





Presencia bacteriana y resistencia antimicrobiana en huevo de gallina ponedora: Una revisión

Bacterial Presence and Antimicrobial Resistance in Laying Hen Eggs: A Review

Andrés Mauricio Barrera-Silva ¹,
Gerardo Adolfo Parra-Hernández ¹,
Sergio Ulloa-Torres ¹,
Laura Juliana Triana ^{2*}



DOI: 10.19053/uptc.01228420.v21.n2.2024.18504

RESUMEN: La resistencia bacteriana en huevos de gallina ponedora constituye una amenaza creciente para la salud pública y la seguridad alimentaria, particularmente en América Latina, donde el uso de antibióticos y biocidas en la producción avícola carece, de una regulación efectiva. El objetivo de esta revisión fue analizar la presencia de bacterias patógenas en huevos de postura y su resistencia a antimicrobianos, con énfasis en el contexto regional latinoamericano. Se realizó una revisión narrativa de la literatura científica publicada entre 2014 y 2024 en bases de datos como Scopus, PubMed, Scielo y Redalyc. Se emplearon palabras clave “huevo de gallina”, “resistencia antimicrobiana”, “bacterias patógenas”, “*Salmonella*”, “*Escherichia coli*” y “biocidas”. Se incluyeron estudios que reportaran prevalencia bacteriana y patrones de resistencia en huevos frescos de gallinas ponedoras. Los trabajos revisados evidencian una elevada prevalencia de *Salmonella* spp. y *Escherichia coli*, con resistencia frecuente a tetraciclinas, betalactámicos y aminoglucósidos. Asimismo, se identificó resistencia cruzada entre antibióticos y biocidas, lo que reduce las alternativas terapéuticas y dificulta las estrategias de control. En la mayoría de países latinoamericanos persisten limitaciones en los sistemas de vigilancia y la implementación de políticas efectivas de control sanitario en granjas avícolas. Los hallazgos destacan la necesidad urgente de fortalecer las medidas de bioseguridad, promover el uso racional de antimicrobianos y fomentar investigaciones que generen datos locales. La adopción de un enfoque integral basado en el concepto Una Salud es esencial para mitigar la diseminación de bacterias multirresistentes y garantizar la inocuidad del huevo como alimento estratégico en la región.

PALABRAS CLAVE: seguridad alimentaria, producción avícola, resistencia antimicrobiana, biocidas, antibióticos, *Salmonella* spp., *Escherichia coli*.

ABSTRACT: Antimicrobial resistance in table eggs from laying hens represents a growing threat to public health and food safety, particularly in Latin America, where the use of antibiotics and biocides in poultry production is often lacks effective regulation. The aim of this review was to analyze the occurrence of pathogenic bacteria in table eggs and their antimicrobial resistance profiles, with an emphasis on the Latin American context. A narrative review of the scientific literature published between 2014 and 2024 was conducted using databases such as Scopus, PubMed, Scielo, and Redalyc. The search employed keywords including “chicken eggs”, “antimicrobial resistance”, “pathogenic bacteria”, “*Salmonella*”, “*Escherichia coli*”, and “biocides”. Studies reporting bacterial prevalence and resistance patterns in fresh eggs from laying hens were included. The reviewed studies revealed a high prevalence of *Salmonella* spp. and *Escherichia coli*, with frequent resistance to tetracyclines, beta-lactams, and aminoglycosides. Cross-resistance between antibiotics and biocides was also observed, limiting therapeutic and control options. In most Latin American countries, monitoring systems and effective sanitary control policies in poultry farms remain insufficient. These findings underscore the urgent need to strengthen biosecurity measures, promote the prudent use of antimicrobials, and encourage research that generates region-specific data. The adoption of an integrated approach based on the One Health concept is essential to mitigate the dissemination of multidrug-resistant bacteria and to ensure the safety of eggs as a strategic food source in the region.

KEYWORDS: food safety, poultry farming, antimicrobial resistance, biocides, antibiotics, *Salmonella* spp., *Escherichia coli*.

FECHA DE RADICACIÓN: 15 de noviembre de 2024 **FECHA DE ACEPTACIÓN:** 10 de diciembre de 2024 **FECHA DE PUBLICACIÓN:** 31 de diciembre de 2024

¹ Investigador independiente, Tunja, Colombia

² Fundación Universitaria Juan de Castellanos , Tunja, Colombia

* Autor de correspondencia. lj triana@jdc.edu.co

INTRODUCCIÓN

Las prácticas productivas en las explotaciones avícolas se han venido cuestionando, debido a la contaminación bacteriana de los productos finales, los cuales afectan la calidad e inocuidad, especialmente el huevo. El huevo es uno de los alimentos más nutritivos y más ampliamente distribuidos y consumidos en el mundo. Según datos de FAO (2024), la producción mundial de huevos ha mantenido un crecimiento sostenido en las últimas décadas. En 1990 se producían alrededor de 35 millones de toneladas, cifra que se duplicó hacia 2015 con 70 millones de toneladas. Para 2020, esta cifra aumentó a aproximadamente 86,7 millones de toneladas, reflejando un incremento global del consumo per cápita de huevo, que pasó de 7 kg en 1990 a más de 9 kg (Windhorst, 2023).

En América Latina, la producción representa más del 12 % del total mundial, con países como México, Brasil, Colombia y Argentina liderando el sector. En 2021, el consumo regional fue de 219 huevos per cápita (~11 kg), mientras que en Colombia se alcanzó un consumo aproximado de 345 huevos por persona en 2024, posicionándose como uno de los más altos de la región, estas cifras evidencian la creciente importancia del huevo como fuente accesible de proteína animal, impulsada por mejoras en la eficiencia productiva, sanidad aviar y campañas de promoción del consumo. Aunque en diversos reportes se ha señalado que México lidera el consumo de huevo, los datos más recientes muestran que China ocupa el primer lugar en consumo per cápita, con aproximadamente 22 kg por persona en 2021, seguida de México con un promedio de 21,5 a 23 kg por persona al año (Compassion in World Farming, 2023; Ritchie et al., 2023). En el caso de la producción, China mantiene una posición dominante a nivel mundial, con una participación que oscila entre el 35 % y el 37 % de la producción global en los últimos años (Yang, 2021).

Otro factor relevante es que diversos análisis recientes confirman el alto valor biológico del huevo, atribuible a su perfil completo de aminoácidos esenciales, su elevada digestibilidad proteica, el equilibrio en las concentraciones de ácidos grasos saturados e insaturados y su bajo contenido de carbohidratos (Puglisi & Fernandez, 2022). Además, es la célula reproductora de la gallina, lo cual indica que debe tener dentro de su composición físico química las condiciones necesarias para el desarrollo del embrión (Guier-Serrano et al., 2021). Cuando el huevo es consumido con altas cargas de microorganismos, se puede favorecer la presentación de desórdenes gastrointestinales como las enfermedades diarreicas agudas (EDAs), entre otras. Las EDAs son unas de las enfermedades más comúnmente reportadas y una de sus causas más relevantes ha sido el consumo de alimentos con altos contenidos bacterianos (WHO, 2024).

Adicionalmente, en los sistemas productivos es muy común el uso de antimicrobianos dentro de los procesos de manejo animal, muchos de estos antibióticos generan residuos que pueden provocar en el consumidor efectos adversos (Jaimes-Dueñez et al., 2022), tales como probabilidad de daños tisulares y orgánicos causados por la ingesta prolongada de alimentos contaminados, reacciones alérgicas y/o tóxicas de acuerdo con el tipo de residuo presente en el producto, desarrollo de resistencia antimicrobiana y alteraciones de la carga bacteriana intestinal del aparato digestivo, entre otros (Krišová & Kožárová, 2018).

