



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ÁREA ACADÉMICA DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

“Análisis de riesgo e identificación de *Escherichia coli* enterohemorrágica en canales y heces de cerdos faenados en un rastro municipal del estado de Hidalgo.”

TESIS

Para obtener el título de
Médico Veterinario Zootecnista

Presenta

JOSÉ MANUEL GONZÁLEZ ESQUIVEL

Director

Dra. Nydia Edith Reyes Rodríguez

Codirector

Juan Martín Talavera González

Asesores

Vicente Vega Sánchez

Fabián Ricardo Gómez De Anda

Luis Daniel Tinoco Plascencia

Septiembre 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia

Academic Area of Veterinary Medicine and Zootechnics

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo., a 18 de agosto de 2025

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado

Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, **José Manuel González Esquivel**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **"Análisis de riesgo e identificación de *Escherichia coli* enterohemorrágica en canales y heces de cerdos faenados en un rastro municipal del estado de Hidalgo."**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

PRESIDENTE	DR. FABIÁN RICARDO GÓMEZ DE ANDA
SECRETARIO	DR. VICENTE VEGA SÁNCHEZ
VOCAL 1	DRA. NYDIA EDITH REYES RODRÍGUEZ
VOCAL 2	DR. JUAN MARTÍN TALAVERA GONZÁLEZ
SUPLENTE 1	LIC. LUIS DANIEL TINOCO PLASCENCIA

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dra. Maricela Ayala Martínez
Coordinador del Programa educativo de
Medicina Veterinaria y Zootecnia.



Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,
México. C.P. 43775.
Teléfono: 7717172001 Ext. 42105
mvzjefatura@uah.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uah.edu.mx

TÍTULO

**“ANÁLISIS DE RIESGOS E IDENTIFICACIÓN DE *Escherichia coli*
ENTEROHEMORRÁGICA EN CANALES Y HECES DE CERDOS FAENADOS
EN UN RASTRO MUNICIPAL DEL ESTADO DE HIDALGO”**

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación no habría sido posible sin el apoyo y la guía de personas extraordinarias que contribuyeron significativamente a mi formación académica y personal.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a la Dra. Nydia Edith Reyes Rodríguez y al Dr. Vicente Vega Sánchez, quienes generosamente me abrieron las puertas de su laboratorio, brindándome la invaluable oportunidad de iniciar mi trayectoria en el campo de la investigación científica. Su confianza en mis capacidades y su generosidad al compartir su espacio de trabajo sentaron las bases fundamentales para mi desarrollo profesional y académico.

Mi profunda gratitud al Dr. Juan Carlos Hernández González, quien asumió con dedicación el papel de mentor durante mi servicio social y prácticas profesionales. Su extraordinaria paciencia, compromiso con la enseñanza y apoyo constante iluminaron mi camino en los momentos más desafiantes de este proceso. Los conocimientos que compartió conmigo y su continuo estímulo para buscar la excelencia han sido pilares esenciales en mi formación como investigador.

Deseo expresar un reconocimiento especial al MVZ. Tinoco, cuya amistad ha trascendido el ámbito académico para convertirse en un soporte fundamental en mi carrera. Su respaldo incondicional, tanto en aspectos profesionales como personales, representa uno de los regalos más valiosos que he recibido durante esta etapa formativa.

Mi reconocimiento y gratitud se dirigen especialmente al equipo del Laboratorio de Patógenos Entéricos del Departamento de Salud Pública de la Facultad de Medicina de la UNAM., cuyo apoyo fue fundamental para la realización de este trabajo. Al doctor Armando Navarro Ocaña, a la Laboratorista Yolanda Martínez, al Técnico Luis Antonio León Alamilla, al Técnico Gabriel Pérez Soto, a la Bióloga Delia Licona Moreno, a todo ellos por su mentoría y rigor académico que elevaron la calidad de esta investigación. Su guía experta y apoyo incondicional durante el proceso de análisis serológico fueron pilares esenciales para este trabajo.

DEDICATORIAS

Agradezco profundamente a Dios por acompañarme en cada paso de este camino, por brindarme la fortaleza, iluminación y fortaleza en cada momento.

A mi amada familia, mi pilar y fuente inagotable de amor y apoyo. Gracias por creer en mí, por su paciencia y por estar siempre a mi lado, celebrando cada logro y acompañándome en los desafíos.

A mis compañeros y doctores de toda la carrera, quienes depositaron su confianza en mí mucho antes de que yo lo hiciera. Sus palabras de aliento y su fe en mis capacidades me impulsaron a superar mis propios límites.

A mis colegas que tuve la oportunidad de conocer y trabajar lado a lado de otras instituciones, por compartir sus conocimientos y experiencias, enriqueciendo mi formación y brindándome valiosas herramientas para mi crecimiento profesional.

A aquellas personas con las que inicié este viaje, que tomaron caminos diferentes, y a quienes regresaron para compartir conmigo la recta final. Su presencia, en cada etapa, dejó una huella imborrable en mi corazón.

"Las abejas nos muestran que el conocimiento se recoge de diversas fuentes.

Gracias a todos los que fueron parte de este camino."

-Anónimo

ABREVIATURAS

BFP: Pili Formadores de Haces.

BPM: Buenas Prácticas de Manufactura.

COMECARNE: Consejo Mexicano de la Carne

DAEC: *Escherichia coli* adherente difusa

DEC: *Escherichia coli* diarreogénica

EAggEC: *Escherichia coli* enteroagregativa

EDA: Enfermedades diarreicas agudas.

ECEH: *Escherichia coli* enterohemorrágica.

EIEC: *Escherichia coli* enteroinvasivo

EPEC: *Escherichia coli* enteropatógena

ETA: Enfermedad transmitidas por alimentos.

ETEC: *Escherichia coli* enterotoxigénica

HACCP: Sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control

LEE: Locus of enterocyte effacement

NOM: Norma Oficial Mexicana

OHZDP: One health Zoonotic Disease Prioritization

OMS: Organización mundial de la salud

PCC: Puntos Críticos de Control.

POES: Procedimientos Operativos Estándares de Sanitación

SUH: Síndrome Urémico Hemolítico.

INDICE

Agradecimientos	4
Dedicatorias	5
Abreviaturas.....	6
Índice de figuras	9
Índice de tablas	10
Resumen	11
Abstract.....	12
Introducción.....	13
Revisión de la literatura	15
Antecedentes.....	15
Obtención de la carne para consumo.....	18
Descripción del proceso de faenado de cerdos	21
Análisis de riesgo e identificación de puntos críticos.....	24
Enfermedades transmitidas por alimentos	29
Historia	31
<i>Eschericia coli</i> diarreogénica o DEC	33
Subclasificación de <i>eschericia coli</i> patogénica	34
<i>E. coli</i> enterohemorrágica.....	35
Transmisión	36
Patogénesis	36
Manifestaciones clínicas de las infecciones por ECEH.....	38
Justificación	42
Hipótesis	44
Objetivos.....	45
Objetivo general	45
Objetivos específicos.....	45
Material y métodos	46
Determinación del tamaño de muestra en canal y heces	47
Resultados.....	54
Puntos críticos identificados.....	58

Doumentación gráfica: factores de riesgo identificados en las instalaciones.....	60
Recomendaciones	65
Discusión.	67
Referencias	77

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 Distribución de los porcinos faenados en México expresados en miles de porcinos. COMECARNE (2024).....	18
FIGURA 2 Esquema de la obtención de la carne, modificado de NOM -194-SSA1-2004.	21
FIGURA 3 Subclasificación de Escherichia coli, modificado de Aguilar (2015).....	34
FIGURA 4 Secuencia de frotación para el método no destructivo. Tomada de Rodriguez (2016).....	48

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de las pruebas bioquímica que identifican el perfil de Escherichia coli.	55
Tabla 2 Resultados obtenidos en serología de las cepas analizadas.	56
Tabla 3 Resultados del cuestionario para determinar el nivel de riesgo en el rastro.....	57

RESUMEN

Las enfermedades transmitidas por alimentos constituyen un problema de salud pública global, siendo *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH) un patógeno emergente crítico en la producción cárnica. La carne porcina representa un vehículo potencial para cepas ECEH que causan cuadros entéricos graves y pérdidas económicas significativas. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el riesgo sanitario mediante identificación y serotipificación de *E. coli* enterohemorrágica en canales y heces de cerdos faenados en un rastro municipal de Hidalgo, determinando su impacto en la inocuidad alimentaria y salud pública.

Se realizó un estudio transversal analítico utilizando métodos microbiológicos convencionales para aislamiento e identificación de *E. coli*, pruebas bioquímicas confirmatorias y serotipificación específica. Adicionalmente, se evaluaron las condiciones higiénico-sanitarias del rastro mediante un cuestionario estructurado de 27 ítems. Se obtuvieron 187 cepas de *E. coli*, de las cuales el 55.1% provino de muestras fecales y el 44.9% de canales. Del total de aislados, el 5.35% (10/187) resultaron sospechosos a ECEH, confirmándose 6 cepas de ECEH: una perteneciente al serotipo O76, H51 con origen en canal, mientras que las 5 restantes no pudieron ser serotipificadas. La evaluación del rastro arrojó una puntuación de 29 puntos, identificándose deficiencias críticas en acceso y personal de inspección ante mortem.

Se concluye que la presencia de *E. coli* enterohemorrágica serotipo O76, H51 en canales y heces representa un riesgo potencial para la salud pública. Las deficiencias higiénico-sanitarias contribuyen a la contaminación cruzada y persistencia del patógeno, identificándose tanto contaminación directa durante la evisceración como posible contaminación cruzada en muestras pareadas. Se recomienda implementar mejoras en infraestructura, capacitación del personal y medidas de control microbiológico para reducir el riesgo de transmisión de ECEH, además de realizar estudios futuros para determinar si los aislados pareados corresponden a cepas clonales o eventos independientes de contaminación.

Palabras clave: *Escherichia coli* enterohemorrágica, rastro municipal, canales porcinas, serotipo O76 H51, inocuidad alimentaria, salud pública.

ABSTRACT

Foodborne diseases constitute a global public health problem, with enterohemorrhagic *Escherichia coli* (EHEC) being a critical emerging pathogen in meat production. Pork meat represents a potential vehicle for EHEC strains that cause severe enteric conditions and significant economic losses. This research aimed to evaluate the health risk through identification and serotyping of enterohemorrhagic *E. coli* in carcasses and feces of slaughtered pigs at a municipal slaughterhouse in Hidalgo, determining its impact on food safety and public health.

An analytical cross-sectional study was conducted using conventional microbiological methods for isolation and identification of *E. coli*, confirmatory biochemical tests, and specific serotyping. Additionally, the hygienic-sanitary conditions of the slaughterhouse were evaluated through a structured questionnaire of 27 items. A total of 187 *E. coli* strains were obtained, of which 55.1% came from fecal samples and 44.9% from carcasses. Of the total isolates, 5.35% (10/187) were suspicious for EHEC, with 6 EHEC strains confirmed: one belonging to serotype O76, H51 originating from carcass, while the remaining 5 could not be serotyped. The slaughterhouse evaluation yielded a score of 29 points, identifying critical deficiencies in access and ante mortem inspection personnel.

It is concluded that the presence of enterohemorrhagic *E. coli* serotype O76, H51 in carcasses and feces represents a potential risk to public health. The hygienic-sanitary deficiencies contribute to cross-contamination and pathogen persistence, identifying both direct contamination during evisceration and possible cross-contamination in paired samples. It is recommended to implement improvements in infrastructure, personnel training, and microbiological control measures to reduce the risk of EHEC transmission, in addition to conducting future studies to determine whether paired isolates correspond to clonal strains or independent contamination events.

Keywords: enterohemorrhagic *Escherichia coli*, municipal slaughterhouse, pork carcasses, serotype O76 H51, food safety, public health.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Consejo Mexicano de la Carne (2023), la carne de cerdo, es una de las tres principales carnes rojas de consumo en México, es una fuente importante de proteínas, minerales, vitaminas entre otros nutrientes. Se estima que existen 979.3 mil unidades de producción con cría y explotación de animales en México, de las cuales 580.9 mil están dedicadas a la producción de porcino para carne, con un consumo nacional anual por persona que alcanzó 24.96 kg; esta demanda es cubierta en un 55% por la producción Nacional cuyos métodos de faenado son realizados por unidades ipo Inspección Federal, por unidades de sacrificio municipales y mataderos.

Los *Escherichia coli* enterohemorrágicos (ECEH) representan un riesgo significativo para la salud pública a nivel mundial, aunque su prevalencia en cerdos varía considerablemente entre regiones. Estudios recientes han demostrado que los cerdos pueden actuar como reservorios asintomáticos de cepas ECEH, particularmente del serotipo O157, con tasas de detección que oscilan entre 0.2% y 8.9% en granjas comerciales (Tseng et al., 2018). A nivel internacional, países como Canadá y Japón han reportado prevalencias de 2.3% y 3.1% respectivamente, mientras que en diversas regiones europeas se han documentado cifras que alcanzan hasta 5.2% en cerdos de matadero (Ercoli et al., 2016). Los sistemas de producción intensiva, frecuentemente implementados para satisfacer la creciente demanda alimentaria, parecen incrementar los factores de riesgo para la transmisión de estos patógenos, lo que subraya la necesidad de fortalecer las medidas de vigilancia epidemiológica y control en la cadena productiva porcina (Martínez-Vázquez et al., 2018).

El incumplimiento parcial o total de los protocolos estandarizados de faenado, ocasionado por la presión de satisfacer una creciente demanda poblacional, incrementa significativamente el riesgo de contaminación cruzada en las canales por diversos agentes patógenos" (Sofos & Geornaras, 2010) y que están presentes de manera natural del sistema digestivo en mamíferos; dentro de los agentes bacterianos que pueden llegar a producir diarrea en la población infantil se incluye *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH) este es un patógeno intestinal no invasivo que detecta hábilmente pequeñas moléculas para colonizar el intestino grueso del humano; después de consumir agua o alimentos

contaminados. Dependiendo del serotipo es la presentación de la enfermedad y llega a causar diarrea con sangre, colitis hemorrágica y >90 % síndrome urémico hemolítico en humanos (Emilfork, 1999).

Los agentes causales de enfermedades diarreicas son temas de importancia médica a nivel mundial, los sectores de la población que se encuentran más vulnerables son aquellos que su sistema inmune este en desarrollo, se encuentre inmaduro o este inmunosuprimido; de acuerdo con la OMS (2021), las enfermedades diarreicas agudas (EDA) causan aproximadamente 1,700 millones de casos cada año tan solo en niños, constituyendo la segunda causa de muerte en niños con 443 832 defunciones en menores de cinco años, compitiendo en números con las infecciones respiratorias agudas.

Por lo que el objetivo de este estudio fue determinar el análisis de riesgo e identificación de *Escherichia coli* enterohemorrágica en canales y heces de cerdos faenados en un rastro municipal del estado de Hidalgo

REVISIÓN DE LA LITERATURA

ANTECEDENTES

El aumento exponencial de la población humana da como resultado una mayor demanda en la obtención de alimentos, buscando siempre las mejoras de las características sensoriales en esta, una mayor calidad en cuanto a contenido nutricional, inocuidad y limpieza (Goodfray et al., 2010) pero tratando de mantener un precio accesible para el público; para el año 2050 se espera un crecimiento adicional de los alimentos de origen animal de 70% comparado con el año 2010 (Friedrich, 2014). Tan solo en 2023 el consumo de carne alcanzó 272 millones 249 mil toneladas en el mundo, acompañando este consumo, la producción cárnica fue de 276 millones 978 mil toneladas (COMECARNE, 2024). Estas cifras son máximos históricos y punteras en cuanto al comportamiento poblacional en torno a la proteína de origen animal.

La producción y el consumo poseen una relación donde una se ve afectada por la otra, cuando el consumo aumenta, la producción debe aumentar (Thornton, 2010); pero esta regla se ve mermada por la capacidad de cada país para producir y satisfacer la necesidad interna. México ocupó el 6to lugar de consumo anual de carne en 2023, con 9,566 toneladas, de las cuales 2,650 son de carne de cerdo (SIAP, 2023).

A nivel mundial, la carne de cerdo posee la mayor demanda, tan solo en 2023 esta alcanzó una cifra de 113 millones 751 mil toneladas consumidas, de las cuales 2,650 mil toneladas le pertenecen a México, convirtiéndolo en el lugar número 9 a nivel mundial en consumo de carne de este origen, alcanzando un consumo per cápita de 24.96 kg (González-Ortíz, et. al, 2022).

Existen en el mundo aproximadamente un billón de cabezas que proporcionan 100 millones de toneladas métricas de carne ara consumo humano; aproximadamente el 37% de toda la carne consumida en el mundo es perteneciente al cerdo (110 millones de toneladas), en comparación con la carne de res (67 millones de toneladas) y pollo (104 millones) (McGlone, 2023).

Este comportamiento en el mercado contrasta con lo consumido en México. A pesar que la población mexicana en 2023 consumió 4.9 por ciento más carne que en 2022 para un total de

10 millones 317 mil toneladas de carne; la carne de pollo fue la más consumida 35kg/persona/año seguida por la de cerdo 24.96 kg/persona/año (Pastrana *et al.*, 2022).

Los factores que pueden afectar este comportamiento son variados, como el precio, preferencias regionales y tendencias emergentes relacionadas con la salud, además de intereses medioambientales y bienestar animal (Vranken *et al.*, 2014).

A pesar que esta carne no sea la principal de consumo y demanda en México, solo siendo desbancada por la carne de pollo, esta es una de las tres principales carnes rojas de consumo en México por diversas razones:

- Propiedades nutricionales

Esta proteína de origen animal se diferencia de las demás debido a su buena digestibilidad para la población en general, ya que carece de tejido conectivo, tiene un contenido bajo en carbohidratos y lípidos. Además de poseer aminoácidos esenciales y otros nutrientes como hierro de alta disponibilidad, zinc y vitaminas del complejo B como tiamina (vitamina B1), piridoxina (vitamina B6), cobalamina (Vitamina B12) y niacina (vitamina B3). (DE CAPA, *et al.*, 2015).

- Gastronomía

La introducción de la gastronomía de México a la lista representativa del patrimonio cultural inmaterial de la humanidad en el 2010, constituyó un impulso sobre el valor de la identidad social, nutritivo y económico de la cocina nacional. En este ámbito, los elementos esenciales y básicos como el chile, frijol, carne de cerdo entre otros elementos, se les dio una elevada notoriedad (Reyes *et al.*, 2017)

- Industria

Actualmente, la industria porcícola en México representa una de las actividades pecuarias más relevantes dentro del sector agroalimentario. De acuerdo con la Organización de Porcicultores Mexicanos (OPORMEX), la producción de carne de cerdo en el país genera aproximadamente 350,000 empleos directos y 1.7 millones de empleos indirectos a lo largo de toda la cadena productiva (Hernández Cárdenas, 2022). Esta cifra refleja el impacto

económico y social de la porcicultura, que ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años.

- Accesibilidad en precio

El bajo costo de la carne de cerdo ha sido una pieza fundamental para mantenerla en el segundo puesto a nivel nacional como la proteína de origen animal más demandada después de la carne de pollo (FIRA, 2021).

