with different proportions of NaCl and KCl. The results showed that replacing 50% of the NaCl with KCl maintained acceptable sensory characteristics and met the microbiological and bromatological parameters established by current Mexican regulations (NOM-213-SSA1-2018 and the General Directorate of Standards, 1984).

The results position bacteriophages as natural biological preservatives and dual strategy to improve the microbiological safety of meat products and contribute to the prevention of non-communicable diseases.

Introducción

La industria alimentaria ha ido evolucionando con el uso de conservadores naturales, como una herramienta para generar etiquetas limpias, debido a que la demanda de consumidores en este sector ha ido incrementando en los últimos 50 años, para disminuir riesgos a la salud. Estos compuestos son multifuncionales, inhibiendo el crecimiento de microorganismos patógenos, cumpliendo con los estándares de calidad y conservando la seguridad de los productos; sin embargo, algunos no se encuentran disponibles en el mercado (Chauhan & Rao, 2024).

La industria cárnica en México ocupa el sexto lugar mundial en consumo de carne, con una ingesta per cápita de 73 kg por persona al año (Consejo Mexicano de la Carne, 2024). Dentro de este sector, las salchichas y los jamones representan el 49% de la producción de carnes frías, siendo los productos de ave los de mayor demanda y los más accesibles para la economía familiar (Consejo Mexicano de la Carne, 2020). No obstante, este consumo masivo conlleva riesgos significativos para la salud pública: el contenido de sodio en las salchichas comercializadas en México oscila entre 595 y 1,014 mg por cada 100 gramos de producto, valores que superan ampliamente las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud, que establece un límite diario de 2,000 mg para adultos (PROFECO, 2016). La ingesta elevada de sodio se asocia con hipertensión arterial, enfermedades cardiovasculares, daño renal y cáncer gástrico, padecimientos que figuran entre las principales causas de mortalidad en el país y en el mundo (OMS, 2026).

A este panorama se suma la problemática microbiológica. Los productos cárnicos procesados y listos para el consumo son especialmente vulnerables a la contaminación por patógenos como *E. coli* O157:H7, *Salmonella* spp. y *Listeria monocytogenes*, microorganismos responsables de numerosos brotes de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs) a nivel global (Jiménez-Edeza, et al., 2020). El manejo a granel, las condiciones de almacenamiento inadecuadas y la ausencia de barreras antimicrobianas efectivas incrementan este riesgo. La normativa mexicana vigente, a través de la NOM-213-SSA1-2018, establece criterios microbiológicos, estrictos, pero su cumplimiento depende en gran medida

de las prácticas de manufactura y de la disponibilidad de tecnologías de biocontrol accesibles y seguras (Secretaría de Salud, 2019).

Frente a estos desafíos, los bacteriófagos, que son virus con capacidad para infectar y destruir bacterias específicas, emergen como una alternativa prometedora y natural para mejorar la inocuidad alimentaria sin recurrir a conservadores químicos (Wessels et al., 2021). A diferencia de los antibióticos, los fagos actúan con alta especificidad hacia su bacteria huésped, no alteran las propiedades organolépticas del alimento y no representan riesgo conocido para la salud humana (Heriberto et al., 2025a). Por lo tanto, se consideran un arma adicional atractiva en la búsqueda continua de medidas preventivas para mejorar la seguridad alimentaria y la salud pública (Sjahriani et al., 2021). Su uso ha sido aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA), en productos cárnicos y avícolas listos para el consumo, además de frutas, verduras, pescados, y la investigación internacional avanza hacia su aplicación en diversas matrices alimentarias (Endersen et al., 2014). En México, sin embargo, su estudio y aplicación en productos cárnicos aún es incipiente.

La presente investigación propone el diseño de una salchicha de res con reducción de sodio mediante la sustitución parcial de cloruro de sodio (NaCl) por cloruro de potasio (KCl), adicionada con bacteriófagos líticos aislados del ambiente como estrategia de biocontrol frente a *Escherichia coli* (*E. coli*). El objetivo es obtener un producto que, además de cumplir con los estándares normativos de inocuidad, resulte aceptable sensorialmente y represente una opción más saludable para la población mexicana, contribuyendo a la prevención simultánea de enfermedades transmisibles y no transmisibles.

1. Marco teórico

1.1 Industria cárnica y tendencias actuales de consumo

A nivel mundial, la población ha ido incrementando y con ello el consumo de carne; la producción en el 2018 fue de 320 millones de toneladas, en el 2022 alcanzó 360 millones y se proyecta que para el 2032 serán 382 millones de toneladas (Stiftung; & Tierra, 2021). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), estima un incremento global del 14% en el consumo de carne hacia 2030; los aumentos más significativos se esperan en África (30%), Asia-Pacífico (18%) y América Latina (12%), con la carne de ave liderando la expansión, especialmente en países en desarrollo. En contraste, Europa registraría el menor crecimiento (0.4%), con tendencia a la baja en carne de vacuno y cerdo por razones ambientales y de salud. A largo plazo, las proyecciones para 2050 varían entre un aumento del 21%, si persisten los desafíos actuales, y apenas un 3% si se adoptan sistemas de producción más sostenibles y equitativos. En este contexto, uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible que la ONU subraya es la urgencia de transformar los patrones de producción y consumo alimentario para hacer frente a las tres crisis planetarias: cambio climático, pérdida de biodiversidad y contaminación (Font-i-furnols, 2023). Derivado de la producción y del consumo de la carne, las investigaciones se enfocan actualmente en la sostenibilidad ambiental, la salud humana y el sufrimiento animal (Pereira et al., 2023).

1.1.1 Importancia de los productos cárnicos en la alimentación de las personas.

De acuerdo con el aporte nutricional, la carne contiene diez aminoácidos esenciales; cien gramos de carne roja otorgan 20.7 g de proteína. De acuerdo con la especie animal y el corte, puede variar el contenido de lípidos; además, aporta micronutrientes como el hierro, vitamina B12 y vitamina A.

Los productos cárnicos derivan de procesos de la carne; como alternativa de consumo, se realizan a partir de carne de pollo, res y cerdo, adicionando grasa animal o vegetal, y se pueden clasificar en crudos, cocidos, curados y jamones. El consumo de estos productos se asocia con el deterioro de la salud por el alto

contenido de grasa y por las sales de nitrito asociadas a la formación de células cancerígenas. Por otra parte, se destacan por ser una buena fuente proteica, siendo alimentos de consumo básico. En la actualidad se busca el desarrollo de productos cárnicos funcionales que, además de otorgar su valor nutricional, brinden beneficios a la salud y/o disminuyan el riesgo de enfermedad (Rey Rodríguez, 2023). Por lo tanto, los consumidores buscan versiones más saludables a partir de formulaciones con fibra natural, conservadores de origen natural y otros ingredientes orgánicos o naturales, sin embargo, existe el desafío de cumplir con las características sensoriales de estos productos, donde las empresas promueven su consumo como alternativa saludable. Algunos estudios han demostrado que la textura, el sabor y el alto contenido de proteína son importantes para la aceptación del producto (Romero-Sánchez et al., 2024).

1.1.2 Panorama de la industria cárnica nacional

En México, el consumo cárnico se incrementó durante el 2023, alcanzando 10.3 millones de toneladas, lo que significa 4.9% más que en el 2022; por lo tanto, es considerado el sexto lugar a nivel mundial con un consumo per cápita de 73 kg de carne por persona al año, estando en primer lugar China, segundo Estados Unidos y tercero la Unión Europea. La carne que más se consume en el país es la de pollo con 203 mil toneladas; en segundo lugar, es la de cerdo con 132 mil y res con 112 mil toneladas (Consejo Mexicano de la Carne, 2024).

La Dirección General de Normas (1984), en la NOM NMX-F-065-1984 define salchicha como un producto alimenticio embutido de pasta semifirme de color característico, elaborado con la mezcla de carne (60% mínimo) de ternera o res y cerdo y grasas, adicionado de condimentos, especias y aditivos para alimentos (Dirección General de Normas, 1984).

1.2 Productos cárnicos

La Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2018 define como productos cárnicos cocidos listos para el consumo aquellos que han sido sometidos a un tratamiento

térmico con el objetivo de alcanzar una temperatura de 70°C en su parte central o a una combinación de tiempo y temperatura que asegure la eliminación de microorganismos dañinos, sin necesidad de que el consumidor los someta a un tratamiento térmico adicional. Esta categoría incluye, entre otros ejemplos, jamón cocido, salchichas cocidas o en salmuera, mortadelas y patés (Secretaría de Salud, 2019).

1.2.1 Definición de carne

La carne es definida como todas las partes adecuadas para el consumo humano de animales domésticos de la especie bovina, porcina, ovina y caprina, así como de solípedos domésticos, incluidos los despojos que no están comprendidos en el término canal (Bautista & Rincón, 2010).

La FAO, ofrece una definición técnica más amplia y detallada desde la ciencia de los alimentos, como aquellos tejidos animales aptos para uso como alimento. Comprende los principales tejidos blandos de la canal: músculo predominantemente esquelético (30–65%), tejido adiposo (10–45%) y tejido conectivo. Otros tejidos animales utilizados como alimento, y también en cierta medida en el procesamiento cárnico, son los órganos internos, incluida la sangre (FAO, 2004).

El Codex Alimentarius define la carne en un sentido amplio, incluyendo todas las partes comestibles de animales de sangre caliente sacrificados o abatidos: músculos esqueléticos, grasa, corazón, intestinos, hígado, entre otros (FAO/WHO, 2023).

Desde el marco regulatorio mexicano, la carne se define de forma específica en la NOM-194-SSA1-2004 como el tejido muscular estriado esquelético, acompañado o no de tejido conectivo, hueso y grasa, además de fibras nerviosas, vasos linfáticos y sanguíneos; de los animales para abasto, que no ha sido sometida a ningún proceso que modifique sus características sensoriales y fisicoquímicas (Secretaría de Salud, 2004). Esta definición de alcance sanitario se complementa con la NOM-009-ZOO-1994, que regula los procedimientos de inspección y manejo desde el sacrificio hasta la comercialización, y establece los criterios zoonosológicos bajo los

cuales la carne es apta para consumo humano en el territorio nacional (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1994).

En la actualidad, el consumo de carne es importante para proveer nutrientes esenciales; sin embargo, también se debe considerar la calidad de este alimento y sus derivados, la cual incluye la suma de todas las propiedades sensoriales, nutritivas, higiénicas, toxicológicas y tecnológicas de la carne (Bautista & Rincón, 2010).

1.2.2 Composición fisicoquímica de la carne

La composición química de la carne y de los productos cárnicos se realiza para conocer la calidad de los productos, debido a que son alimentos manipulados, procesados y almacenados con la finalidad de cumplir con la aceptación del consumidor. La evaluación aplica en el contenido microbiano, humedad, proteínas, grasas y cenizas (material inorgánico) (Vargas, 2018).

De acuerdo con la literatura especializada, la carne está compuesta aproximadamente por 72 a 75% de agua y 25 a 28% de materia seca, con un 19 a 20% de proteínas y 1.5% de compuestos nitrogenados no proteicos (que incluyen nucleótidos, péptidos, creatina y creatinina), 2.5 a 5% de lípidos, 1.2% de carbohidratos, 0.65 a 1% de cenizas y 0.1% de vitaminas (Ciobanu et al., 2025).

1.2.3 Clasificación de los productos cárnicos en el mercado mexicano

Un producto cárnico está formulado a partir de ingredientes como carne, grasa y vísceras, así como de otros productos comestibles y autorizados para el consumo humano. Este tipo de alimentos son sometidos a diferentes procesos, por lo que se cuentan con diferentes clasificaciones (Tabla 1 y 2). Los procesos tecnológicos que se aplican a estos alimentos son el curado, en donde se utiliza sal, nitritos/nitratos para desarrollar el color y sabor característicos; el ahumado, donde existe la exposición al humo de maderas de forma fría o caliente para otorgar sabor, color y un efecto de conservación; la fermentación, que aplica el uso de bacterias lácticas disminuyendo el pH; y el tratamiento térmico controlado para asegurar la inocuidad

y una textura adecuada, mediante los procesos de pasteurización y esterilización (Consejo Mexicano de la Carne, 2022).

En México, durante el año 2023, la producción anual de carnes frías se distribuyó así: salchicha (50%), jamones (39%) y otros productos (11%). Dentro de este último grupo están el chorizo y la longaniza, que se diferencian por su proceso de elaboración. Otros productos incluyen tocino (30%), chuleta ahumada (18%), mortadela (13%) y queso de puerco (8%). Según el Consejo Mexicano de la Carne (2022), los principales lugares donde se compran productos cárnicos, especialmente carnes frías, son: abarrotes (38%), supermercados (25%), charcuterías (23%), mercados (12%), minisúper (1%) y otros (2%) (Torres-Álvarez et al., 2025).

Tabla 1. Clasificación principal de productos cárnicos

Productos cárnicos crudos	
Frescos: chorizo, longaniza, hamburguesas, albóndigas	Curados: jamón serrano, chorizo español, salami, pepperoni crudo
Productos cárnicos cocidos	
Embutidos cocidos: jamón cocido, salchicha, mortadela, queso de puerco.	Productos cocidos no embutidos: tocino cocido, chicharrón prensado, carnitas, patés.
Productos cárnicos secos y semisecos	
Cecina	
Machaca	
Tasajo	
Charqui	
Chorizo seco	
Productos cárnicos marinados	
Carne al pastor preparada	
Carne para asar marinada	
Fajitas preparadas	
Arrachera marinada	

Tabla 2. Clasificación productos cárnicos por contenido de carne

Categoría	Proteína cárnica	Ejemplos
Premium	Mínimo 14 %	Jamón tipo Virginia, salchichas premium
Preferente	Mínimo 11 %	Jamón cocido, salchichas de pavo
Económica	Mínimo 8 %	Salchichas económicas, jamón económico.
Popular	Menos del 8 %	Productos con extensores

1.2.4 Carnes frías

Las carnes frías de mayor consumo en México son las salchichas y los jamones, con una producción de 49%, siendo las de ave de mayor demanda, considerándose un alimento accesible para la economía, integrando una porción de proteína segura y accesible (Consejo Mexicano de la Carne, 2020).

De acuerdo con la Asociación Nacional de Tiendas de Autoservicio y Departamentales, la salchicha encabeza la lista de consumo de embutidos en el país, seguida por el jamón, el chorizo y la mortadela (Asociación Nacional de Tiendas de Autoservicio y Departamentales, 2018).

1.2.4.1 Salchicha

Las salchichas son los productos cárnicos que más se consumen en los países desarrollados (Pérez-Vargas et al., 2024); es considerada un producto cárnico cocido listo para el consumo, el cual es sometido a un tratamiento térmico para alcanzar una temperatura de 70°C en su centro térmico, o a una relación tiempo-temperatura equivalente que garantice la destrucción de microorganismos patógenos y que no requiere un tratamiento térmico por parte del consumidor. Por lo tanto, se encuentran de manera enunciativa, mas no limitativa, los productos

como jamón cocido, salchichas cocidas o en salmuera, mortadelas y patés (Secretaría de Salud, 2018).

La salchicha, de acuerdo con la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), es un alimento procesado de consistencia semisólida que se elabora a partir de carne de cerdo, ave o res, a la que se le puede añadir grasa de cerdo e incluso, en algunos casos, vísceras o piel de estas especies. La carne se tritura y se mezcla con sal, especias, condimentos y aditivos como fosfato de sodio, eritorbato de sodio y nitrito de sodio. La mezcla resultante se moldea y se introduce en envolturas naturales, comúnmente tripas de cerdo, o envolturas artificiales, generalmente de colágeno o celulosa (PROFECO, 2020). La salchicha tipo Viena, Frankfort y coctel son los productos alimenticios que son elaborados básicamente en su composición con no menos de 60% de carne de res y cerdo (Dirección General de Normas, 1984).

Según la Dirección General de Normas (1984), la NOM NMX-F-065-1984 define salchicha como un producto alimenticio embutido de pasta semifirme de color característico, elaborado con la mezcla de carne (60% mínimo) de ternera o res y cerdo y grasas, adicionado de condimentos, especias y aditivos para alimentos y establece las especificaciones que deben cumplir los productos alimenticios denominados salchichas, las cuales se describen en la Tabla 3; sin embargo, no es de carácter obligatorio (Dirección General de Normas, 1984).

La PROFECO realizó un análisis de 57 marcas de salchichas que se venden en México y encontró que 28 de estos productos tienen un contenido de proteína por debajo del 9.5%. El componente principal en estos productos fue el agua, que osciló entre el 50% y el 74%, llegando incluso en algunos casos hasta un 80%, superando el 70% permisible. En cuanto al contenido de sodio, es elevado debido a la presencia de agentes de curado, conservantes y sal, con cantidades que van entre los 595.6 mg y 1,014.6 mg de sodio por cada 100 gramos de salchicha. También se observó que algunos de estos productos etiquetados como "de pavo" tienen más carne de pollo que el ingrediente mencionado (PROFECO, 2020).