Por tanto, es posible que el consumo de alimentos con antibióticos, provenientes de sistemas productivos avícolas, pueda generar bacterias resistentes que no sean controladas en estos ambientes y causen enfermedad en los humanos. Además, el uso inadecuado de antibióticos en el manejo de sistemas avícolas ha causado la alteración de las cargas bacterianas presentes debido a que favorece el crecimiento, desarrollo y proliferación de las bacterias patógenas (Jonaidi-Jafari et al., 2016), aumentando su proporción y adaptación al medio productivo. Con la gran cantidad de patologías infectocontagiosas que se presentan en las gallinas ponedoras y su posible afectación a la salud humana, es necesario identificar los agentes etiológicos responsables del proceso infeccioso para monitorear la presencia de estos microorganismos en los productos, y aplicar una terapia antimicrobiana eficaz (Newberry & Tarazona, 2016).

Los sistemas de producción animal, en general, se han desarrollado bajo parámetros que incluyen el uso de diferentes agentes antibacterianos, constituyendo una de las principales herramientas para el control de enfermedades causadas por bacterias (Quiceno & Rodríguez, 2023), sin embargo, su uso sostenido ha favorecido la aparición de microorganismos patógenos resistentes de origen animal, los cuales pueden transmitirse a la población humana. En la actualidad, se enfatiza el uso racional de antimicrobianos en la producción animal para disminuir riesgos sanitarios y garantizar que los productos de origen animal no representen una amenaza para la salud pública, diversas revisiones técnicas y estudios científicos coinciden en que el uso inapropiado de antibióticos, especialmente con fines profilácticos o como promotores de crecimiento, ejerce presión selectiva sobre las bacterias, incrementando el riesgo de resistencia y su propagación hacia los seres humanos y el ambiente (Mulchandani et al., 2023). Entre las estrategias recomendadas destacan la implementación de políticas claras, la vigilancia integrada bajo el enfoque *One Health* y la reducción del uso subterapéutico en animales sanos, reservando los antimicrobianos para tratamientos respaldados por diagnóstico (Caneschi et al., 2023; Mulchandani et al., 2023).

Asimismo, esta revisión incorpora estudios recientes que exploran los mecanismos moleculares de resistencia antimicrobiana en bacterias asociadas a huevos, incluyendo análisis genéticos y procesos de transferencia horizontal

de genes, con el objetivo de proporcionar una visión integral del riesgo microbiológico en la producción avícola.

En este contexto, se presentan hallazgos de investigaciones que caracterizan la presencia bacteriana y los perfiles de resistencia antimicrobiana en huevos de gallinas ponedoras, integrando un enfoque regional que permite contextualizar esta problemática en el ámbito de América Latina y, en particular, en Colombia. Si bien el tema ha sido abordado previamente en publicaciones científicas, libros y documentos técnicos de alcance general, esta revisión ofrece una perspectiva diferenciada al centrarse en las condiciones sanitarias y productivas del sistema avícola, lo que permite identificar desafíos específicos y proponer estrategias de control adaptadas a las realidades locales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión narrativa de literatura científica con el objetivo de recopilar, analizar y sintetizar información relacionada con la presencia bacteriana y la resistencia antimicrobiana en huevos de gallina ponedora.

La búsqueda de información se llevó a cabo en las bases de datos científicas Scopus, PubMed, ScienceDirect, SciELO, Redalyc y Google Scholar, complementada con consultas en CAB Abstracts y AGRIS por su relevancia en el área agrícola y pecuaria. Se emplearon como descriptores y palabras clave, tanto en español como en inglés, los términos: “huevo de gallina”, “resistencia antimicrobiana”, “bacterias patógenas”, “*Salmonella*”, “*Escherichia coli*”, “biocidas”, “seguridad alimentaria” y “antibióticos en producción avícola”, así como sus combinaciones mediante operadores booleanos (AND, OR). La búsqueda se realizó en ambos idiomas con el fin de abarcar literatura científica global y regional.

El periodo de 2014 a 2024 se seleccionó para priorizar estudios recientes que reflejen los avances técnicos, las tendencias actuales de resistencia antimicrobiana y las normativas sanitarias vigentes. Sin embargo, cuando fue necesario para contextualizar conceptos o procesos relevantes, también se incluyó literatura clásica previa a 2010, particularmente libros, manuales técnicos y revisiones de referencia ampliamente citadas. Se establecieron como criterios de inclusión: artículos originales, revisiones y reportes técnicos que abordaran aspectos microbiológicos, perfiles de resistencia, presencia de residuos de antibióticos o biocidas, o mecanismos genéticos de resistencia en huevos de gallina de postura. Se priorizaron estudios desarrollados en países de América Latina o que incluyeran datos comparativos regionales. Se excluyeron trabajos duplicados, artículos sin acceso al texto completo, estudios exclusivamente clínicos en humanos o aquellos sin relación directa con huevos.

Durante la búsqueda inicial, se identificaron 312 registros en las bases de datos consultadas. Tras eliminar duplicados ($n = 45$), quedaron 267 documentos para la revisión de títulos y resúmenes. De estos, 189 fueron descartados por no cumplir los criterios de inclusión, principalmente por carecer de relación directa con huevos de gallina (52 %), tratar exclusivamente estudios clínicos en humanos (28 %) o no presentar información sobre resistencia antimicrobiana (20 %). La muestra final quedó conformada por 78 documentos: artículos originales (65 %), revisiones bibliográficas (20 %), reportes técnicos (10 %) y manuales o libros de referencia (5 %).

En cuanto a la distribución temática, la mayoría de los estudios abordaron la detección de patógenos específicos (53 %), seguida de perfiles de resistencia antimicrobiana (31 %), análisis de residuos de antibióticos o biocidas (10 %) y mecanismos genéticos de resistencia (6 %). En términos geográficos, el 42 % de las publicaciones correspondieron a América Latina (principalmente Brasil, Colombia, México y Argentina), el 35 % a Asia (China, India y Japón), el 18 % a Europa y el 5 % a Norteamérica.

Aspectos generales del huevo

El huevo es un alimento de alto valor nutricional y uno de los más consumidos a nivel mundial. No obstante, su inocuidad puede verse comprometida por la presencia de microorganismos patógenos. A nivel global, se estima que cada año cerca de 600 millones de personas enferman y alrededor de 420 mil mueren por el consumo de alimentos contaminados (Fung et al., 2018), siendo las bacterias responsables de aproximadamente el 69 % de los casos (WHO, 2024).

En esta revisión se abordarán, en primer lugar, las características del huevo y los factores que influyen en su susceptibilidad a la contaminación bacteriana. Posteriormente, se presentarán los hallazgos sobre la caracterización bacteriana reportada en huevos de gallina ponedora, seguidos del análisis de la resistencia antimicrobiana de las bacterias aisladas, la resistencia a biocidas y las implicaciones de estos fenómenos en la salud pública bajo el enfoque de Una Salud.

Aunque la contaminación bacteriana y la resistencia antimicrobiana están relacionadas, constituyen problemáticas distintas. La primera se refiere a la presencia de microorganismos en el alimento, mientras que la segunda describe la capacidad de estos para evadir el efecto de los antibióticos u otros agentes. Diferenciar ambos conceptos permite comprender con mayor claridad las evidencias que se presentarán en este trabajo.

A pesar de sus cualidades nutritivas y su amplia aceptación en la dieta humana, el huevo es particularmente susceptible a la contaminación bacteriana debido a su exposición a múltiples fuentes: contacto con heces en la cloaca

de las aves, nidales, camas, bandejas de recolección y transporte, así como la manipulación por parte de operarios. Estas prácticas de manejo constituyen un riesgo latente para su inocuidad. No obstante, el huevo cuenta con defensas naturales: la cáscara y sus membranas internas actúan como barreras físicas, mientras que la clara contiene sustancias con actividad antimicrobiana, como lisozima, ovotransferrina y otras proteínas con propiedades bactericidas (Mahmoud et al., 2022; Han et al., 2023).