PRODUCCIÓN DE LA CARNE DE CERDO EN MÉXICO

De acuerdo con la región donde se produce la carne de cerdo en México, la tecnificación de la granja cambia. Tomando esto como base, se puede clasificar las regiones en 4: Noreste, centro-occidente, península y región Noreste, centro y sureste. El estado de Hidalgo se localiza en la región Noreste, Centro y Sureste, zona que se caracteriza por predominar las explotaciones muy pequeñas de baja y muy baja tecnificación e incluso de traspatio. (FIRA, 2021).

El 55% de la demanda que se produce en México es cubierto por la producción Nacional, la demanda restante se compensa con la importación de 1 millón de toneladas anuales de países como Estados Unidos (88%) y Canadá (12%). México es el tercer importador de carne de cerdo en el mundo (Magaña, 2023).

Resultado de la demanda poblacional, los métodos de faenado para el procesamiento de la carne, producción y obtención de esta están siendo mejorados para llegar a resultados más saludables y benevolentes, sustentando el bienestar animal y la inocuidad de la carne y sus derivados obtenidos (Quispe, 2018)

La Secretaría de Salud (1995) establece en la NOM-120-SSA1-1994 que deben aplicarse medidas de higiene y sanidad rigurosas durante el procesamiento de alimentos para evitar riesgos microbiológicos para poder obtener una canal lo más inocua posible, existen métodos y manejo del animal durante el sacrificio y limpieza de la canal para evitar contaminación cruzada, crecimiento bacteriano dentro del establecimiento y eliminar vectores tanto humanos como de utensilios.

De acuerdo al compendio COMECARNE (2024), del 100%, es decir un estimado total de 21,100 cabezas de porcinos del faenado de la producción Nacional se lleva a cabo de la manera descrita en la Figura 1.

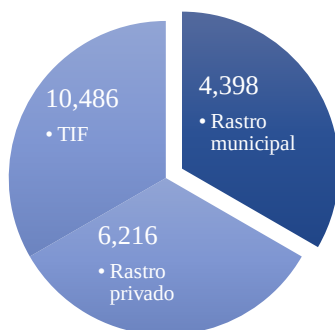


FIGURA 1 Distribución de los porcinos faenados en México expresados en miles de porcinos. (COMECARNE, 2024).

La gráfica nos indica que cada año son faenados más de 4,000 porcinos en rastros municipales, los cuales son destinados para el consumo de las familias mexicanas., 10,000 son faenados en establecimientos tipo TIF, y más de 6,000 en rastros de origen privado.

OBTENCIÓN DE LA CARNE PARA CONSUMO

La obtención de carne para el consumo humano es un proceso fundamental dentro de la cadena alimentaria, y tiene lugar principalmente en instalaciones especializadas conocidas como rastros o mataderos. Estos espacios están diseñados para llevar a cabo el sacrificio de animales de abasto, bajo condiciones higiénicas, sanitarias y de bienestar animal, con el fin de garantizar productos cárnicos seguros y de alta calidad para el consumidor final (Miranda-de la Lama y Genaro, 2013).

Los rastros, también conocidos como mataderos o establecimientos de sacrificio, pueden clasificarse en distintos tipos según sus características operativas, tecnológicas y regulatorias.

Esta clasificación permite distinguir el grado de cumplimiento en cuanto a higiene, bienestar animal y calidad del producto final (Martínez, 2019).

Los rastros Tipo Inspección Federal (TIF), están regulados y supervisados por la autoridad sanitaria federal como SENASICA en México. Cumplen con altos estándares de higiene, sanidad y bienestar animal. La carne que se obtiene en los rastros TIF puede comercializarse a nivel nacional e internacional, ya que cuenta con certificaciones que garantizan su inocuidad. Estos rastros suelen estar bien equipados y automatizados, y son clave para la exportación de productos cárnicos (Mozhiarasi, et al., 2022).

Los rastros municipales, son instalaciones administradas generalmente por los gobiernos locales. Su función principal es abastecer de carne a las comunidades o municipios donde se ubican. Suelen tener una capacidad de sacrificio media y, en algunos casos, operan con equipos básicos o tradicionales. La implementación de normas sanitarias puede variar dependiendo de la región (Martínez, 2019).

Los establecimientos municipales para el faenado y sacrificio humanitario de animales toman como base la Norma Oficial Mexicana NOM-194-SSA1_2004, cualquier otro establecimiento donde se realice matanza de ganado para consumo humano fuera de Rastros Municipales se considera clandestina (Reglamento del Rastro Municipal de Pachuca de Soto, 1996).

Según la Norma Oficial Mexicana, todas las unidades o mataderos deberán contar como mínimo dos áreas cerradas, una sucia y una limpia, corrales, áreas de desembarque de animales y área de carga de canales y vísceras. Esta distribución de las áreas en el establecimiento permite una mejor circulación de los productos durante todo el proceso hasta convertirse en una canal. La correcta distribución de las áreas de rastros disminuye la probabilidad de contaminar la carne y derivados de manera cruzada.

El proceso de sacrificio y faenado de cerdos en un rastro sigue una serie de pasos bien definidos que garantizan la inocuidad del producto, el bienestar animal y el cumplimiento de las normas sanitarias. Para visualizar de manera clara y ordenada estas etapas, se emplea un diagrama de flujo, herramienta que permite representar gráficamente cada fase del procedimiento, así como los puntos de control e inspección necesarios. Este diagrama no solo

facilita la comprensión del proceso, sino que también ayuda a identificar posibles áreas de mejora en términos de eficiencia, higiene y manejo del animal. Cada paso debe ejecutarse cuidadosamente, ya que influye directamente en la calidad de la carne, la seguridad alimentaria y el respeto a la vida del animal.

A continuación, se detalla el proceso de obtención de la carne tomando como base el documento Slaughterhouse and poultry wastes: management practices, feedstocks for renewable energy production, and recovery of value added products de Mozhiarasi, V. & Natarajan, T.S. (2022).





Figura 2 Esquema de la obtención de la carne, modificado de NOM -194-SSA1-2004.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FAENADO DE CERDOS

El proceso de obtención de carne porcina en los rastros municipales sigue un flujo sistemático que garantiza la inocuidad del producto final. La secuencia comienza con la recepción de animales, donde se verifica la documentación sanitaria como la guía de tránsito y el

certificado zoosanitario. Los cerdos son registrados para asegurar la trazabilidad y colocados en corrales de recepción para un reposo obligatorio de mínimo 12 horas antes del sacrificio, conforme a la NOM-033-SAG/ZOO-2014. Durante este tiempo, se les proporciona agua potable *ad libitum* sin alimento.

Posteriormente, se realiza la inspección antemortem a cargo de un Médico Veterinario Responsable Autorizado, quien evalúa los signos vitales, condición física, estado de hidratación y comportamiento del animal. Esta inspección permite identificar animales sospechosos o con signos de enfermedad, que son separados para un sacrificio especial o rechazados según corresponda. Todos los hallazgos se documentan en formatos oficiales.

Los animales aprobados siguen al proceso de aturdimiento mediante métodos autorizados como electronarcosis o pistola de perno cautivo, según establece la NOM-033-SAG/ZOO-2014. Se verifica la efectiva inconsciencia del animal mediante la ausencia de reflejos corneales, respiración rítmica y tono muscular. Inmediatamente después, se procede al izado por las extremidades posteriores utilizando un sistema de rieles elevados.

El desangrado debe realizarse en un tiempo máximo de 30 segundos post-insensibilización, mediante el corte de los principales vasos sanguíneos del cuello. La sangre se recolecta en canales sanitarios para su adecuada disposición, cumpliendo con las normas ambientales vigentes.

El escaldado se efectúa sumergiendo al cerdo en un tanque con agua a temperatura controlada entre 60-65°C durante 5-6 minutos, lo que facilita el posterior depilado. Este proceso se realiza primero con máquina depiladora rotativa y se complementa con depilado manual para zonas de difícil acceso. Después se realiza un lavado con agua potable a presión.

Se continúa con el flameado para eliminar pelos residuales y reducir la carga microbiana superficial. Luego se procede a la evisceración, que incluye la apertura de la cavidad abdominal mediante un corte longitudinal y la extracción de vísceras abdominales (estómago, intestinos, bazo, hígado) y torácicas (corazón, pulmones, tráquea). Las vísceras se separan e identifican para correlacionarlas con su canal correspondiente durante la inspección sanitaria.

La inspección postmortem es realizada por el Médico Veterinario e incluye el examen visual y palpación de órganos y tejidos, inspección de ganglios linfáticos y cortes específicos en órganos según el protocolo de la NOM-194-SSA1-2004. Se toman muestras para análisis microbiológico cuando sea necesario. Las canales y vísceras aptas para consumo humano reciben un marcado sanitario oficial, mientras que los órganos o canales no aptos son decomisados parcial o totalmente, registrándose en la bitácora oficial.

Tras la aprobación sanitaria, se procede a la división de la canal mediante un corte longitudinal por la columna vertebral, obteniendo dos medias canales. Estas son sometidas a un riguroso lavado con agua potable a presión y aplicación de solución desinfectante aprobada (como ácido acético al 1.5-2%), seguido de un escurrido de al menos 10 minutos.

Las canales son pesadas con exactitud para su correcta valoración comercial y posteriormente clasificadas según estándares de calidad establecidos. La refrigeración se realiza en cámaras frigoríficas hasta alcanzar una temperatura interna máxima de 7°C, conforme a la NOM-213-SSA1-2002, con registros de temperatura cada 4 horas y adecuada separación entre canales.

El despiece/cortes se efectúa en salas de temperatura controlada (máximo 10°C), donde se realizan los cortes normalizados y el deshuesado cuando sea requerido, con una inspección visual final de los productos.

Finalmente, se procede al empaclado en materiales aprobados para contacto con alimentos y al etiquetado con información de trazabilidad según la normativa vigente, incluyendo el sello oficial del rastro, número de lote, fecha de sacrificio y caducidad. El almacenamiento y distribución se realiza en cámaras y vehículos refrigerados a temperatura máxima de 4°C, con verificación previa a la carga y documentación completa del destino.

Todo este proceso está sujeto a un riguroso control y vigilancia sanitaria que incluye muestreos microbiológicos periódicos, registros diarios de operación, programas documentados de limpieza y desinfección, y evaluación del personal en buenas prácticas de manufactura, asegurando una trazabilidad completa "del corral a la mesa".

ANÁLISIS DE RIESGO E IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS

El análisis de riesgo y la identificación de puntos críticos de control son fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria en los rastros municipales de cerdos en México. Estos procesos son clave para evitar la contaminación de la carne y proteger la salud pública. A través de la implementación de un Sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP), los rastros pueden controlar eficazmente los riesgos asociados con el sacrificio y procesamiento de cerdos, reduciendo las probabilidades de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs). En este sentido, es esencial identificar los peligros biológicos, químicos y físicos en cada etapa de la cadena productiva, desde el sacrificio hasta la distribución (Hernández, 2019).

Análisis de Riesgos y Evaluación de Riesgos

El análisis de riesgos se enfoca en identificar los peligros en el proceso de sacrificio y procesamiento de cerdos. Estos peligros incluyen riesgos biológicos, como bacterias patógenas (*Salmonella*, *Escherichia coli* enterohemorrágica, entre otros), riesgos físicos, como fragmentos metálicos, y riesgos químicos, como residuos de medicamentos veterinarios (García et al., 2018). Para evaluar estos riesgos, es importante considerar la probabilidad de que ocurran y la severidad de sus consecuencias. La evaluación de riesgos

debe realizarse considerando el contexto local, las condiciones operacionales de cada rastro y las prácticas de manejo de los animales (Comisión Nacional del Agua, 2020). Su objetivo principal es identificar, evaluar y controlar los peligros físicos, químicos y biológicos que pueden afectar la seguridad del producto final. A diferencia de los métodos tradicionales que se enfocan en la inspección del producto terminado, el sistema HACCP actúa de forma proactiva, estableciendo controles en los puntos críticos del proceso para evitar la ocurrencia de problemas antes de que sucedan. (Martínez et al. 2016)

Manejo de riesgo y comunicación del riesgo

El manejo de riesgos es el conjunto de acciones y procedimientos aplicados para mitigar los peligros identificados en el análisis de riesgos. En los rastros, esto incluye controlar las condiciones sanitarias, como la temperatura, el almacenamiento adecuado de productos y el manejo adecuado del agua potable. Es esencial también la comunicación del riesgo, ya que los trabajadores deben conocer los riesgos a los que están expuestos y las medidas preventivas a seguir (Gómez et al., 2021). Para ello, es necesario realizar capacitaciones constantes sobre prácticas de higiene, manejo adecuado de los cerdos y limpieza de instalaciones, con el objetivo de garantizar que todos los involucrados en el proceso comprendan la importancia de cada paso en la seguridad alimentaria.

Antes de implementar un sistema HACCP eficaz, es necesario establecer una base sólida mediante los programas de prerequisites. Estos son condiciones y prácticas higiénicas básicas que deben cumplirse en toda empresa alimentaria para reducir el riesgo de contaminación y asegurar un entorno controlado. Los prerequisites no son parte directa del análisis de peligros, pero sirven como soporte fundamental para que el sistema HACCP funcione correctamente. Según López (2025), los programas de prerequisites, como las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y los Procedimientos Operativos Estandarizados de Saneamiento (POES), son esenciales para garantizar la inocuidad alimentaria y facilitar la implementación efectiva del sistema HACCP. Estos programas abordan aspectos clave como la higiene del personal, la limpieza de instalaciones y equipos, el control de plagas y la gestión de residuos, creando un entorno seguro para la producción de alimentos inocuos. La

implementación adecuada de BPM y POES contribuye significativamente a la prevención de riesgos en el proceso de producción y, por ende, al éxito del sistema HACCP (López, 2025).

A continuación, se enumeran los principales programas de prerequisites:

Los Procedimientos Operativos Estándares de Sanitación (POES) son fundamentales para mantener condiciones higiénicas durante el sacrificio y procesamiento de los cerdos. Estos procedimientos deben abarcar desde la limpieza de las instalaciones hasta la desinfección de los equipos utilizados. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-050-SAG/G-2017 (SAGARPA, 2017), los POES deben ser monitoreados y actualizados regularmente para asegurar que se cumpla con los estándares de higiene y para reducir la propagación de patógenos.

La integración de ambos sistemas garantiza una mayor eficiencia en la prevención de la contaminación y asegura la calidad de la carne. La integración de los sistemas HACCP con programas de prerequisites como las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y los Procedimientos Operativos Estándar de Saneamiento (POES) es esencial para garantizar la inocuidad alimentaria en la industria cárnica. Las BPM establecen condiciones y prácticas básicas que deben cumplirse en toda empresa alimentaria para reducir el riesgo de contaminación y asegurar un entorno controlado (Canadian Beef, 2020). Por su parte, los POES detallan procedimientos específicos para mantener las condiciones sanitarias durante el proceso de producción, incluyendo la limpieza y desinfección de equipos y superficies, control de plagas y manejo adecuado del personal (Mendoza, 2020). La implementación efectiva de estos programas de prerequisites proporciona una base sólida sobre la cual se puede construir un sistema HACCP robusto, permitiendo la identificación y control de peligros en puntos críticos del proceso (González, 2020). Además, la combinación de BPM, POES y HACCP no solo mejora la seguridad alimentaria, sino que también fortalece la competitividad de las empresas en mercados nacionales e internacionales al asegurar productos cárnicos de alta calidad y libres de contaminantes (Canadian Beef, 2020).

Implementación del Sistema HACCP

La adopción del sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP) requiere seguir una serie de pasos estructurados que garantizan la seguridad alimentaria a lo largo de todo el proceso productivo. A continuación, se describen las etapas principales:

1. Formación del equipo HACCP

La formación del equipo HACCP se refiere al proceso de seleccionar y capacitar a un grupo de personas dentro de una organización que serán responsables de implementar y mantener el sistema HACCP. Este equipo tiene como objetivo identificar, evaluar y controlar los riesgos en el proceso de producción de alimentos para garantizar la seguridad alimentaria

2. Descripción del producto

Una de las primeras etapas para implementar el HACCP es la descripción detallada del producto, lo cual implica especificar sus características, los ingredientes y los procesos necesarios para su producción. Es una explicación detallada de las características y especificaciones del producto que se va a producir, manipular o distribuir. Esta descripción es un componente esencial para la implementación de un sistema HACCP, ya que ayuda a identificar los peligros potenciales, los puntos críticos de control y las medidas preventivas en el proceso de producción (Tomasevic, 2020). Estas deben de incluir el nombre específico del producto alimenticio, listado completo de ingredientes utilizados en la producción, con énfasis en aquellos que puedan presentar riesgos (como alérgenos), descripción de los pasos involucrados en la fabricación o procesamiento del producto, condiciones de almacenamiento como temperatura, humedad, y otras condiciones específicas para mantener la seguridad del producto, información sobre la duración del producto antes de que pierda su calidad o seguridad, tipo de embalaje utilizado para el producto y si tiene alguna implicación en su seguridad, instrucciones sobre cómo se debe manejar y consumir el producto. Por lo que la descripción del producto ayuda a que el equipo de HACCP pueda identificar y evaluar correctamente los peligros asociados al producto, lo que facilita la implementación de medidas de control adecuadas para garantizar la seguridad alimentaria (Sánchez, 2021).

3. Elaboración de diagrama de flujo

La elaboración de un diagrama de flujo se refiere a la creación de un esquema visual o gráfico que representa todas las etapas del proceso de producción de un alimento, desde la recepción de materias primas hasta la distribución del producto final. Este diagrama es una herramienta clave porque permite visualizar claramente el proceso, identificar en qué puntos pueden aparecer peligros (físicos, químicos o biológicos) y ubicar los Puntos Críticos de Control (PCC) más fácilmente. Según López et al. (2022), este diagrama debe ser preciso, reflejando de manera clara cada actividad realizada en el rastro.

4. Principios del Sistema HACCP

El sistema HACCP se basa en siete principios fundamentales que proporcionan un marco estructurado y lógico para garantizar la inocuidad de los alimentos. Estos principios permiten identificar los peligros potenciales dentro del proceso productivo, establecer controles en los puntos críticos y asegurar que los alimentos que llegan al consumidor sean seguros para su consumo (Omer et al, 2018).

Cada principio cumple una función clave dentro del sistema, desde el análisis de peligros hasta la verificación de su correcto funcionamiento. En conjunto, forman una metodología preventiva que permite a las empresas alimentarias controlar de manera proactiva los riesgos, en lugar de reaccionar a las fallas una vez que ocurren (Nastasijevic et al. 2017).

La correcta aplicación de estos principios no solo mejora la seguridad del producto final, sino que también fortalece la gestión de calidad, el cumplimiento normativo y la confianza del consumidor.

A continuación, se describen los siete principios del sistema HACCP, esenciales para el diseño e implementación de un plan de control efectivo:

a) Análisis de peligros

El primer principio consiste en realizar un análisis de los peligros que puedan comprometer la inocuidad del alimento durante su producción. Estos peligros pueden ser de tipo biológico, químicos o físicos. Para cada etapa del proceso, se identifican y evalúan estos posibles riesgos considerando su probabilidad de ocurrencia y la severidad de sus consecuencias. El objetivo es determinar cuáles son los peligros significativos que deben ser controlados para proteger la salud del consumidor (Mozhiarasi et al. 2022).