Tabla 3. Especificaciones de cumplimiento para productos denominados salchicha

Especificaciones	Descripción
Sensoriales	Color: Rosado característico, según el tipo de que se trate. Olor: Agradable, característico, exento de olores extraños. Sabor: Agradable, característico, exento de sabores extraños. Consistencia: Masa compactada, semiblanda.
Físicas y químicas	Dimensionales: • Viena: Diámetro 14-26 mm, longitud 50-300 mm. • Frankfurt: Diámetro 20-33 mm, longitud 80-300. • Cocktail: Diámetro 14-26, longitud 30-65. Químicas: • Humedad: máximo 70% • Grasa: máximo 30% • Proteína: mínimo 9.5%
Microbiológicas	<i>Staphylococcus aureus</i> 5000 Col/g máx. <i>Salmonella</i> negativa en 25 g. Mesofílicas aerobias: 500,000 Col/g máx.
Materia extraña objetable	El producto objeto de esta norma debe estar libre de: Fragmentos de insectos, pelos y excretas de roedores, así como de cualquier otra materia extraña.
Aditivos alimentarios	Oxidantes: • Nitrito de sodio: Máximo en producto: 156 mg/kg (156 ppm) terminado. • Nitrato de sodio: la cantidad máxima permitida en combinación con el nitrito de sodio no debe rebasar los 156 mg/kg (156 ppm). Antioxidantes: • Ascorbato y/o eritorbato de sodio, mínimo 0.5%, o ácido ascórbico, mínimo 0.25% Emulsificantes: • Polifosfato de sodio y/o potasio máximo agregado: 0.5%. Expresado como P2O5 máximo agregado: 0.3%. •
Espicias, condimentos y saborizantes	Todas las especias naturales y los condimentos preparados a base de mezclas de ellos y/o sus extractos y/o sus aceites esenciales, azúcares (glucosa, dextrosa, sacarosa, lactosa y fructosa), sal, glutamato monosódico, proteínas vegetales hidrolizadas (PVH).
Otros ingredientes	Agua y/o hielo en cantidad suficiente para su proceso. Componentes de cereales, oleaginosas y leches o mezclas de los mismos que no excedan en conjunto el 10% del producto terminado.
Ahumado	Se declara ahumado natural cuando se utilice humo natural o sus extractos líquidos; se declara ahumado artificial cuando se utilicen sus equivalentes sintéticos.

Contaminantes químicos	El producto objeto de esta norma debe estar libre de contaminantes químicos en cantidades que puedan representar un riesgo para la salud. Los límites máximos para estos contaminantes quedan sujetos a lo que establezca la Secretaría de Salud desde 1982.
------------------------	--

Fuente: Dirección General de Normas, 1984. NOM NMX-F-065-1984

1.2.4.2 Determinación de sodio en salchichas en México

De acuerdo con los resultados de la Encuesta Nacional de Salud 2023, las carnes procesadas, como son longaniza o chorizo, salchicha de puerco, pavo o combinado, y jamón de puerco o pavo, se encuentran en el grupo de alimentos no recomendables para consumo cotidiano, ya que se les asocian riesgos para la salud y el desarrollo de enfermedades no transmisibles (ENT) (Secretaría de Salud, 2023). Dicha encuesta encontró que la población que más consume este tipo de alimentos son los adolescentes, seguida de escolares y preescolares con un 21.6%, 18.2% y 14.5% respectivamente (Gaona-Pineda et al., 2023), lo que implicó un incremento en el consumo de estos alimentos en comparación con los resultados obtenidos en la encuesta del 2018 (Santaella, 2019)

En un estudio realizado por Nieto et al. (2018), se analizaron los niveles de sodio en alimentos envasados en México y se evaluó en qué medida cumplen con los estándares de referencia de sodio establecidos por la Agencia de Normas Alimentarias del Reino Unido (UK FSA) y la Comisión Mexicana para la Protección de Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). El estudio encontró que las carnes procesadas, como el jamón, el tocino y las salchichas, presentaron las concentraciones más elevadas de sodio. Estos hallazgos concuerdan con los resultados del estudio SALMEX, que identificó a las carnes procesadas como la principal fuente de sodio en la ingesta diaria, representando el 8% del consumo total por persona según los registros de alimentación de tres días.

En cuanto a las salchichas consumidas en México, se detectó que cada una de ellas contiene 266 mg de sodio en una porción de 33.3 gramos. Este valor representa el 13.3% del sodio recomendado diariamente para un adulto (2,000 mg) y el 17.7%

para un niño o niña, lo que demuestra que la cantidad de sodio en cada salchicha es considerablemente alta. Además, únicamente una tercera parte del producto consiste en nutrientes como grasas, carbohidratos y proteínas, mientras que el resto está compuesto por agua y aditivos (PROFECO, 2016).

1.2.4.2.1 Estrategias para la disminución en el consumo de sodio

El sodio es un nutriente esencial para funciones específicas en el cuerpo humano. Además, es uno de los principales ingredientes que aumenta la palatabilidad en los alimentos procesados y ayuda a preservar durante más tiempo su vida de anaquel (Campos-Nonato, Oviedo-Solís, et al., 2022).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), las dietas elevadas en sodio tienen efectos negativos significativos, incluyendo el aumento de la presión arterial, el riesgo de cáncer gástrico, obesidad, osteoporosis, síndrome de Menière y enfermedades renales, estimando que 2 millones de muertes al año están relacionadas con el exceso de sodio en la dieta (OMS, 2026).

El 30% de los casos de hipertensión (HTA) se asocian al exceso de sal en la dieta, y dentro de las enfermedades cardíacas y los accidentes cerebrovasculares, la HTA incide en el 40% de estos diagnósticos, los cuales representan un 45% de las enfermedades no transmisibles (ENT) (OPS, 2019).

Dentro de los riesgos asociados, con el mayor número de muertes en el mundo en mujeres de todas las edades en el 2019, fue en primer lugar la presión arterial sistólica alta (5.25 millones de muertes), en segundo lugar, riesgos dietéticos por ejemplo poca fruta y mucha sal (3.48 millones de muertes) y en tercer lugar glucosa plasmática alta en ayunas (3.09 millones de muertes), y para hombres, en primer lugar, está el consumo de tabaco (6.56 millones de muertes), en segundo lugar, presión arterial sistólica alta (5.60 millones de muertes) y en tercer lugar riesgos dietéticos (4.47 millones de muertes) (IHME, 2023).

En México, de acuerdo con los resultados de la Encuesta Nacional de Salud 2022, aproximadamente la mitad de los adultos padecen hipertensión arterial, la cual se

caracteriza por una constante elevación de la presión en los vasos sanguíneos y, cuanto más alta es la presión arterial, más difícil le resulta al corazón bombear sangre por todo el cuerpo. Este padecimiento también incrementa con la edad, el consumo de alcohol, el tabaquismo, el sedentarismo y factores como la contaminación del aire, el ruido y el estrés psicosocial, y se asocia con la presencia de enfermedades como obesidad y diabetes (Campos-Nonato, Oviedo-Solís, et al., 2022).

Además de las patologías mencionadas, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasificó a los productos cárnicos procesados como carcinógenos del Grupo 1, señalando que la incidencia de cáncer colorrectal aumenta en un 18% cuando se consumen más de 50 g al día (International Agency for Research on Cancer [IARC], 2015).

Es recomendable que se reduzca el consumo diario de sodio a menos de 2000 mg o menos de 5 g de sal, debido a que en la Región de las Américas está muy por encima del nivel recomendado, ya que la ingesta diaria promedio es de 8.5 y 15 g por persona, por lo que la reducción de sal en la dieta es una de las medidas recomendadas por la Cumbre de las Naciones Unidas para prevenir las enfermedades no transmisibles y señalada como una de las mejores estrategias para mejorar la salud de la población, proponiendo como primera acción la reformulación de los productos alimenticios para que contengan menos sal/sodio, fijando niveles objetivos en los alimentos y bebidas (OPS, 2019).

Según la OMS, disminuir el consumo de sodio constituye una de las intervenciones con mejor relación costo-beneficio para mejorar la salud poblacional y disminuir la carga de enfermedades no transmisibles. Entre las medidas propuestas se encuentran: reducir el contenido de sodio en los alimentos procesados, establecer sistemas de etiquetado frontal que orienten a los consumidores hacia opciones más bajas en sodio, desarrollar campañas mediáticas orientadas a modificar los hábitos de consumo, y promover políticas de compra y suministro de alimentos en instituciones públicas que favorezcan productos con menor contenido de sodio (OMS, 2026).

En este contexto, diversos países han implementado estrategias orientadas a disminuir el consumo de sodio en la población, entre las que destacan campañas de promoción de la salud, medidas fiscales, sistemas de etiquetado nutricional, programas de educación al consumidor y otras intervenciones de salud pública (Nieto et al., 2018).

En 2023 se publicó el primer informe mundial sobre la reducción de la ingesta de sodio; el informe tiene por objeto hacer un seguimiento de los progresos y determinar las esferas de acción en la aplicación de políticas para la reducción de la ingesta de sodio (OMS, 2023). También se diseñó una “tarjeta de puntuación del sodio por país”, la cual evalúa el progreso en la adopción de compromisos nacionales y la adopción de un enfoque multifacético implementando políticas para la reducción de la ingesta de sodio (figura 1). El Reino Unido es el país que se considera líder en la reducción de sal; sin embargo, otros países de la Unión Europea destacan, así como México y Brasil (OMS, 2026).

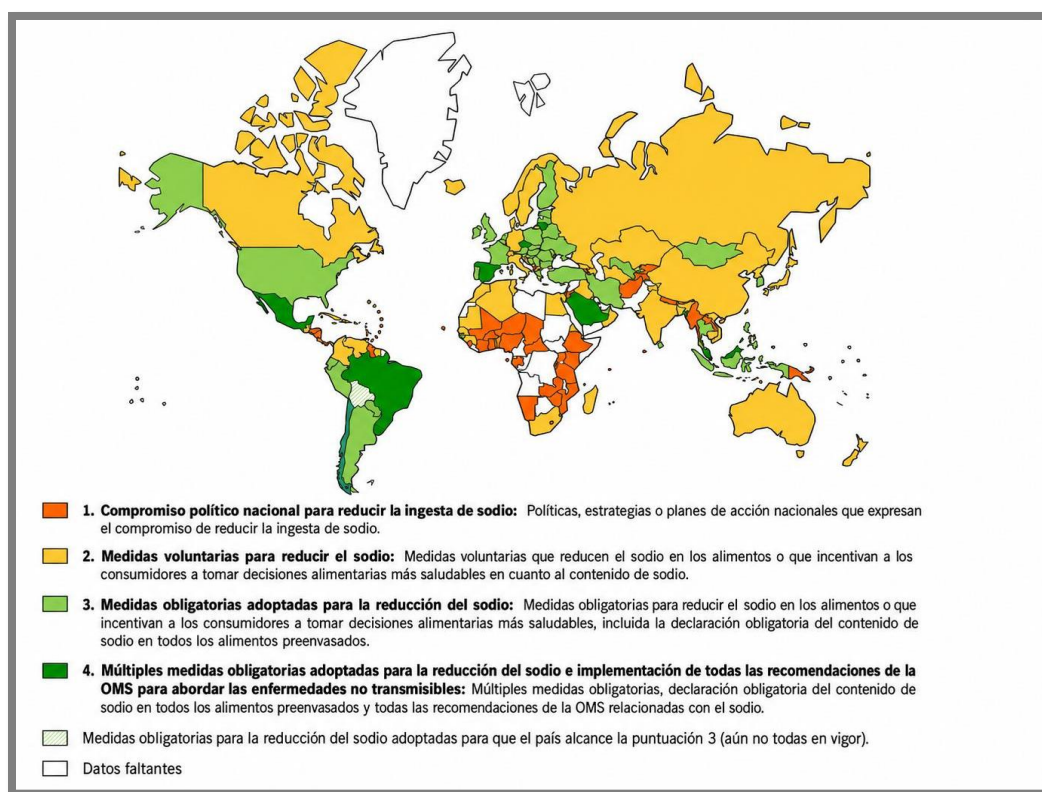


Figura 1. Mapa mundial de la reducción de ingesta de sodio del 2022 (OMS, 2023).

Dentro de las estrategias, se realizó la Modificación de la NORMA Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados-información comercial y sanitaria; dicha norma contempla el manejo del sodio en los alimentos, el cual es un parámetro que se debe identificar su exceso en la etiqueta, con más de 5 mg a 140 mg, expresándolos en múltiplos de 10 mg. Si presenta más de 1 mg o más de 300 mg en 100 g de producto, se utilizará la leyenda de EXCESO DE SODIO en alimentos sólidos, y en líquidos se usará si presentan más de 45 mg de sodio (Secretaría de Salud, 2017).

Tabla 4. Acciones en México para la reducción del consumo de sodio

Año	Acción	Resultados
2010	Política	Acuerdo Nacional para la Salud Alimentaria: Reducir consumo de sodio, disminuir sodio añadido y aumentar disponibilidad de productos bajos en sodio
2011	Capacitación	Programa México Sano (PROMESA): Capacitación a restaurantes e industria; retiro voluntario de saleros de las mesas
2013	Campaña	Campaña "Menos Sal, Más Salud":
2020	Política	Modificación a la NOM-051-SCFI/SSA1-2010: Sellos de advertencia "EXCESO" de sodio y otros nutrientes

Fuente: Elaboración propia de Campos-Nonato et al. (2022).

Se han implementado diferentes tecnologías para evitar el uso de conservadores químicos en los alimentos, con la finalidad de mejorar la calidad de vida del ser humano, agregando compuestos naturales, los cuales brindan seguridad a los comensales (The Food Tech, 2022).

En los productos cárnicos la concentración de sodio es elevada y ha sido un tema importante en materia de salud pública, por lo cual se han desarrollado estrategias para su disminución, como es la sustitución de sal por cloruro de potasio,

potenciadores de sabor naturales sin modificar sus características sensoriales (Samad et al., 2026).

El cloruro de sodio es un ingrediente fundamental en las salchichas debido a que tiene la capacidad de unión y retención de agua, logrando un control microbiológico y dando características sensoriales particulares a estos alimentos; sin embargo, se han realizado varias investigaciones para disminuir el contenido a partir de otros sustitutos (Sirini et al., 2022).

Las sales de nitrito y nitrato son conservadores en los productos cárnicos, ya que inhiben el crecimiento de bacterias patógenas y favorecen el color y sabor típico de la carne curada; por su capacidad de toxicidad aguda, se debe regular su uso o aplicación (Sirini et al., 2022). La OMS clasifica a las carnes procesadas como carcinógenos del grupo 1, por su contenido de nitritos; por lo tanto, surgen varias estrategias para su control (Alvarado, 2025).

De acuerdo con la NOM 213 SSA1 2018, se establecen los límites máximos permisibles de nitritos en México, los cuales no deben ser mayores a 156 mg en salchichas; por lo tanto, la industria ha reemplazado por extractos vegetales como alternativa (The Food Tech, 2025).

1.2.5 Factores que favorecen el crecimiento microbiano

Los alimentos suelen contaminarse por bacterias, virus, parásitos o químicos; por lo tanto, suelen causar enfermedades como diarrea o algún tipo de cáncer. La OMS reporta que al año enferman 600 millones de personas en el mundo por el consumo de alimentos contaminados, causando la muerte en 420 mil personas (COFEPRIS, 2017).

Durante la producción de los alimentos se puede producir la contaminación, la cual es considerada como sustancias que no se han añadido intencionalmente, y que puede suceder en cualquier momento, ya sea durante la fabricación, manipulación, almacenamiento, elaboración o distribución, o bien a partir del medio ambiente; por lo tanto, la calidad de los alimentos debe vigilarse para evitar que sean nocivos para la salud (FAO, 2023).

1.2.5.1 Deterioro microbiológico en productos cárnicos

La carne suele contaminarse desde el animal vivo, en rastros, en las superficies de contacto; sin embargo, las carnes procesadas son más susceptibles de contaminación por el manejo que tienen, siendo considerada la mayor causa de las ETAs en el mundo (Heredia et al., 2014). Por lo tanto, es importante tener un control microbiológico y evitar la propagación de enfermedades.

1.2.6 Riesgos sanitarios asociados al consumo de productos cárnicos

Los patógenos son la causa principal en la transmisión de enfermedades por los alimentos, y las bacterias enteropatógenas como *Salmonella entérica* y *E. coli* enterohemorrágica (ECEH) son de mayor preocupación en la producción de alimentos. La bacteria *Listeria monocytogenes* es también patógena y se encuentra en alimentos listos para el consumo humano, la cual se produce durante el almacenamiento. Otras especies bacterianas que se han identificado en la carne y causan daños al ser humano son *Campylobacter jejuni*, *Clostridium perfringens* y *Yersinia enterocolítica* (Lianou et al., 2020).

Las enfermedades transmitidas por los alimentos (ETAs) suceden cuando un patógeno presente en el alimento se ingiere y se adapta en el huésped, con un periodo de incubación y aparición de síntomas. Existen más de 200 ETAs, afectando más a adultos mayores y niños menores (Bintsis, 2017).