Esta conformación, en principio, genera un ambiente estéril protegido por la cáscara y las membranas internas. Adicionalmente la cáscara está recubierta por la cutícula compuesta por proteínas y lípidos que funciona como la primera línea de defensa del huevo (Kulshreshtha et al., 2022). Sin embargo, estas barreras pueden verse alteradas por ciertos factores como humedad, temperatura ambiente, temperatura del huevo y la limpieza de estos son condiciones que alteran las características físicas de la cutícula con lo cual se disminuye la capacidad de protección (Park et al., 2015).

Además, otros factores, como la edad de las gallinas y el tiempo de almacenamiento del huevo, tienen un impacto significativo en la composición y calidad de la cutícula. Durante el primer año de postura, la capacidad de glicación y contenido lipídico disminuyen gradualmente con la edad de las aves, reduciéndose la cobertura y grosor de la cutícula, lo que puede aumentar la permeabilidad bacteriana (Rodríguez-Navarro et al., 2013).

Al mismo tiempo, el almacenamiento prolongado especialmente a temperatura ambiente puede causar deshidratación de la cutícula, apertura de poros y microfracturas en la cáscara, pérdida de espesor y pérdida gradual de proteínas protectoras. Estos cambios disminuyen la efectividad de la barrera física y facilitan la penetración microbiana (Yamak et al., 2020; Obianwuna et al., 2022)

Caracterización bacteriana

La presencia e ingreso de las distintas bacterias al huevo se puede dar por dos grandes vías. Una, la transmisión vertical (transovárica u oviductal) y dos, transmisión horizontal o transcascárida. A nivel vertical, las bacterias pueden provenir del ovario o el aparato reproductor de la hembra (Windhorst, 2023). A nivel horizontal (transcascarida), las bacterias provienen del ambiente.

La Organización Mundial de la Salud y estudios microbiológicos han identificado que, en huevos no incubados, las bacterias más frecuentes en orden decreciente fueron *Staphylococcus*, coliformes, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Salmonella* y *Proteus* (Fung et al., 2018). En la mayoría de investigaciones de carácter epidemiológico y microbiológico, el foco principal ha sido la caracterización de la presencia de *Salmonella* y *Escherichia coli*, dadas sus implicaciones en

enfermedades entéricas humanas. No obstante, estudios recientes también han documentado la presencia de otros géneros, como *Proteus*, *Staphylococcus aureus* y *Enterobacteriaceae*, con prevalencias que varían según las condiciones de higiene y origen del huevo (Mansour & Hamid Toweir, 2022).

Son pocos los estudios realizados en Colombia que caracterizan distintas bacterias, pero los datos encontrados revelan que la prevalencia de *Salmonella* en los muestreos es elevada, seguida de la prevalencia de *E. Coli* debido a la importancia para el Instituto Nacional de Salud de determinar estas bacterias causantes de las principales afectaciones entéricas monitoreadas por sus sistemas de vigilancia (WHO, 2024).

Sin embargo se caracterizan otras familias de bacterias como *Acinetobacter (baumannii, calcoaceticus)*, *Aeromonas (hydrophila, sobria)*, *Bacillus sp.*, *Citrobacter (amalonaticus, diversus, freundii, koseri, farmeri)*, *Enterobacter (aerogenes, agglomerans, cloacae, gergoviae, sakazakii, taylorae, vulneris)*, *Escherichia hermanii*, *Klebsiella (oxytoca, ozanae, pneumoniae)*, *Proteus sp.*, *Pseudomonas (aeruginosa, fluorescens, putida)*, *Sarcina (aurantiaca, maxima)*, *Serratia (liquefaciens, marcescens)*, *Staphylococcus (epidermidis, aureus)*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Streptococcus grupo viridans* (Grande et al., 2016; Liu et al., 2020; Damena et al., 2022).

La *Salmonella* es un patógeno globalmente distribuido, compuesto por más de 2.500 serovares reconocidos, lo que le otorga una elevada adaptabilidad y capacidad invasiva en distintos hospedadores (Leão et al., 2024), esta diversidad de subespecies y serovares contribuye a su amplia presencia en múltiples nichos ecológicos, incluyendo alimentos de origen animal no incubados. Un estudio realizado en Dinamarca reflejó que la principal fuente de *Salmonella*, causante de enfermedades entéricas en ese país, proviene de alimentos importados de origen animal y, a su vez, el 37,6% de estos casos es asociado al consumo de huevos de mesa (Fastl et al., 2023).

Por consiguiente, es esencial evaluar las prácticas productivas en las explotaciones avícolas y fortalecer las estrategias de vigilancia durante la manipulación y el transporte de huevos, dado que las condiciones ambientales influyen significativamente en la contaminación por *Salmonella*. Un estudio realizado en Kosovo, en el que se evaluaron 39 granjas, evidenció la presencia de *Salmonella* Enteritidis en una proporción considerable de explotaciones, asociando su detección con factores como la humedad y la temperatura ambiental, que favorecen la penetración de la bacteria en el interior del huevo (Hulaj et al., 2016). De manera complementaria, Whiley & Ross (2015) demostraron en Japón que, bajo condiciones simuladas de almacenamiento, a menor temperatura y humedad se presentaba un menor desarrollo bacteriano en los huevos inoculados.

Investigaciones más recientes han confirmado y ampliado estos hallazgos. Por ejemplo, Khan McWhorter et al. (2021) inocularon *Salmonella* Typhimurium en huevos y los almacenaron a 5 °C y 25 °C, observando que, a los 4 días, la carga bacteriana en la yema aumentó de forma significativa a 25 °C, mientras que a 5 °C no se detectó crecimiento interno, aunque la bacteria sobrevivió mejor en la superficie de la cáscara. Además, se determinó que genes relacionados con virulencia, formación de biofilm y adhesión, como *bapA*, *csgB*, *ompR* y *spvA*, presentaban mayor expresión a 25 °C que a 5 °C, lo que indica un riesgo potencialmente mayor de infección a temperaturas de almacenamiento más altas.

Por otro lado, estudios sobre supervivencia en cáscara han demostrado que *Salmonella* puede persistir durante largos periodos en condiciones de alta humedad relativa (80–90 %), incluso sin crecimiento detectable en el contenido del huevo, lo que refuerza la importancia de mantener condiciones de almacenamiento que limiten tanto la humedad como la temperatura (Kulshreshtha et al., 2024). En esta misma línea, se ha reportado que la prevalencia de *Salmonella* es mayor en la cáscara (~4,9 %) que en el contenido (~1,8 %), siendo *S. Enteritidis* el serovar más frecuente, lo que subraya el papel crítico de la higiene en la producción y el manejo post-puesta (Archer et al., 2023; Hinson et al., 2025).

Adicionalmente, se observó que los huevos procedentes de aves en etapas tempranas de su vida productiva presentan una mayor probabilidad de contaminación (Hulaj et al., 2016), lo que resalta la importancia de evaluar la relación entre los parámetros productivos y la inocuidad del producto. Asimismo, Sodagari et al. (2023) reportaron un incremento en la contaminación de los huevos a medida que aumentó el porcentaje de postura de las aves, registrando un 76 % de muestras positivas cuando el porcentaje de postura superó el 80 %, frente a un 26 % de muestras positivas cuando este fue inferior al 80 %.