- a) Determinación de los Puntos Críticos de Control (PCC)
- b) Establecimiento de los límites críticos
- c) Establecimiento de un sistema de monitoreo
- d) Establecimiento de acciones correctivas
- e) Establecimiento de documentación y registros

ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR ALIMENTOS

Las enfermedades, según el agente etiológico y su origen, se pueden clasificar en distintos subtipos, uno de los cuales se denomina Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024), se estima que cada año, aproximadamente 600 millones de personas se enferman tras consumir alimentos contaminados con agentes patógenos como bacterias, virus, parásitos o sustancias químicas. Los niños menores de 5 años representan una proporción significativa de las muertes por enfermedades transmitidas por alimentos, con 125,000 muertes registradas anualmente en este grupo etario. Las enfermedades diarreicas, causadas por patógenos como *E. coli*, norovirus, *Campylobacter* y *Salmonella* no tifoidea, constituyen más del 50% de la carga global de enfermedades transmitidas por alimentos (OMS, 2024).

Un brote de Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA) se define como un incidente en el que dos o más personas presentan una enfermedad semejante después de la ingestión de un mismo alimento, y los análisis epidemiológicos apuntan al alimento como el origen de la enfermedad (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2020). Es importante señalar que un único caso de enfermedades graves como el botulismo o intoxicaciones químicas puede ser suficiente para desencadenar acciones relacionadas con un brote, debido a la gravedad de la enfermedad provocada por esos agentes (OPS, 2020).

Los alimentos de origen animal son frecuentemente los involucrados en epidemias y casos de ETA. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024) señala que cada año, aproximadamente 600 millones de personas se enferman tras consumir alimentos

contaminados con agentes patógenos como bacterias, virus, parásitos o sustancias químicas. Estas enfermedades y muertes son en su mayoría prevenibles. Los niños menores de 5 años representan una proporción significativa de las muertes por enfermedades transmitidas por alimentos, con 125,000 muertes registradas anualmente en este grupo etario, estas enfermedades y muertes son en su mayoría prevenibles (OMS, 2024).

Muchos de los brotes pueden o no ser notificados por diversos factores, como la comunicación de los consumidores, el personal médico tratante y las actividades de vigilancia sanitaria de las secretarías municipales. La probabilidad de que un brote o caso se reconozca y notifique por las autoridades de salud depende, entre otros factores, de la comunicación de los consumidores, del relato de los médicos y de las actividades de vigilancia sanitaria de las secretarías municipales, departamentales y provinciales de salud (OPS, 2020).

La sola presencia de las bacterias no es indicativo de la enfermedad; también influye la cantidad de las mismas en los alimentos, además de regirse por factores intrínsecos que favorezcan el desarrollo de las colonias de bacterias. Para que ocurra una ETA, el patógeno o sus toxinas deben estar presentes en el alimento en cantidad suficiente para causar una infección o producir toxinas, y el alimento debe ser capaz de sustentar el crecimiento de los patógenos (OPS, 2020).

Provocando el deceso de 420,000 personas, de los cuales se estima que el 40%, equivalente a 125,000 muertes, son de niños menores de 5 años (OMS, 2024).

Estas cifras alarmantes deben ser consideradas por los líderes de las naciones, estados y municipios del mundo, quienes deben someter a vigilancia y renovación de tecnologías, metodologías y estatutos los procedimientos de faenado y obtención de la carne. La implementación de sistemas de gestión de inocuidad alimentaria, como el HACCP, es esencial para prevenir riesgos microbiológicos y garantizar la salud pública (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2020).

La inversión en la salud alimentaria de la población es un tema de debate debido a la cantidad de recursos a convenir. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), los

alimentos contaminados causan aproximadamente 600 millones de enfermedades y 420,000 muertes prematuras cada año, con un costo estimado de 95,000 millones de dólares anuales en pérdida de productividad y gastos médicos en países de ingresos bajos y medianos.

Las características nutricionales y físicas de la carne cruda permiten el desarrollo de microorganismos desde el momento de la transformación de la canal. Un manejo eficaz y oportuno puede mitigar este crecimiento bacteriano, y a través de un manejo adecuado dentro de las normas mexicanas de manejo de carne y sus derivados, se puede obtener un producto inocuo libre de agentes microbiológicos que pueden poner en riesgo la salud de la población en general (González, 2020).

HISTORIA

Theodor Escherich en su publicación de 1885 describió bastones cortos y delgados de heces en infantes, las cuales denominó *Bacterium coli commune*. A pesar de ser una bacteria comensal inofensiva, existen cepas que la pueden convertir en un patógeno capaz de adaptarse y causar una gran variedad de enfermedades en humanos, mamíferos y otros animales, estos padecimientos pueden ser localizados en el tracto gastrointestinal, urinario y provocar una bacteriemia que puede llegar hasta el sistema nervioso central (Croxen, 2013).

Los agentes causales de enfermedades diarreicas son temas de importancia médica a nivel mundial, provocando muertes en estratos poblacionales cuyo sistema inmune este inmaduro, comprometido o sus recursos monetarios le impidan acceder a servicios de salud de calidad; este segmento incluye pero no se limita a la población infantil alrededor del mundo, en especial aquellos países en vías de desarrollo como México y más específicamente el estado de Hidalgo (Ramírez, 2023)

Dentro de los agentes bacterianos que pueden llegar a producir diarrea en la población infantil se incluye *Eschericia coli* cuyas características fenotípicas pueden llegar a producir enfermedades digestivas; otras serovariedades de esta bacteria como *Eschericia coli*

productora de toxina Shiga puede desencadenar el Síndrome urémico hemolítico (SUH) (Scheiring et al., 2010).

Por otro lado, la presencia de esta bacteria se ha utilizado como organismo indicador de coliformes, es decir, una contaminación de origen fecal en carne, agua, moluscos, productos lácteos y otros alimentos (Kornacki et al., 2013).

El género *Escherichia coli* ha sido reconocido durante más de un siglo, distinguiéndose entre cepas patogénicas y no patogénicas. *E. coli* es una bacteria Gram negativa, presente en el tracto digestivo de animales, principalmente en la porción distal. El ganado bovino es el principal reservorio, aunque también se encuentra en caprinos, porcinos, aves y otras especies animales. Esta bacteria puede sobrevivir en el medio ambiente durante varios días y en agua puede permanecer durante meses, dependiendo de las condiciones ambientales y la presencia de nutrientes (Ramírez-Castillo et al., 2020; Montero et al., 2019).

E. coli tiene un interés significativo para los seres humanos debido a su capacidad para colonizar el intestino humano pocas horas después del nacimiento, convirtiéndose en la bacteria anaerobia facultativa más abundante de la microbiota intestinal. Esta colonización temprana es esencial para el desarrollo del sistema inmunológico y la prevención de infecciones por patógenos (Hugon et al., 2022; Moline-Velazquez et al., 2021).

Las características metabólicas y fenotípicas de *E. coli* permiten su crecimiento exponencial en carne y productos de origen animal que han estado contaminados o han tenido un manejo deficiente en el proceso de obtención de la carne o sus derivados (Aslam et al., 2018). Este género está formado por bacilos anaerobios facultativos, pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae (Palmieri et al., 2021). A pesar de que la mayoría de cepas son inofensivas en individuos cuyo sistema inmune se encuentre sano o en buenas condiciones, existen cepas cuyos factores de virulencia desempeñan un papel importante en enfermedades diarreicas en individuos jóvenes, gerontes o inmunodeprimidos (Navarro-Garcia et al., 2020).

Estas cepas a través de mecanismos adaptativos a nivel horizontal de genes han ido desarrollando y adquiriendo combinaciones específicas de virulencia, clasificando las cepas en distintos patotipos descritos (Liao et al., 2022). Los principales patotipos de *E. coli*

asociados a enfermedades transmitidas por alimentos incluyen cepas productoras de toxina Shiga (STEC), enteropatógenicas (EPEC), enterotoxigénicas (ETEC), enteroagregativas (EAEC), enteroinvasivas (EIEC) y de adherencia difusa (DAEC), cada una con mecanismos de patogenicidad distintivos (Yang et al., 2017). La transferencia horizontal de genes mediante elementos genéticos móviles como plásmidos, transposones y bacteriófagos ha permitido la evolución rápida de estas cepas y la emergencia de patógenos con mayor virulencia y resistencia antimicrobiana (Barroso-Batista et al., 2020).

En rastros y plantas procesadoras de carne, la contaminación por *E. coli* patógena representa un riesgo significativo para la salud pública, especialmente cuando los procedimientos de higiene, control de temperatura y buenas prácticas de manufactura no se aplican correctamente (Castro et al., 2019). Las superficies de contacto, equipos, manipuladores y el ambiente pueden servir como fuentes de contaminación cruzada durante el proceso de faenado (Ny et al., 2017). La implementación de sistemas de análisis de peligros y puntos críticos de control (HACCP) ha demostrado ser efectiva para reducir la incidencia de contaminación por *E. coli* patógena en estos entornos (Yang et al., 2022).

ESCHERICIA COLI DIARREOGÉNICA O DEC

Esta cepa clasificatoria posee una característica determinante en el sitio de colonización del huésped, además la virulencia, síntomas y consecuencias que puede desencadenar la enfermedad resultante permite una subclasificación (Pastor, 2019). Estas cepas tienen la característica de causar diarrea, producir una histopatología en el epitelio intestinal en la cual el sitio de unión de las bacterias provoca una lisis.

A su vez, las categorías difieren entre sí por su patogénesis y propiedades de virulencia, comprendiendo un grupo distinto de serotipos O:H (Morales, 2017).

Los serotipos se basan en los antígenos somáticos O que son polisacáridos termoestables y el antígeno flagelar H, que es termolábil y proteico.

SUBLASIFICACIÓN DE *ESCHERICHIA COLI* DIARROGÉNICA

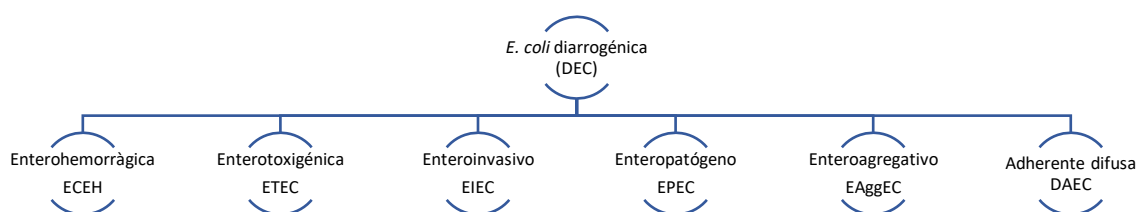


FIGURA 3 Subclasificación de *Escherichia coli*, modificado de Aguilar (2015).

Esta clasificación agrupa factores de virulencia comunes, cuando existe una integración entre estos tipos de factores se le denomina patógenos híbridos los cuales poseen un potencial más alto de virulencia (Navarro-Garcia et al., 2023).

En las zoonosis, la categoría más importante es la enterohemorrágica, causando los problemas de salud más graves (One Health Zoonotic Disease Prioritization [OHZDP], 2024). *Escherichia coli* se clasifica en diversos patotipos según sus factores de virulencia, incluyendo: enteropatogénica (EPEC), enterohemorrágica (ECEH), enterotoxigénica (ETEC), enteroagregativa (EAEC), enteroinvasiva (EIEC), de adherencia difusa (DAEC), adherente invasiva (AIEC), uropatogénica (UPEC) y asociada a meningitis neonatal (NMEC).

Navarro-Garcia et al. (2023) describen que el término enteropatogénica se utilizó inicialmente para caracterizar cepas de *E. coli* asociadas con brotes epidémicos de diarrea infantil, manifestándose principalmente con diarrea acuosa y presencia variable de fiebre. Los avances en la clasificación molecular han permitido identificar factores de virulencia

específicos que diferencian estos patotipos, siendo la producción de toxinas Shiga el principal marcador de la ECEH.

E. COLI ENTEROHEMORRÁGICA

La *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH) representa un patógeno zoonótico de significativa importancia clínica debido a su capacidad para inducir colitis hemorrágica y síndrome urémico hemolítico. La patogenicidad de ECEH se fundamenta en un sofisticado repertorio de factores de virulencia que actúan sinérgicamente para establecer la infección (Tran et al., 2018).

El principal determinante de virulencia en ECEH es la producción de toxinas Shiga (Stx), clasificadas principalmente en Stx1 y Stx2, las cuales poseen una estructura homóloga, pero con potencias patogénicas diferentes. Estas toxinas AB5 exhiben una estructura pentamérica en la subunidad B que facilita su adhesión específica a receptores globotriaosilceramida (Gb3) presentes en el epitelio intestinal y células endoteliales renales. La subunidad A catalítica, una vez internalizada, escinde específicamente el ARN ribosómico 28S, inhibiendo irreversiblemente la síntesis proteica celular y desencadenando cascadas apoptóticas (Melton-Celsa, 2020).

El segundo determinante de virulencia crítico es la isla de patogenicidad LEE (locus of enterocyte effacement), un elemento genético móvil que codifica para el sistema de secreción tipo III (T3SS), intimina y Tir (receptor translocado de intimina). Este sistema facilita la formación de lesiones de adherencia y borrado (A/E) caracterizadas por la destrucción de microvellosidades intestinales y la reorganización del citoesqueleto de actina, generando pedestales característicos. La intimina, una adhesina de membrana externa, interactúa específicamente con su receptor Tir previamente inyectado en la célula hospedera, estableciendo una unión íntima entre la bacteria y el enterocito (Franzin y Sircili, 2015).

Adicionalmente, ECEH posee el plásmido pO157 de 92 kb que codifica para múltiples factores de virulencia accesorios, incluyendo la enterohemolisina (Ehx), una toxina formadora de poros que lisa eritrocitos liberando hemoglobina como fuente de hierro; la catalasa-peroxidasa KatP que confiere resistencia al estrés oxidativo; una serina proteasa EspP con actividad citotóxica; y el sistema de secreción tipo II que facilita la exportación de proteínas al entorno extracelular (Yang et al., 2017).

Investigaciones moleculares han identificado efectores no codificados en LEE que son translocados a través del T3SS, ampliando el repertorio de mecanismos que subvierten las funciones celulares del hospedero. Estos incluyen proteínas Nle (non-LEE encoded effectors) que colectivamente inhiben vías de señalización proinflamatorias, facilitando la evasión inmune (Cepeda-Molero et al., 2017).

La regulación de estos factores de virulencia es orquestada por sistemas regulatorios jerárquicos que responden a señales ambientales específicas, incluyendo concentraciones de hierro, temperatura, osmolaridad y densidad poblacional mediante quorum sensing, garantizando su expresión sincronizada durante las distintas fases de infección (Gomes et al., 2020). La comprensión molecular de estos mecanismos de virulencia proporciona bases fundamentales para el desarrollo de aproximaciones terapéuticas y profilácticas dirigidas contra este patógeno de significativa relevancia en salud pública (Monteiro et al., 2016).

TRANSMISIÓN

Las cepas se transmiten a través de vía fecal-oral por contacto directo, a través de fuentes de agua y alimentos contaminados o fómites. Los brotes en guarderías y centros de cuidado infantil ya no son comunes como los brotes en Chongqing, China, donde se determinó que las manos del personal médico eran las portadoras de la bacteria. (Wu y Peng, 1992). Como estos existen cientos de casos donde las fuentes de infección fueron fuentes de agua, vegetales o productos de origen animal.

PATOGÉNESIS

La patogénesis de las infecciones por *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH) constituye un proceso multifactorial caracterizado por una compleja interacción entre los factores de virulencia bacterianos y las respuestas del hospedador. Este patógeno zoonótico requiere una dosis infecciosa excepcionalmente baja (10-100 unidades formadoras de colonias), lo que explica parcialmente su elevada transmisibilidad (Karmali et al., 2020).

Colonización Intestinal

El proceso patogénico inicia con la ingesta de alimentos o agua contaminados, seguido por la resistencia a la acidez gástrica mediante sistemas de respuesta a estrés ácido altamente eficientes que permiten la supervivencia bacteriana durante el tránsito gástrico (Lim et al., 2017). Al alcanzar el intestino grueso, particularmente el colon ascendente y el ciego, ECEH despliega un sofisticado arsenal adhesivo que incluye fimbrias, adhesinas autoaglutinantes y el sistema de secreción tipo III codificado en la isla de patogenicidad LEE (Garcés-Sánchez et al., 2019).

La adhesión inicial mediada por fimbrias (ECP, Curli, HCP) y adhesinas afimbriales (EhaA, EhaB) facilita el contacto primario con la mucosa intestinal. Posteriormente, mediante el sistema de secreción tipo III (T3SS), ECEH inyecta efectores bacterianos directamente en el citoplasma de los enterocitos, incluido el receptor translocado de intimina (Tir), que se inserta en la membrana celular y sirve como receptor para la adhesina bacteriana intimina. Esta interacción Tir-intimina establece una unión íntima entre la bacteria y el enterocito, desencadenando una profunda reorganización del citoesqueleto de actina que resulta en la formación de pedestales característicos y la destrucción de microvellosidades (lesiones de adherencia y borrado) (Furniss et al., 2019).

Manifestaciones Sistémicas y Síndrome Urémico Hemolítico

El síndrome urémico hemolítico (SUH), la complicación más severa de las infecciones por ECEH, se desarrolla en aproximadamente 5-15% de los casos, con mayor incidencia en población pediátrica. La patogénesis del SUH se fundamenta en el daño endotelial microvascular mediado por toxinas Shiga que desencadena:

1. Daño endotelial glomerular que activa mecanismos protrombóticos y antifibrinolíticos.
2. Activación plaquetaria con formación de microtrombos en la microvasculatura renal.
3. Hemólisis mecánica de eritrocitos al atravesar capilares parcialmente ocluidos.

4. Reducción de la filtración glomerular secundaria a la microangiopatía trombótica.
5. Respuesta inflamatoria sistémica que amplifica el daño tisular (Zoja et al., 2021).

La lesión neurológica, otra manifestación grave, resulta de efectos directos de Stx sobre células neurales que expresan Gb3 y daño endotelial de la microvasculatura cerebral con consecuente isquemia, edema y microhemorragias (Trachtman et al., 2018).

MANIFESTACIONES CLÍNICAS DE LAS INFECCIONES POR ECEH

Las infecciones causadas por *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH) presentan un espectro clínico heterogéneo que abarca desde estados de portador asintomático hasta condiciones potencialmente letales como el síndrome urémico hemolítico (SUH) y la púrpura trombocitopénica trombótica (PTT). La presentación clínica varía considerablemente según factores del patógeno (serotipo, perfil de toxinas, factores de adhesión) y del hospedador (edad, estado inmunológico, polimorfismos genéticos) (Tarr et al., 2018).

Período de incubación y manifestaciones gastrointestinales

El período de incubación oscila típicamente entre 3 y 8 días, con una media de 3-4 días, significativamente más prolongado que el observado en otras infecciones entéricas bacterianas. La enfermedad se inicia característicamente con dolor abdominal de intensidad moderada a severa y diarrea acuosa no sanguinolenta, que en aproximadamente 80-90% de los casos evoluciona a diarrea sanguinolenta entre 1-3 días después del inicio de los síntomas (Davis et al., 2019).