En México, los principales patógenos causantes de diarrea aguda en niños son por *E. coli*, seguidos de los rotavirus (Ríos-Muñiz et al., 2019). La bacteria *E. coli* tiene forma de bacilo y es Gram negativa, perteneciente a la familia *Enterobacteriaceae*, la cual fermenta glucosa y lactosa (Heredia et al., 2014). Es considerada inofensiva, ya que se encuentra en los intestinos del humano y forma parte de la microbiota intestinal; sin embargo, pueden presentarse serotipos patógenos que causan enfermedades gastrointestinales, produciendo una toxina llamada Shiga que puede causar la muerte (CDC, 2019).

Con base en su mecanismo de patogenicidad y cuadro clínico, las cepas de *E. coli* causantes de diarrea se clasifican en seis grupos: enterotoxigénica (ETEC), enterohemorrágica, también conocida como productora de toxina Vero o toxina semejante a Shiga (EHEC o ECVT o STEC), enteroinvasiva (EIEC), enteropatógena (EPEC), enteroagregativa (EAEC) y de adherencia difusa (DAEC) (Molina López & Eslava Campos, 2026). De acuerdo a los antígenos presentes en la bacteria, existen los serotipos O (lipopolisacáridos), H (flagelares) y K (capsulares), siendo *E. coli* O157:H7 uno de los serotipos más reconocidos dentro de este grupo, junto con O26, O103, O111 y O145, entre otros (Institute for International Cooperation in Animal Biologics, 2009).

1.2.7 Microorganismos patógenos asociados a producto cárnico

Los productos cárnicos son la fuente de infección de *E. coli* O157 (Jure et al., 2015) y los embutidos listos para el consumo, como son la salchicha y el jamón, suelen ser vulnerables a la contaminación con microorganismos y asociados a las ETAs, debido a la manipulación por su venta a granel, aumentando el riesgo de contaminación por *E. coli*, *Salmonella* y *L. monocytogenes*; por lo tanto, es recomendable adquirirlos en empaques cerrados (Jiménez-Edeza et al., 2020).

La actividad de agua en embutidos es alta (0.95-0.99), lo que favorece el crecimiento de *Salmonella*, *E. coli* y *Listeria monocytogenes*; por lo tanto, se aplican técnicas para su reducción, como es salado, curado y secado aplicando nitratos y nitritos. En relación con el pH junto con la actividad de agua en estos alimentos, se requiere utilizar los métodos de refrigeración, los cuales deben estar por debajo de 4°C y proceso térmico para evitar el crecimiento de *Clostridium botulinum* (Clayton et al., 2019).

La bacteria se transmite al hombre principalmente por el consumo de alimentos contaminados, como productos de carne picada cruda o poco cocida, leche cruda, hortalizas y semillas germinadas crudas contaminadas. Se destruye cociendo los alimentos hasta que todas las partes alcancen una temperatura de 70 °C o más. *E.*

coli O157:H7 es el serotipo de *E. coli* productora de toxina Shiga más importante por su impacto en la salud pública (OMS, 2024).

1.2.8 Criterios microbiológicos para productos cárnicos

En México se establecen los parámetros permisibles para el monitoreo de los microorganismos patógenos en los productos cárnicos cocidos listos para el consumo y crudos listos para el consumo, en la NORMA Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2018 Productos y servicios. Productos cárnicos procesados y los establecimientos dedicados a su proceso. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba. (Tabla 5) (Secretaría de Salud, 2019).

Tabla 5. Criterios microbiológicos para productos cárnicos

Productos	Tipo de microorganismos	Criterio microbiológico
Productos cárnicos cocidos listos para el consumo y crudos listos para el consumo	Mesófilos aerobios	100 UFC/g
	<i>E. coli</i>	3 NMP/g
	<i>Listeria monocytogenes</i>	Ausente en 25 g
	<i>Salmonella spp.</i>	Ausente en 25 g
Productos cárnicos precocidos y crudos no listos para el consumo	<i>E. coli</i>	500 UFC/g
	<i>E. coli</i> O157:H7	Ausente en 25 g

Fuente: Basada en NORMA Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2018

1.9 Uso de productos "clean-label"

La tendencia por el uso de “etiquetas limpias” (clean-label) a nivel mundial surge en la industria de los alimentos por la inclinación de los consumidores a adquirir alimentos con ingredientes naturales, menos procesados y sin alérgenos; la definición de este concepto aún no es clara. Sin embargo, existe una descripción de producido sin aditivos químicos, con listas de ingredientes fáciles de entender y producido mediante el uso de técnicas tradicionales con un procesamiento limitado. Dentro de los aditivos químicos se encuentran los conservadores, los cuales fungen

como prevención en la contaminación de microorganismos, reduciendo costos, favoreciendo el sabor de los alimentos; sin embargo, su consumo excesivo se asocia a efectos nocivos a la salud, como alergias, cáncer y citotoxicidad (Chauhan & Rao, 2024).

La industria cárnica enfrenta un reto importante para la creación de etiquetas limpias en productos cárnicos, siendo los nitritos un antimicrobiano y un antioxidante funcional en estos alimentos y son seguros dentro de los límites permisibles de acuerdo a la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) en la Unión Europea y la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) en Estados Unidos. Por lo tanto, antes de utilizar algún compuesto natural, es importante evaluar su actividad antimicrobiana y su evaluación sensorial en el producto. Dentro de estas investigaciones se han aplicado aceites esenciales de hierbas; por lo tanto, algunos aditivos como colorantes, texturizantes, antioxidantes y antimicrobianos se han estado sustituyendo por otras alternativas naturales (Delgado-Pando et al., 2021).

Además del uso de aceites naturales para la conservación de productos cárnicos, se utilizan otros compuestos, que se han incorporado a matrices alimentarias como son nanopartículas, óxidos metálicos, extractos vegetales, enzimas, péptidos bioactivos, surfactantes y bacteriófagos (Yong et al., 2021). Por ello, la investigación futura se proyecta hacia el estudio de interacciones sinérgicas entre ingredientes, la consolidación de metodologías de estandarización y la transferencia tecnológica a escala industrial, con el fin de fortalecer la producción de alimentos cárnicos de alta calidad y con etiqueta limpia (Kim et al., 2025).

La fagoterapia es un tratamiento antimicrobiano con gran potencial para el control de infecciones bacterianas en personas, animales y contaminación en productos de consumo humano y productos agrícolas, entre otros. Los bacteriófagos (fagos) son un arma adicional atractiva en la búsqueda continua de medidas preventivas para mejorar la seguridad alimentaria y la salud pública (Sjahriani T, 2021).

1.3 Bacteriófagos

1.3.1 Aspectos generales de los bacteriófagos

La palabra bacteriófago proviene de “bacteria” y “fagein” (del griego comer o devorar), propuesta por Felix d’Herelle. Fueron observados por primera vez en 1896 y 1898 por el británico Ernest Hankin y el ruso Gamaleya, respectivamente, quienes los describieron como una sustancia no identificada con posible actividad antibacteriana. Descritos de manera independiente por el británico Frederick Twort en 1915 y por el francocanadiense Felix d’Herelle en 1917, Twort fue el primero en reportar su capacidad. Los bacteriófagos fueron oficialmente nombrados en 1917 por d’Herelle durante sus investigaciones en el Instituto Pasteur de París. D’Herelle, al igual que Twort, demostró que las bacterias eran destruidas, hecho evidenciado por la aparición de pequeños halos traslúcidos en la superficie de los medios de cultivo. En 1933, Felix d’Herelle, junto con George Eliava, cofundaron un instituto que sobrevive hasta nuestros días (Osorio, 2015). Los bacteriófagos se consideran agentes infecciosos más abundantes del planeta, con un aproximado en su existencia de 10^{31} . Son muy diversos debido a que se desarrollan en diferentes nichos ambientales. Se conocen también como fagos y son virus cuyos únicos hospederos son las bacterias (Velasco et al., 2024).

1.3.2 Morfología de los fagos

La identificación y caracterización son los pasos iniciales en cualquier investigación sobre los fagos de acuerdo con el Comité Internacional de Taxonomía de Virus - ICTV, que desarrolla un sistema taxonómico universal para los virus; el sistema incluye la descripción estructural a través de microscopía electrónica y tipo de material genético (Turner & Kropinski, 2021).

Su tamaño oscila entre 20 y 200 nanómetros y se pueden observar por medio de microscopía electrónica (Velasco et al., 2024). Se clasifican de acuerdo con su forma, tamaño y tipo de ácido nucleico, el cual puede ser dsADN, ssADN, dsARN y

ssARN, como se observa en la figura 2; con relación a su morfología, están los poliédricos (con o sin cola) y los filamentosos. Los bacteriófagos con cola han sido descubiertos en mayor proporción, con un 96%, identificados como *Caudoviricetes*, los cuales presentan cola, cápside y ADN de doble cadena. Un ejemplo de ellos es el bacteriófago T, que se puede observar su morfología en la figura 2 (Ackermann, 2003; Heriberto et al., 2025b; Llamas et al., 2023).

Las familias más representativas de esta taxonomía son *Myoviridae* (cola contráctil), *Siphoviridae* (cola larga no contráctil) y *Podoviridae* (cola extremadamente corta), *Ackermannviridae* y *Herelleviridae* (Ochoa, 2022). Otra clasificación es la que realizó en su primer informe el ICTV, en seis géneros: T4, λ , ϕ X174, MS2 y fd, y el tipo PM2. Un ejemplo de la morfología de un bacteriófago está en la figura 3, y con el tiempo, se han añadido nuevos grupos de fagos. En relación con otros virus, los bacteriófagos constituyen el grupo viral más grande de la naturaleza (Ackermann, 2003).

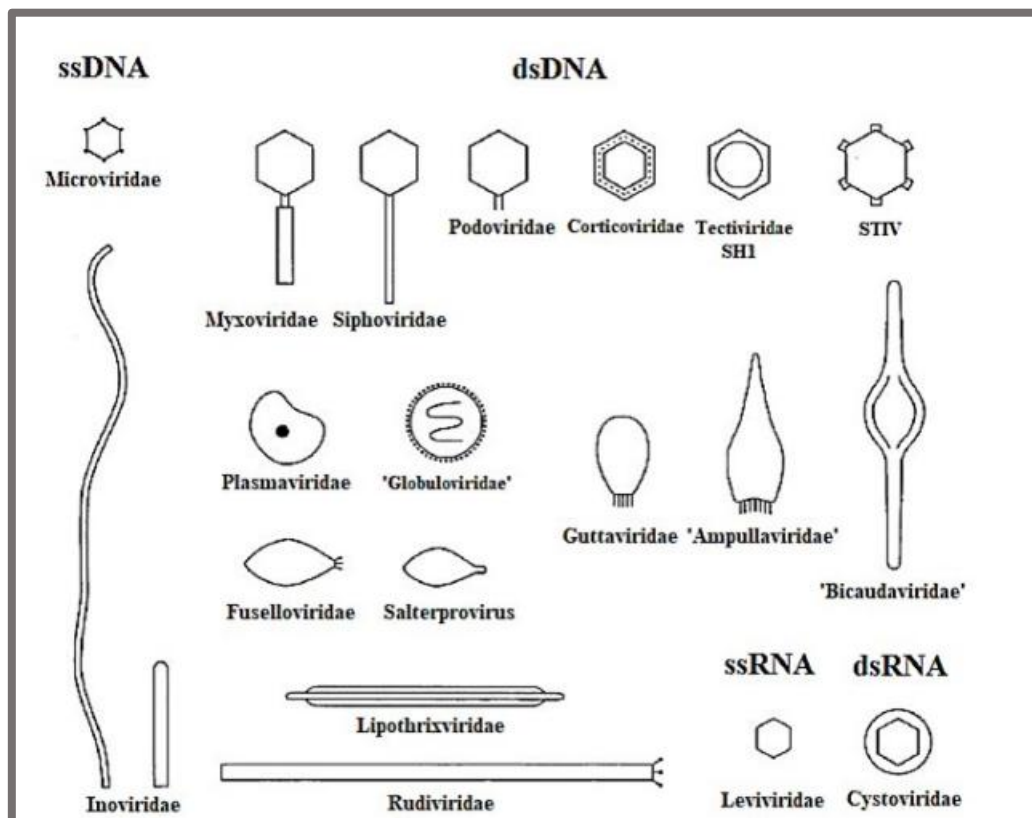


Figura 2. Representación esquemática de los principales grupos de fagos (Ackermann, 2003)

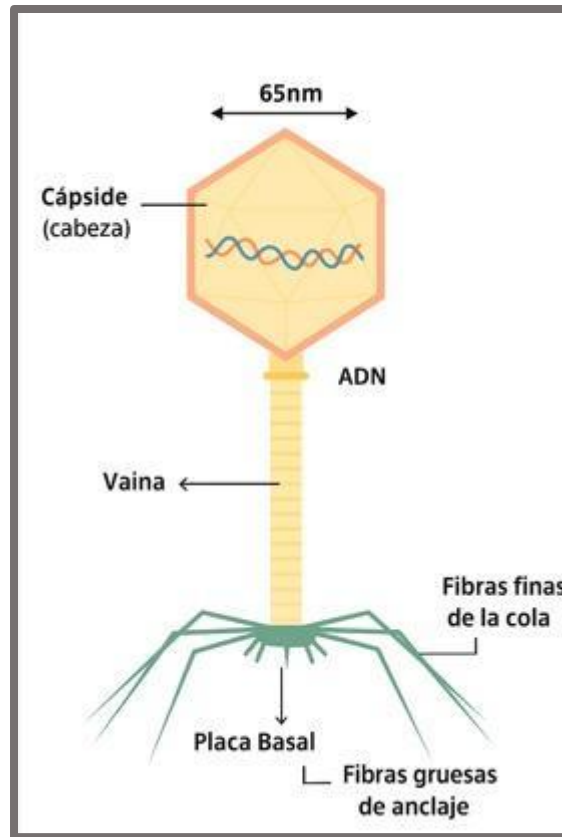


Figura 3. Aspectos estructurales del bacteriófago T (Osorio, 2015)

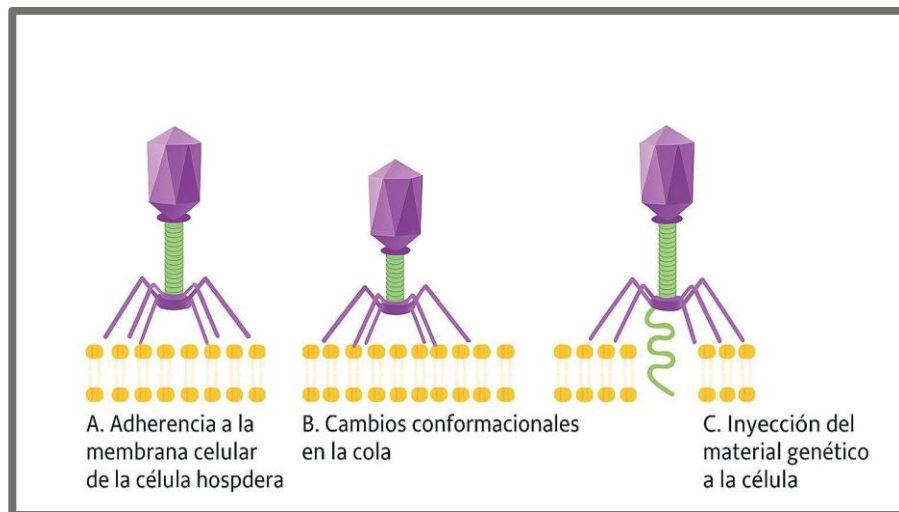


Figura 4. Fases de adherencia e inyección del material genético a la bacteria hospedera (Osorio, 2015).

1.3.3 Ciclos de replicación

El ciclo de replicación del bacteriófago puede tomar dos rutas, la de la integración del genoma bacteriano, estableciéndose el ciclo lisogénico, o la ruta de la inducción, estableciéndose el ciclo lítico. Los fagos con ciclo lítico eliminan las bacterias por medio de lisis y comprenden los siguientes pasos: adsorción o acoplamiento, inyección del material genético viral (figura 4), replicación del material genético viral, síntesis de las envolturas proteicas, empaquetamiento del ADN dentro de la envoltura proteica y ensamblaje de la envoltura, lisis y liberación de las partículas virales (Gildea et al., 2022). Al final del proceso de multiplicación del bacteriófago, se sintetizan las endolisinas, las cuales tienen la función de lisar la pared celular de las bacterias huésped, liberando los viriones del bacteriófago recién adherido (Chang, 2020). Los fagos como el T4 solo utilizan la vía de replicación lítica y, por otro lado, los fagos templados como el fago λ pueden entrar en el ciclo lítico o en el lisogénico, formando una relación estable con el huésped. En este ciclo, el genoma es llamado profago y sucede la replicación con el ADN del huésped; en algunas situaciones de estrés, los profagos pueden salir del ciclo y producir más viriones fuera de la bacteria (figura 5) (Salmond & Fineran, 2015).