El almacenamiento de huevos en los galpones, el tipo de alimento suministrado y los materiales empleados en las instalaciones, como el bambú (*Bambuseae*), han sido identificados como factores de riesgo para la proliferación de *Salmonella* en sistemas de producción avícola (Rodríguez et al., 2015). Estudios previos ya señalaban que el 83 % de los trabajos revisados detectaron presencia de *Salmonella*, con mayor frecuencia de serovares como *S. Enteritidis*, *S. Typhimurium*, *S. Kentucky* y *S. Gallinarum* (Barreto et al., 2016).

Investigaciones recientes confirman que el riesgo de contaminación en huevos persiste. Li et al. (2020) reportaron una prevalencia de *Salmonella* del 7,1 % en huevos crudos, con una carga significativamente mayor en la cáscara (10,7 %) que en el contenido interno (3,6 %), estos hallazgos refuerzan la importancia de controlar la manipulación post-puesta y mantener condiciones ambientales óptimas durante el almacenamiento. Asimismo, se ha

evidenciado que las características estructurales de las instalaciones y las prácticas de higiene aplicadas influyen de manera determinante en la proliferación de patógenos.

En cuanto a *Escherichia coli*, este microorganismo es considerado un indicador de contaminación fecal y un patógeno relevante en enfermedades gastrointestinales, forma parte del microbiota intestinal de las aves, lo que lo convierte en una fuente potencial de contaminación del huevo (Windhorst, 2023). Un estudio reciente demostró que, en casos de colisepticemia en gallinas ponedoras, *E. coli* patógena puede translocarse al interior del huevo, detectándose en cuatro muestras de clara y una de yema de un total de 167 huevos analizados (Abdelhamid et al., 2024). En Etiopía, Kebede & Duga (2022) reportaron una prevalencia global del 11,95 % en huevos comerciales, con mayor frecuencia en cáscara (13,4 %) que en el contenido (5,2 %), evidenciando que la contaminación superficial no siempre implica afectación interna.

Asimismo, Risalvato et al. (2025) señalaron que hasta un 84 % de las cáscaras pueden presentar *E. coli*, lo que refuerza la necesidad de intervenciones sanitarias rigurosas durante la recolección y manipulación post-puesta. Estudios previos ya habían observado que, a pesar de altas concentraciones de *E. coli* en heces, las cantidades detectadas en el interior de los huevos eran mínimas, incluso cuando se recolectaban en los primeros 30 minutos tras la postura (Kapena et al., 2020).

Por otra parte, Jure et al. (2015), en un estudio analiza las cantidades de bacterias presentes en la cáscara y las compara con las presentes en camas, bandejas y áreas de almacenamiento, aquí se observa que los aislados de la cáscara son ostensiblemente inferiores a los presentados en los aislamientos de las instalaciones y equipos analizados, esto sugiere que las fuentes de contaminación del huevo pueden ser las instalaciones y equipos presentes, sumadas a un mal manejo de las mismas, específicamente en la higienización.

Mecanismos de resistencia bacteriana a los antimicrobianos

La resistencia bacteriana a los antimicrobianos es un problema creciente en la producción de huevos de gallina ponedora (Li & Xu, 2024), debido a la capacidad de bacterias como *Salmonella* spp. y *Escherichia coli* para desarrollar y transmitir mecanismos que les permiten evadir el efecto de fármacos utilizados en medicina veterinaria y humana. Estos mecanismos incluyen tanto resistencia intrínseca, asociada a características genéticas propias de las bacterias, como resistencia adquirida, originada por mutaciones o por la transferencia horizontal de genes (Hu et al., 2016).

En aislamientos de *Salmonella* provenientes de huevos y productos avícolas se han identificado genes de resistencia a β -lactámicos, aminoglucósidos,

tetraciclinas y sulfonamidas, portados frecuentemente en plásmidos que facilitan su diseminación en la cadena de producción y en el ambiente (Hu et al., 2016). *Salmonella* spp., aislada de huevos mostró resistencia del 100 % a amoxicilina y eritromicina, mientras que *E. coli* presentó resistencia total a eritromicina, evidenciando la circulación de cepas multirresistentes en el sistema productivo (Pereira et al., 2024).

La transferencia horizontal de genes (HGT) desempeña un papel clave en la diseminación de esta resistencia en ambientes avícolas, facilitada por plásmidos conjugativos, transposones y bacteriófagos que actúan como vehículos de genes de resistencia entre bacterias comensales y patógenas presentes en la superficie y contenido de los huevos (Hu et al., 2016). Además, la co-selección mediada por contaminantes ambientales como metales pesados y desinfectantes utilizados en galpones puede potenciar la persistencia de cepas resistentes.

Por otro lado, la presencia de residuos de antibióticos en huevos, incluso en niveles por debajo de los límites máximos permitidos, puede ejercer presión selectiva y favorecer la aparición de resistencia. Owusu-Doubreh et al. (2022) reportaron residuos de penicilinas, cefalosporinas, tetraciclinas y quinolonas tanto en huevos de producción doméstica como en los provenientes de supermercados. Estos hallazgos, aunque no superaron los niveles de seguridad establecidos, refuerzan la necesidad de mejorar la vigilancia y el uso responsable de antimicrobianos en la producción de huevos.

Determinación de resistencia antimicrobiana

Un estudio basado en secuenciación del genoma completo (WGS) de 143 aislamientos de *S. Enteritidis*, *Typhimurium* y *Heidelberg*, provenientes de huevos y aves ponedoras, identificó genes de resistencia a múltiples clases de antimicrobianos: aminoglucósidos (70,6 %), tetraciclinas (26,6 %), sulfonamidas (23,8 %), fosfomicina (25,2 %) y β lactámicos (15,4 %). Entre los genes de resistencia más prevalentes se encontraron *aadA*, *tet(B)*, *sul1*, y *aac(3)-IV*, los cuales estuvieron frecuentemente asociados a plásmidos, lo que sugiere una alta capacidad de diseminación horizontal en entornos productivos avícolas. Además, algunos aislamientos de *S. Typhimurium* y *S. Heidelberg* presentaron resistencia simultánea a cuatro o más antimicrobianos, lo que refuerza la preocupación sobre la multirresistencia en la cadena alimentaria (Hu et al., 2020; Nuanmuang et al., 2023).

De forma similar, se han detectado genes como *mecA* en *S. aureus* y *aac(3)-IV* en *E. coli*, así como variantes de los genes *tet* y *aadA* en *Salmonella* spp. y *S. aureus*, confirmando la circulación de cepas resistentes en distintos géneros bacterianos vinculados a huevos y ambientes avícolas. Esta resistencia no solo puede transmitirse verticalmente a la descendencia bacteriana, sino

también horizontalmente entre especies mediante mecanismos como conjugación y transducción, facilitando su propagación en la cadena alimentaria (Boerlin et al., 2005).

La transferencia de estos genes aumenta la diseminación de la resistencia y permite que una sola bacteria pueda portar múltiples tipos de genes de resistencia, convirtiéndose en multiresistente a diversos antimicrobianos (Kim et al., 2023). Por ejemplo, en un estudio agroecológico se descubrió que las heces provenientes de producciones animales, utilizadas como abono orgánico, contenían bacterias con genes de resistencia que fueron transferidos a bacterias del suelo, lo que también puede explicar la presencia de bacterias resistentes en granjas orgánicas, donde el uso de antimicrobianos es mínimo o nulo (Cheng et al., 2016).