La colitis hemorrágica constituye la manifestación gastrointestinal distintiva, caracterizada por:

- Dolor abdominal cólico intenso, frecuentemente localizado en cuadrantes inferiores, que puede simular un cuadro de apendicitis aguda.
- Deposiciones sanguinolentas (hematoquecia), típicamente sin leucocitos fecales significativos, lo que refleja el mecanismo patogénico toxigénico más que invasivo.

- Tenesmo rectal y urgencia defecatoria desproporcionados respecto al volumen fecal evacuado.
- Vómitos en aproximadamente 30-50% de los pacientes, particularmente en población pediátrica.
- Fiebre ausente o de bajo grado ($<38.5^{\circ}\text{C}$) en la mayoría de los pacientes, un hallazgo útil para diferenciar ECEH de otros patógenos enteroinvasivos (Keir et al., 2020).

Los hallazgos endoscópicos revelan una colitis predominantemente derecha con eritema, edema, friabilidad mucosa, erosiones superficiales y hemorragias submucosas. La afectación ileal terminal es frecuente, pudiendo simular enfermedad de Crohn en fase aguda. Histológicamente se observa infiltrado inflamatorio mixto en lámina propia, depleción de mucina, abscesos crípticos y necrosis hemorrágica focal sin invasión tisular profunda (Freedman et al., 2017).

Complicaciones Locales Gastrointestinales

Las complicaciones gastrointestinales incluyen:

- Colitis necrotizante con riesgo de perforación intestinal (1-2% de casos).
- Prolapso rectal, particularmente en población pediátrica.
- Estenosis colónicas tardías secundarias a cicatrización.
- Megacolon tóxico con dilatación colónica >6 cm en adultos y manifestaciones sistémicas de toxicidad.
- Invaginación intestinal, más frecuente en lactantes y preescolares.
- Apendicitis neutrofílica con infiltrado inflamatorio agudo sin obstrucción luminal (Lopez et al., 2016).

La duración media de la colitis hemorrágica es de 4-10 días, aunque la eliminación bacteriana puede prolongarse aproximadamente 13-21 días en niños y 7-9 días en adultos tras la resolución de los síntomas, con implicaciones epidemiológicas relevantes (Ross et al., 2020).

Síndrome Urémico Hemolítico (SUH)

El SUH representa la complicación extraintestinal más grave, desarrollándose en aproximadamente 5-15% de las infecciones por ECEH, con mayor incidencia (10-15%) en

población pediátrica <5 años y ancianos. Esta entidad clínica se caracteriza por la tríada clásica de anemia hemolítica microangiopática, trombocitopenia y lesión renal aguda, manifestándose típicamente 5-13 días después del inicio de la diarrea (Gould et al., 2019).

Las manifestaciones clínicas del SUH incluyen:

- Manifestaciones Renales
- Oligoanuria (diuresis <0.5 ml/kg/h) en 50-65% de los casos.
- Hematuria microscópica o macroscópica (90-95%).
- Proteinuria de grado variable, raramente en rango nefrótico.
- Hipertensión arterial en 47-70% de los pacientes, secundaria a sobrecarga hídrica, activación del sistema renina-angiotensina e isquemia renal.
- Edema en grado variable, desde edema palpebral hasta anasarca.

Evolución y Pronóstico del SUH

El pronóstico del SUH asociado a ECEH ha mejorado sustancialmente con los avances en cuidados intensivos y soporte renal. Aproximadamente 65-70% de los pacientes requieren terapia de reemplazo renal transitoria, con una duración media de 5-7 días. La mortalidad aguda ha disminuido al 3-5%, pero hasta 30% desarrollan secuelas renales a largo plazo (hipertensión arterial, proteinuria, reducción de filtrado glomerular). Los factores pronósticos adversos incluyen: leucocitosis >20,000/mm³, anuria prolongada (>7 días), afectación neurológica severa y edad <2 años o >65 años (Mody et al., 2015).

Otras Manifestaciones Sistémicas

Las manifestaciones extraintestinales y extrarrenales adicionales incluyen:

Manifestaciones Cardiovasculares

- Miocarditis con disfunción ventricular e insuficiencia cardiaca.
- Derrame pericárdico secundario a sobrecarga hídrica o inflamación.
- Arritmias por alteraciones hidroelectrolíticas o isquemia miocárdica.

Manifestaciones Pulmonares

- Edema pulmonar cardiogénico o no cardiogénico (síndrome de distrés respiratorio agudo).
- Hemorragia alveolar difusa por microangiopatía pulmonar.
- Derrame pleural exudativo o trasudativo.

Manifestaciones Pancreáticas

- Pancreatitis aguda con elevación enzimática y manifestaciones clínicas variables.
- Diabetes mellitus transitoria por isquemia pancreática.

Manifestaciones Hepáticas

- Elevación transitoria de transaminasas sin compromiso funcional significativo.
- Colestasis con elevación de bilirrubina y fosfatasa alcalina.

Manifestaciones Osteoarticulares

- Rabdomiólisis con elevación de creatina quinasa y mioglobinuria.
- Artritis reactiva postinfecciosa en fase de convalecencia.

Secuelas a Largo Plazo

El seguimiento longitudinal de pacientes con infecciones por ECEH revela secuelas a largo plazo:

- Nefropatía residual: 30% desarrollan enfermedad renal crónica, hipertensión arterial o proteinuria persistente.
- Secuelas neurológicas: 10-20% presentan déficits cognitivos, trastornos del aprendizaje o epilepsia.
- Síndrome de intestino irritable postinfeccioso: hasta 35% de los pacientes refieren alteraciones persistentes del hábito intestinal y dolor abdominal recurrente.
- Intolerancia a la lactosa: secundaria a daño de disacaridasas del borde en cepillo intestinal.
- Alteraciones psicológicas: trastornos adaptativos y estrés postraumático, particularmente en población pediátrica (Ardissino et al., 2021).

JUSTIFICACIÓN

Una de las necesidades básicas que debe ser cubierta, tanto en México como a nivel internacional es el derecho de una alimentación variada, rica en nutrientes esenciales, inocua y libre de agentes patógenos que sea posible que tengan el potencial de enfermar, dañar la integridad o el tracto gastrointestinal de las personas.

La carne, es una fuente de proteínas de origen animal, cuyas características y metabolización, difieren de las proteínas de origen vegetal debido a la cantidad de aminoácidos requeridos para las personas. La carne en promedio posee entre 63 a 68% de proteína de peso seco, en comparación con la proteína de origen vegetal (excepto las legumbres) que alcanza sólo el 12%.

La seguridad alimentaria es un tema de creciente interés y preocupación a nivel mundial, especialmente en el ámbito de la producción animal destinada al consumo humano. En este contexto, la identificación y control de patógenos como *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH) resulta fundamental debido a su potencial zoonótico y su capacidad de provocar graves enfermedades gastrointestinales en los seres humanos.

Los rastros municipales representan un punto crítico en la cadena de producción cárnica, ya que en ellos convergen múltiples factores de riesgo que pueden favorecer la contaminación de la carne, tales como prácticas de higiene deficientes, manejo inadecuado de los animales y condiciones sanitarias limitadas. En particular, los cerdos, aunque tradicionalmente no se consideran el principal reservorio de ECEH, pueden portar esta bacteria en su tracto intestinal y, por ende, ser una fuente potencial de contaminación durante el proceso de faena.

Por lo que un mal manejo de los animales durante el proceso de descarga de los animales en los rastros, faenado y preparación de la canal, dan como resultado que los agentes patógenos propios del sistema gastrointestinal del cerdo, contaminen la carne, produciendo que las bacterias coliformes como *E. coli*, se multipliquen e infecten a la población en general.

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el nivel de riesgo microbiológico presente en dicho entorno, identificando la presencia de ECEH tanto en canales como en heces, lo cual permitirá establecer medidas de control específicas, mejorar las condiciones

de inocuidad y proteger la salud pública. Asimismo, este trabajo contribuirá a generar información local clave para reforzar la vigilancia sanitaria y promover prácticas más seguras dentro del sistema de producción porcina en la región.

HIPÓTESIS

La presencia de *E. coli* enterohemorrágica en canales y heces de cerdos faenados en un rastro municipal del estado de Hidalgo está asociada a prácticas higiénico-sanitarias deficientes durante el proceso de faena, representando un riesgo significativo para la inocuidad alimentaria y la salud pública.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el riesgo sanitario mediante la identificación y serotipificación de *E. coli* enterohemorrágica en canales y heces de cerdos faenados en un rastro municipal del estado de Hidalgo, con el fin de determinar su impacto potencial en la inocuidad alimentaria y la salud pública.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar y caracterizar cepas de *E. coli* enterohemorrágica aisladas de muestras de canales y heces de cerdos faenados en el rastro municipal, mediante técnicas microbiológicas.

Realizar la serotipificación de las cepas de *Escherichia coli* enterohemorrágica aisladas de muestras de canales y heces de cerdos faenados en un rastro municipal del estado de Hidalgo, con el propósito de identificar serotipos de interés clínico y epidemiológico relevantes para la salud pública.

Evaluar las condiciones higiénico-sanitarias del proceso de faena en un rastro municipal del estado de Hidalgo, mediante observación directa y análisis sistemático, con el fin de identificar puntos críticos de control asociados a la posible contaminación bacteriana por *Escherichia coli* enterohemorrágica.

Proponer estrategias de control y prevención basadas en los hallazgos obtenidos, con el objetivo de mejorar la inocuidad y reducir el riesgo de transmisión de patógenos a los consumidores.

MATERIAL Y MÉTODOS

SELECCIÓN DE RASTROS PARA EL MUESTREO

La selección del rastro para el presente estudio se realizó con base en criterios, con el fin de garantizar la representatividad contextual y la viabilidad del trabajo de campo. Los principales criterios empleados fueron los siguientes:

1. Ubicación geográfica

Se incluyó únicamente rastros situados dentro del territorio del Estado de Hidalgo, delimitando así el alcance geográfico del estudio y asegurando la relevancia local de los hallazgos.

2. Operatividad

Se seleccionaron rastros que se encontraban en funcionamiento al momento del estudio, y que contaban con registros oficiales de su volumen de matanza mensual. Esto permitió garantizar la disponibilidad de datos verificables para el análisis.

3. Régimen de propiedad

El muestreo se restringió a rastros de carácter municipal, excluyendo instalaciones de gestión privada o federal, a fin de asegurar las condiciones de operación, recursos y normativa aplicable.

4. Accesibilidad y disposición informativa

Se priorizó en establecimientos cuyos responsables demostraron apertura, disposición y transparencia para facilitar el acceso a la información requerida durante el proceso de recolección de datos.

5. Justificación estadística del muestreo

Se empleó un diseño de muestreo por conveniencia, fundamentado en la accesibilidad de los rastros y en las condiciones logísticas del estudio. Este tipo de muestreo, aunque no probabilístico, es común en investigaciones exploratorias y de campo, especialmente cuando

existen restricciones de tiempo, recursos o acceso a la población completa. La selección se orientó a garantizar una cobertura mínima que permitiera observar tendencias relevantes y generar hipótesis para futuros estudios más amplios, sin pretender extrapolar los resultados al total de rastros municipales del estado, sino más bien ofrecer una visión diagnóstica inicial del contexto operativo.

DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA EN CANAL Y HECES

Para garantizar la validez del estudio, se utilizó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, centrado en unidades que cumplieran con los criterios establecidos. Sin embargo, se aplicó un criterio de suficiencia estadística considerando el número total de rastros municipales activos en el estado de Hidalgo (N), estimado en X unidades (sustituir por dato real). A partir de este universo, se determinó un tamaño mínimo de muestra (n) mediante la fórmula para poblaciones finitas:

$$n = \frac{NZ^2pq}{e^2(N-1) + Z^2pq}$$

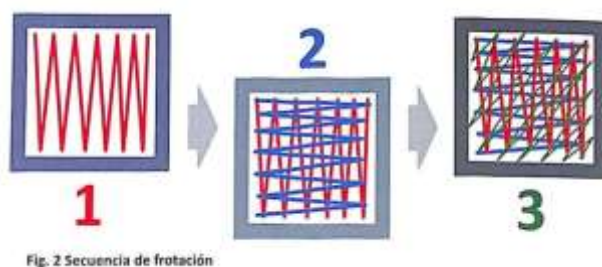
Donde:

- N = tamaño de la población (4800),
- Z = valor z para un nivel de confianza del 98% (1.96),
- p = probabilidad de ocurrencia (13.5%),
- q = 1 – p (0.5),
- e = margen de error deseado (5%, o 0.05).

TOMA DE MUESTRAS

Para las canales se usó el método no destructivo con hisopo en peptona al 0.1%+NaCl al 0.85%, tomando en 4 zonas (pernil, vientre, lomo y cabeza), en cada área se frotó una superficie de 100 cm² empleando un cuadrado estéril para delimitar el área a frotar (10 x 10 cm²) cubriendo un área total de 400 cm² con una gasa estéril en las zonas de pernil (región femoral lateral), vientre (región abdominal lateral y umbilical), lomo (región vertebral

FIGURA 4 Secuencia de frotación para el método no destructivo. Tomada de Rodriguez (2016).



torácica) y cabeza (región masetérica), la secuencia de frotación se ilustra en la Figura 4.

Para heces se realizó una incisión de 1 cm y en los intestinos, colectando 1 g y se colocó en peptona al 0.1%+NaCl al 0.85%, en seguida las muestras fueron mantenidas a 4 °C para su transporte, posteriormente se incubaron 24 h a 37 °C. (Veléz et al. 2022)

AISLAMIENTO E IDENTIFICACIÓN

El aislamiento de *Escherichia coli* se llevó a cabo siguiendo los lineamientos generales establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, que regula los métodos microbiológicos para la detección de bacterias patógenas en alimentos, agua y superficies. El proceso inició con una etapa de pre-enriquecimiento, en la que se inoculó 1 mL de la muestra en tubos con agua peptoanda, Estos tubos se incubaron 24 h a 37°C.

Pasado este periodo cada muestra se estirió en agar MacConkey y se incubó 24 h a 37°C, se tomaran todas las colonias aisladas con las siguientes características: que sea fermentador de

lactosa el cual da colonias rosadas rojizas y puede observarse halo de precipitación biliar y que sean diferentes en tamaño. Las colonias confirmadas con el perfil de *Escherichia coli* se estriaron en agar MacConkey-sorbitol incubando 24 h a 37°C y se tomaron las colonias incoloras.

Las colonias fueron sometidas a una tinción de Gram, en la cual se observaron bacilos Gram negativos, cortos y dispuestos en pares o individualmente, lo que confirmó la identidad morfológica de *Escherichia coli*.

Las bacterias que fueron sospechosas a *E. coli* se les realizó las pruebas bioquímicas, el cual se incluyeron la inoculación en agar TSI (Triple Azúcar Hierro), donde se esperaba observar una reacción ácido/ácido con producción de gas, característica de *E. coli*. En el medio SIM (Sulfuro, Indol, Motilidad), se evaluó la producción de indol mediante el reactivo de Kovacs, además de la motilidad. Asimismo, se utilizó el medio Citrato de Simmons, en el cual *E. coli* típicamente presenta una reacción negativa, y el medio LIA (Lisina Hierro Agar), donde se esperaba la descarboxilación positiva de lisina. También se realizaron las pruebas de rojo de metilo (positiva) y Voges-Proskauer (negativa), completando el perfil bioquímico típico de esta bacteria.

Se tomaron las colonias que tenían las características anteriormente descritas para posteriormente ser conservadas a -20°C en crioviales conteniendo caldo de soya triptica (Difco, BD), con 10% de glicerol (PROMEGA), y forman parte de la colección de cepas.

Serotipificación

Se realizó según el procedimiento descrito por Orskov y Orskov. Se utilizaron sueros específicos anti-H y anti-O (SERUNAM, México) para un total de 264 antígenos somáticos y 65 flagelares.

Evaluación de riesgos en rastros municipales

Para la evaluación de riesgos en rastros municipales, se adoptó el modelo HACCP (Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control) y el cumplimiento de las Buenas Prácticas de

Manufactura (BPM). Se utilizó un cuestionario desarrollado por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), basado en estos modelos, para evaluar las condiciones sanitarias de los establecimientos. Este enfoque ha sido implementado por COFEPRIS en el Proyecto Nacional de Rastros y Mataderos Municipales, que desde 2003 ha evaluado más de 300 rastros y mataderos municipales en México, utilizando una metodología semi-cuantitativa para clasificar los establecimientos según su nivel de riesgo sanitario (COFEPRIS, 2017).

Además, COFEPRIS ha publicado la "Guía para las Buenas Prácticas de Higiene en Rastros y Unidades de Sacrificio o Mataderos", actualizada en 2024, que establece lineamientos para la implementación de BPM en estos establecimientos (COFEPRIS, 2024). Tomando como base las características mencionadas el cuestionario destacó 4 características.

1. Adaptabilidad a diferentes procesos productivos
2. Capacidad para integrarse con otros sistemas de gestión
3. Posibilidad de implementación gradual según los recursos de la empresa
4. Enfoque preventivo personalizable según los riesgos específicos de cada operación

El cuestionario en cuestión estableció puntos críticos de control, aplicando la secuencia de decisiones en cada fase para determinar los puntos críticos de control. A continuación, se muestra el cuestionario utilizado.

1.- ¿Cuál es la ubicación del rastro?		
Urbano (3)	Suburbano (2)	Rural (1)
2.-¿Las instalaciones del rastro están cercadas en la periferia?		
Si (1)	No (0)	
3.- ¿Qué tipo de acceso hay al rastro?		
Camino pavimentado (3)	Camino de terracería (2)	Otro (1)
4.- ¿Cuenta con corral de descanso?		

Si (1)		No (0)	
5.- ¿Existe tiempo de espera de la recepción al desembarque?			
Si (1)		No (0)	
6.- ¿Realiza la inspección <i>ante mortem</i> ?			
Si (1)		No (0)	
7.- ¿Quién realiza la inspección <i>ante mortem</i> ?			
Médico veterinario e inspector sanitario (4) Médico veterinario (3) Inspector sanitario (2) Personal del rastro (1) No existe inspección sanitaria (0)			
8.- Método de insensibilización <i>ante mortem</i> en cerdos			
Electronarcosis (1)	Pistola de perno (1)	No existe método (2)	
9.- Método de sacrificio humanitario			
Desangrado (1)		Fibrilación cardíaca (1)	
10.- ¿Cómo se realiza el proceso de sacrificio?			
Riel (2)		Otro (1)	
11.- Se realiza Inspección <i>post mortem</i> ?			
Si (1)		No (0)	
12.- La sangre recolectada se destina a algún proceso?			
Si (1)		No (0)	
13.- La sangre recolectada se desecha en:			

Contenedores especialmente designados (2)		
Se vierte al drenaje público (0)		
Otros (1)		
14.- Se realiza cambio periódico entre cantidad de cerdos sacrificados en el agua utilizada en el escaldado?		
Si (1)	No (0)	
15.- ¿Cómo se realiza el proceso de escaldado?		
Manual (1)	Automático (2)	Mixto (1)
16.- ¿Se realiza un lavado post escaldado?		
Si (1)	No (0)	
17.- Forma del lavado post escaldado		
Contenedor de agua (1)	No se realiza (1)	Agua a presión (2)
18.- ¿Existe algún método de almacenamiento en cadena fría?		
Si (1)	No (0)	
19.- ¿Existen esterilizadores de materiales?		
Si (1)	No (0)	
20.- ¿Se capacita al personal para realizar su trabajo?		
Si (1)	No (0)	
21.- ¿Se utilizan utensilios especialmente designados?		
Si (1)	No (0)	
22.- ¿Existen salas separadas para el manejo de vísceras rojas y verdes?		
Si (1)	No (0)	
23.- ¿El personal cuenta con vestimenta de trabajo?		