1.3.4 Uso de bacteriófagos en la industria alimentaria

Los fagos se encuentran abundantes en el medio ambiente; incluso su introducción y distribución en los alimentos se considera un proceso natural, ya que se han identificado más de 108 fagos viables/g en carne o productos cárnicos frescos y procesados (Bodie et al., 2023). Hasta la fecha no se ha encontrado evidencia de que el uso de fagos represente riesgos a la salud humana, animal o vegetal (Hudson et al., 2015). Por ello, la investigación para integrar su uso en la industria va en aumento (Hong et al., 2016; Huang et al., 2018) debido al interés para solventar problemas de contaminación en la industria alimentaria y brotes de ETAs (Leon-Velarde et al., 2019). Este escenario obliga a la industria a la inserción de nuevas estrategias en la sofisticación y vanguardia alimentaria para fortalecer aspectos de seguridad alimentaria y satisfacer la demanda (Wessels et al., 2021).

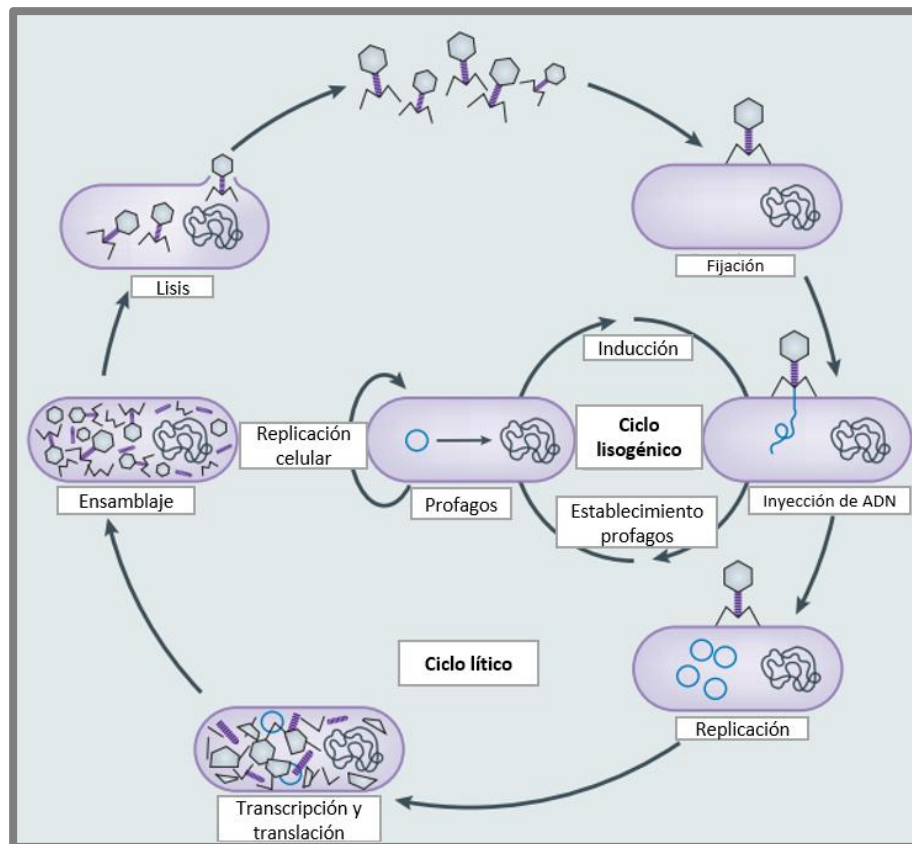


Figura 5. Ciclo de vida del bacteriófago (Salmond & Fineran, 2015)

Para su uso intencional en matrices alimentarias, la mayoría de los fagos son aislados del medio ambiente y no están modificados genéticamente; además, una ventaja importante de su uso es que no tienen ningún efecto sobre las propiedades organolépticas de los alimentos y tienen una alta eficacia en la reducción microbiana (Wessels et al., 2021; Ziyu et al., 2022). No obstante, su éxito como agentes de biocontrol en los alimentos es dependiente de diferentes características como los componentes de las matrices alimentarias, la temperatura de procesos y conservación, así como de la dosis de fagos aplicada (Hong et al., 2016; Son et al., 2018; Zhou et al., 2022).

Los países que han liderado la investigación enfocada en el control bacteriano de carnes rojas y productos cárnicos son los Estados Unidos y China. Actualmente,

existen productos comerciales a base de fagos tanto en los Estados Unidos como en Brasil y los Países Bajos (Hong et al., 2016). Incluso, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) aprobó en 2006 el uso de fagos contra *Listeria* spp. como producto de biocontrol en carnes y productos avícolas listos para el consumo. Posteriormente, en 2015, se amplió la aprobación para su aplicación en frutas, verduras y productos lácteos, como se puede observar en la Tabla 6. (Endersen et al., 2014; Huang et al., 2018; Leon-Velarde et al., 2019).

Tabla 6. Marcas comerciales de bacteriófagos aprobadas por la FDA

Fago comercial	Tipo de comida	Bacterias objetivo	Año de aprobación FDA	Cita
ListShield™	Frutas, verduras, salmón, mariscos y carne	<i>L. monocytogenes</i>	2006	(Lasagabaster et al., 2020) (Vikram et al., 2020) (Figueiredo & Almeida, 2017)
Listex™ P100	Productos cárnicos y avícolas, verduras, frutas y jugos	<i>L. monocytogenes</i>	2007	(Lone et al., 2016) (Figueiredo & Almeida, 2017)
EcoShield™	Carne	<i>E. coli</i> O157:H7	2011	(Wang et al., 2017)
SalmoFresH™	Aves, pescados, mariscos, así como en vegetales frescos y procesados	<i>Salmonella</i> spp.	2013	(Huang et al., 2018) (Zhang et al., 2019)
Salmonex™	Productos cárnicos y avícolas	<i>Salmonella</i> spp.	2013	(Huang et al., 2018)
ShigaShield™	Pollo, carne, lechuga, salmón y melón	<i>Shigella</i> spp.	2016	(Vikram et al., 2020)

El uso de bacteriófagos se está implementando en otros procesos de conservación, lo que resulta una aplicación prometedora en el sistema de producción de alimentos. ListShield™ es un cóctel de bacteriófagos dirigido a *L. monocytogenes* y es el primer aditivo alimentario de fagos purificados utilizado comercialmente para controlar este

patógeno en productos cárnicos y avícolas listos para el consumo. SalmoFresh™ específico para *Salmonella*, se puede utilizar directamente en aves, pescados y mariscos, y en frutas y verduras frescas y procesadas (Bumunang et al., 2023). Los bacteriófagos son eficaces para controlar el crecimiento de bacterias contaminantes de la superficie solo cuando se aplican directamente sobre la superficie del producto alimenticio contaminado, y son ineficaces como agente de biocontrol cuando se utilizan como aditivo (Ahmadi et al., 2020).

En estudios sobre el uso de bacteriófagos comerciales, se ha empleado PhageGuard S™. Li et al. (2023) compararon la efectividad de los bacteriófagos y el ácido láctico para reducir el crecimiento de *E. coli* O157:H7 en la superficie de la carne, utilizando concentraciones del 5 % y 2.5 % respectivamente. Sin embargo, no lograron reducir la presencia de la bacteria en la parte interna de la carne, Shebs-Maurine et al. (2021) también utilizaron estos bacteriófagos en recortes de carne fina y gruesa, aplicando concentraciones de 10^8 UFP/g y 10^9 UFP/g, logrando una reducción de 1 log UFC/g en *Salmonella*. Cuando aplicaron los bacteriófagos directamente sobre la carne, consiguieron una reducción de 1.6 log UFC/g, determinando que, a medida que aumenta el área de superficie, se requieren concentraciones más altas de fagos.

Yeh et al. (2017) estudiaron el uso de bacteriófagos Salmonex™ en la reducción de *Salmonella* en carne molida, durante el proceso de volteo en tambores giratorios, donde se aplicaron soluciones antimicrobianas, encontrando que una concentración de 10^8 UFP/mL de fagos reduce la presencia de *Salmonella* a 1 log UFC/g, mientras que una concentración de 10^7 UFP/mL logró una reducción de 0.7 log UFC/g (Yeh et al., 2017).

Shebs et al. (2020) aplicaron el producto comercial de bacteriófagos PhageGuard E™, siendo uno de los primeros estudios en comparar la eficacia de bacteriófagos versus ácidos orgánicos en la reducción de *E. coli* O157:H7 en carne vacuna envasada al vacío y sin envasar, donde observaron una eficacia letal de los fagos de al menos el 96.7 % contra *E. coli* O157:H7 (Shebs-Maurine et al., 2020).

Por otra parte, un estudio de Figueiredo et al. (2017) evaluó los efectos inhibidores de LISTEX™ P100, nisina y lactato de sodio en lonchas de jamón listo para comer inoculado con dos cepas de *L. monocytogenes*, donde encontraron que el tratamiento más eficaz fue el bacteriófago, logrando reducir los niveles de la bacteria a cero en 72 horas, mientras que el lactato de sodio fue el menos eficaz (Figueiredo & Almeida, 2017). Komora et al., (2021) también utilizaron este fago comercial junto con bacterias bacteriocinógenas del ácido láctico y la alta presión hidrostática como método de biocontrol. Esta combinación eliminó la presencia de *L. monocytogenes* en salchichas fermentadas, logrando más de cinco reducciones logarítmicas, destacando el uso de bacteriófagos como una técnica económica en comparación con las otras.

Ishaq et al. (2020) emplearon los fagos de ListShield™ para reducir *L. monocytogenes* en carne de res fresca, y en otro estudio, combinaron estos fagos con aceite de clavo y rayos ultravioleta (UV) como tratamientos de control bacteriano, observando que todos los tratamientos mostraron actividad antimicrobiana, aunque aumentaron la dureza de la carne durante el almacenamiento.

Otro estudio comparó la eficacia de los bacteriófagos comerciales LISTEX™ P100 y ListShield™, donde LISTEX™ P100 logró reducir los recuentos viables de *L. monocytogenes* por debajo del límite de detección, mientras que ListShield™ fue menos eficaz en muestras altamente contaminadas a bajas temperaturas, debido a que no redujo el crecimiento bacteriano. Este fue el primer estudio en comparar fagos comerciales de diferentes marcas en productos cárnicos y superficies de manejo de alimentos (Gutiérrez et al., 2017).

Los fagos se han utilizado en diferentes etapas de la cadena alimentaria; se aplican como tratamiento para enfermedades de los animales, también en la desinfección de equipos rociándolos en las superficies; otro método de uso es en la propia carne para inhibir el crecimiento bacteriano y, finalmente, en la aplicación de películas activas de los productos terminados para evitar el deterioro por contaminación. Por lo tanto, los bacteriófagos con actividad lítica pueden utilizarse como agentes de

biocontrol seguros para prevenir el crecimiento bacteriano (Efenberger-Szmechtyk, 2025).

1.3.4 Marco legal y regulatorio de los bacteriófagos en los alimentos.

En Estados Unidos, el uso de bacteriófagos tiene la aprobación de la FDA, como ya se mencionó, y además se cuenta con estatus de Generalmente Reconocido como Seguro (GRAS) para su uso como agente de biocontrol contra patógenos dañinos. Algunas empresas que cuentan con esta aprobación son Intralytix, Microcos Food Safety, FINK TEC GmbH, Passport Food Safety Solutions y Phagelux (Endersen & Coffey, 2020).

En el mercado europeo se requiere realizar un proceso más riguroso para el uso de bacteriófagos, el cual lo determina la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y los denomina antimicrobianos terapéuticos, a los cuales se les realiza un análisis genómico para identificar la presencia de microorganismos resistentes a los antimicrobianos (AMR) determinado por valores de concentración mínima inhibitoria (Comité Científico de la EFSA, 2025).

En México aún no existe una regulación para el uso de bacteriófagos; sin embargo, ya se cuenta con una Alianza para la Inocuidad Alimentaria (FSP) creada por tres instituciones: la FDA, el Servicio Nacional de Salud, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria de México (SENASICA) y la Comisión Federal para la Protección contra el Riesgo Sanitario (COFEPRIS), la cual se concretó en el 2020, con la finalidad de proteger la salud pública de la población y la prevención de las ETAs, utilizando enfoques modernos y prácticas basadas en ciencia y tecnología, vigilancia sanitaria y medidas de verificación, destacando la importancia de colaborar con el mundo académico y asociaciones comerciales para el control de alimentos y enfermedades que afectan a la población (FDA, 2023).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un producto cárnico bajo en sodio tipo salchicha adicionado con bacteriófagos líticos específicos como estrategia de biocontrol para *E. coli*, eliminando conservadores químicos, para ofrecer una alternativa de consumo segura y saludable, que contribuya a la prevención de enfermedades transmisibles y no transmisibles.

2.2 Objetivos específicos

1. Aislar y purificar un bacteriófago lítico específico para *E. coli* mediante una metodología estandarizada y reproducible para obtener un agente de biocontrol natural.
2. Evaluar *in vitro* la eficacia lítica del bacteriófago mediante la técnica de "spot test", con el propósito de comprobar su capacidad de inhibición frente a *E. coli*.
3. Caracterizar morfológicamente el bacteriófago mediante microscopía electrónica, para su identificación taxonómica y pueda ser clasificarlo conforme a los criterios del Comité Internacional de Taxonomía de Virus.
4. Elaborar un producto cárnico tipo salchicha bajo en sodio mediante la sustitución de NaCl por KCl sin recurrir a conservadores químicos, para obtener un producto cárnico tipo salchicha bajo en sodio.
5. Evaluar al producto cárnico tipo salchicha bajo en sodio de acuerdo a sus características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales, mediante pruebas del producto con el consumidos, para garantizar la calidad y aceptabilidad del producto.

3. Material y métodos

3.1 Aislamiento de *E. coli*

Se obtuvieron dos cepas de *E. coli* A115 y O157H7 previamente identificadas a partir de canales de bovinos y de agua; para el aislamiento se utilizó la técnica de acuerdo con el Bacteriological Analytical Manual de la FDA (Feng, Weagant & Jinneman, 2020). Las muestras se enriquecieron en caldo Infusión de Cerebro y Corazón (BHI), en la incubadora marca Felisa a 37 °C por 3 horas y posteriormente se realizó la siembra en placas de agar MacConkey, se incubaron a 37 °C por 24 horas y se seleccionaron las colonias típicas para la confirmación bioquímica, las cuales debían presentar un centro oscuro y de color rojo ladrillo.

Posteriormente se seleccionaron las colonias, y se realizó la caracterización por tinción de Gram utilizando la técnica descrita por Portillo López (2021), para consolidar el uso de bacterias correctas en el experimento. La cual consistió en teñir, fijar, decolorar y contrateñir las muestras bacterianas fijadas y extendidas en un portaobjetos. Se utilizó cristal violeta para teñir todas las células de azul, seguido del lugol como mordiente. Posteriormente, un decolorante alcohol-acetona y, finalmente, se aplica safranina para contrateñir las bacterias Gram negativas de rosa. La metodología comprendió los pasos: 1. Preparación frotis, donde se tomó una muestra bacteriana, se extendió en un portaobjetos y se dejó secar. Luego, se fijó la muestra pasando el portaobjetos por una llama 3 o 4 veces. 2. Adición Lugol, aquí se cubrió el frotis con una solución de Lugol y se esperó un minuto. Se enjuagó con agua para eliminar el exceso. El Lugol formó un complejo insoluble con el cristal violeta dentro de la célula. 3. Decoloración con alcohol-acetona, en este paso se añadió una mezcla de alcohol-acetona durante 10-15 segundos. La solución de alcohol-acetona eliminó el colorante de las bacterias Gram negativas, pero el complejo de cristal violeta-lugol permaneció en las bacterias Gram positivas. Se enjuagó rápidamente con agua para detener el proceso. 4. Contra tinción con safranina, se aplicó safranina (un tinte rojo) durante un minuto. Se enjuagó con agua

y se retiró el exceso de líquido. Las bacterias Gram negativas se tiñeron de rosa y las Gram positivas permanecieron violetas.

Posteriormente, se observaron los portaobjetos al microscopio, para identificar la morfología bacteriana y distinguir entre bacterias, las cuales correspondieron a Gram negativas (rosas).

3.2 Cinética de crecimiento de *E. coli*

Se evaluó la cinética de crecimiento bacteriano de *E. coli* mediante la metodología del Manual de Microbiología de la Universidad Autónoma de Baja California (Portillo López, 2021) utilizando un análisis de turbidimetría, se calibró el espectrofotómetro marca Genova con modelo 2251, a una densidad óptica de 600 nm (OD600), para conocer la fase exponencial de la bacteria y sea aplicada para enriquecer el filtrado de bacteriófagos. La metodología comprendió los siguientes pasos, la cual se realizó por triplicado:

3.2.1 Preparación del inóculo

Se tomó una colonia aislada de *E. coli* de una placa de agar y se inoculó en un tubo con 5 mL de caldo TSA (Agar Soya Trypticase) y se incubó en la incubadora marca Felisa durante 24 horas a 37°C.

3.2.2 Configuración del experimento y dilución

Se realizó la preparación del medio fresco tomando 3 matraces Erlenmeyer de 250 mL y se añadieron 50 mL de caldo TSA estéril a cada uno. Se etiquetaron como A1, A2, A3. Posteriormente, se realizó la preparación del inóculo bacteriano ajustando la turbidez de la suspensión a un estándar McFarland 0.5, equivalente a aproximadamente 1.5×10^8 UFC/mL, siguiendo las recomendaciones del Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI, 2018), la cual se puede observar que se logró en la figura 6. Este ajuste permitió garantizar que la densidad inicial del cultivo fuera uniforme y reproducible, condición indispensable para la evaluación de la

cinética de crecimiento. Una vez calibrado el inóculo, se procedió a la inoculación en caldo TSA, incubando a 37 °C bajo condiciones controladas.