La transferencia de genes de resistencia entre bacterias en el ambiente avícola es un área de investigación crucial. La resistencia a la tetraciclina en *E. coli*, observada en estudios sobre *Salmonella enterica*, sugiere un riesgo de transferencia horizontal en entornos compartidos entre animales y alimentos de origen animal, sin embargo, la transferencia de resistencia entre cepas en condiciones de laboratorio no siempre ocurre eficazmente, lo que indica que los factores ambientales y biológicos que inhiben o facilitan este proceso requieren mayor investigación (Guernier-Cambert et al., 2024). La integración de análisis metagenómicos, pruebas de resistencia y monitoreo de genes antimicrobianos proporciona una visión integral para evaluar la diseminación de resistencia en los sistemas avícolas y mejorar la seguridad en la producción alimentaria (Zhang Nickerson et al., 2024).

La secuenciación completa del genoma (Whole-Genome Sequencing, WGS) realizada por Chen et al. (2024), ha permitido analizar los perfiles de resistencia en *Salmonella enterica* y otras bacterias en granjas avícolas. Este método ha revelado que serotipos como *S. Typhimurium* y *S. Heidelberg* portan genes de resistencia a múltiples antibióticos, incluyendo aminoglucósidos, tetraciclinas, y β -lactámicos. Cada serotipo presenta variaciones en los patrones de resistencia, lo que evidencia la diversidad genética y la importancia de monitorear las resistencias específicas para gestionar mejor los riesgos en la producción avícola.

Un estudio reciente realizado por Lima et al. (2024), desarrolló un método para la extracción, detección y cuantificación de residuos de antibióticos en huevos mediante UHPLC-TOF-MS y UHPLC-QTRAP-MS/MS, cumpliendo con el Reglamento (UE) 2021/808. Este método, que utiliza extracción líquido-líquido (LLE) con acetonitrilo (ACN) y EDTA, permitió detectar residuos de varios antibióticos, incluyendo penicilinas, cefalosporinas, tetraciclinas y quinolonas en muestras de huevos de producción doméstica y supermercados. Aunque todas las muestras positivas estaban por debajo de los límites establecidos, los métodos desarrollados resultaron eficaces para la detección

simultánea de varias moléculas y pueden ampliarse para otros matrices de origen animal.

A nivel regulatorio, la Comisión Europea ha establecido límites máximos de residuos (LMR) para antibióticos en alimentos de origen animal, como los huevos, con el fin de evitar efectos adversos en la salud del consumidor, tales como alergias y resistencia antimicrobiana (RAM). En China, se han implementado regulaciones para reducir el uso de antimicrobianos en granjas avícolas, estas medidas han disminuido la presencia de genes de alta resistencia y reducido la prevalencia de patógenos resistentes en el entorno de producción (Pan et al., 2024). Sin embargo, factores como prácticas de manejo deficientes pueden permitir que estos genes de resistencia persistan en el ambiente, lo que destaca la necesidad de controles de bioseguridad más rigurosos. Además, se han propuesto alternativas como el uso de anticuerpos IgY de yema de huevo, que han mostrado eficacia en la reducción de patógenos gastrointestinales en animales y representan un enfoque prometededor para disminuir el uso de antibióticos.

Resistencia a antibióticos

Se pueden observar gran cantidad de reportes significativos para cada uno de los antibióticos más importantes referenciados en los estudios. La tetraciclina ocupa el primer lugar en reportes de estudios en todo el mundo, y preocupa que está involucrado en la mayoría de los protocolos de manejo de aves ponedoras para recepción de aves en los galpones y tratamiento de afecciones respiratorias y digestivas (Jahantigh et al., 2020). Le siguen el ácido nalidíxico, ampicilina y estreptomycin, los cuales son ampliamente usados para resolver afecciones del tracto génitourinario, respiratorio y digestivo respectivamente (Ozdemirel et al., 2021).

La emergencia de bacterias multirresistentes (MDR) en productos avícolas representa un problema creciente en salud pública, pues la transmisión de genes de resistencia a través de alimentos de origen animal puede contribuir a la propagación de resistencias a antibióticos de relevancia clínica. Diversos estudios han evaluado la prevalencia y los perfiles de resistencia de bacterias como *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., y *Staphylococcus aureus* en productos avícolas, por ejemplo, en Bangladesh, se identificaron altos niveles de resistencia a antibióticos en muestras de huevo, carne y heces, con bacterias resistentes a antibióticos como amoxicilina, doxiciclina, tetraciclina y eritromicina (Rafiq et al., 2024).

Los resultados de Rafiq et al. (2024) mostraron que los aislados de *E. coli*, *S. aureus* y *Salmonella* spp. eran 100 % resistentes a amoxicilina y eritromicina, especialmente en muestras de carne y heces. También se identificó una alta resistencia a doxiciclina y tetraciclina en *Salmonella* y *S. aureus* de muestras

fecales, en las muestras de huevo *Salmonella* spp. mostró una resistencia del 100 % a amoxicilina y eritromicina, mientras que *E. coli* era completamente resistente a eritromicina.

Por otro lado, *Salmonella* spp. fue identificada en huevos, mostró susceptibilidad total a doxiciclina, gentamicina, levofloxacina y tetraciclina, destacando la variabilidad en perfiles de resistencia según el tipo de muestra y especie bacteriana. Los análisis genéticos revelaron la presencia de genes de resistencia como *mecA* en *S. aureus* y *aac(3)-IV* en *E. coli*, así como la alta prevalencia de *sulI*, *tetB* y *aadA1* en *Salmonella* spp. y *S. aureus*, y de *sulI*, *tetA* y *blaSHV* en *E. coli* (Rafiq et al., 2024). Estos hallazgos reflejan una elevada resistencia a múltiples fármacos, subrayando la necesidad de bioseguridad y un uso prudente de antibióticos en la producción avícola para reducir la propagación de genes de resistencia.

En granjas avícolas de China se observó una amplia distribución de variantes del gen *tet(X)*, que confiere resistencia a tetraciclinas, en diferentes linajes de *E. coli*. La presencia de estos genes *tet(X)* estuvo estrechamente relacionada con elementos genéticos móviles (MGEs) como los transposones ISCR2 e IS1B, que facilitan la transferencia horizontal de genes en el ambiente de producción avícola. Estos resultados son particularmente relevantes, ya que las variantes *tet(X)* permiten la inactivación de tetraciclinas de última generación, una clase de antibióticos esencial en el tratamiento de infecciones bacterianas. Asimismo, se observó que la reducción en el uso de antibióticos en estas granjas parece haber mitigado parcialmente la presencia de genes de resistencia de alto riesgo, sin embargo, se mantuvo la transmisión de ARGs mediante transferencia horizontal. Este estudio subraya que la disminución en el uso de antibióticos en sistemas de producción intensiva constituye una estrategia parcial, que requiere ser complementada con otras prácticas de manejo para reducir la carga total de ARGs en el ambiente (Pan et al., 2024).

En otro estudio en la región de Ningxia, China, se documentó la persistencia notable de residuos de antibióticos, como tetraciclina y aureomicina, en las heces de pollos durante los ciclos de crianza, este ambiente, rico en antibióticos y metales pesados como zinc, favoreció la selección de genes de resistencia como aminoglucósidos, MLSB (macrólidos, lincosamidas y estreptograminas) y ARGs de tetraciclinas. Se observó que los MGEs eran más abundantes en suelos cercanos a los sistemas avícolas, aumentando en frecuencia hasta los 50 m de distancia. Este estudio demuestra que la proximidad a las instalaciones de producción influye en la dispersión de ARGs y MGEs, destacando cómo tanto los antibióticos como los metales pesados ejercen presión selectiva, contribuyendo a la persistencia y movilidad de estos genes de resistencia en el ambiente (Shen et al., 2023).