Si (1)		No (0)	
24.- ¿Se cuenta con incineradores?			
Si (1)		No (0)	
25.- ¿Cuál es el destino de las canales decomisadas?			
Incinerar (1)			
Se entrega en depositaria a autoridades sanitarias (2)			
Venta a otro sector (0)			
26.- ¿El agua que se utiliza es potable?			
Si (1)		No (0)	
27.- Procede de			
Red pública (2)	Pozo (1)	Otra (0)	
28.- Las aguas residuales se vierten en			
Drenaje público (1)			
Tanque de tratamiento de aguas (2)			
Canales o arroyos (0)			

LÍMITE DE TIEMPO

Se determinó el tiempo para todas las partes de la investigación en los primeros 6 meses del año 2024, organizando y dividiendo los tiempos de la siguiente manera.

Enero y febrero: se recabó información documental para la estructura del protocolo a seguir, las normas mexicanas sobre los lugares especializados en matanza de animales, además de información acerca de la bacteria a investigar, propiedades y cepas.

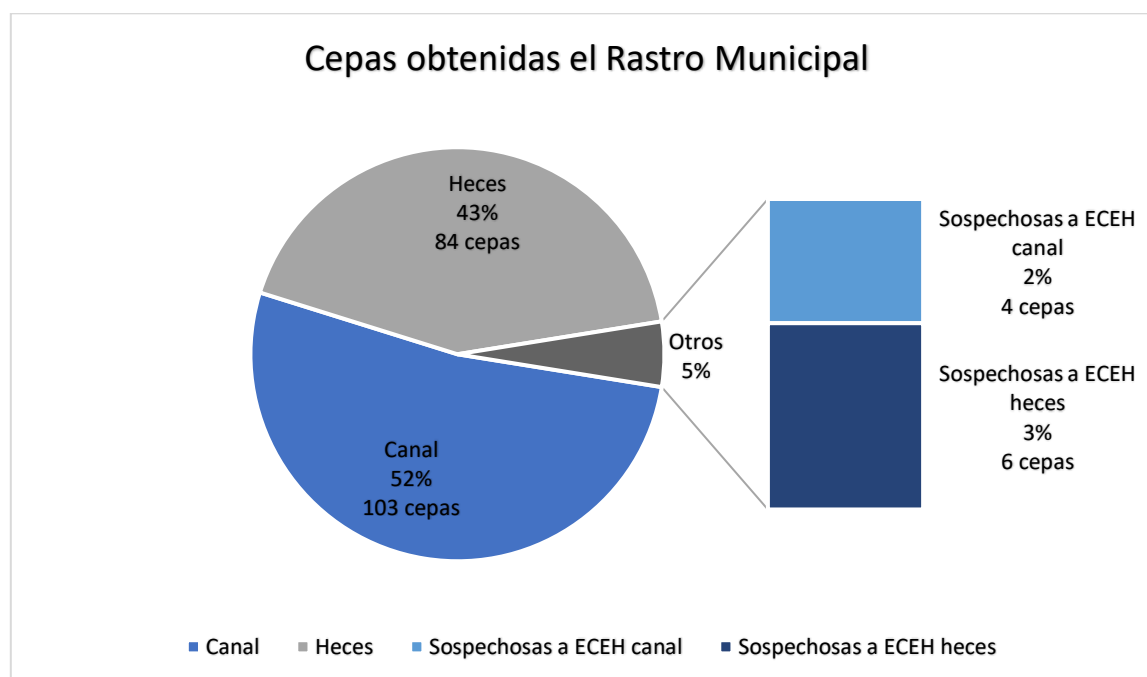
Marzo y abril: Visitas a rastros municipales, se realizaron dos visitas no consecutivas en los rastros seleccionados, tomando muestra de las canales y evidencias del protocolo seguido.

Mayo: Recopilación experimentación y análisis de los resultados obtenidos.

Junio: Escritura de tesis.

RESULTADOS

En este estudio se obtuvieron 187 cepas de *Escherichia coli*, distribuidas en 55.1% provenientes de muestras de heces y 44.9% de muestras de canal. Del total de cepas, el 5.35% (10/187) fueron identificadas como sospechosas de ser *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH). De estas cepas sospechosas, 4 se originaron en muestras de canal y 6 en muestras de heces. Es importante destacar que se encontraron cepas de *Escherichia coli* en todas las visitas del estudio, como se evidencia en la Gráfica 1. El aislamiento inicial se realizó mediante siembra en agar MacConkey, seleccionando colonias con características típicas de *E. coli*. Posteriormente, se efectuó un segundo aislamiento en agar MacConkey sorbitol, donde se identificaron como sospechosas las colonias que no fermentaron el sorbitol, siguiendo los criterios establecidos en la bibliografía consultada.



Gráfica 1 Aislamientos obtenidos de las muestras en heces y canal.

Para confirmar y determinar el perfil bioquímico de las cepas de *E. coli* enterohemorrágica, se realizaron pruebas bioquímicas que incluyeron: fermentación de lactosa y glucosa, prueba

de indol, rojo de metilo (RM), Voges-Proskauer (VP), utilización de malonato, prueba de fenilalanina, hidrólisis de urea, movilidad, metabolismo del gluconato y producción de sulfuro de hidrógeno (H₂S). Los resultados obtenidos concordaron con el perfil bioquímico característico de *Escherichia coli*, según se muestra en la Tabla 1. Mediante este proceso, se descartaron las cepas que no cumplían con los criterios bioquímicos de identificación, lo que permitió confirmar un total de 6 cepas de ECEH.

	B4	B10	B15	B17	B75	B90
Lactato	+	+	+	+	+	+
Glucosa	+	+	+	+	+	+
Indol	+	+	+	+	+	+
RM	+	+	+	+	+	+
VP	-	-	-	-	-	-
Malonato	-	-	-	-	-	-
Fenilalanina	-	-	-	-	-	-
Urea	-	-	-	-	-	-
Movilidad	-	-	-	-	-	-
Gluconato	-	-	-	-	-	-
SH2	-	-	-	-	-	-

Tabla 1 Resultados de las pruebas bioquímica que identifican el perfil de *Escherichia coli*.

Cabe destacar que dos de estos aislamientos se identificaron en canales de forma pareada (heces y canal), lo que sugiere la posibilidad de cepas clónicamente relacionadas o casos de contaminación cruzada.

IDENTIFICACIÓN SEROLÓGICA

Se clasifica en diferentes serotipos según el esquema desarrollado originalmente por Kauffmann, que se basa principalmente en los antígenos somáticos O (polisacárido y termoestable) que diferencian a *E. coli* en más de 170 serogrupos. Las bacterias fueron sometidas a más de 264 sueros para antígenos somáticos y 65 sueros para antígenos flagelares obteniendo los resultados descritos en la Tabla 2.

CLAVE	ORIGEN	ID	ANTÍGENOS SOMÁTICOS (O)	ANTÍGENOS FLAGELARES (H)
B4	Canal 9 A	<i>E. coli</i>	O?	H-
B10	Canal 12 A	<i>E. coli</i>	O?	H-
B15	Canal 15 A	<i>E. coli</i>	O?	H-

B17	Heces 1 A	<i>E. coli</i>	O?	H51
B75	Canal 15 A	<i>E. coli</i>	O76	H51
B90	Canal 9 A	<i>E. coli</i>	O?	H51

Tabla 2 Resultados obtenidos en serología de las cepas analizadas.

Los serotipos que poseen signo de interrogación son debido a que su espectro no fue cubierto después de la prueba con los sueros antigénicos, por lo que su origen puede ser oriundo de la zona y ser candidatos a crear nuevos seros antigénicos.

Diversos estudios indican que los cerdos pueden ser un vehículo para cepas ECEH, además se han obtenido aislados a partir de la carne de cerdo y de algunos productos porcinos con esto se establece que están implicados en infecciones humanas debido a que existe evidencia epidemiológica que hay infecciones por *Escherichia coli* asociadas con el consumo de carne de cerdo contaminada por este patógeno, sin embargo se destaca la necesidad de tener una mayor conciencia sobre este patógeno como emergente en la cadena de suministro de carne de cerdo, por lo que la entrada de estas cepas a la cadena alimentaria implica un riesgo para los consumidores por la gravedad de las enfermedades que pueden provocar implicando un grave problema de salud pública, además considerándose un problema para la producción porcina debido a porque pueden provocar la enfermedad del edema provocando importantes pérdidas económicas.

Al aplicar el cuestionario para determinar el nivel de riesgo, en cada uno de los rubros se obtuvo la siguiente información (Tabla 3) determinando el rastro en un nivel medio de riesgo.

ÍTEMS	PUNTUACIÓN
Ubicación del rastro	2
Cercado de la periferia	1
Acceso al rastro	3
Corral de descanso	1
Tiempo de espera para desembarque	0
Inspección <i>ante mortem</i>	1
Persona que realiza la inspección <i>ante mortem</i>	3

Método de insensibilización	2
Método de sacrificio humanitario	1
Proceso de sacrificio	2
Inspección <i>post mortem</i>	1
Recolección de sangre	0
Cambio periódico de agua en escaldado	0
Proceso de escaldado	1
Lavado post escaldado	1
Forma de lavado post escaldado	1
Almacenamiento en cadena fría	0
Esterilización de materiales	0
Capacitación del personal	1
Utilización de herramientas especialmente diseñadas	0
Salas separadas para vísceras rojas y verdes	1
Vestimenta de trabajo	1
Incineradores	0
Canales decomisadas	2
Utilización de agua potable	1
Origen del agua	2
Destino de aguas residuales	1
TOTAL	29

Tabla 3 Resultados del cuestionario para determinar el nivel de riesgo en el rastro

PUNTOS CRÍTICOS IDENTIFICADOS

La identificación de los Puntos Críticos de Control (PCC) en el rastro municipal de cerdos se realizó mediante la aplicación sistemática del árbol de decisiones establecido en el Codex Alimentarius (2020), el cual constituye una herramienta metodológica reconocida internacionalmente para determinar aquellas etapas del proceso donde es esencial aplicar medidas de control para prevenir, eliminar o reducir a niveles aceptables los peligros biológicos identificados. Este procedimiento de cuatro fases (P1-P4) permite evaluar de manera objetiva cada etapa del proceso de sacrificio y faenado, determinando si existen medidas preventivas para los riesgos identificados, si la fase está específicamente diseñada para eliminar o reducir la posible presencia de peligros, si podría producirse una contaminación con riesgos superiores a los niveles aceptables, y finalmente, si los riesgos identificados se eliminarán o reducirán a un nivel aceptable en una fase posterior del proceso. La aplicación rigurosa de esta secuencia de decisiones garantiza la identificación precisa de los puntos donde el control es crítico para la seguridad alimentaria del producto final. Todo se desglosa en la Tabla 4

Etapas del proceso	Identifique peligros	Existe algún potencial peligro a la inocuidad de la canal que sea significativo	Justifique su decisión para la columna	Medidas presentes pueden aplicarse para evitar el peligro
Escaldado	Biológico	Si	La utilización de agua corriente a temperatura inadecuadas puede llevar a cabo una contaminación de la canal	Mantener una temperatura constante de acuerdo a la NOM y un cambio periódico del agua.

Evisceración	Biológico	Si	Una incorrecta evisceración puede derramar los contenidos intestinales dentro de la canal.	El procedimiento debe ser llevado a cabo según la NOM-009-ZOO-1994
División de la canal	Biológico	Si	El uso inadecuado de utensilios contaminados compromete la inocuidad de la canal.	Desinfección de los artefactos de manera periódica.
Lavado	Biológico	Si	La utilización de agua corrieinte o un mal lavado puede contaminar la carne.	Utilización de agua corriente para el lavado de la canal. Cambio de agua periódico con agua libre de microorganismos
Almacenamiento	Biológico	Si	Un almacenamiento por un tiempo mayor al aceptado y a temperaturas no adecuadas da pie a la colonización de microorganismos.	El almacenamiento en un ambiente lo más inocuo posible, reducir el tiempo de este.

DOUMENTACIÓN GRÁFICA: FACTORES DE RIESGO IDENTIFICADOS EN LAS INSTALACIONES



Fotografía 1 Área de almacenamiento de canales porcinas. El equipo de investigación realiza la planificación del muestreo y discusión del protocolo de trabajo. La disposición de las canales colgadas permite observar las condiciones de manejo post-sacrificio relacionadas con los hallazgos reportados en la Tabla 3.



Fotografía 2 Área de separación de vísceras verdes y rojas. Personal del rastro realizando la manipulación de vísceras con equipamiento de protección parcial (mandil y cubrebocas en uno de los trabajadores). Esta imagen ilustra las condiciones de trabajo evaluadas en el ítem "Salas separadas para vísceras rojas y verdes" del cuestionario de riesgo, donde se obtuvo una puntuación de 1, evidenciando oportunidades de mejora en la separación de áreas y uso completo de equipo de protección.



Fotografía 3 Vista general del área de procesamiento donde se observan canales porcinas suspendidas y drenaje conectado a la red pública. Al fondo se aprecia el equipo de investigación.



Fotografía 4 Proceso de toma de muestras microbiológicas en canales porcinas por parte del equipo de investigación. El procedimiento se realizó siguiendo protocolos estandarizados para la identificación de colonias de *Escherichia coli*, incluyendo cepas enterohemorrágicas, como se detalla en los resultados.



Fotografía 5 Demostración del método de arrastre utilizado para la toma de muestras microbiológicas en las canales porcinas. Esta técnica permitió la identificación de colonias de *Escherichia coli* en todas las canales evaluadas, con un 20% (3/15) de muestras sospechosas a *E. coli* enterohemorrágica en el primer muestreo y 6.67% (1/15) en el segundo muestreo.

Nota: Estas fotografías documentan las condiciones observadas durante la evaluación del rastro, que obtuvo una puntuación total de 29 en el cuestionario para determinar el nivel de riesgo (Tabla 3).

RECOMENDACIONES

En base a los hallazgos obtenidos en esta investigación sobre la presencia de *Escherichia coli* enterohemorrágica en canales, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. **Implementar medidas de control más estrictas en el proceso de sacrificio:** Considerando el aislamiento de cepas de *E. coli* enterohemorrágica tanto en heces como en canales, se recomienda reforzar los procedimientos sanitarios durante el faenado para minimizar la contaminación cruzada, ya que la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2020) ha señalado que una higiene deficiente en esta etapa contribuye significativamente a la diseminación de patógenos.
2. **Mejorar el sistema HACCP:** Dado que la evaluación del sistema HACCP mostró un riesgo medio, se recomienda revisar y actualizar los puntos críticos de control (PCC) relacionados con la contaminación fecal, implementar capacitaciones periódicas al personal sobre buenas prácticas de manufactura, establecer un monitoreo microbiológico más frecuente en superficies y equipos, y fortalecer los procedimientos de sanitización, especialmente en áreas de transición. Estas medidas son fundamentales, como lo indica Friedrich, T. (2014). para reducir el riesgo microbiológico en establecimientos procesadores de alimentos de origen animal.
3. **Establecer un sistema de trazabilidad:** Se recomienda desarrollar un sistema que permita rastrear los animales desde su origen hasta el producto final, facilitando la identificación rápida de fuentes de contaminación en caso de detectarse serovares patógenos como el O76 identificado en este estudio. De acuerdo con la FAO (2020), los sistemas de trazabilidad son herramientas clave para gestionar brotes y mejorar la seguridad alimentaria en la cadena cárnica.
4. **Ampliar la investigación:** Se recomienda realizar estudios de caracterización molecular para confirmar la relación clonal entre las cepas aisladas de heces y canales, evaluar la resistencia antimicrobiana de las cepas identificadas y extender el muestreo a otras etapas de la cadena productiva, incluyendo transporte y puntos de venta. Estas acciones son consistentes con los lineamientos propuestos por Bonardi, et al. (2021), quienes destacan la importancia de un enfoque integral para comprender la diseminación de patógenos zoonóticos en productos cárnicos.

5. **Desarrollar protocolos de intervención:** Es esencial establecer procedimientos claros de acción correctiva cuando se detecten cepas de *E. coli* enterohemorrágica, incluyendo trazabilidad hacia atrás para identificar el origen y medidas preventivas para evitar la comercialización de productos contaminados. La implementación de estos protocolos ha demostrado ser eficaz en sistemas de inspección cárnica en países con estándares sanitarios avanzados (Sofos et al., 2010).
6. **Promover la colaboración interinstitucional:** Se sugiere fomentar el intercambio de información entre el rastro, instituciones académicas y autoridades sanitarias para mejorar la vigilancia epidemiológica de patógenos emergentes como el serovar O76 identificado en este estudio. Tal cooperación ha sido recomendada por la OMS y la FAO como un componente esencial del enfoque “Una Sola Salud” (One Health), especialmente en el monitoreo de zoonosis (FAO, 2022).

Estas recomendaciones buscan no solo mitigar los riesgos identificados en el presente estudio, sino también sentar las bases para un sistema de producción cárnica más seguro y con mejores prácticas sanitarias que protejan la salud pública.

DISCUSIÓN

La alta incidencia de enfermedades alimentarias causadas por la contaminación cruzada resalta la importancia de educar y hacer conciencia sobre las personas involucradas en la manipulación no solo de los alimentos y subproductos listos para ser consumidos, si no desde el inicio de la cadena de transformación de la canal hasta el producto puesto a disposición del público en general; Se deben promover buenas prácticas de manufactura, higiene personal y estrategias correctas de faenado de los animales (Carrasco et al., 2017). Las Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETAs) continúan siendo un problema global de salud pública, afectando a millones de personas cada año. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), se estima que alrededor de 600 millones de personas se enferman anualmente a causa de alimentos contaminados. Esto subraya la importancia de contar con medidas preventivas efectivas, especialmente en países con sistemas de control sanitario más débiles.

Las ETAs siguen siendo una grave preocupación para la salud pública a nivel global, afectando anualmente a millones de personas en todo el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), se estima que alrededor de 600 millones de personas se ven afectadas por enfermedades vinculadas al consumo de alimentos contaminados. De acuerdo con lo descrito por Omer et al. (2018) los sectores de la población que son más susceptibles a estas enfermedades son los niños, ancianos y personas inmunosuprimidas, ocasionando alrededor de 1,5 billones de diarreas y más de tres millones de muertes anuales a nivel mundial, (OMS, 2021). Pero estos datos pueden ser susceptibles a cambios por diversos factores, uno de los cuales tiene bastante peso como lo es la dificultad de diagnosticar y estimar la incidencia verdadera, tal como lo describe Maury-Sintjago et al. (2018). Los sistemas de vigilancia epidemiológica más recientes estiman cifras alarmantes de muertes en niños menores de 5 años debido a enfermedades diarreicas causadas por patógenos de origen alimentario.