Figura 6. Técnica de McFarland 0.5

3.2.3 Medición de la cinética de crecimiento

Se configuró el espectrofotómetro de la marca Genova con modelo 2251, en un tiempo aproximado de 15 a 30 min. El blanco que se utilizó fue caldo TSA estéril. Posteriormente, de la muestra inicial ($T=0$): se retiró con asepsia 1 mL de cada matraz (A1, A2, A3) con una pipeta estéril y se colocó en una cubeta; se inició con la medición de cada una de las muestras, anotando los valores del tiempo cero. Se incubaron nuevamente y se realizaron las mediciones de forma sucesiva cada 60 minutos, manteniendo la temperatura a 37°C, y se registraron inmediatamente los valores de absorbancia en una tabla, para identificar fases de latencia, exponencial y estacionaria.

3.3 Aislamiento, enriquecimiento y titulación de los bacteriófagos

El aislamiento de bacteriófagos se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Clokie & Kropinski (2009), con algunas modificaciones; la cual constituye un referente internacional en el estudio de la biología de los fagos. Este procedimiento

se fundamenta en la interacción específica entre bacteriófagos y sus bacterias hospedadoras, permitiendo la recuperación de partículas virales a partir de muestras ambientales. La técnica incluye la preparación de cultivos bacterianos en fase exponencial, la exposición de dichos cultivos a muestras potencialmente portadoras de fagos, y la posterior detección de actividad lítica mediante la formación de placas de lisis en medios sólidos. La metodología comprendió los siguientes pasos:

3.3.1. Recolección de muestra

Se recolectaron 10 litros de muestra de agua residual que se encontraba en el cruce de una unidad de producción de bovinos y de casa habitación del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. La muestra se almacenó en tubos Falcon de 10 mL para su procesamiento.

3.3.2. Filtración de bacteriófagos

Se colocaron los tubos de 15 mL, en una centrifuga de la marca JOANLAB a 4000 RPM $\times$ 30 min. Se recogió el sobrenadante y se filtró con un filtro Millipore de 0.22 μ m; posteriormente, el filtrado se mezcló en un tubo estéril con 7 mL de filtrado, 1 mL de cultivo de *E. coli* en fase exponencial, 1 mL de CaCl_2 10 mM y 1 mL de MgSO_4 0.5 mM. Se incubó el filtrado enriquecido 24 h a 37°C.

Posteriormente, se centrifugó nuevamente el filtrado a 4000 RPM $\times$ 30 min y se filtró el sobrenadante con un filtro Millipore de 0.22 μ m, dando como resultado el lisado de fagos enriquecido.

3.3.3 Prueba de esterilidad

Previo a la titulación de los bacteriófagos, se realizó una prueba de esterilidad del filtrado mediante incubación en caldo nutritivo y en agar TSA sin la presencia de la cepa hospedera. Este procedimiento permitió confirmar la ausencia de bacterias

viables en el filtrado, asegurando que los resultados de la titulación correspondieran exclusivamente a fagos y no a contaminación bacteriana (Clokier & Kropinski, 2009)

3.3.4 Detección de lisis in vitro (Spot Test) en agar doble capa

El ensayo de “spot test” en placa se empleó para evaluar la actividad lítica de los bacteriófagos frente a la cepa hospedera. Esta técnica, descrita por Mirzaei & Nilsson (2015), con algunas modificaciones la cual consistió en la aplicación localizada de una suspensión de fagos sobre una superficie de agar previamente inoculada con la bacteria de interés. La formación de zonas claras de lisis en el área de aplicación constituye evidencia de la actividad de los bacteriófagos, permitiendo una evaluación cualitativa rápida de la especificidad y potencia del bacteriófago.

Para la técnica de doble capa, se vertió agar TSA en placas Petri, sobre la cual se añadió una segunda capa de agar blando previamente mezclado con la suspensión de la bacteria *E. coli* en fase exponencial y se dejó secar por 15 min, para lograr una capa homogénea. Posteriormente se depositaron 5 µL de filtrado de bacteriófagos en gotas sobre la superficie de la placa. Se incubaron en la incubadora marca Felisa las placas por 24 h a 37°C (Clokier & Kropinski, 2009)

3.3.5 Purificación del filtrado

Se contaron placas de lisis y se calculó las UFC/mL mediante la técnica de incorporación, que consistió en realizar diluciones seriadas de la muestra y sembrar cada dilución en una placa de Petri, con agar TSA mantenido a 45-50 °C durante 24 h. Después de la incubación, observamos la placa formada y expresada como UFP/mL y se utilizó lisado enriquecido para su almacenamiento y purificación de acuerdo con la técnica que utilizó Sjahriani et al., (2021).

3.3.6 Suspensión de bacteriófagos en PEG 8000

La suspensión de bacteriófagos se concentró utilizando polietilenglicol de peso molecular 8,000 (PEG 8000), un polímero hidrosoluble ampliamente empleado en

microbiología para la precipitación de partículas virales. En presencia de cloruro de sodio, el PEG 8000 favorece la agregación de los fagos, permitiendo su separación del sobrenadante mediante centrifugación. Este procedimiento asegura la obtención de suspensiones más purificadas y con mayor concentración de unidades formadoras de placa, lo que facilita su posterior titulación y caracterización (Clokier & Kropinski, 2009; Carlson, 2005).

Se calculó la formulación de PEG 8000 al 40%, utilizando la siguiente fórmula:

$$(\text{Concentración deseada} / 100) \times \text{Volumen final deseado} = \text{Masa de soluto (g)}$$

$$\text{Cálculo: } (40 / 100) \times 4.5 \text{ mL} = 1.8 \text{ gramos de PEG 8000}$$

Se necesitó un volumen de agua ligeramente inferior a 4.5 mL para disolver el PEG; posteriormente, se pesó 1.8 g de PEG 8000, colocándolo en un vaso de precipitados y en la balanza. Se agregaron aproximadamente 3 mL de agua destilada, luego se calentó y agitó con una barra magnética suavemente en una placa calefactora marca Thermo Scientific CIMAREC, con agitación a baja temperatura (no más de 50-60°C). De acuerdo con esta temperatura, se pudo disolver el PEG. Posteriormente el PEG se encontró completamente disuelto y la solución era transparente. Al final se ajustó el volumen final de 4.5 mL y se mezcló por inversión.

3.3.6.1 Precipitación con PEG 8000

Se añadió la solución de PEG al tubo Falcon de 15 mL que contiene el lisado filtrado, donde se añadieron 8 mL de lisado, dando una concentración final ~8-10% y de NaCl de ~0.2-0.25 M. Se invirtió suavemente varias veces para mezclar completamente y se incubó en frío a 4°C 24 h.

3.3.6.2. Recuperación del precipitado (centrifugación)

Se centrifugó la mezcla en la centrifuga marca JOANLAB, en los tubos a 10,000 RPM durante 60 min a 4°C. Después de la centrifugación, se observó un pellet blanquecino o transparente en el fondo del tubo y el sobrenadante estaba claro. Posteriormente se eliminó el sobrenadante; con una micropipeta se aspiró todo el

líquido residual, teniendo mucho cuidado de no tocar o desprender el pellet. Se dejó secar el tubo boca abajo sobre una toalla de papel durante 1-2 min. Se añadió una 5 μ L de SM Buffer, dejando el tubo en el baño de hielo durante 15-30 min para que el pellet se hidrate. Luego se pipeteó suavemente el tampón sobre las paredes del tubo y se agitó; posteriormente, se centrifugó brevemente (30 segundos a 10,000 RPM) y se transfirió el sobrenadante limpio a un nuevo tubo de microcentrífuga.

3.4 Almacenamiento de bacteriófagos a corto plazo: 4°C

Se elaboró el medio de almacenamiento con SM Buffer (1 litro): 5.8 g de NaCl, 2.0 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 50 mL de Tris-HCl 1 M (pH 7.5). Se utilizó agua destilada para adaptar el volumen a 1 L y se filtró con un filtro de 0.22 μm .

Para hacer la transferencia de la muestra purificada, se empleó una campana de flujo laminar para pipetear el lisado purificado de fagos (que ya había sido centrifugado y filtrado) a un tubo plástico estéril para micro centrifugadora. Se identificó el tubo con claridad, incluyendo la fecha y el medio de almacenamiento (SM Buffer), y se guardó en la nevera a 4°C, colocándolo de manera vertical.

3.5 Caracterización morfológica de los fagos mediante MET

Las características morfológicas de los fagos se investigaron mediante un microscopio electrónico de transmisión (MET) (JEM-1400plus) en el Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo (CITNOVA), a un voltaje de operación de 80 kV. Se depositó una gota de fago puro de alto título sobre rejillas de cobre recubiertas de carbono (400 mesh). Las rejillas se secaron al aire durante cinco minutos tras ser teñidas negativamente con acetato de uranilo al 2 % (Abozahra et al., 2025). Los bacteriófagos fueron identificados de acuerdo con las directrices del noveno informe del Comité Internacional de Taxonomía de Virus; confirmaron la taxonomía y morfología de los bacteriófagos (Lianou et al., 2020).

3.6 Elaboración de la salchicha y tratamientos de sodio

3.6.1 Elaboración del embutido

La carne de res se congeló 24 h; posteriormente, se limpió el exceso de grasa, se cortó en tiras y se picó con un material estéril. Al siguiente día, se pesó y se mezcló con la grasa y el hielo en una trituradora, en un molino de carne mezcladora (mini cutter) marca Rhino Moca-12, hasta obtener una masa homogénea, manteniendo una temperatura no mayor a 4 °C. Se agregaron los condimentos y especias, los cuales se muestran en la tabla 7; aquí se incluyeron los tres tratamientos de sal con 100% de NaCl, 50% de NaCl y 50% de KCl y 100% de KCl. Se embutió el producto y se obtuvieron 9 lotes de las 3 muestras por triplicado (Cruz-Romero et al., 2021).

3.6.2 Empaquetamiento del embutido

Las muestras de embutidos fueron sometidas a un tratamiento térmico en una estufa con tina de cocción que las coagula y les proporciona una estructura elástica y firme, sin exceder los 70°C. Después, se llevó a cabo un choque térmico al ser puestas en una tina con hielo y, finalmente, se empaquetaron. Se empleó la máquina para almacenar a alto vacío marca SHORBULL y prevenir así que el producto se contaminara (FAO, 2014). Las muestras fueron etiquetadas con un número particular, que corresponde al tratamiento de sodio que recibieron 948 (100% de NaCl), 638 (50% de NaCl y 50% de KCl) y 527 (100% de KCl).

3.7 Evaluación sensorial de la salchicha

La evaluación sensorial de los embutidos se realizó con un panel de 105 consumidores no entrenados, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 8586:2012 y de Meilgaard et al. (2007), donde tuvimos un total de 64 mujeres y 41 hombres, con edades entre los 17 y 48 años. Se aplicó basándose en las características de olor, color, sabor y textura, utilizando una escala hedónica de 4 puntos, con los siguientes descriptores: Me desagrada mucho = 1, Me desagrada

un poco = 2, Me gusta mucho = 3 y Me gusta muchísimo = 4. Las muestras fueron calentadas en agua a una temperatura de 70°C, cortadas en trozos de 1.5 cm, identificadas con números aleatorios de tres cifras. La evaluación fue realizada en un área ventilada, de buena iluminación, libre de olores extraños; se brindó agua purificada y galletas integrales para mayor degustación (Granados & Guzmán, 2013).

Tabla 7. Formulaciones para la elaboración de la salchicha

Ingredientes	T0 100% de NaCl	T1 50% de NaCl y 50% de KCl	T2 100% de KCl
	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)
Pulpa de res	0.750	0.750	0.750
Hielo	0.375	0.375	0.375
Grasa	0.375	0.375	0.375
Total	1.500	1.500	1.500
Aislado de soya	0.038	0.038	0.038
Fécula de papa	0.035	0.035	0.035
Potasio	-	0.015	0.030
Sal	0.030	0.015	-
Fosfato	0.008	0.008	0.008
Condimento salchicha	0.003	0.003	0.003
Pimienta blanca	0.002	0.002	0.002
Ajo en polvo	0.002	0.002	0.002
Caramelo	0.0008	0.0008	0.0008
Humo líquido	0.0008	0.0008	0.0008
Cebolla	0.0005	0.0005	0.0005
Rojo carmín	0.0004	0.0004	0.0004
Suma	0.119	0.119	0.119

Nota: T0 = Tratamiento 0, T1 = Tratamiento 1 y T2 = Tratamiento 2

3.8 Análisis bromatológico de la salchicha

El análisis bromatológico de las salchichas se realizó conforme a los lineamientos establecidos en la NMX-F-065-1984 y la NOM-213-SSA1-2018. Las determinaciones incluyeron humedad, proteína, grasa, cenizas y carbohidratos por diferencia. Este análisis permitió caracterizar la composición nutricional del producto y verificar su cumplimiento con los límites normativos, asegurando la calidad del alimento.

3.9 Análisis microbiológico de la salchicha.

El análisis microbiológico de las salchichas se realizó conforme a la NOM-213-SSA1-2018 y a los lineamientos del Bacteriological Analytical Manual (FDA, 2020). Se incluyeron pruebas para la detección de coliformes y *E. coli* mediante la técnica de número más probable (NMP) y siembra en medios selectivos, así como la búsqueda de patógenos de importancia sanitaria como *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus* y hongos y levaduras. Las muestras se incubaron en condiciones específicas de temperatura y tiempo, siguiendo protocolos estandarizados, y los resultados se expresaron en unidades formadoras de colonia (UFC/g). Estos análisis permiten verificar el cumplimiento de los criterios microbiológicos establecidos para embutidos, asegurando la inocuidad del producto final.

4. Resultados y discusión

4.1 Cinética de crecimiento bacteriano de *E. coli*

Previo a la cinética de crecimiento se realizó la activación de la bacteria *E. coli* de acuerdo con la técnica del Bacteriological Analytical Manual de la FDA (Feng, Weagant & Jinneman, 2020). Las colonias que se utilizaron presentaron centro oscuro y de color rojo ladrillo, como se muestra en la figura 7.



Figura 7. *E. coli* en Agar MacConkey

De acuerdo con el estudio de velocidad de crecimiento de la bacteria *E. coli*, en el cual no se reportaron los resultados esperados de acuerdo a Tuttle et al. (2021); debido a que no se tomó la medición de la hora cero y no hubo un control para la medición del crecimiento, como se observa en la figura 10. Se realizó un segundo análisis de crecimiento por triplicado (figura 11), observándose que de la hora 0 a la 2 tuvo una adaptación al medio; posteriormente, se observó que entre la hora 2 a la hora 5, se presentó la fase exponencial de crecimiento y después observamos la fase de transición para pasar a la fase estacionaria, como se puede observar en la figura 9. Lo anterior se realizó con la finalidad de conocer el momento en que la

bacteria, puede estar en mejores condiciones de reproducción, para ser sembrada y posteriormente ser inoculada por el bacteriófago. De la misma forma, Riverón-Rodríguez et al. (2012) encontraron resultados y los clasificaron por fases: la fase I de adaptación se metaboliza y no se multiplica, y en la fase II o exponencial muestra crecimiento logarítmico a la hora 4, y la fase III es la estacionaria, donde la concentración celular se mantiene constante.

Además, se realizó un cálculo de la desviación estándar (σ) de las lecturas de absorbancia (ABS1, ABS2, ABS3) en cada intervalo de tiempo. Esto permitió mostrar la variabilidad experimental, demostrando que la desviación estándar es baja (<0.03) en la mayoría de los puntos, lo que indica buena reproducibilidad entre réplicas. Los valores más altos ($\sigma \approx 0.06$ – 0.07) aparecen en la fase exponencial (11:40–12:40), donde la variabilidad es mayor por el rápido crecimiento bacteriano y en la fase estacionaria (13:40 en adelante).