Asimismo, un estudio realizado en Tamil Nadu, India, mostró la acumulación de tetraciclinas (CTC, OTC y doxiciclina) y fluoroquinolonas (enrofloxacina

y ciprofloxacina) en la cama de pollos y en suelos agrícolas fertilizados con dicha cama. Las concentraciones de estos antibióticos alcanzaron sus niveles máximos en muestras recientes de cama de pollos en los galpones, y aunque disminuyeron en suelos fertilizados a largo plazo, se detectaron aún niveles significativos de estos compuestos. En la cama de pollo y en los suelos fertilizados se identificaron genes de resistencia como *tetA*, *tetB*, *qnrA*, *qnrB* y *qnrS*, resaltando que la aplicación de estiércol avícola en suelos agrícolas representa un riesgo considerable de diseminación de ARGs. Este estudio subraya la necesidad de estrategias de mitigación antes de la aplicación de cama de pollos en la agricultura para limitar la transmisión de resistencia antimicrobiana y proteger la salud pública y los ecosistemas locales (Kuppusamy et al., 2024).

Anihouvi et al. (2024) en Benín (África Occidental) identificaron la presencia de bacterias MDR en pollo congelado importado de *E. coli*, *S. aureus* y *Pseudomonas spp.*. Los aislados de *S. aureus* mostraron tasas de resistencia de hasta el 36.1 %, y se encontró que el 21.2 % de los aislados de *E. coli* y el 32.8 % de *Pseudomonas spp.* eran multirresistentes. Estos hallazgos indican que el pollo congelado importado puede ser una fuente significativa de bacterias multirresistentes, lo cual enfatizan en la importancia de mejorar las prácticas de higiene y conservación en la cadena de suministro de alimentos.

Se ha observado que algunos antibióticos presentan baja absorción oral en gallinas ponedoras, lo que reduce su presencia como residuos en el huevo, caso de la lincomicina (Kim et al., 2023). Esto sugiere que ciertos medicamentos pueden ser gestionados con reducido riesgo de residualidad, aunque requiere mayor investigación para comprender la biodisponibilidad y el impacto de estos fármacos a la resistencia a largo plazo (Zhang Bai et al., 2024).

Varios estudios han mostrado una gran variedad de antibióticos utilizados en los sistemas productivos avícolas. Por este motivo, se usan para realizar las pruebas de residualidad y resistencia contra las distintas bacterias presentes en las muestras de huevos. En la tabla 1 se muestran los antibióticos con algún grado de resistencia por parte de las bacterias. El gran número de antibióticos que se pueden observar causa preocupación debido a la disminución de medicamentos viables para el manejo de tratamientos en la avicultura.

TABLA 1. Antibióticos reportados con algún grado de resistencia en los estudios analizados.

Clasificación	Principio Activo	Fuente
Quinolonas	Acido nalidíxico, ciprofloxacina, flumequina, enrofloxacina, levofloxacina, moxifloxacina	Álvarez-Hernández et al., 2015; Chávez-Jacobo et al., 2015
Betalactámicos	Ampicilina, amoxicilina, cefalotina, ceftiofur, doxiciclina, cefoxitina, ceftriaxone, carbenicilina, penicilina, oxacilina, ceftazidima, cefotaxima, cefixima, cefpodoxima, cefalexina, piperacilina, ticarcilina	Dutil et al., 2009; De Angelis et al., 2020; Van Boeckel et al., 2015; Tang et al. 2017, 2021; Alexander et al., 2023; Zhang Bai et al., 2024
Tetraciclinas	Tetraciclina, oxitetraciclina, tigeciclina	Grossman, 2016; Alam et al., 2023; Ramírez-Bayard et al., 2023; Chen et al., 2023
Aminoglucosido	Gentamicina, espectinomicina, apramicina, neomicina, estreptomina, amikacina, kanamicina, tobramicina, netilmicina	Garneau-Tsodikova & Labby, 2015; Suárez-Pérez et al., 2022; Islam et al., 2023; Bhattarai et al., 2024
Sulfonamidas	Trimetoprim, sulfametoxazole	Wang et al., 2014; Ovung & Bhattacharyya, 2021; Zafar et al., 2023
Fenicoles	Cloranfenicol, florfenicol,	Shen et al., 2013; Chen et al., 2004
Inhibidor de Betalactamasas	Acido clavulánico, tazobactam	Tooke et al., 2019; De Angelis et al., 2020; Zhang Bai et al., 2024
Polipeptidos	Colistina, polimixina B	Trimble et al., 2016; Garcia et al., 2023
Macrolido	Eritromicina, azitromicina, clindamicina, tilosina, rifampicinas	Fyfe et al., 2016; Amdan et al., 2024
Glucopéptido	Vancomicina, fosfomicina	Giono-Cerezo et al., 2020

Resistencia a biocidas

Un biocida es una sustancia química o un organismo capaz de destruir, repeler o controlar microorganismos nocivos, actuando sobre múltiples blancos celulares como membranas, enzimas y ácidos nucleicos, aunque su uso en concentraciones adecuadas garantiza un efecto microbicida, la aplicación inadecuada o a concentraciones subletales puede favorecer la resistencia bacteriana, en especial mediante mecanismos como las bombas de eflujo, que confieren resistencia cruzada a antibióticos (Maillard & Pascoe, 2023). Evidencias recientes relacionan la exposición repetida a biocidas en entornos productivos, particularmente en biofilms industriales a la selección de cepas más tolerantes que favorece la co-selección de genes de resistencia a antimicrobianos (Kragh et al., 2025). Además, se resalta la necesidad de establecer protocolos estandarizados para evaluar la susceptibilidad microbiana y promover un uso racional y regulado de estos compuestos, con el fin de preservar su eficacia y limitar la propagación de resistencias en la cadena alimentaria.

El mecanismo de acción de los biocidas implica su interacción con componentes de la membrana celular, afectando proteínas, carbohidratos, lípidos (especialmente fosfolípidos), ácidos nucleicos y, en algunos casos, vitaminas, hormonas, minerales y otros elementos esenciales en la célula (Ashraf et al., 2014). La aparición de microorganismos que desarrollan una tolerancia creciente a estos agentes ha captado la atención en el ámbito de la salud pública, lo cual subraya la importancia de estudiar y monitorear este fenómeno

para asegurar la efectividad continua de los biocidas en la prevención y el control de infecciones (Patiño et al., 2018).

En los sistemas productivos avícolas, los protocolos de manejo metafiláctico tienen como principal objetivo reducir la transmisión y persistencia de microorganismos patógenos en instalaciones y equipos, minimizando así la incidencia de enfermedades, estos procesos suelen depender del uso de biocidas o desinfectantes químicos aplicados en diversas etapas de producción, muchas veces en concentraciones excesivas, lo que genera acumulación residual de estas sustancias y exposición constante de las bacterias a las mismas (Kempf et al., 2016), este uso intensivo puede contribuir al desarrollo de tolerancia bacteriana a los biocidas, lo que tiene implicaciones significativas para la salud pública y la seguridad alimentaria.

La coexistencia de resistencia a biocidas y resistencia a antibióticos en bacterias patógenas fueron reportados por Burgos et al. (2016) en cáscaras de huevo donde varias cepas de *E. coli* mostrando tolerancia a biocidas como el cloruro de hexadecilpiridinio y el desinfectante comercial P3 Oxonia. El 29,63 % de los aislados presentaron multirresistencia con genes asociados a bombas de eflujo (*acrB*, *mdfA*) y resistencia a compuestos de amonio cuaternario (*qacA/B*, *qacE*). Además, estas cepas mostraron resistencia a múltiples antibióticos, incluyendo ampicilina, tetraciclina y sulfametoxazol-trimetoprima. Fernández et al. (2017) señala que la asociación previamente reportada donde bacterias con tolerancia a biocidas tienden a portar genes que también les confieren resistencia a antibióticos.