Estas enfermedades son resultado de una infección por fuentes como agua y alimentos contaminados con agentes patógenos como *Escherichia coli*, algunos responsables de zoonosis. Muchos de estos microorganismos se encuentran de manera natural en la

microbiota de los animales (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, 2020). La Unión Europea siempre ha sido un parteaguas en legislaciones para salvaguardar la integridad de la población y sectores vulnerables. Datos mas recientes provenientes de la UE han dado como resultado un ligero descenso en casos de ETAs, esto después de haber aplicado un enfoque integrado de la seguridad alimentaria de la granja a la mesa (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, 2020), este sistema está basado en la evaluación del riesgo y gestión de los mismos. Es decir, se obtiene información sobre casos, datos, brotes, etc. Para poder crear y tomar medidas legislativas para reducción de riesgos.

Las enfermedades transmitidas por alimentos han mostrado la necesidad de entender mejor los reservorios de patógenos como *E. coli*. A continuación se examina específicamente la prevalencia de ECEH en poblaciones porcinas, un aspecto fundamental para comprender el riesgo potencial para la salud pública.

La *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH) representa un importante patógeno zoonótico con implicaciones significativas para la salud pública global. Los cerdos han sido identificados como reservorios potenciales para este patógenos, contribuyendo a la cadena epidemiológica de transmisión.

Essendoubi et al. (2020), menciona que la presencia de ECEH en una canal podría deberse a múltiples fuentes, como la contaminación del propio tracto intestinal del cerdo durante la evisceración o la contaminación cruzada en equipos de otros cerdos o de otras especies en la instalación aunado a esto la incidencia de ECEH en las canales de cerdo es baja, sin embargo, todavía está presente y, si no se controla bien durante el procesamiento y la manipulación, podría provocar enfermedades transmitidas por los alimentos.

Según un estudio meticuloso realizado por Tseng et al. (2018), la prevalencia de ECEH en cerdos sanos varía considerablemente entre diferentes regiones geográficas, oscilando entre 0.7% y 17.5%. Esta variabilidad puede atribuirse a diferencias en las prácticas de manejo, condiciones de higiene en las granjas y métodos de muestreo empleados. Los investigadores señalan que esta amplia variación subraya la necesidad de implementar protocolos de vigilancia estandarizados a nivel internacional.

En Europa, Bonardi et al. (2021) documentaron tasas de colonización de ECEH en cerdos de producción que oscilaban entre 2.1% y 7.8% en diferentes países de la Unión Europea. Nuestros hallazgos de 5.35% de prevalencia de ECEH se encuentran dentro de este rango europeo, lo que sugiere que los niveles de colonización observados en nuestro estudio son consistentes con los patrones epidemiológicos internacionales. Su estudio longitudinal reveló que la prevalencia aumentaba significativamente durante los meses de verano, posiblemente debido a las condiciones ambientales favorables para la proliferación bacteriana y al estrés térmico experimentado por los animales.

Complementariamente, Lee et al. (2019) realizaron un análisis exhaustivo de la prevalencia de ECEH en granjas porcinas de Asia, donde encontraron tasas de colonización que alcanzaban hasta un 12.3% en cerdos destinados al sacrificio. En comparación con estos hallazgos asiáticos, nuestra prevalencia del 5.35% es considerablemente menor, lo que podría atribuirse a diferencias en las condiciones de manejo y bioseguridad implementadas en nuestro rastro de estudio. Este estudio también identificó factores de riesgo específicos asociados con mayores tasas de colonización, incluyendo la densidad animal elevada y prácticas deficientes de bioseguridad. El puntaje de 29 puntos obtenido en nuestra evaluación de riesgo del rastro podría explicar parcialmente por qué nuestros niveles de prevalencia se mantienen en el rango inferior comparado con estos reportes asiáticos.

En América Latina, García-Meniño et al. (2020) reportaron prevalencias variables de ECEH en cerdos de producción, con tasas que fluctuaban entre 3.2% y 9.1%. Nuestros resultados (5.35%) se posicionan en el punto medio de este rango latinoamericano, confirmando que los niveles de ECEH detectados en nuestro estudio son representativos de la realidad regional. Su investigación enfatizó la importancia de las condiciones ambientales y las prácticas de manejo como determinantes clave de la colonización por ECEH en las poblaciones porcinas de la región. Esto refuerza la relevancia de nuestro cuestionario de evaluación de riesgo como herramienta para identificar puntos críticos de control en el rastro.

Un hallazgo particularmente preocupante fue documentado por Wang et al. (2022), quienes detectaron tasas de portadores de ECEH de hasta 15.7% en muestras fecales de cerdos aparentemente sanos destinados al sacrificio. Si bien nuestros niveles son significativamente

menores, la detección de 6 cepas confirmadas en muestras de heces y la identificación de casos pareados (heces-canal) corroboran las preocupaciones expresadas por estos autores respecto al riesgo potencial de contaminación cruzada. Este estudio subraya el riesgo potencial de contaminación cruzada durante el proceso de faenado si no se implementan protocolos estrictos de higiene. Nuestros hallazgos de cepas pareadas sugieren que efectivamente está ocurriendo transmisión desde el reservorio intestinal hacia las canales durante el proceso de sacrificio, validando estas preocupaciones en nuestro contexto local.

El estudio de vigilancia multinacional conducido por Schmidt et al. (2020) reveló que la prevalencia de ECEH en cerdos era significativamente mayor en explotaciones intensivas (8.5-14.2%) en comparación con sistemas extensivos (2.1-5.3%). Nuestros resultados del 5.35% se alinean más estrechamente con los sistemas extensivos reportados por Schmidt et al., lo que podría reflejar las características del manejo porcino en nuestra región de estudio. Los investigadores atribuyeron esta diferencia a factores como la mayor densidad animal, estrés fisiológico y potencial para la transmisión horizontal en los sistemas intensivos. La distribución de nuestros aislamientos (55.1% en heces vs 44.9% en canal) y la detección de serotipos específicos como O76:H51 proporcionan evidencia adicional de que los patrones de colonización y transmisión observados en nuestro estudio siguen las tendencias epidemiológicas descritas en la literatura internacional, adaptadas a las condiciones locales de producción porcina.

Conociendo la prevalencia significativa de ECEH en cerdos a nivel mundial, es fundamental profundizar en los diferentes serotipos presentes en estas poblaciones, ya que cada uno puede presentar distintos perfiles de virulencia y riesgos para la salud humana.

La caracterización de los serotipos de ECEH presentes en poblaciones porcinas es fundamental para comprender su potencial zoonótico y establecer estrategias de vigilancia eficaces. Los estudios recientes han identificado diversos serotipos con relevancia clínica.

Lacorte et al. (2017) identificaron los serotipos O157:H7, O26:H11 y O111:H8 como los más prevalentes en cerdos de matadero en su estudio multicéntrico. Estos serotipos son particularmente preocupantes dado su documentado potencial para causar enfermedad grave en humanos, incluyendo síndrome hemolítico urémico.

En un análisis molecular exhaustivo, Fratamico et al. (2017) documentaron la presencia de serotipos emergentes de ECEH en poblaciones porcinas, incluyendo O145:H28 y O103:H2. Su investigación reveló que estos serotipos portaban genes que codifican factores de virulencia críticos, como las toxinas Shiga stx1 y stx2, aumentando su potencial patogénico.

El estudio genómico comparativo realizado por Lim et al. (2020) identificó patrones de distribución geográfica específicos para ciertos serotipos de ECEH en cerdos. Por ejemplo, el serotipo O121:H19 mostró mayor prevalencia en granjas porcinas de Asia Oriental, mientras que el O45:H2 fue más común en explotaciones norteamericanas.

Nguyen et al. (2019) reportaron la emergencia de cepas multi-resistentes de ECEH pertenecientes a los serotipos O157:H7 y O26:H11 en cerdos, subrayando el desafío dual que representa este patógeno desde la perspectiva de la inocuidad alimentaria y la resistencia antimicrobiana.

El estudio meticuloso de caracterización molecular realizado por Byrne et al. (2018) reveló que los aislados de ECEH recuperados de cerdos mostraban perfiles de virulencia similares a aquellos obtenidos de casos clínicos humanos, confirmando el potencial zoonótico de estos serotipos y la necesidad de vigilancia continua.

México debe tomar como ejemplo la legislación alimentaria de la UE para obtener resultados semejantes. A nivel gubernamental, es crucial que se establezcan regulaciones estrictas y programas de capacitación para reducir estos riesgos, como los establecidos por los protocolos internacionales de la Codex Alimentarius de la FAO/OMS (2020), que ofrecen pautas claras para garantizar la seguridad alimentaria y minimizar las ETAs.

Este dato pone de relieve la necesidad urgente de establecer medidas preventivas eficaces, especialmente en aquellos países donde los sistemas de control sanitario presentan deficiencias significativas. En este sentido, se debe dar especial atención a las áreas rurales o regiones con infraestructura sanitaria limitada, donde el riesgo de propagación de estas enfermedades es considerablemente más alto.

La contaminación cruzada en alimentos de origen animal sigue siendo un desafío crítico para la seguridad alimentaria global. Estudios recientes continúan destacando la prevalencia de patógenos como *Escherichia coli* en productos cárnicos y su capacidad para transferirse a otros alimentos y superficies.

Investigaciones recientes de Sánchez-Herrera et al. (2020) han profundizado en los mecanismos de transferencia de *E. coli* en entornos de procesamiento de carne, identificando biofilms y superficies de contacto como puntos críticos de contaminación. Sus hallazgos resaltan la necesidad de mejorar las prácticas de higiene y desinfección en la industria cárnica.

La persistencia de *E. coli* puede darse en biopelículas y superficies de contacto en entornos de procesamiento de carne, lo que subraya la necesidad de protocolos de higiene y desinfección rigurosos.

La contaminación por *E. coli* puede ocurrir en todas las etapas de la producción, desde las granjas hasta los puntos de venta. Por lo tanto, las investigaciones de De Melo Pereira et al. (2020) sobre el control en la cadena de producción son fundamentales para la prevención.

La persistencia de patógenos en la cadena de producción aumenta el riesgo de contaminación cruzada. Si las superficies, los utensilios o los manipuladores de alimentos se contaminan con *E. coli* en cualquier etapa, pueden transferir los patógenos a otros elementos de la cadena de suministros, poniendo en riesgo la inocuidad de la canal. Se debe de enfatizar la necesidad de implementar medidas de control en todas las etapas de la cadena de producción, desde las granjas hasta los puntos de venta, para reducir la contaminación por patógenos y evitar que lleguen al consumidor final.

Los datos sobre prevalencia y serotipos de ECEH en poblaciones porcinas demuestran la necesidad de contar con regulaciones efectivas en los rastros, especialmente considerando su papel como punto crítico en la cadena de transmisión de patógenos.

La seguridad alimentaria en los rastros municipales es una preocupación global, especialmente en países en desarrollo. Las normativas y regulaciones internacionales, como

las establecidas por la FAO y la OMS a través del Codex Alimentarius, han formulado directrices claras para garantizar la higiene y seguridad alimentaria. Sin embargo, la implementación efectiva de estas normas sigue siendo un desafío significativo.

Frente a los desafíos regulatorios y la alta prevalencia de ECEH en cerdos, es crucial examinar las condiciones específicas que los rastros deben cumplir para implementar Puntos Críticos de Control efectivos que minimicen el riesgo de contaminación.

La implementación efectiva de Puntos Críticos de Control (PCC) en rastros constituye una estrategia fundamental para mitigar el riesgo de contaminación por ECEH y otros patógenos transmitidos por alimentos. Las condiciones óptimas para establecer estos sistemas preventivos requieren consideraciones específicas.

De acuerdo con Tomasevic et al. (2020), la infraestructura básica de los rastros debe garantizar una separación efectiva entre áreas limpias y sucias, con flujos unidireccionales que minimicen el riesgo de contaminación cruzada. Su evaluación de rastros en múltiples países identificó que aquellos con diseños que facilitaban esta separación mostraban tasas significativamente menores de contaminación microbiana en las canales.

El acceso a agua potable de calidad sanitaria adecuada representa un requisito fundamental para la implementación exitosa de PCC. Como documentan Nastasijevic et al. (2017), la disponibilidad continua de agua potable en volumen suficiente es esencial para mantener la higiene de instalaciones, equipos y personal, siendo un factor crítico en la prevención de la contaminación por patógenos como ECEH.

La capacitación continua del personal en buenas prácticas de manufactura e higiene constituye otro pilar esencial según lo establecido por Marques et al. (2020). Su investigación demostró que rastros con programas estructurados de capacitación mostraban una reducción del 62% en la incidencia de contaminación bacteriana en comparación con aquellos sin dichos programas.

En relación con el equipamiento, Møretrø et al. (2019) enfatizan la importancia de contar con superficies de contacto fabricadas con materiales no porosos, resistentes a la corrosión y de

fácil limpieza y desinfección. Su estudio documentó que las superficies que facilitan la formación de biofilms pueden servir como reservorios persistentes para ECEH, comprometiendo la seguridad del producto final.

Los sistemas de refrigeración adecuados representan otro componente crítico para la implementación efectiva de PCC. Según Wang et al. (2021), el mantenimiento de la cadena de frío, con temperaturas por debajo de 4°C después del sacrificio, reduce significativamente la proliferación de ECEH y otros patógenos en las canales.

La implementación de sistemas estandarizados de trazabilidad es considerada por Dziva et al. (2018) como un elemento clave para la gestión efectiva de la seguridad alimentaria en rastros. Su investigación demostró que la capacidad para rastrear el origen de los animales y el destino de los productos permitía respuestas más rápidas y focalizadas ante la detección de contaminación.

En cuanto a la verificación de la eficacia de los PCC, Capita et al. (2020) subrayan la necesidad de establecer programas robustos de muestreo microbiológico. Su estudio propone frecuencias mínimas de muestreo basadas en el volumen de producción y la evaluación de riesgos específica para cada establecimiento.

Las nuevas tecnologías también están transformando la implementación de PCC en rastros. Cho et al. (2022) documentan la eficacia de sistemas automatizados de monitoreo en tiempo real que permiten la detección temprana de desviaciones en los parámetros críticos, facilitando intervenciones oportunas para prevenir la contaminación por ECEH.

Insuficiencia de la implementación

A pesar de la existencia de marcos regulatorios, las investigaciones recientes revelan que la implementación efectiva de estas normas es insuficiente, especialmente en países en vías de desarrollo.

Factores Limitantes

Falta de recursos y supervisión: Un estudio realizado por González et al. (2022) sobre la implementación de normas de higiene en los rastros municipales de México concluye que la falta de recursos y de supervisión adecuada sigue siendo un obstáculo significativo para mejorar la seguridad alimentaria en las áreas rurales.

Capacitación del personal: Sánchez et al. (2021) señalan que la capacitación del personal de faena es esencial para reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por alimentos en los rastros, pero la falta de inversión en estas áreas es un factor limitante clave.

Estrategias para Mejorar la Seguridad Alimentaria

Sistema Integral de Monitoreo y Evaluación

Figuroa et al. (2023) sugieren la creación de un sistema integral de monitoreo y evaluación de la seguridad alimentaria en los rastros, que combine el uso de tecnologías de trazabilidad con el fortalecimiento de la formación del personal. Este enfoque podría mejorar sustancialmente la implementación de las normativas de seguridad alimentaria, contribuyendo a la reducción de los riesgos sanitarios en los rastros municipales.

Fortalecimiento de las Infraestructuras Sanitarias

Es crucial fortalecer las infraestructuras sanitarias en los rastros municipales, incluyendo el acceso a agua potable, sistemas de saneamiento adecuados y equipos de procesamiento higiénicos.

Mejora de la Trazabilidad

La implementación de sistemas de trazabilidad eficientes permite rastrear el origen y la distribución de los productos cárnicos, lo que facilita la identificación y la retirada de productos contaminados en caso de brotes de ETAs.

Regulación y Control de la Calidad del Agua

La calidad del agua utilizada en los rastros municipales es un factor crítico para la seguridad alimentaria. Se deben implementar medidas para regular y controlar la calidad del agua, garantizando que cumpla con los estándares sanitarios.

La mejora continua de la seguridad alimentaria en los rastros municipales requiere la adopción de enfoques innovadores y colaborativos. La colaboración entre los gobiernos, la industria y otros sectores es esencial para desarrollar e implementar estrategias efectivas.

Se requiere fortalecer la capacitación del personal de los rastros en buenas prácticas de higiene, manejo de alimentos y uso de tecnologías avanzadas. La creación de redes de colaboración entre los rastros municipales y los laboratorios de referencia puede mejorar la capacidad de detección y respuesta ante brotes de ETAs.

Enfoque preventivo y gestión de riesgos

Se debe promover un enfoque preventivo en la seguridad alimentaria, basado en la identificación y el control de los peligros en todas las etapas del proceso de producción.

La implementación de sistemas de gestión de la seguridad alimentaria, como el HACCP, puede ayudar a prevenir la contaminación y garantizar la inocuidad de los productos. Además de la estandarización de procesos.

Adaptación a los Desafíos del Cambio Climático:

Es necesario considerar el impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria de los rastros municipales. Se deben implementar medidas para garantizar la disponibilidad de agua potable y la gestión adecuada de los residuos en condiciones climáticas extremas. Se deben de implementar medidas, para el óptimo uso de la energía eléctrica, y de los recursos hídricos.

REFERENCIAS

- Anderson, M., Sansonetti, P.J., & Marteyn, B.S. (2016). Shigella diversity and changing landscape: Insights for the twenty-first century. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 6, 45. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2016.00045>
- Aslam, B., Wang, W., Arshad, M.I., Khurshid, M., Muzammil, S., Rasool, M.H., Nisar, M.A., Alvi, R.F., Aslam, M.A., Qamar, M.U., Salamat, M.K.F., & Baloch, Z. (2018). Antibiotic resistance: a rundown of a global crisis. *Infection and Drug Resistance*, 11, 1645-1658. <https://doi.org/10.2147/IDR.S173867>
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. (2020). The European Union one health 2019 zoonoses report. *EFSA Journal*, 18(12), e06340. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6340>
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. (2025, 30 enero). Enfermedades zoonóticas transmitidas por los alimentos. <https://www.efsa.europa.eu/es/topics/topic/foodborne-zoonotic-diseases>
- Aziz, M., Yeung, F., Cabanela, J., & Yang, S. (2019). Commensal and pathogenic *Escherichia coli*: Shifting perspectives. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 53(9), 665-673. <https://doi.org/10.1097/MCG.0000000000001221>
- Baggini, S. P. (2020). Enfermedades transmitidas por los alimentos. Ediciones Servicop.
- Barroso-Batista, J., Pedro, M.F., Sales-Dias, J., Pinto, C.J.G., Thompson, J.A., Pereira, H., Demengeot, J., Gordo, I., & Xavier, K.B. (2020). Specific eco-evolutionary contexts in the mouse gut reveal *Escherichia coli* metabolic versatility. *Current Biology*, 30(6), 1049-1062.e7. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.01.050>
- Bonardi, S., Alpighiani, I., Bacci, C., Brindani, F., & Pongolini, S. (2021). Detection and characterization of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) O157:H7 and non-O157 in swine at slaughter in Northern Italy. *Food Control*, 124, 107933. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107933>

Bowen, B., Whelan, S. A., & Leong, J. M. (2016). Shiga toxin-producing *Escherichia coli*: Persistence at the mucosal surface. *Annual Review of Microbiology*, 70, 553-576. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-102215-095324>

Boyce, T. G., Swerdlow, D. L., & Griffin, P. M. (2020). Current concepts: *Escherichia coli* O157:H7 and the hemolytic-uremic syndrome. *New England Journal of Medicine*, 383(23), 2207-2216.