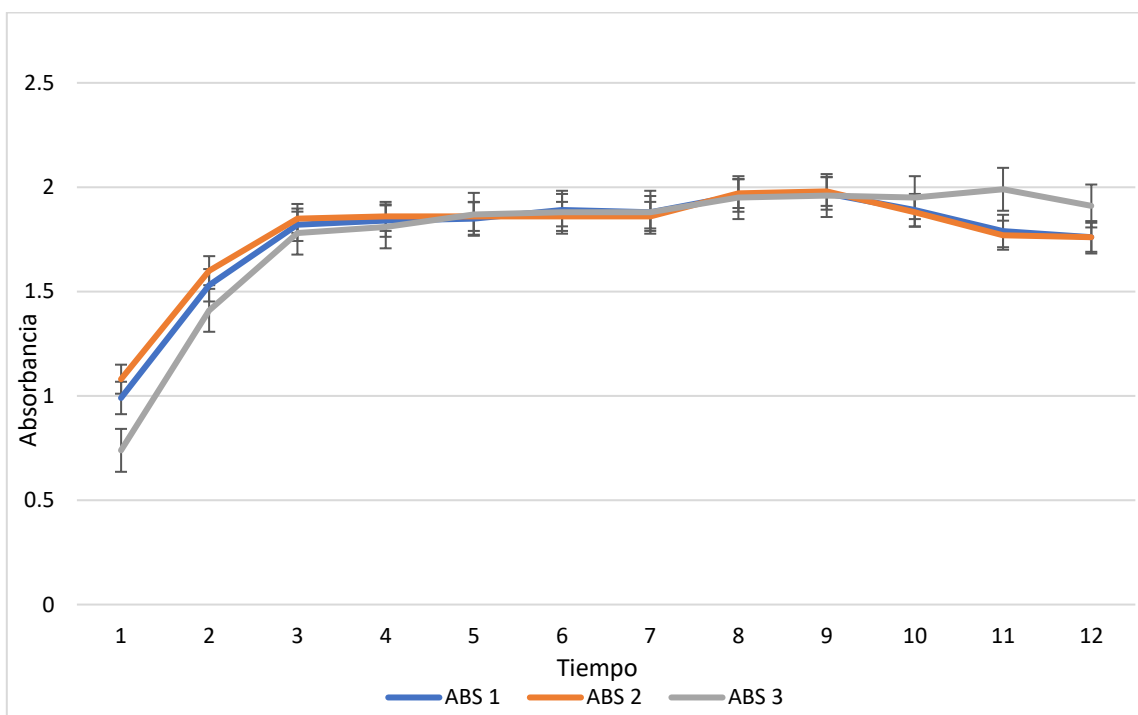


Figura 8. Cinética 1 de crecimiento bacteriano de *E. coli*. ABS=Absorbancia

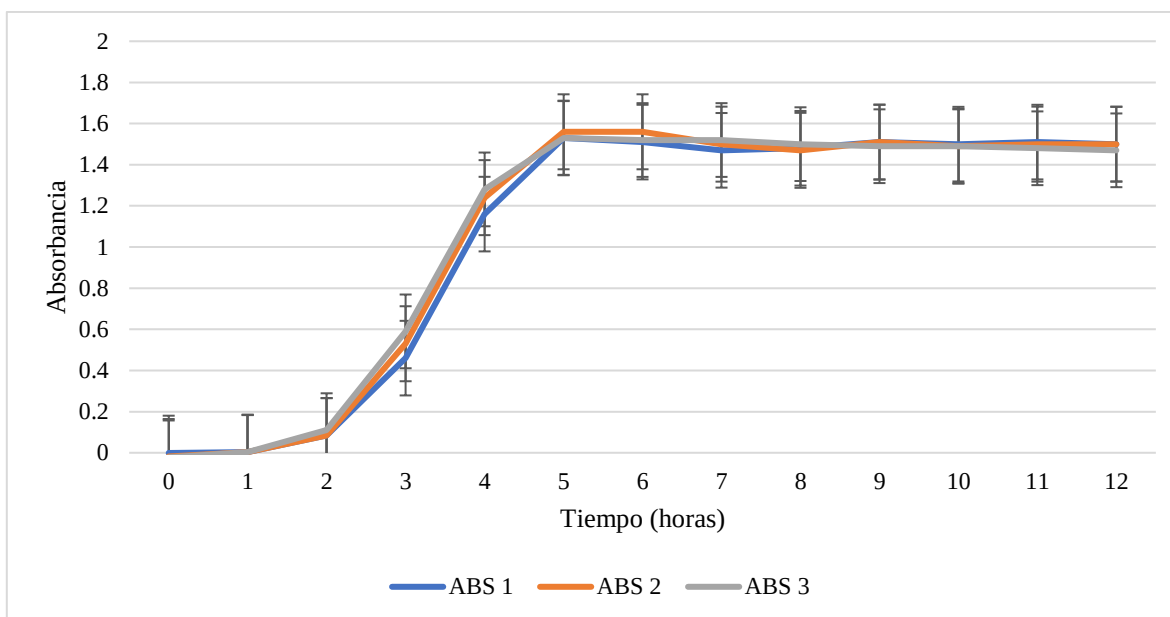


Figura 9. Cinética 2 de crecimiento bacteriano de *E. coli*. ABS = Absorbancia

4.2 Aislamiento de bacteriófagos

Se aislaron los bacteriófagos a partir de agua residual de una unidad de producción de bovinos y cruce de una unidad habitacional, dado que es una estrategia ampliamente utilizada en microbiología, debido a que estos ambientes representan reservorios naturales de bacteriófagos con gran diversidad genética (Vega et al., 2025).

En este estudio, la técnica de aislamiento fue estandarizada con el objetivo de garantizar su replicabilidad, lo cual es fundamental para la validación de resultados y la comparación entre diferentes laboratorios. La estandarización de protocolos, como el “spot test”, asegura que los resultados obtenidos puedan ser reproducidos y contrastados en distintos contextos experimentales, sin embargo, también existen otras técnicas para identificar la actividad lítica como en el estudio de Khan Mirzaei y Nilsson (2015).

La elección de las cepas de *E. coli* A115 y O157 como hospederos es particularmente relevante. La cepa O157, asociada a brotes de enfermedades

transmitidas por alimentos, representa un modelo de interés en salud pública, mientras que la cepa A115 funciona como un control bacteriano que permite evaluar la especificidad del fago. El hallazgo de actividad lítica en ambas cepas, evidenciado por la formación de placas claras en la superficie del agar (figura 10), confirma la capacidad de los bacteriófagos aislados para infectar y destruir células bacterianas. Estas placas de lisis, también denominadas calvas, son el resultado de la replicación viral y la subsecuente destrucción de las bacterias en el área circundante (Clokier & Kropinski, 2009).

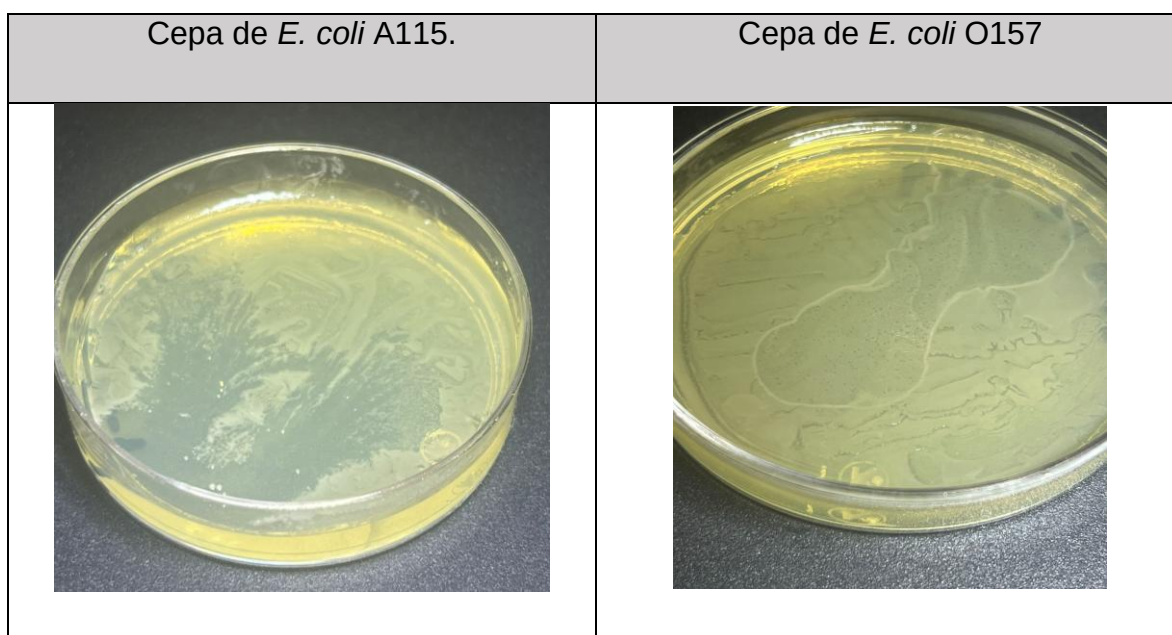


Figura 10. Placas de lisis originadas de la interacción entre un bacteriófago

La importancia de estos hallazgos radica en el potencial uso de los bacteriófagos como alternativas a los antibióticos, especialmente frente a cepas multirresistentes. En un contexto global de creciente resistencia antimicrobiana, los fagos representan una herramienta prometedora para la biotecnología. Además, el hecho de que los bacteriófagos sean altamente específicos para sus hospederos bacterianos reduce el riesgo de afectar la microbiota benéfica, lo que constituye una ventaja frente a los antibióticos de amplio espectro.

4.3 Caracterización del bacteriófago

La caracterización morfológica de bacteriófagos mediante MET constituye una herramienta fundamental para su clasificación taxonómica preliminar. En este estudio, se logró observar estructuras virales con cápside icosaédrica y cola contráctil, lo que permitió identificar al bacteriófago como miembro de la familia *Myoviridae*, conforme a los criterios establecidos por el Comité Internacional de Taxonomía de Virus (ICTV), como se puede observar en la figura 11, presentando una medida de 100 nm. Este resultado se confirma con el estudio de Yang et al. (2023) donde utilizaron microscopía electrónica para confirmar las características morfológicas típicas de la familia *Myoviridae*. Así también en el estudio de Abozahra, et al. (2025) confirmaron la morfología y la taxonomía del bacteriófago ϕ EcM-vB1, asilado para *E. coli*, presentando una cabeza icosaédrica de 63.06 nm de diámetro y una cola larga y contráctil de 109.34 nm de longitud, el cual se clasificó a la familia *Myoviridae*. Liu, et al. (2026) aislaron un bacteriófago y observaron en MET que tenía una cabeza icosaédrica típica con un diámetro de aproximadamente 91.57 nm y una cola larga con una longitud de aproximadamente 117.95 nm, categorizándolo en la clase de *Caudoviricetes* y de la familia *Myoviridae*.

Los *Myoviridae* se distinguen por presentar colas largas, contráctiles y relativamente rígidas (80–455 × 16–20 nm), compuestas por un núcleo central rodeado por una vaina helicoidal contráctil. Esta estructura se conecta a la cápside mediante un cuello, y su contracción es esencial para la inyección del ADN viral en la célula huésped. En las micrografías obtenidas, se observaron partículas virales con estas características, lo que respalda su clasificación dentro de esta familia. Además, los *Myoviridae* suelen tener cápsides de mayor tamaño y contenido genético más amplio que otros fagos con cola, lo que puede influir en su capacidad infectiva y especificidad de hospedero. La clasificación del bacteriófago como *Myoviridae* tiene implicaciones importantes para su aplicación biotecnológica y terapéutica; son potencial lítico; los convierte en candidatos ideales para el control bacteriano en entornos clínicos, agrícolas e industriales. Tienen estabilidad estructural; su

robustez morfológica permite su manipulación en laboratorio bajo condiciones controladas (Sjahriani et al., 2021).

Si bien la microscopía electrónica proporciona evidencia morfológica clara, la clasificación definitiva requiere complementarse con estudios genómicos, como lo recomienda el ICTV en sus lineamientos actuales. La morfología puede coincidir entre diferentes géneros o subfamilias, por lo que se sugiere realizar análisis de homología proteica y organización genómica para validar la propuesta taxonómica (Turner & Kropinski, 2021).

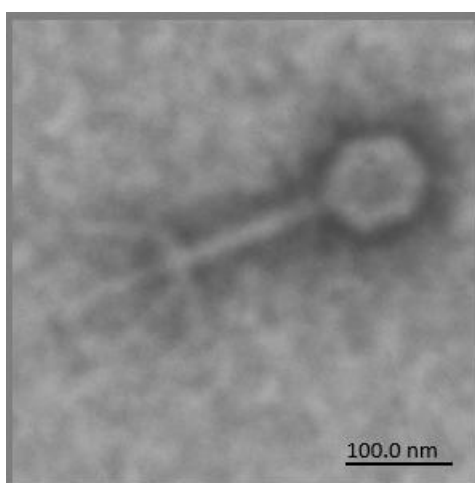


Figura 11. Bacteriófago identificado de la familia *Myoviridae*

4.4 Elaboración del embutido

Como resultado del proceso, se obtuvieron 9 lotes de embutido de carne de res, correspondientes a tres formulaciones por triplicado: T1 (100% NaCl, control), T2 (50% NaCl + 50% KCl) y T3 (100% KCl). En todos los tratamientos se logró una masa homogénea, sin evidencia visual de separación de grasa, lo cual indica que el control de temperatura ($\leq 4^{\circ}\text{C}$) durante el picado y mezclado fue adecuado para preservar la capacidad de retención de agua y la estabilidad de la emulsión cárnica. Esto es consistente con lo reportado por Zhang et al. (2024) donde demostraron que mantener la masa cárnica por debajo de 4°C durante el picado y mezclado preserva la estabilidad de la emulsión y evita defectos tecnológicos.

Durante la incorporación de los condimentos y especias (figura 12), no se observaron diferencias visibles en la textura de la masa entre los tres tratamientos de sal previo al embutido, lo que sugiere que, a nivel de formulación, la sustitución de NaCl por KCl no comprometió la ligazón inicial de la mezcla. Este resultado coincide con investigaciones previas en salchicha de pollo, donde se determinó que la sustitución parcial de NaCl por KCl no influyó negativamente en las características proximales del producto, obteniéndose valores de pH, humedad, grasa y proteína dentro de rangos aceptables para los tres tratamientos evaluados (Caballero Noboa et al., 2023).

Los 9 lotes obtenidos quedaron disponibles para los análisis físicoquímicos, microbiológicos y/o sensoriales correspondientes, cuyos resultados se presentan en los siguientes apartados.



Figura 12. Demostración gráfica de elaboración del embutido

4.5 Evaluación sensorial de la salchicha

El uso de respuestas hedónicas en los consumidores de alimentos es útil en varios campos de la ciencia sensorial, como en la nutrición y el marketing (Plaza & Saulais, 2022). El análisis sensorial fue realizado con 105 consumidores voluntarios; permitió obtener información valiosa sobre la aceptación de las muestras envasadas al

vacío. La muestra de los evaluadores fue de 64 mujeres y 41 hombres, con edades entre los 17 y 48 años, lo que contribuye a la representatividad de los resultados. Este enfoque es coherente con las recomendaciones internacionales de la ISO 8586:2012, que sugiere incluir consumidores no entrenados para estudios de aceptación general (ANSI, 2023). Este diseño minimiza el sesgo sensorial y permite una evaluación más precisa de las características organolépticas.

La metodología empleada, basada en la escala hedónica de 4 puntos, es ampliamente utilizada en estudios de preferencia alimentaria por su simplicidad y efectividad para captar la percepción subjetiva de los consumidores (Granados & Guzmán, 2013). Los atributos evaluados, color, olor, sabor y textura, son fundamentales en la aceptación de productos alimentarios. La escala hedónica utilizada (1 = "me disgusta mucho" a 4 = "me gusta mucho") permitió cuantificar la preferencia de manera directa. Aunque esta escala es menos detallada que la de 9 puntos, su simplicidad favorece la participación de consumidores no entrenados y reduce la fatiga cognitiva durante la evaluación (Christensen & Sommer, 2001).

Los resultados que se obtuvieron de acuerdo al color, sabor, olor y textura fueron semejantes entre el lote 638 (50% NaCl y 50% KCl) y el lote 948 (100% NaCl), a diferencia del lote 527 (100% KCl), resaltando la no aceptación en el sabor, como se puede observar en la Figura 13. En un estudio realizado en salchichas de cerdo, encontraron semejanza en estos resultados, donde las salchichas sustituidas con KCl en lugar de NaCl tenían un sabor amargo o metálico y no se observaron diferencias significativas en la textura entre las formulaciones reducidas en NaCl y el grupo control, y su apariencia se mantuvo estable (Stanley et al., 2017).