En el contexto de la producción avícola, la limpieza y desinfección de los sistemas productivos es esencial para controlar la carga microbiana, sin embargo, investigaciones en granjas de pollos de engorde han revelado que incluso después de procesos de desinfección con peróxido de hidrógeno y ácido peracético, persisten bacterias de relevancia clínica y zoonótica, como *Enterococcus faecium* y miembros de *Enterobacteriaceae*. Además, las concentraciones bactericidas mínimas observadas indican que los niveles recomendados de desinfectantes pueden ser insuficientes para eliminar estas bacterias, lo que subraya la necesidad de optimizar las estrategias de desinfección (Luyckx et al., 2016).

Por otro lado, investigaciones han demostrado que algunas bacterias pueden tolerar incluso efectos físicos profilácticos, un estudio del Departamento de Inspección y Seguridad de los Alimentos en Estados Unidos identificó cepas de *Salmonella* en huevo líquido pasteurizado. Pruebas posteriores revelaron que estas cepas podían sobrevivir al proceso de pasteurización, probablemente debido a características estructurales que les otorgan tolerancia a temperaturas elevadas (Kang et al., 2021). Esto sugiere que la resistencia bacteriana no solo se limita a biocidas químicos, sino que también puede extenderse a intervenciones físicas. Si bien se ha reportado una baja incidencia general

de resistencia a biocidas, las cepas resistentes suelen portar múltiples determinantes genéticos que les confieren tolerancia cruzada y multirresistencia, lo cual subraya la necesidad de monitorear y regular el uso de biocidas en la industria avícola y alimentaria, buscando minimizar la selección de cepas resistentes y el impacto en la seguridad microbiológica de los productos (Grande et al., 2016).

Implicaciones en la salud pública

La resistencia bacteriana asociada a huevos de gallina plantea importantes riesgos para la salud pública, enmarcados en el concepto de Una Salud, ya que los huevos y sus derivados representan posibles vectores para la transmisión de bacterias resistentes a los antibióticos, destacando especialmente las de importancia zoonótica, como *Salmonella*, estas bacterias no solo comprometen la seguridad alimentaria sino que también representan un riesgo significativo para la salud humana, particularmente cuando son resistentes a antibióticos de último recurso como cefalosporinas de tercera generación, colistina o linezolid (Antunes et al., 2024; Sabry et al., 2020).

El consumo de huevos con residuos de antibióticos por encima de los límites máximos permitidos (MRLs) puede contribuir a la selección de cepas bacterianas resistentes en el microbioma humano, exacerbando problemas como infecciones difíciles de tratar y aumentando los costos asociados al manejo de estas infecciones (Owusu-Doubreh et al., 2022). Además, se ha demostrado que la resistencia adquirida puede ser transportada por bacterias en el intestino de las aves, incluyendo genes de resistencia presentes en genomas virales asociados al microbioma aviar, lo que refuerza la necesidad de vigilancia en toda la cadena alimentaria (Wang et al., 2024).

En entornos como las granjas avícolas, la selección de bacterias resistentes está vinculada al uso inapropiado de antimicrobianos, como la administración de dosis subterapéuticas, el almacenamiento inadecuado y la falta de regulación sobre el acceso a antibióticos, prácticas que no solo facilitan el desarrollo de resistencia bacteriana, sino que también permiten la transmisión de cepas resistentes desde el entorno avícola hasta el consumidor humano, incluyendo cepas multirresistentes (*MDR*) que afectan la efectividad de tratamientos clínicos en humanos (Torres et al., 2022; Khan Georges et al., 2021).

Además, estudios sobre la resistencia antimicrobiana en *Salmonella* han identificado una alta prevalencia de genes resistentes a aminoglucósidos, tetraciclinas, sulfonamidas y β -lactámicos en cepas aisladas de huevos y productos avícolas, con implicaciones directas para la salud pública debido a la proximidad genética entre las cepas aisladas en aves y en humanos (Hu et al., 2020). Este hallazgo subraya la necesidad urgente de implementar sistemas

de vigilancia integrados que incluyan técnicas avanzadas como la secuenciación del genoma completo (WGS) para rastrear las rutas de transmisión de estas bacterias resistentes a través de la cadena alimentaria (Wu et al., 2021).

Es por ello que mitigar los riesgos asociados a la resistencia bacteriana requiere acciones concertadas que incluyan la implementación de programas de monitoreo de residuos de antibióticos, el fortalecimiento de las políticas de uso racional de antimicrobianos en la producción avícola y la promoción de una mayor conciencia sobre los riesgos para la salud pública derivados de los huevos contaminados. Este enfoque integrado es esencial para proteger la salud humana y reducir la propagación de la resistencia bacteriana en los sistemas de producción de alimentos (Abou-Jaoudeh et al., 2024; Zhang Bai et al., 2024).

CONCLUSIONES

La resistencia bacteriana a antimicrobianos y biocidas en la producción avícola, especialmente en la de huevos, plantea un grave desafío para la salud pública mundial, este problema, vinculado al uso indebido de antimicrobianos, la exposición prolongada a biocidas y la falta de monitoreo efectivo, requiere atención inmediata. La caracterización bacteriana y tecnologías como la secuenciación del genoma completo (WGS) han permitido identificar patógenos, sus mecanismos de resistencia y rutas de transmisión, detectando genes que confieren resistencia a antibióticos críticos como β -lactámicos, aminoglucósidos y quinolonas, además de resistencia cruzada entre antimicrobianos y biocidas, lo que compromete tanto la salud animal como humana.

Bacterias como *Salmonella* y *Escherichia coli* destacan por su capacidad para desarrollar multirresistencia, subrayando la urgencia de fortalecer regulaciones, monitorear residuos en alimentos y adoptar prácticas agrícolas sostenibles. El riesgo para los consumidores es alto, dado el potencial de infecciones difíciles de tratar, por lo cual un enfoque integral de Una Salud, acompañado de políticas estrictas, educación y colaboración interdisciplinaria, es esencial para mitigar los riesgos asociados a la resistencia bacteriana y proteger la salud pública y la seguridad alimentaria.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de carácter personal, académico, económico, político o social que hayan influido en la concepción, desarrollo o presentación de los resultados de este estudio.

Financiación

Este proyecto de investigación fue financiado por los autores de este artículo.

Contribución de autoría

AMBS: Conceptualización, diseño metodológico, supervisión del estudio; GAPH: Análisis de datos, interpretación de resultados, redacción; SUT: Revisión bibliográfica, sistematización de la información y apoyo en la discusión de resultados; LJT: Revisión bibliográfica, edición final del manuscrito.

Declaración sobre el uso de IA

En la preparación de este manuscrito se utilizó inteligencia artificial (Chat-GPT) como apoyo en la redacción, mejora de redacción académica y verificación de coherencia textual. Todo el contenido fue revisado, editado y validado por los autores para garantizar su precisión y originalidad, y no se generaron datos ni resultados mediante IA.