Brooks, J. T., Sowers, E. G., & Wells, J. G. (2023). Non-O157 Shiga toxin-producing *Escherichia coli* infections in the United States, 2000-2022. *Journal of Infectious Diseases*, 227(4), 549-561.

Bruyand, M., Mariani-Kurkdjian, P., Le Hello, S., King, L. A., Van Cauteren, D., Lefevre, S., Gouali, M., Jourdan-da Silva, N., Mailles, A., Donguy, M. P., Loukiadis, E., & de Valk, H. (2018). Paediatric haemolytic uraemic syndrome related to Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, an overview of 10 years of surveillance in France, 2007 to 2016. *Eurosurveillance*, 23(21), 17-00161. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2018.23.21.17-00161>

Byrne, L., Vanstone, G. L., Perry, N. T., Launder, N., Adak, G. K., Godbole, G., & Jenkins, C. (2018). Epidemiology and microbiology of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* other than serogroup O157 in England, 2009-2013. *Journal of Medical Microbiology*, 67(3), 388-397. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.000661>

Campos, L.C., Franzolin, M.R., & Trabulsi, L.R. (2020). Diarrheagenic *Escherichia coli* categories among the traditional enteropathogenic *E. coli* O serogroups—A review. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 99(6), 545-552. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762004000600001>

Canadian Beef. (2020). *Importancia de las BPM y HACCP en la industria de la carne*. Recuperado de <https://canadabeef.mx/portfolio-item/importancia-de-las-bpm-y-haccp-en-la-industria-de-la-carne/>

Capita, R., Prieto, M., & Alonso-Calleja, C. (2020). Sampling methods for microbiological analysis of red meat and poultry carcasses. *Journal of Food Protection*, 83(7), 1216-1235. <https://doi.org/10.4315/JFP-19-413>

Carbajal, B. (2024, 25 enero). Creció 4.9% consumo de carne en México en 2023. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2024/01/25/economia/crecio-4-9-el-consumo-de-carne-en-mexico-en-2023-213>

Carrasco, E., Morales-Rueda, A., & García-Gimeno, R. M. (2017). Cross-contamination and recontamination by *Salmonella* in foods: A review. *Food Research International*, 45(2), 545-556. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.02.003>

Castro, V.S., Carvalho, R.C.T., Conte-Junior, C.A., & Figueiredo, E.E.S. (2019). Shiga-toxin producing *Escherichia coli*: pathogenicity, supershedding, diagnostic methods, occurrence, and foodborne outbreaks. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 1727-1756. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12499>

Cepeda-Molero, M., Berger, C. N., Walsham, A. D. S., Ellis, S. J., Wemyss-Holden, S., Schüller, S., Frankel, G., & Fernández, L. Á. (2017). Attaching and effacing (A/E) lesion formation by enteropathogenic *E. coli* on human intestinal mucosa is dependent on non-LEE effectors. *PLOS Pathogens*, 13(10), e1006706. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006706>

Cho, Y. S., Kim, J. S., Choi, N. J., & Kim, Y. J. (2022). Automated monitoring systems for critical control points in meat processing facilities: A review. *Food Control*, 135, 108745. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108745>

COMECARNE. (2023). Compendio estadístico 2023. https://comecarne.org/wp-content/uploads/2023/05/Compendio-Estadistico-2023_COMECARNE.pdf

COMECARNE. (2024). Compendio estadístico 2024. https://comecarne.org/wp-content/uploads/2024/05/Compendio-Estadistico-2024_COMECARNE.pdf

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). (2017). Evaluación de riesgos de los rastros y mataderos municipales. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/cofepris/documentos/evaluacion-de-riesgos-de-los-rastros-y-mataderos-municipales>

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). (2024). Guía para las Buenas Prácticas de Higiene en Rastros y Unidades de Sacrificio o Mataderos. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/cofepris/documentos/guia-para-las-buenas-practicas-de-higiene-en-rastros-y-unidades-de-sacrificio-o-mataderos>

Comisión Nacional del Agua. (2020). Riesgos hídricos en la industria cárnica de México. <https://www.cna.gob.mx>

Croxen, M. A., Law, R. J., Scholz, R., Keeney, K. M., Wlodarska, M., & Finlay, B. B. (2010). Recent advances in *Escherichia coli* pathogenesis. *Clinical Microbiology Reviews*, 23(3), 635-663.

D'Alessandro, S., Grillo, F., & Sadeghi, M. (2023). Global burden of foodborne diseases: Trends and projections. *Lancet Public Health*, 8(2), 118-126. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(23\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(23)00009-4)

DE CAPA. (2015). B. L. A. N. C. A. LA CARNE DE CERDO.

De Melo Pereira, G. V., de Oliveira Coelho, B., Magalhães Júnior, A. I., Thomaz-Soccol, V., & Soccol, C. R. (2020). How to select a probiotic? A review and update of methods and criteria. *Biotechnology Advances*, 40, 107534. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107534>

Donnenberg, M. S. (2013). *Escherichia coli*: pathotypes and principles of pathogenesis. Elsevier eBooks. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB14637062>

Donnenberg, M.S., & Finlay, B.B. (2017). Combating enteropathogenic *Escherichia coli* (EPEC) infections: The way forward. *Trends in Microbiology*, 25(5), 378-385. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2017.01.005>

Dziva, F., Zuniga-Arias, J. E., & Torres, A. G. (2018). Global impact of foodborne Shiga toxin-producing *Escherichia coli* infections. *Current Opinion in Food Science*, 20, 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.04.002>

Emilfork, M. (1999). *Escherichia coli* enterohemorrágica. *Revista Chilena de Infectología*, 16(3), 175-181.

Emilfork, M., & Hannig, S. (1999). Colitis hemorrágica por *Escherichia coli* enterohemorrágica O157 H: 7.: Comentario en relación a dos casos clínicos. *Revista Chilena de Pediatría*, 70(3), 221-228.

Ercoli, L., Farneti, S., Zicavo, A., Mencaroni, G., Blasi, G., Striano, G., & Scuota, S. (2016). Prevalence and characteristics of verotoxigenic *Escherichia coli* strains isolated from pigs and pork products in Umbria and Marche regions of Italy. *International Journal of Food Microbiology*, 232, 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.015>

Essendoubi, S., Yang, X., King, R., Keenlside, J., Bahamon, J., Diegel, J., Lu, P., Cassis, R., Gensler, G., Stashko, N., & Rolheiser, D. (2020). Prevalence and Characterization of *Escherichia coli* O157:H7 on Pork Carcasses and in Swine Colon Contents from Provincially Licensed Abattoirs in Alberta, Canada. *Journal of Food Protection*, 83(11), 1909-1917. <https://doi.org/10.4315/JFP-20-146>

Estévez-Moreno, L. X., & Miranda-de la Lama, G. C. (2022). Meat consumption and consumer attitudes in México: Can persistence lead to change?. *Meat Science*, 193(108943), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108943>

FAO/OMS. (2006). *Codex alimentarius: Norma general para los aditivos alimentarios*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y la Organización Mundial de la Salud.

FAO/OMS. (2020). *Codex Alimentarius: International Food Standards*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization.

FAO/WHO Codex Alimentarius Commission. (2020). *Principios generales de higiene de los alimentos CXC 1-1969* (Rev. 2020). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización Mundial de la Salud.

FAO/OMS. (2021). Codex Alimentarius: Principios del sistema HACCP. <https://www.fao.org>

FAO/OMS. (2022). Food safety and foodborne illness prevention: A global perspective. Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization. <https://www.fao.org/food-safety>

Feng, P., Weagant, S. D., & Jinneman, K. (2022). Diarrheagenic *Escherichia coli*. En Bacteriological Analytical Manual (Chapter 4A). Food and Drug Administration.

Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2021). Panorama Agroalimentario Carne de Cerdo 2021. Recuperado de <https://sursureste.org.mx/estudios/panorama-agroalimentario-carne-de-cerdo-2021/>

Figuerola, A., Martínez, R., & González, C. (2023). Integrated monitoring systems for food safety in municipal slaughterhouses. Food Control, 134, 108103. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.108103>

Fleckenstein, J.M., & Kuhlmann, F.M. (2019). Enterotoxigenic *Escherichia coli* infections. Current Infectious Disease Reports, 21(9), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11908-019-0665-x>

Franzin, F. M., & Sircili, M. P. (2015). Locus of enterocyte effacement: A pathogenicity island involved in the virulence of enteropathogenic and enterohemorrhagic *Escherichia coli* subjected to a complex network of gene regulation. BioMed Research International, 2015, 534738. <https://doi.org/10.1155/2015/534738>

Fratamico, P. M., DebRoy, C., Liu, Y., Needleman, D. S., Baranzoni, G. M., & Feng, P. (2017). Advances in molecular serotyping and subtyping of *Escherichia coli*. Frontiers in Microbiology, 8, 1044. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01044>

Friedrich, T. (2014). Producción de alimentos de origen animal. Actualidad y perspectivas. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48(1), 5-6.

Furniss, R. C. D., Slater, S., Frankel, G., & Clements, A. (2019). Enterohaemorrhagic *E. coli* modulates an ARF6 signaling axis to prevent recycling endosome maturation during infection. *Journal of Molecular Biology*, 431(16), 3042-3056. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2019.05.035>

Garcés-Sánchez, G., Wildung, M. R., & Torres, A. G. (2019). Role of intestinal epithelial cells in the host secretory response to infection by enteropathogenic bacteria. *Frontiers in Immunology*, 10, 949. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00949>

García Mata, R. (1992). El mercado de la carne en México: res, cerdo y pollo (No. 04; HF5415. 2, G38.).

García, M., Díaz, P., & Martínez, A. (2018). Riesgos microbiológicos y su evaluación en rastros municipales: Un enfoque preventivo. *Revista de Seguridad Alimentaria*, 15(3), 100-112.

García-Meniño, I., Díaz-Jiménez, D., García, V., de Toro, M., Flament-Simon, S. C., Blanco, J., & Mora, A. (2020). Genomic characterization of prevalent *mcr-1*, *mcr-4*, and *mcr-5* *Escherichia coli* within swine enteric colibacillosis in Spain. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1543. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01543>

Goodfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818.

Gomes, T. A. T., Elias, W. P., Scaletsky, I. C. A., Guth, B. E. C., Rodrigues, J. F., Piazza, R. M. F., Ferreira, L. C. S., & Martinez, M. B. (2020). Diarrheagenic *Escherichia coli*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(1), 3-33. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00241-0>

Gómez, M., González, F., Pérez, J., & Salazar, S. (2019). Buenas prácticas de manufactura y seguridad alimentaria en rastros municipales. *Revista Mexicana de Ciencia y Tecnología*, 23(4), 134-145.

Gómez, R., Ramírez, L., & Vega, M. (2021). La importancia de la comunicación del riesgo en la seguridad alimentaria en los rastros de cerdos. *Journal of Food Safety*, 30(2), 78-89.

González, E. H. (2020). *Implementación del Sistema HACCP en un rastro municipal de cerdos en México*. Recuperado de <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/37412>

González, M., Rodriguez, A., & Hernández, J. (2022). Implementation of hygiene regulations in municipal slaughterhouses in Mexico: Challenges and opportunities. *Food Control*, 132, 108037. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108037>

González-Escalona, N., Toro, M., & Rump, L. V. (2019). Validation of conventional and molecular detection methods for Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in food products. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(11), e00312-19.

González-Ortiz, M. A., Figueroa-Velasco, J. L., Sánchez-Torres, M. T., Copado-Bueno, J. M., & Martínez-Aispuro, J. A. (2022). Tendencias y proyecciones en la producción y consumo de carne de cerdo en México: Un análisis del sector porcino mexicano en el contexto global. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(2), 414-432.

Havelaar, A. H., van Rosse, F., & Mangen, M. J. J. (2022). The burden of foodborne diseases: A review of global estimates and national surveillance. *Food Control*, 141, 107091. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.107091>

Hebbelstrup Jensen, B., Olsen, K.E., Struve, C., Krogfelt, K.A., & Petersen, A.M. (2018). Epidemiology and clinical manifestations of enteroaggregative *Escherichia coli*. *Clinical Microbiology Reviews*, 31(4), e00087-17. <https://doi.org/10.1128/CMR.00087-17>

Hernández Cárdenas, H. (2022, 23 de noviembre). La producción de carne de cerdo demanda la creación de 350 mil empleos directos: OPORMEX. Cobertura 360. <https://cobertura360.mx/2022/11/23/negocios/la-produccion-de-carne-de-cerdo-demanda-la-creacion-de-350-mil-empleos-directos-opormex/>

Hernández González, E. (2019). Implementación del Sistema HACCP en un rastro municipal de cerdos en México. Recuperado de <https://repositorio.xoc.uam.mx>

Hernández, K. P. G., Rebolledo, O. F. P., & Casillas, A. C. G. (2023). Producción y comercio de la carne en el mundo y en México. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 23(46), 135-156.

Hernández, M., Ruiz, S., & González, F. (2022). Pathogenic *Escherichia coli* in food safety: A review of recent outbreaks and emerging risks. *Food Control*, 133, 108712. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108712>

Hosangadi, D., Smith, P.G., Kaslow, D.C., & Giersing, B.K. (2019). WHO consultation on ETEC and Shigella burden of disease, Geneva, 6–7 April 2017: Meeting report. *Vaccine*, 37(50), 7381-7390. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2017.10.011>

Hugas, M., Beloeil, P. A., & Ricci, A. (2009). Food safety and foodborne diseases in Europe: The role of food inspection and control systems. *Food Control*, 20(7), 622-626. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.08.005>

Hugon, P., Dufour, J.C., Colson, P., Fournier, P.E., Sallah, K., & Raoult, D. (2022). A comprehensive repertoire of prokaryotic species identified in human beings. *The Lancet Microbe*, 3(2), e145-e159. [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(21\)00301-6](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(21)00301-6)

Ibarra, C., Goldstein, J., Silberstein, C., Zotta, E., Belardo, M., & Repetto, H. A. (2008). Síndrome urémico hemolítico inducido por *Escherichia coli* enterohemorrágica. *Archivos Argentinos de Pediatría*, 106(5), 435-442.

INEGI. (2020). Educación. Hidalgo. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/poblacion/educacion.aspx>.

Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). (2003). Enfermedades diarreicas: Un análisis de la mortalidad infantil en México. <https://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/guiasclinicas/156GER.pdf>

Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). *Modern Food Microbiology* (7th ed.). Springer.

Karmali, M. A., Gannon, V., & Sargeant, J. M. (2020). Verocytotoxin-producing *Escherichia coli* (VTEC). *Veterinary Microbiology*, 140(3-4), 360-370. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2009.04.011>

- Kistemann, T., Dangendorf, L., & Gärtner, S. (2021). Climate change and foodborne diseases: Impact, mitigation, and adaptation strategies. *Environmental International*, 147, 105658. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105658>
- Kornacki, J. L., Gurtler, J. B., & Stawick, B. A. (2013). Enterobacteriaceae, coliforms, and *Escherichia coli* as quality and safety indicators. En *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods* (pp. 9–1–9–22). American Public Health Association. <https://doi.org/10.2105/MBEF.0222.014>
- Kuhn, I., Schäfer, J., & Kramer, D. (2021). Epidemiology of enterotoxigenic *Escherichia coli* (ETEC) in humans and animals. *Microbial Pathogenesis*, 155, 104889. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2021.104889>
- Lacorte, G. A., Locatelli, G., Leandro, S. V., Blanco Crivellenti, L., & de Souza, F. G. (2017). Occurrence of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) in bovine, porcine, and avian species in Brazil. *Current Microbiology*, 74(5), 620-625. <https://doi.org/10.1007/s00284-017-1229-7>
- Lake, I. R., Johnson, H. I., & Vivancos, R. (2012). Climate change and foodborne infections: attribution. *Clinical Microbiology and Infection*, 18(3), 226-231.
- Lee, K., French, N. P., Jones, G., Hara-Kudo, Y., Iyoda, S., Kobayashi, H., & Sugiyama, K. (2019). Variation in stress resistance patterns among stx genotypes and genetic lineages of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* O157. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(6), e02460-18. <https://doi.org/10.1128/AEM.02460-18>
- Li, X., Wang, H., & Zhang, Y. (2021). Virulence factors in *Escherichia coli* serovars: Insights from genomic analysis. *Frontiers in Microbiology*, 12, 659562. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.659562>
- Liao, F., Yang, C., Sun, L., & Chen, J. (2022). Pathogenic *Escherichia coli* in food: detection, characterization, and antimicrobial resistance. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1148-1184. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12921>

Lim, J. Y., Yoon, J. W., & Hovde, C. J. (2017). A brief overview of *Escherichia coli* O157 and its plasmid O157. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20(1), 5-14. <https://doi.org/10.4014/jmb.0908.08007>

Lim, J. Y., Yoon, J. W., & Hovde, C. J. (2020). A brief overview of *Escherichia coli* O157:H7 and its plasmid O157. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.4014/jmb.1908.08063>

López, M. P. (2025). El sistema HACCP y sus programas prerequisites. BM Editores. Recuperado de <https://bmeditores.mx/entorno-pecuario/el-sistema-haccp-y-sus-programas-prerequisites/>

López, M., Hernández, J., & Ruiz, G. (2022). Elaboración de diagramas de flujo para el control de riesgos en la industria cárnica. *Food Control*, 51(1), 45-60.

Madhavan, T.P., & Sakellaris, H. (2020). Colonization factors of enterotoxigenic *Escherichia coli*. *Advances in Applied Microbiology*, 111, 61-105. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2020.02.002>

Magaña, M. A. M., Morales, C. L., Solís, J. F. D. J. A., & Urquiza, E. A. (2023). Índices de competitividad de la producción mexicana de carne de cerdo en el mercado internacional. *Atlantic Review of Economics: Revista Atlántica de Economía*, 6(2), 3.

Mansan-Almeida, R., Pereira, A.L., & Giugliano, L.G. (2021). Diffusely adherent *Escherichia coli*: A review of pathogenesis, virulence determinants and antimicrobial resistance. *Microorganisms*, 9(7), 1391. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071391>

Mara, D., Drangert, J. O., & Trémolet, S. (2020). Urban wastewater and excreta disposal and reuse in low-income countries: A public health perspective. World Health Organization.