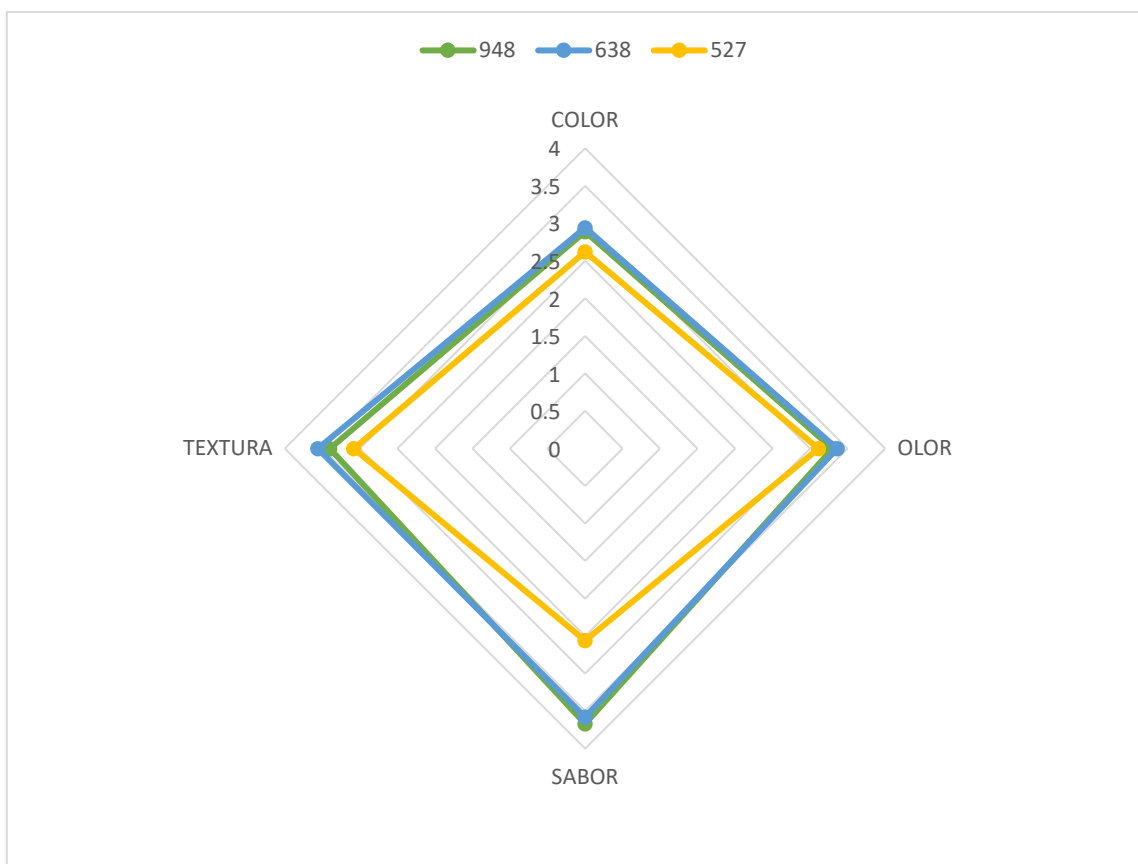


Figura 13. Resultados de aceptación del análisis sensorial.

4.6 Análisis microbiológico

El análisis microbiológico realizado a las muestras de embutidos (tabla 8) mostró ausencia de bacterias patógenas de importancia en salud pública, como son *Salmonella* spp. y *E. coli*. Estos resultados cumplen con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2018, Productos cárnicos procesados y los establecimientos dedicados a su proceso, y la NMX-F-065 Alimentos, Salchichas y Especificaciones. En consecuencia, las muestras analizadas se consideran inocuas y aptas para el consumo humano (Dirección General de Normas, 1984 y Secretaría de Salud, 2019).

Tabla 8. Resultados de evaluación microbiológica en la salchicha

Tipo de microorganismos	NMX-F-065-1984	NOM-213-SSA1-2018. Productos cárnicos procesados	Resultado del análisis
Mesófilos aerobios	≤100 UFC/g	≤100 UFC/g	Ausente
<i>E. coli</i>	0 UFC/g	≤3 NMP/g	Ausente
<i>Salmonella</i>	Ausente en 25 g	Ausente en 25 g	Ausente
<i>Staphylococcus aureus</i>	Ausencia en 100 g	≤100 UFC/g	Ausente
Hongos y levaduras	≤100 UFC/g	N/A	Ausente

4.7 Análisis bromatológico

Se obtuvieron los resultados del análisis bromatológico, los cuales se muestran en la tabla 9 y, de acuerdo con la Norma NMX-F-065 Alimentos, Salchichas y Especificaciones, se encuentran dentro de los parámetros permitidos: de proteína como mínimo deben tener un 9.5%, de lípidos como máximo 30% y de humedad. un 70%. De acuerdo a las formulaciones que se realizaron y al análisis bromatológico, en el estudio de (Caballero-Noboa et al., 2023) encontraron resultados semejantes en humedad, 59.7%, de acuerdo con la aplicación de KCl en salchichas de pollo.

Tabla 9. Análisis bromatológico de los tipos de formulaciones de embutido

Salchicha	Proteína	Lípidos	Humedad	Cenizas	Fibra
948*	17.36%	21.11%	56.82%	2.60%	0
638**	16.92%	21.29%	56.98%	2.83%	0
527***	17.30%	21.05%	56.94%	2.81%	0

948* Formulación de 100% NaCl

638** Formulación de 50% NaCl y 50% KCl

527*** Formulación de 100% KCl

5. Conclusiones

- ❖ La técnica de aislamiento de bacteriófagos a partir de aguas residuales fue estandarizada exitosamente, permitiendo su replicación y confirmando actividad lítica frente a cepas de *E. coli* A115 y O157:H7 mediante la prueba de spot test.
- ❖ El bacteriófago aislado fue clasificado morfológicamente dentro de la familia *Myoviridae*, con cápside icosaédrica y cola contráctil de aproximadamente 100 nm, de acuerdo con los criterios del Comité Internacional de Taxonomía de Virus (ICTV).
- ❖ La formulación de salchicha con sustitución del 50% de NaCl por KCl (tratamiento T1) representó la mejor opción, al mantener características sensoriales aceptables comparables al control con 100% de NaCl y al mismo tiempo reducir el contenido de sodio del producto.
- ❖ La formulación con 100% de KCl (tratamiento T2) fue rechazada sensorialmente por los evaluadores, principalmente en el atributo de sabor, reportándose notas amargas o metálicas, lo que la descarta como alternativa viable para la industria.
- ❖ Los tres tratamientos de salchicha cumplieron con los parámetros bromatológicos establecidos por la NMX-F-065-1984, registrando valores adecuados de proteína (>9.5%), lípidos (<30%) y humedad (<70%).
- ❖ El análisis microbiológico confirmó la ausencia de patógenos indicadores (*E. coli*, *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus*, mesófilos aerobios y hongos), cumpliendo con lo estipulado en la NOM-213-SSA1-2018, lo que avala la inocuidad del producto desarrollado.

6. Referencias

- Abozahra, R., Shlkamy, D., & Abdelhamid, S. M. (2025). Isolation and characterization of ϕ EcM-vB1 bacteriophage targeting multidrug-resistant *E. coli*. *BMC Res Notes* 18, 3. <https://doi.org/10.1186/s13104-024-07033-x>
- Ackermann, H. (2003). Bacteriophage observations and evolution. *Research in Microbiology*, 154(4), 245–251. [https://doi.org/10.1016/S0923-2508\(03\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0923-2508(03)00067-6)
- Ahmadi, H., Barbut, S., Lim, L. T., & Balamurugan, S. (2020). Examination of the Use of Bacteriophage as an Additive and Determining Its Best Application Method to Control *Listeria monocytogenes* in a Cooked-Meat Model System. *Frontiers in Microbiology*, 11, 779. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00779>
- Alvarado, Y. M. (2025). Los nitritos como aditivos en la carne: entre la seguridad y los nuevos desafíos regulatorios. *Industria Alimentaria*. <https://www.industriaalimentaria.org/blog/contenido/los-nitritos-como-aditivos-en-la-carne-entre-la-seguridad-y-los-nuevos-desafios-regulatorios>
- Asociación Nacional de Tiendas de Autoservicio y Departamentales. (2018). Aumentan mexicanos su consumo de embutidos. <https://antad.net/aumentan-mexicanos-su-consumo-de-embutidos/>
- Bautista, J. H., & Rincón, F. G. R. (2010). ¿Calidad de la carne o carne de calidad? *Nacameh*, 4(1), 1–10.
- Bintsis, T. (2017). Foodborne pathogens. *AIMS Microbiology*, 3(3), 529–563. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.3.529>
- Bodie, A. R., Bryan, C. A. O., Olson, E. G., & Ricke, S. C. (2023). Natural Antimicrobials for *Listeria monocytogenes* in Ready-to-Eat Meats: Current challenges and future prospects. *Foods*, 12(1), 16.
- Bumunang, E. W., Zaheer, R., Niu, D., Narvaez-Bravo, C., Alexander, T., McAllister,

- T. A., & Stanford, K. (2023). Bacteriophages for the Targeted Control of Foodborne Pathogens. *Foods*, 12(14), 2734. <https://doi.org/10.3390/foods12142734>
- Caballero-Noboa, E., Cortez-Espinoza, A., Aldas-Morejon, J., & Revilla-Escobar, K. (2023). Sustitución parcial de cloruro de sodio (NaCl) por cloruro de potasio (KCl) y su efecto en la elaboración de salchicha de pollo. *Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 16, 77–85.
- Campos-Nonato, I., Oviedo-Solís, C., Vargas-Meza, J., Ramírez-Villalobos, D., Medina-García, C., Gómez-Álvarez, E., Hernández-Barrera, L., & Barquera, S. (2022). Prevalencia, tratamiento y control de la hipertensión arterial en adultos mexicanos: resultados de la Ensanut 2022. *Salud Pública de México*. <https://doi.org/10.21149/14779>
- Campos-Nonato, I., Vargas-Meza, J., & Barquera, S. (2022). Consumo de sal/sodio en México y experiencias en Latinoamérica. *Instituto Nacional de Salud Pública*.
- Carroll-Portillo, A., Coffman, C. N., Varga, M. G., Alcock, J., Singh, S. B., & Lin, H. C. (2021). Standard Bacteriophage Purification Procedures Cause Loss in Numbers and Activity. *Frontiers in Microbiology*, 12–16.
- CDC. (2019). *E. coli (E. coli)*. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/food/foodborne-pathogens/escherichia-coli-e-coli>
- Chang, Y. (2020). Bacteriophage-derived endolysins applied as potent biocontrol agents to enhance food safety. *Food Microbiology Journal*.
- Chauhan, K., & Rao, A. (2024). Clean-label alternatives for food preservation : An emerging trend. *Heliyon*, 10(16), e35815. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35815>
- Christensen, B., & Sommer, H. (2001). Use of hedonic scales in consumer testing: Comparison of 4-point and 9-point scales. *Food Quality and Preference*. 12(4), 263–267. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(01\)00020-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-3293(01)00020-5)
- Ciobanu, M., Manoliu, D., Mihai, C., & Flocea, E. (2025). Dietary fibres in processed

- meat: A review on nutritional enhancement, technological effects, sensory implications and consumer perception. *Meat Science Review*, 1–31.
- Clayton, K., Bush, D., & Keener, K. (2019). Métodos para la conservación de alimentos. *Purdue University Extension*.
- Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). (2018). *Performance standards for antimicrobial susceptibility testing* (28th ed.). CLSI supplement M100. Wayne, PA: CLSI. <https://clsi.org/shop/standards/m100>
- Clokier, M. R. J., & Kropinski, A. M. (Eds.). (2009). *Bacteriophages*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-60327-164-6>
- COFEPRIS. (2017). Riesgos en Alimentos de Origen Animal: Evaluación de Riesgos en Rastros y Mataderos Municipales. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/riesgos-en-alimentos-de-origen-animal-evaluacion-de-riesgos-en-rastros-y-mataderos-municipales>
- Comité Científico de la EFSA. (2025). Guía sobre la caracterización de microorganismos para la evaluación de riesgos de productos utilizados en la cadena alimentaria. *EFSA Journal*, 23(11). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9705>
- Consejo Mexicano de la Carne. (2020). La industria de las carnes frías en México. <https://comecarne.org/la-industria-de-las-carnes-frias-en-mexico/>
- Consejo Mexicano de la Carne. (2022). Clasificación de productos cárnicos. <https://comecarne.org/articulos/clasificacion-productos-carnicos>
- Consejo Mexicano de la Carne. (2024). Avanza el consumo cárnico de México. <https://comecarne.org/avanza-el-consumo-carnico-de-mexico>
- Cruz-Romero, M. C., O'flynn, C. C., Troy, D., Mullen, A. M., & Kerry, J. P. (2021). The use of potassium chloride and tapioca starch to enhance the flavour and texture of phosphate- and sodium-reduced low fat breakfast sausages manufactured using high pressure-treated meat. *Foods*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/FOODS11010017>

- Delgado-Pando, G., Ekonomou, S. I., & Stratakos, A. C. (2021). Clean label alternatives in meat products. *Meat Science Review*, 1, 17.
- Dirección General de Normas. (1984) NMX-F-065, 1984. Alimentos-Salchichas-Especificaciones. Diario Oficial de la Federación.
- Efenberger-Szmechtyk, M. (2025). Bacteriophage Power: Next-gen biocontrol strategies for safer meat. *Food Microbiology Journal*.
- Endersen, L., & Coffey, A. (2020). The use of bacteriophages for food safety. *Current Opinion in Food Science*, 36, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.006>
- Endersen, L., Mahony, J. O., Hill, C., Ross, R. P., Mcauliffe, O., & Coffey, A. (2014). Phage therapy in the food industry. *Annual Review of Food Science and Technology*, 5, 327–349. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030713-092415>
- FAO/WHO. (2023). *Codex Alimentarius Commission. Code of hygienic practice for meat*. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius>
- FAO. (2004). *La carne como materia prima, ingredientes no cárnicos y técnicas básicas en el procesamiento posterior de la carne*. <https://www.fao.org/docrep/004/T0279E/T0279E06.htm>
- FAO. (2014). *Fichas técnicas Procesados de carnes*. FAO Publishing.
- FAO. (2023). *Codex Alimentarius. Nomas internacionales de los alimentos*. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/themes/contaminants/es/>
- FDA. (2023). *FDA-SENASICA-COFEPRIS Food Safety Partnership*. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.fda.gov/food/international-cooperation-food-safety/fda-senasica-cofepris-food-safety-partnership>
- Feng, P., Weagant, S., Grant, M., & Burkhardt, W. (2020). Bacteriological analytical manual, Chapter 4: Enumeration of E. coli and the coliform bacteria. *U.S. Food and Drug Administration*.
- Figueiredo, L., & Almeida, R. C. C. (2017). Antibacterial efficacy of nisin ,

- bacteriophage P100 and sodium lactate against *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat sliced pork ham. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48(4), 724–729.
<https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.02.010>
- Font-i-furnols, M. (2023). Meat consumption sustainability and alternatives : An overview of motives and barriers. *Meat Science Review*.
- Gaona-Pineda, E. B., Rodríguez-Ramírez, S., Medina-Zacarías, M. C., Valenzuela-Bravo, D. G., Martínez-Tapia, B., Arango-Angarita, A., & Gómez, E. B. (2023). Consumidores de grupos de alimentos en población mexicana. *Ensanut Continua 2020-2022*, 65.
- Gildea, L., Ayariga, J. A., & Robertson, B. K. (2022). Bacteriophages as biocontrol agents in livestock food production. *Foods*, 12, 19.
- Granados, C., & Guzmán, L. E. (2013). Análisis proximal, sensorial y de textura de salchichas elaboradas con subproductos de la industria procesadora de atún (*Scombridae thunnus*). *Ingeniería Industrial*, 24(6), 29–34.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600005>
- Gutiérrez, D., Rodríguez-Rubio, L., Fernández, L., Martínez, B., Rodríguez, A., & García, P. (2017). Applicability of commercial phage-based products against *Listeria monocytogenes* for improvement of food safety in Spanish dry-cured ham and food contact surfaces. *Food Control*, 73, 1474–1482.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.11.007>
- Heredia, N., Esteban, J., Aviña, D., Soto, L. S., & García, S. (2014). Productos cárnicos: principales patógenos y estrategias no térmicas de control. *Revista de Ciencia y Tecnología de los alimentos*, 8, 20–42.
- Heriberto, D., Díaz, C., & Zepeda, A. V. (2025a). Bacteriófagos como alternativa terapéutica: Explorando su papel en la era de la resistencia antimicrobiana. *Revista X*, 13, 150–160.
- Heriberto, D., Díaz, C., & Zepeda, A. V. (2025b). Bacteriófagos como alternativa terapéutica: Explorando su papel en la era de la resistencia antimicrobiana.

Revista X, 13, 161–171.