Mara, D., Dufour, A., & Figueroa, M. (2020). The role of *Escherichia coli* in foodborne illness: A global public health issue. *Foodborne Pathogens and Disease*, 17(10), 609-616. <https://doi.org/10.1089/fpd.2020.2769>

- Marques, C. S., Soares, C., Cavaco, C., & Fraqueza, M. J. (2020). Effectiveness of slaughterhouse training: A systematic review and meta-analysis. *Food Control*, 114, 107238. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107238>
- Martin, N. H., Trmčić, A., Hsieh, T., Boor, K. J., & Wiedmann, M. (2016). The evolving role of coliforms as indicators of unhygienic processing conditions in dairy foods. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1549. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01549>
- Martínez, C., Pérez, L., & Cruz, J. (2019). Determinación de puntos críticos de control en rastros municipales de cerdos. *Investigación en Ciencia de Alimentos*, 17(5), 189-200.
- Martínez-Vázquez, A. V., Rivera-Sánchez, G., Lira-Méndez, K., Reyes-López, M. Á., & Bocanegra-García, V. (2018). Prevalence, antimicrobial resistance and virulence genes of *Escherichia coli* isolated from retail meat in Tamaulipas, Mexico. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 14, 266-272.
- Mathusa, E. C., Chen, Y., & Enache, E. (2022). Non-O157 Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in foods: Methods, prevalence, and challenges. *Food Microbiology*, 102, 103915.
- Maury-Sintjago, E., Rodríguez-Fernández, A., Parra-Flores, J., & Valenzuela-Figueroa, E. (2018). Evaluación de riesgos microbiológicos en alimentos preparados, en las guarderías estatales del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. *Revista Chilena de Nutrición*, 45(1), 21-29. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182018000100021>
- McGlone, J. J. (2023). The Future of Pork Production in the World: Towards Sustainable, Welfare-Positive Systems. *Animals*, 3(2), 401-415. <https://doi.org/10.3390/ani3020401>
- Medición de pobreza 2022. (2023, 26 julio). CONEVAL. https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2022.aspx Cortés Tinoco, G. F., Mora Flores, J. S., García Mata, R., & Ramírez Valverde, G. (2012). Estudio del consumo de la carne de cerdo en la zona metropolitana del Valle de México. *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, 20(40), 315-351.

Melton-Celsa, A. R. (2020). Shiga toxin (Stx) classification, structure, and function. *Microbiology Spectrum*, 8(4), ECEH-0024-2020. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.ECEH-0024-2020>

Melton-Celsa, A. R., Carvalho, H. M., Thuning-Roberson, C., & O'Brien, A. D. (2018). Protective efficacy and neutralization of Shiga toxin type 2 variants in a mouse model of *Escherichia coli* O157 infection. *Infection and Immunity*, 86(3), e00811-17. <https://doi.org/10.1128/IAI.00811-17>

Melton-Celsa, A.R. (2020). Shiga toxin (Stx) classification, structure, and function. *Microbiology Spectrum*, 8(3), 8.3.21. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.ECEH-0024-2018>

Mendoza, K. I. (2020). *Manual de BPM y POES*. Recuperado de https://fliphtml5.com/xvndq/kimh/Manual_de_BPM_Y_POES/

Mir, R.A., Kudva, I.T., & Hovde, C.J. (2021). Ecology of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in cattle: A review of what we know and what we need to know. *Microorganisms*, 9(5), 1073. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9051073>

Miranda-Estrada, L. I., Ruíz-Rosas, M., Molina-López, J., Parra-Rojas, I., González-Villalobos, E., & Castro-Alarcón, N. (2016). Relación entre factores de virulencia, resistencia a antibióticos y los grupos filogenéticos de *Escherichia coli* uropatógena en dos localidades de México. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 35(7), 426-433. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2016.02.021>

Moline-Velazquez, J., Campos-Martín, Y., & Sánchez-Rodríguez, C. (2021). Understanding commensal and pathogenic *E. coli* metabolic adaptation in the intestinal tract based on novel genomic and functional approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 6903. <https://doi.org/10.3390/ijms22136903>

Monteiro, R., Ageorges, V., Rojas-Lopez, M., Schmidt, H., Weiss, A., Bertin, Y., Forano, E., Jubelin, G., Henderson, I. R., & Gobert, A. P. (2016). A secretome view of colonisation factors in Shiga toxin-encoding *Escherichia coli* (STEC): From enterohaemorrhagic *E. coli*

(ECEH) to related enteropathotypes. FEMS Microbiology Letters, 363(12), fnw179. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnw179>

Montero, D.A., Velasco, J., Del Canto, F., Puente, J.L., Padola, N.L., Rasko, D.A., Farfán, M., Salazar, J.C., & Vidal, R.M. (2019). Locus of adhesion and autoaggregation (LAA), a pathogenicity island present in emerging Shiga Toxin-producing *Escherichia coli* strains. Scientific Reports, 9(1), 708. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36881-4>

Morales, S., Siu, E., Ramírez, P., & Navarro, A. (2017). Determinación de serotipos de *Escherichia coli* aisladas de crías de alpacas (*Vicugna pacos*) con y sin diarrea en Huancavelica. REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria, 18(9), 1

Møretrø, T., Langsrud, S., & Heir, E. (2019). Biofilm formation and disinfectant resistance of *Escherichia coli* O157:H7 in processing environments. Microorganisms, 7(9), 306. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7090306>

Mozhiarasi, V., & Natarajan, T. S. (2022). Slaughterhouse and poultry wastes: management practices, feedstocks for renewable energy production, and recovery of value added products. Biomass conversion and biorefinery, 1–24. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02352-0>

Nastasijevic, I., Tomasevic, I., Smigic, N., Milicevic, D., Petrovic, Z., & Djekic, I. (2017). Hygiene assessment in Serbian meat establishments using different scoring systems. Food Control, 78, 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.03.009>

Navarro-Garcia, F., Gaytan, M.O., Bidoia, F., Talamantes-Becerra, B., Vázquez-Juárez, R.C., Arteaga, J., & Nataro, J.P. (2020). Pathogenic mechanisms and virulence factors of diarrheagenic *Escherichia coli*. Reviews in Medical Microbiology, 31(3), 137-147. <https://doi.org/10.1097/MRM.0000000000000208>

Navarro-Garcia, F., Ruiz-Perez, F., & Eslava, C. (2019). Role of serine proteases in enteropathogenic and enterohemorrhagic *Escherichia coli* infection. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 9, 130. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2019.00130>

Navarro-Garcia, F., Ruiz-Perez, F., Cataldi, Á., & Larzábal, M. (2023). Classification of Diarrheagenic *Escherichia coli* (DEC): Twenty-Five Years Later, Still Expanding. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), 1378. <https://doi.org/10.3390/ijms24021378>

Nguyen, V. T., Jamroz, D., Matamoros, S., Carrique-Mas, J. J., Ho, H. M., Thai, Q. H., Nguyen, T. N., Wagenaar, J. A., Thwaites, G., Parkhill, J., & Schultz, C. (2019). Limited contribution of non-intensive chicken farming to ESBL-producing *Escherichia coli* colonization in humans in Vietnam: An epidemiological and genomic analysis. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 74(3), 561-570. <https://doi.org/10.1093/jac/dky506>

Ny, S., Löfmark, S., Börjesson, S., Englund, S., Ringman, M., Bergström, J., Naucclér, P., Giske, C.G., & Byfors, S. (2017). Community carriage of ESBL-producing *Escherichia coli* is associated with strains of low pathogenicity: a Swedish nationwide study. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 72(2), 582-588. <https://doi.org/10.1093/jac/dkw419>

Okhuysen, P.C., & DuPont, H.L. (2018). Enterohaggative *Escherichia coli* (EAEC): A cause of acute and persistent diarrhea of worldwide importance. *The Journal of Infectious Diseases*, 217(3), 533-536. <https://doi.org/10.1093/infdis/jix642>

Omer, M. K., Hauge, S. J., Østensvik, Ø., Moen, B., Alvseike, O., Røtterud, O. J., Prieto, M., Dommersnes, S., Nesteng, O. H., & Nesbakken, T. (2018). Effects of hygienic treatments during slaughtering on microbial dynamics and contamination of sheep meat. *International Journal of Food Microbiology*, 286, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.07.032>

OMS. (2021). WHO estimates of the global burden of foodborne diseases. World Health Organization.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). Los alimentos contaminados cuestan 420.000 vidas y 95.000 millones de dólares en pérdidas al año. Recuperado de <https://news.un.org/es/story/2022/06/1509842>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). Inocuidad de los alimentos. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>

Organización Mundial de la Salud. (2023). Enfermedades diarreicas: Datos y cifras. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease>

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2020). Enfermedades transmitidas por alimentos. Recuperado de <https://www.paho.org/es/temas/enfermedades-transmitidas-por-alimentos>

Ørskov, F., & Ørskov, I. (1984). Serotyping of *Escherichia coli*. In T. Bergan (Ed.), *Methods in microbiology* (Vol. 14, pp. 43–112). Academic Press.

Palmieri, B., Vadanandari, V., Dhanasekar, R., & Reddy, C.K. (2021). Pathogenic *Escherichia coli* in food: molecular characterization and antimicrobial resistance. *Food Science and Human Wellness*, 10(4), 458-469. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.017>

Pasqua, M., Michelacci, V., Di Martino, M.L., Tozzoli, R., Grossi, M., Colonna, B., Morabito, S., & Prosseda, G. (2017). The intriguing evolutionary journey of enteroinvasive *E. coli* (EIEC) toward pathogenicity. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2390. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02390>

Pastrana-Camacho, A. P., Estévez-Moreno, L. X., & Miranda-de la Lama, G. C. (2023). What slaughterhouse workers' attitudes and knowledge reveal about human-pig relationships during pre-slaughter operations: A profile-based approach. *Meat Science*, 195, 109017.

Pearson, J. S., Giogha, C., Wong Fok Lung, T., & Hartland, E. L. (2016). The genetics of enteropathogenic *Escherichia coli* virulence. *Annual Review of Genetics*, 50, 493-513. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120215-035138>

Platts-Mills, J.A., Liu, J., & Houpt, E.R. (2018). New concepts in diagnostics for infectious diarrhea. *Mucosal Immunology*, 11(6), 1551-1557. <https://doi.org/10.1038/s41385-018-0008-5>

Quispe Ccasa, H. A. (2018). Influencia de indicadores de bienestar animal en el proceso de faenado de reses sobre la calidad físico-química de la carne y pérdidas económicas, en el

centro de beneficio de Chachapoyas [Tesis de maestría, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional de la UNTRM.

Ramírez-Barraza, B. A., Martínez-Natera, J. A., Rodríguez-Torres, L., & Ramírez-Figueroa, D. A. (2023). Enfermedades gastrointestinales transmitidas por el agua y mortalidad infantil: Un estudio de la desigualdad socioeconómica en México. Recuperado de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11593563/>

Ramírez-Castillo, F.Y., Loera-Muro, A., Jacques, M., Garneau, P., Avelar-González, F.J., Harel, J., & Guerrero-Barrera, A.L. (2020). Waterborne pathogens: detection methods and challenges. *Pathogens*, 9(10), 857. <https://doi.org/10.3390/pathogens9100857>

Rasko, D.A., Webster, D.R., Sahl, J.W., Bashir, A., Boisen, N., Scheutz, F., Paxinos, E.E., Sebra, R., Chin, C.S., Iliopoulos, D., Klammer, A., Peluso, P., Lee, L., Kislyuk, A.O., Bullard, J., Kasarskis, A., Wang, S., Eid, J., Rank, D., ... Ravel, J. (2019). Origins of the *E. coli* strain causing an outbreak of hemolytic-uremic syndrome in Germany. *New England Journal of Medicine*, 371(8), 709-717. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1106920>

Reyes, P., Muñoz Cuevas, H., & Paredes, S. (2017). Análisis de la cadena del frijol en México. Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE). Recuperado de <https://repositorio-digital.cide.edu/handle/11651/3716>

Rogawski, E.T., Liu, J., Platts-Mills, J.A., Kabir, F., Lertsethtakarn, P., Sigvas, M., Khan, S.S., Praharaj, I., Murei, A., & Nshama, R. (2020). Use of quantitative molecular diagnostic methods to investigate the effect of enteropathogen infections on linear growth in children in low-resource settings (MALED): A prospective cohort study. *The Lancet Global Health*, 8(2), e254-e265. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(19\)30541-X](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30541-X)

Sánchez, L., Vázquez, M., & Martínez, P. (2021). The role of personnel training in the prevention of foodborne diseases in slaughterhouses. *Food Control*, 128, 108124. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108124>

Sánchez-Herrera, K., Sandoval-Copado, J., Luna-Guevara, J. J., & Hernández-López-Malo, A. (2020). Biofilm formation by foodborne pathogens and its control strategies. *Food Safety and Preservation*, 231-254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816115-5.00007-7>

Santos, A.S., & Finlay, B.B. (2015). Bringing down the host: Enteropathogenic and enterohaemorrhagic *Escherichia coli* effector-mediated subversion of host innate immune pathways. *Cellular Microbiology*, 17(3), 318-332. <https://doi.org/10.1111/cmi.12412>

Scheiring, J., Rosales, A., & Zimmerhackl, L. B. (2010). Hemolytic uremic syndrome caused by Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in children: Incidence, risk factors, and clinical outcome. *European Journal of Pediatrics*, 169(7), 7–13. <https://doi.org/10.1007/s00431-009-1039-4>

Schmidt, J. W., Agga, G. E., Bosilevac, J. M., Brichta-Harhay, D. M., Shackelford, S. D., Wang, R., Wheeler, T. L., & Arthur, T. M. (2020). Occurrence of antimicrobial-resistant *Escherichia coli* and *Salmonella enterica* in the beef cattle production and processing continuum. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(8), e03079-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.03079-19>

Schüller, S., Sadiq, F., Cameron, A. D., & Hegerle, N. (2021). Shiga toxin-producing *Escherichia coli*: The big bad wolf of the bacterial world. *Infection and Immunity*, 89(9), e00133-21. <https://doi.org/10.1128/IAI.00133-21>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (1994). NOM-009-ZOO-1994, Especificaciones sanitarias para la atención y manejo de los animales en los zoológicos. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Salud. (1995). NOM-120-SSA1-1994: Bienes y servicios. Prácticas de higiene y sanidad en el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. *Diario Oficial de la Federación*. <https://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/120ssa14.html>

Secretaría de Salud. (2002). NOM-213-SSA1-2002, Salud ambiental. Manejo de residuos de establecimientos de salud. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Salud. (2004). NOM-194-SSA1-2004, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Determinación de metales pesados. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Salud. (2004). 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. Especificaciones sanitarias de productos. *Diario*

Oficial de la Federación.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661587&fecha=18/09/2004

Servin, A.L. (2017). Diffusely adherent *Escherichia coli* strains expressing Afa/Dr adhesins (Afa/Dr DAEC): Hitherto unrecognized pathogens. *FEMS Microbiology Letters*, 364(10), fnx057. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx057>

SIAP. (2023). Panorama agroalimentario 2023: Producción y consumo de carne en México. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Sofos, J. N., & Geornaras, I. (2010). Overview of current meat hygiene and safety risks and summary of recent studies on biofilms, and control of *Escherichia coli* O157 in nonintact, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat, meat products. *Meat Science*, 86(1), 2-14. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.015>

Tarr, G. A. M., Shringi, S., Phipps, A. I., Besser, T. E., Tarr, P. I., & Peter Rabinowitz, M. D. (2023). Shiga toxin-producing *Escherichia coli* infection in humans: Causal inference synthesis of existing evidence. *PLoS ONE*, 18(4), e0284644. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284644>

Tarr, P.I., Gordon, C.A., & Chandler, W.L. (2018). Shiga-toxin-producing *Escherichia coli* and haemolytic uraemic syndrome. *The Lancet*, 391(10163), 847-859. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)31485-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)31485-X)

Thornton, P. K. (2010). Livestock production: Recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2853-2867.

Tomasevic, I., Kuzmanović, J., Anđelković, A., Saračević, M., Stojanović, M. M., & Djekic, I. (2020). The effects of mandatory HACCP implementation on microbiological indicators of process hygiene in meat processing and retail establishments in Serbia. *Meat Science*, 166, 108138. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108138>

Trachtman, H., Austin, C., Lewinski, M., & Stahl, R. A. K. (2018). Renal and neurological involvement in typical Shiga toxin-associated HUS. *Nature Reviews Nephrology*, 8(11), 658-669. <https://doi.org/10.1038/nrneph.2012.196>

Tran, S. L., Billoud, L., Lewis, S. B., Phillips, A. D., & Schüller, S. (2018). Shiga toxin production and translocation during microaerobic human colonic infection with Shiga toxin-producing *E. coli* O157 and O104. *Cellular Microbiology*, 20(5), e12781. <https://doi.org/10.1111/cmi.12781>

Tseng, M., Fratamico, P. M., Bagi, L., Manzinger, D., & Funk, J. A. (2018). Shiga toxin-producing *E. coli* (STEC) in swine: Prevalence over the finishing period and characteristics of the STEC isolates. *Epidemiology & Infection*, 146(9), 1201-1209. <https://doi.org/10.1017/S0950268818001255>

Tseng, M., Fratamico, P. M., Manning, S. D., & Funk, J. A. (2014). Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in swine: the public health perspective. *Animal Health Research Reviews*, 15(1), 63-75.

Vélez, M., Colello, R., Etcheverría, A., & Padola, N. (2022). *Escherichia coli* productora de toxina Shiga: el desafío de adherirse para sobrevivir. *Revista Argentina de Microbiología*, 55(1), 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2022.04.001>

Vranken, L., Avermaete, T., Petalios, D., & Mathijs, E. (2014). Curbing global meat consumption: Emerging evidence of a second nutrition transition. *Environmental Science & Policy*, 39, 95-106.

Wang, J., Chen, L., Li, P., Li, X., Zhou, H., Wang, F., Li, D

Yamamoto, K., Miura, M., Nakajima, M., Takahashi, T., & Sato, T. (2019). Molecular epidemiology and antimicrobial resistance of Shiga toxin-producing *Escherichia coli*, 2015–2019. *Japanese Journal of Infectious Diseases*, 72(6), 376-383. <https://doi.org/10.7883/yoken.JJID.2019.066>

Yang, S. C., Lin, C. H., Aljuffali, I. A., & Fang, J. Y. (2017). Current pathogenic *Escherichia coli* foodborne outbreak cases and therapy development. *Archives of Microbiology*, 199(6), 811-825. <https://doi.org/10.1007/s00203-017-1393-y>

- Yang, S.C., Hung, C.F., Aljuffali, I.A., & Fang, J.Y. (2020). The roles of the virulence factor IpaB in *Shigella* spp. in the escape from immune cells and invasion of epithelial cells. *Microbiological Research*, 231, 126356. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126356>
- Yang, S.C., Lin, C.H., Sung, C.T., & Fang, J.Y. (2017). Antibacterial activities of bacteriocins: application in foods and pharmaceuticals. *Frontiers in Microbiology*, 8, 563. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00563>
- Yang, X., Badoni, M., Youssef, M.K., & Gill, C.O. (2022). Control of *Escherichia coli* on beef carcasses processed at high line speeds using acid antimicrobial interventions and air-chilling. *Microbial Biotechnology*, 15(2), 587-598. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13876>
- Yang, X., Sun, H., Fan, R., Fu, S., Zhang, J., Matussek, A., Xiong, Y., & Bai, X. (2020). Genetic diversity of the intimin gene (eae) in non-O157 Shiga toxin-producing *Escherichia coli* strains in China. *Scientific Reports*, 10(1), 3275. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60225-w>
- Zamanlou, S., Rezaee, M.A., Aghazadeh, M., Ghotaslou, R., Nave, H.H., & Khalili, Y. (2018). Genotypic and phenotypic characteristics of enteroinvasive *Escherichia coli* associated with diarrhea. *Infection, Genetics and Evolution*, 59, 158-162. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2018.02.009>
- Zoja, C., Buelli, S., & Morigi, M. (2021). Shiga toxin-associated hemolytic uremic syndrome: pathophysiology of endothelial dysfunction. *Kidney International*, 88(4), 738-747. <https://doi.org/10.1016/j.kint.2015.05.016>