- Hong, Y., Schmidt, K., Marks, D., Hatter, S., Marshall, A., Albino, L., & Ebner, P. (2016). Treatment of Salmonella-contaminated eggs and pork with a broad-spectrum, single bacteriophage: Assessment of Efficacy and Resistance Development. *Foodborne Pathogens and Disease*, 13(12), 679–688. <https://doi.org/10.1089/fpd.2016.2172>
- Huang, C., Shi, J., Ma, W., Li, Z., Wang, J., Li, J., & Wang, X. (2018). Isolation, characterization, and application of a novel specific Salmonella bacteriophage in different food matrices. *Food Research International*, 111, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.071>
- Hudson, J. A., Billington, C., Premaratne, A., & On, S. L. W. (2015). Inactivation of *E. coli* O157 : H7 using ultraviolet light-treated bacteriophages. *Food Science and Technology International*, 21(2), 104–112. <https://doi.org/10.1177/1082013214560445>
- International Agency for Research on Cancer. (2015). *IARC monographs evaluate consumption of red meat and processed meat* (Press release No. 240). World Health Organization. <https://www.iarc.who.int/>
- International Organization for Standardization (ISO). (2012). ISO 8586: *Sensory analysis — General guidelines for the selection, training and monitoring of selected assessors and expert sensory assessors*. Geneva: ISO.
- Institute for International Cooperation in Animal Biologics. (2009). *E.coli enterohemorrhagica*. The Center for Food Security & Public Health, 1–12. http://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/upch/3680/Caracterizacion_Sa_nchezVillanueva_Andre.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ishaq, A., Ebner, P. D., Syed, Q. A., & Ubaid ur Rahman, H. (2020). Employing list-shield bacteriophage as a bio-control intervention for *Listeria monocytogenes* from raw beef surface and maintain meat quality during refrigeration storage. *LWT*, 132, 109784. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109784>

- Ishaq, A., Syed, Q. A., Ebner, P. D., & Ubaid ur Rahman, H. (2021). Multiple hurdle technology to improve microbial safety, quality and oxidative stability of refrigerated raw beef. *LWT*, 138, 110529. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110529>
- Jiménez-Edeza, M., Castillo-Burgos, M., Germán-Báez, L. J., Castañeda-Ruelas, G. M., Jiménez-Edeza, M., Castillo-Burgos, M., Germán-Báez, L. J., & Castañeda-Ruelas, G. M. (2020). Venta a granel de embutidos: una tendencia de comercialización asociada al riesgo de enfermedades transmitidas por alimentos en Culiacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(3), 848–858. <https://doi.org/10.22319/RMCP.V11i3.5274>
- Jure, M. A., Condorí, M. S., Pérez, G. Catalán, M. G., López, A., Zolezzi, G., Chinen, I., Rivas, M., & Castillo, M. (2015). Aislamiento y caracterización de *E. coli* O157 en productos cárnicos bovinos y medias reses en la provincia de Tucumán. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(2), 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.03.006>
- Katz, D. S. (2016). Plaque assay protocols. *Journal of Virological Methods*, 233, 1–5.
- Kim, M., Bae, S. M., Yoo, Y., & Park, J. (2025). Clean-label strategies for the replacement of nitrite, ascorbate, and phosphate in meat products: A review. *Meat Science Review*, 1, 38.
- Komora, N., Maciel, C., Amaral, R. A., Fernandes, R., Castro, S. M., Saraiva, J. A., & Teixeira, P. (2021). Innovative hurdle system towards *Listeria monocytogenes* inactivation in a fermented meat sausage model - high pressure processing assisted by bacteriophage P100 and bacteriocinogenic *Pediococcus acidilactici*. *Food Research International*, 148, 110628. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110628>
- Lasagabaster, A., Jim, E., Lehnher, T., & Miranda-cadena, K. (2020). Bacteriophage biocontrol to fight *Listeria* outbreaks in seafood. *Food and Chemical Toxicology*, 145, 111682. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111682>

- Lee, S., & Kim, H. (2020). Effect of sodium nitrite, sodium chloride and concentrated seawater on physicochemical properties of meat emulsion system. *Food Science of Animal Resources*, 40(6), 980–989.
- Leon-Velarde, C. G., Woo Jun, J., & Skurnik, M. (2019). Yersinia phages and food safety. *Food Microbiology Journal*, 1, 20.
- Li, S., Konoval, H. M., Marecek, S., Lathrop, A. A., Feng, S., & Pokharel, S. (2023). Control of *E. coli* O157:H7 using lytic bacteriophage and lactic acid on marinated and tenderized raw pork loins. *Meat Science*, 196, 109030. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109030>
- Lianou, A., Panagou, E. Z., & Nychas, G. E. (2020). Meat Safety: Foodborne pathogens and other biological issues. *Meat Science Review*.
- Liu, Y., Ding, M., Zou, T. et al. (2026). Isolation and characterization of a lytic bacteriophage against *Staphylococcus aureus*. *BMC Vet Res* 22, 203. <https://doi.org/10.1186/s12917-026-05371-5>
- Llamas, L. F., Catarina, A., Duarte, L., & García, S. A. (2023). Los enemigos de las bacterias: los bacteriófagos. *Revista de Divulgación Científica*.
- Lone, A., Anany, H., Hakeem, M., Aguis, L., Avdjian, A., Bouget, M., Atashi, A., Brovko, L., Rochefort, D., & Griffiths, M. W. (2016). Development of prototypes of bioactive packaging materials based on immobilized bacteriophages for control of growth of bacterial pathogens in foods. *International Journal of Food Microbiology*, 217, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.10.011>
- Meilgaard, M., Civille, G. V., & Carr, B. T. (2007). *Sensory evaluation techniques* (4th ed). CRC Press.
- Mirzaei, M. K., & Nilsson, A. S. (2015). Isolation of phages for phage therapy : a comparison of spot tests and efficiency of plating analyses for determination of host range and efficacy. *PLoS ONE*, 10(3) e0118557. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118557>
- Molina López, J., & Eslava Campos, C. (2026). *E. coli* diarrogénica. Universidad

- Nieto, C., Tolentino-Mayo, L., Medina, C., Monterrubio-Flores, E., Denova-Guti3rrez, E., & Barquera, S. (2018). Sodium content of processed foods available in the Mexican Mmrket. *Nutrients*, 10(12), 2008. <https://doi.org/10.3390/NU10122008>
- Ochoa, A. K. O. (2022). Aislamiento y caracterizaci3n de bacteri3fagos l3ticos para el control de *Vibrio parahaemolyticus* causante de AHPND. *Revista de Microbiolog3a Aplicada*.
- Organizaci3n Mundial de la Salud (OMS). (2023). *Informe mundial de la OMS sobre la reducci3n de la ingesta de sodio*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240069985>
- Organizaci3n Mundial de la Salud (OMS). (2024). *E.coli*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli>
- Organizaci3n Mundial de la Salud (OMS). (2026). *Tarjeta de puntuaci3n del pa3s sobre el sodio*. <https://gifna.who.int/summary/sodium>
- Organizaci3n Panamericana de la Salud (OPS). (2019). *Reducci3n de Sal*. <https://www.paho.org/es/temas/reduccion-sal>
- Osorio, J. C. C. (2015). Bacteri3fagos: aspectos generales y aplicaciones cl3nicas. *Revista Colombiana de Microbiolog3a*, 6, 36–51.
- Pereira, C., Natali, M., Pereira, R., & Souza, A. (2023). Consumer behavior concerning meat consumption: Evidence from Brazil. *Food*, 12, 16.
- P3rez-Vargas, A. L., Reyes-V3zquez, N. C., Morales-landa, J. L., Aranda-Ru3z, J., Quintero-Ramos, A., Rico-Costilla, D. S., & M3ndez-Zamora, G. (2024). Walnut paste as a fat substitute in frankfurter sausage formulation. *Revista de Ciencia y Tecnolog3a de Alimentos*, 16, 55–65.
- Pick, K., Ju, T., Willing, B. P., & Raivio, T. L. (2022). Isolation and characterization of a novel temperate *E. coli* bacteriophage, kapi1, which modifies the o-antigen

and contributes to the competitiveness of its host during colonization of the murine gastrointestinal tract. *mBio*, 13,(1),e02085-21.
<https://doi.org/10.1128/mBio.02085-21>

Plaza, A. G., & Saulais, L. (2022). Hedonic response sensitivity to variations in the evaluation task and culinary preparation in a natural consumption context. *Frontiers in Nutrition*, 9, 16.

Portillo López, A. (2021). *Manual de prácticas de Biología: Observación morfológica de colonias bacterianas y Tinción de Gram*. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias.
<https://ciencias.ens.uabc.mx/documentos/manual/bio/ManualMicrobiología.pdf>

Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO). (2016). *Radiografía de Salchichas*.
<https://elpoderdelconsumidor.org/2016/03/radiografia-de-salchichas-de-pavo-fud-1-salchicha/>

Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO). (2020). *Estudio calidad salchichas*.
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/569105/ESTUDIO_CALIDAD_SALCHICHAS .pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/569105/ESTUDIO_CALIDAD_SALCHICHAS.pdf)

Rey Rodríguez, J. F. (2023). Productos cárnicos saludables, un mercado por explorar en Latinoamérica. *Revista de Innovación Alimentaria*.

Ríos-Muñiz, D., Cerna-Cortés, J. F., Morán-García, N., & Meza-Segura, M. (2019). *E. coli* enterotoxigénica y enteroagregativa: prevalencia, patogénesis y modelos murinos. *Gaceta Médica de México*, 155(4), 410–416.
<https://doi.org/10.24875/GMM.19004716>

Riverón-Rodríguez, E., Ramírez-Frómeta, N., Herrera-alba, D., & Barreras-García, G. (2012). Estación de trabajo para el estudio de la cinética de crecimiento de *E. coli* mediante el método de turbidez. *Revista Cubana de Microbiología*, 24(2), 45–52.

Rojas, N. A. (2024). Estandarización de la cepa *E. coli* con el método sustrato

- enzimático definido como indicador de calidad en agua potable. *Revista Mexicana de Microbiología*, 16(1), 33–40.
- Romero-Sánchez, D., Rincón-Soledad, E. M., Arredondo-Nontién, M. A., Vásquez-Mejía, S. M., & Barrios, D. (2024). Factores determinantes de la intención de compra de productos cárnicos procesados saludables. *Revista CEA*, 11(25), 1-15.
- Salmond, G. P. C., & Fineran, P. C. (2015). A century of the phage: Past, present and future. *Nature Reviews Microbiology*, 3(11), 777–786.
<https://doi.org/10.1038/nrmicro3564>
- Samad, A., Muazzam, A., Alam, A. M. M. N., Kim, S., Hwang, Y., & Joo, S. (2026). A comprehensive review of technological advances in meat safety, quality, and sustainability for public health. *Meat Science Review*, 1, 22.
- Santaella, J. A. (2019). Comunicado de prensa núm. 650/19: La Ensanut 2018 ofrece información para conocer el estado de salud. *Secretaría de Salud*.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1994). *Norma Oficial Mexicana NOM-009-ZOO-1994, Proceso sanitario de la carne*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Salud. (2004). NORMA Oficial Mexicana NOM-194-SSA1-2004, *Productos y servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Salud. (2017). *Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados -Información comercial y sanitaria*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Salud. (2018). *Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2018, Productos y servicios*. Diario Oficial de la Federación.
<https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5556645>

- Secretaría de Salud. (2019). NOM-213-SSA1-2018. *Productos y servicios. Productos cárnicos procesados y los establecimientos dedicados a su proceso*. Diario Oficial de la Federación, 1–48.
- Secretaría de Salud. (2023). *ENSANUT*. Instituto Nacional de Salud Pública.
- Shebs-Maurine, E. L., Giotto, F. M., Laidler, S. T., & de Mello, A. S. (2021). Effects of bacteriophages and peroxyacetic acid applications on beef contaminated with *Salmonella* during different grinding stages. *Meat Science*, 173, 108407. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108407>
- Shebs-Maurine, E. L., Torres, E. S., Yeh-Parker, Y., & de Mello, A. S. (2020). Application of MS bacteriophages on contaminated trimmings reduces *E. coli* O157 and non-O157 in ground beef. *Meat Science*, 170, 108243. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108243>
- Sirini, N., Munekata, P. E. S., Lorenzo, J. M., Pateiro, M., P, Á., Teixeira, A., Fern, J., Frizzo, L., & Rosmini, M. (2022). Development of Healthier and Functional Dry Fermented Sausages : Present and Future. *Meat Science Review*, 1, 21.
- Sjahriani, T., Wasito, E. B., & Tyasningsih, W. (2021). Isolation and Identification of *E. coli* O157:H7 Lytic Bacteriophage from Environment Sewage. *International Journal of Food Science*, 2021, 7383121. <https://doi.org/10.1155/2021/7383121>
- Son, H. M., Duc, H. M., Masuda, Y., Honjoh, K., & Miyamoto, T. (2018). Application of bacteriophages in simultaneously controlling *E. coli* O157 : H7 and extended-spectrum beta-lactamase producing *E. coli*. *Food Control*, 89, 6–10.
- Stanley, R. E., Bower, C. G., & Sullivan, G. A. (2017). Influence of sodium chloride reduction and replacement with potassium chloride based salts on the sensory and physico-chemical characteristics of pork sausage patties. *Meat Science*, 133, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.05.021>
- Stiftung, Heinrich Böll, & Tierra, A. de la. (2021). *Atlas de la carne*. Creative Commons.
- The Food Tech. (2022). Así fue el 2022 en la industria de los conservantes

alimentarios. https://thefoodtech.com/packaging-y-procesamiento/asi-fue-el-2022-en-la-industria-de-los-conservantes-alimentarios/?utm_source=copilot.com

The Food Tech. (2025). Nitritos en alimentos cárnicos: ¿Aditivos seguros o riesgos latentes? <https://thefoodtech.com/soluciones-y-tecnologia-alimentaria/nitritos-en-alimentos-carnicos-aditivos-seguros-o-riesgos-latentes/>

Thung, T. Y., Siti Norshafawatie, B. M. F., Premarathne, J. M. K. J. K., Chang, S., W., Loo, Y. Y., Kuan, C. H., New, C. Y., Ubong, A., Ramzi, O. S. B., Mahyudin, N. A., & Son, R. (2017). Isolation of food-borne pathogen bacteriophages from retail food and environmental sewage. *International Food Research Journal*, 24, 450–454.

Torres-Álvarez, C., Pastrana, V. M. I., García-Alanís, K. G., Bautista-Villarreal, M., Amaya-Guerra, C. & Castillo, S. (2025). Evaluación integral de la calidad e inocuidad del chorizo: Un enfoque fisicoquímico, microbiológico y nutricional. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 10(2), 12–23.

Turner, D., & Kropinski, A. M. (2021). A roadmap for genome-based phage taxonomy. *Virology Journal*, 18, 10.

Tuttle, A. R., Trahan, N. D., & Son, M. S. (2021). Growth and maintenance of *E. coli* laboratory strains. *Current Protocols*, 1(1), e20. <https://doi.org/10.1002/cpz1.20>

Vargas, C. A. (2018). Importancia nutricional de la carne. *Revista de Nutrición*, 54, 61.

Velasco, R. G., Garza-Manero, S. P., Pastelín-Palacios, R., & Adán, M. (2024). Bacteriófagos: Los virus que se emplearán como agentes terapéuticos de las infecciones ocasionadas por bacterias multirresistentes a los antimicrobianos. *Revista de Microbiología Clínica*. 140,149.

Vega, I. I., Rodríguez, N. E. R., Pérez, V. J. A., Velázquez, A. P. Z., Sánchez, V. V., Arana, J. L. R., Noguez, J. B. P., & Gómez De Anda, F. R. (2025). bacteriophages as a biocontrol strategy to prevent the contamination of meat

- products with *E. coli*: A meta-analysis. *Polish journal of microbiology*, 74(2), 165–176. <https://doi.org/10.33073/pjm-2025-014>
- Vikram, A., Woolston, J., & Sulakvelidze, A. (2020). Phage biocontrol applications in food production and processing. *Current Issues in Molecular Biology*, 40, 267–302. <https://doi.org/10.21775/cimb.040.267>
- Wang, L., Cao, Z., Wang, X., & El-Tayeb, W. (2017). Use of bacteriophages to control *E. coli* O157:H7 in domestic ruminants, meat products, and fruits and vegetables. *Foodborne Pathogens and Disease*, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1089/fpd.2016.2266>
- Wessels, K., Rip, D., & Gouws, P. (2021). *Salmonella* in chicken meat: Consumption, outbreaks, characteristics, current control methods and the potential of bacteriophage use. *Food Microbiology Review*, 1, 20.
- Yang, F., Wang, L., Zhou, J., Xiao, H., & Liu, H. (2023). In situ structures of the ultra-long, extended and contracted tail of bacteriophage P1 of *Myoviridae*. *Viruses*, 15(6), 1267. <https://doi.org/10.3390/v15061267>
- Yeh, Y., Purushothaman, P., Gupta, N., Ragnone, M., Verma, S. C., & de Mello, A. S. (2017). Bacteriophage application on red meats and poultry: Effects on *Salmonella* population in final ground products. *Meat Science*, 127, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.01.001>
- Yong, H. I., Kim, T., Choi, H., & Jang, H. W. (2021). Clean label meat technology : Pre-converted nitrite as a natural curing. *Food Science of Animal Resources*, 41(2), 173–184.
- Zhang, X., Niu, Y. D., Nan, Y., Stanford, K., Holley, R., McAllister, T., & Narváez-Bravo, C. (2019). SalmoFresh™ effectiveness in controlling *Salmonella* on romaine lettuce, mung bean sprouts and seeds. *International Journal of Food Microbiology*, 305, 108250. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108250>
- Zhang, Y., Li, H., Chen, X., & Wang, J. (2024). Enhancing emulsification of meat broth system mixed with myofibrillar proteins and type I collagen: The role of

NaCl and heat. *Food Chemistry*: X, 24, 101945.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101945>

Zhou, Y., Li, L., Han, K., Wang, L., Cao, Y., Ma, D., & Wang, X. (2022). A Polyvalent Broad-Spectrum Escherichia Phage Tequatrovirus EP01 Capable of Controlling *Salmonella* and *E. coli*. contamination in foods. *Viruses*, 14(2), 286.
<https://doi.org/10.3390/v14020286>

Ziyu, S., Wen, H., Ma, L., & Id, Z. C. (2022). Isolation, characterization and application of bacteriophage PSDA-2 against *Salmonella Typhimurium* in chilled mutton. *PLoS ONE*, 17(2), e0262946.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262946>