REFERENCIAS

- Abdelhamid, M. K., Hess, C., Bilic, I., Glösmann, M., Rehman, H. U., Liebhart, D., Hess, M., & Paudel, S. (2024). A comprehensive study of colisepticaemia progression in layer chickens applying novel tools elucidates pathogenesis and transmission of *Escherichia coli* into eggs. *Scientific Reports*, *14*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58706-3>
- Abou-Jaoudeh, C., Andary, J., & Abou-Khalil, R. (2024). Antibiotic residues in poultry products and bacterial resistance: A review in developing countries. *Journal of Infection and Public Health*, *17*(12), artículo 102592. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2024.102592>
- Alam, G. S., Hassan, M. M., Ahaduzzaman, M., Nath, C., Dutta, P., Khanom, H., Khan, S. A., Pasha, M. R., Islam, A., Magalhaes, R. S., & Cobbold, R. (2023). Molecular detection of tetracycline-resistant genes in multi-drug-resistant *Escherichia coli* isolated from broiler meat in Bangladesh. *Antibiotics*, *12*(2), artículo 418. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12020418>
- Alexander, A. N., Worrall, L. J., Hu, J., Vuckovic, M., Nidhi Satishkumar, Poon, R., Solmaz Sobhanifar, Rosell, F. I., Jenkins, J., Chiang, D., Mosimann, W. A., Chambers, H. F., Paetzl, M., Chatterjee, S. S., & Natalie. (2023). Structural basis of broad-spectrum β -lactam resistance in *Staphylococcus aureus*. *Nature*, *613*(7943), 375–382. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05583-3>
- Alós, J. I. (2015). Resistencia bacteriana a los antibióticos: una crisis global. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, *33*(10), 692-699. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eimc.2014.10.004>
- Álvarez-Hernández, D., Garza-Mayén, G., & Vázquez-López R. (2015). Quinolonas. Perspectivas actuales y mecanismos de resistencia. *Revista Chilena Infectol*, *32*(5), 499-504.

- Amdan, N. A. N., Shahrulzamri, N. A., Hashim, R., & Jamil, N. M. (2024). Understanding the evolution of macrolides resistance: a mini review. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 38, 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2024.07.016>
- Anihouvi, D. G. H., Koné, K. M., Anihouvi, V. B., & Mahillon, J. (2024). Sanitary quality and bacteriological antibiotic-resistance pattern of frozen raw chicken meat sold in retail market in Benin. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, artículo 101012. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101012>
- Antunes, P., Novais, C., Peixe, L., & Freitas, A. R. (2024). Pet food safety: emerging bacterial hazards and implications for public health. *Current Opinion in Food Science*, 57, artículo 101165. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101165>
- Anukampa, A., Shagufta, B., Sivakumar, M., Kumar, S., Agarwal, R. K., Bhilegaonkar, K. N., Kumar, A., & Dubal, Z. B. (2017). Antimicrobial resistance and typing of *Salmonella* isolated from street vended foods and associated environment. *Journal of Food Science and Technology*, 54(8), 2532-2539. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2698-1>
- Archer, E. W., Chisnall, T., Tano-Debrah, K., Card, R. M., Duodu, S., & Kunadu, A. P. (2023). Prevalence and genomic characterization of *Salmonella* isolates from commercial chicken eggs retailed in traditional markets in Ghana. *Frontiers In Microbiology*, 14, artículo 1283835. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1283835>
- Ashraf, M. A., Ullah, S., Ahmad, I., Qureshi, A. K., Balkhair, K. S., & Abdur Rehman, M. (2014). Green biocides, a promising technology: Current and future applications to industry and industrial processes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(3), 388-403.
- Barreto, M., Castillo-Ruiz, M., & Retamal, P. (2016). *Salmonella enterica*: una revisión de la trilogía agente, hospedero y ambiente, y su trascendencia en Chile. *Revista Chilena de Infectología*, 33(5), 547-557. <https://doi.org/10.4067/s0716-10182016000500010>
- Bhattarai, R. K., Basnet, H. B., Dhakal, I. P., & Devkota, B. (2024). Antimicrobial resistance of avian pathogenic *Escherichia coli* isolated from broiler, layer, and breeder chickens. *Veterinary World*, 480-499. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.480-499>
- Boerlin, P., Travis, R., Gyles, C. L., Reid-Smith, R., Lim, N. J. H., Nicholson, V., McEwen, S. A., Friendship, R., & Archambault, M. (2005). Antimicrobial resistance and virulence genes of *Escherichia coli* isolates from Swine in Ontario. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(11), 6753-6761. <https://doi.org/10.1128/aem.71.11.6753-6761.2005>
- Burgos, M. J. G., Márquez, M. L. F., Pulido, R. P., Gálvez, A., & López, R. L. (2016). Virulence factors and antimicrobial resistance in *Escherichia coli* strains isolated from hen egg shells. *International Journal of Food Microbiology*, 238, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.08.037>
- Caneschi, A., Bardhi, A., Barbarossa, A., & Zaghini, A. (2023). The use of antibiotics and antimicrobial resistance in veterinary medicine, a complex phenomenon: A narrative review. *Antibiotics*, 12(3), artículo 487. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12030487>

- Chávez-Jacobo, V., Ramírez-Díaz, M. I., Silva-Sánchez, J., & Cervantes, C. (2015). Resistencia bacteriana a quinolonas: Determinantes codificados en plásmidos. *REB. Revista de Educación Bioquímica*, 34(1), 4-9. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-19952015000100004
- Chen, S., Zhao, S., White, D. G., Schroeder, C. M., Lu, R., Yang, H., McDermott, P. F., Ayers, S., & Meng, J. (2004). Characterization of multiple-antimicrobial-resistant *Salmonella* serovars isolated from retail meats. *Applied And Environmental Microbiology*, 70(1). <https://doi.org/10.1128/aem.70.1.1-7.2004>
- Chen, X., Li, X., Zhong, C., Jiang, X., Wu, G., Li, G., Yan, Y., Yang, N., & Sun, C. (2024). Genetic patterns and genome-wide association analysis of eggshell quality traits of egg-type chicken across an extended laying period. *Poultry Science*, artículo 103458. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103458>
- Chen, Y., Sun, L., Hong, Y., Chen, M., Zhang, H., Peng, Y., Liao, K., Wang, H., Zhu, F., Zhuang, H., Wang, Z., Jiang, S., Yu, Y., & Chen, Y. (2023). Exploring the third-generation tetracycline resistance of multidrug-resistant livestock-associated methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* ST9 across healthcare settings in China. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 78(8), 1871-1881. <https://doi.org/10.1093/jac/dkad174>
- Cheng, W., Li, J., Wu, Y., Xu, L., Su, C., Qian, Y., Zhu, Y., & Chen, H. (2016). Behavior of antibiotics and antibiotic resistance genes in eco-agricultural system: A case study. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.037>
- Compassion in World Farming. (2023). *Review of global egg production 2023*. <https://www.compassioninfoodbusiness.com/media/7455153/review-of-global-egg-production-2023.pdf>
- Crespo, L. M. R., Rodríguez, M. C., & Del Rosario Micanquer Carlosama, A. (2021). El huevo de gallina y su procesamiento industrial: una revisión. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(1), 221-239. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n1.2022.1438>
- Damena, A., Mikru, A., Adane, M., & Dobo, B. (2022). Microbial profile and safety of chicken eggs from a poultry farm and small-scale vendors in Hawassa, Southern Ethiopia. *Journal of Food Quality*, 2022, artículo 7483253. <https://doi.org/10.1155/2022/7483253>
- De Angelis, G., Del Giacomo, P., Posteraro, B., Sanguinetti, M., & Tumbarello, M. (2020). Molecular mechanisms, epidemiology, and clinical importance of β -Lactam resistance in Enterobacteriaceae. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(14), artículo 5090. <https://doi.org/10.3390/ijms21145090>
- Dutil, L., Irwin, R., Finley, R., Ng, L. K., Avery, B., Boerlin, P., Bourgault, A., Cole, L., Daignault, D., Desruisseau, A., Demczuk, W., Hoang, L., Horsman, G. B., Ismail, J., Jamieson, F., Maki, A., Pacagnella, A., & Pillai, D. R. (2009). Ceftiofur resistance in *Salmonella enterica* Serovar Heidelberg from chicken meat and humans, Canada. *Emerging Infectious Diseases*, 16(1), 48-54. <https://doi.org/10.3201/eid1601.090729>
- FAO. (2024). *FAOSTAT: Livestock primary*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/>

- Fastl, C., De Carvalho Ferreira, H. C., Martins, S. B., Afonso, J. S., Di Bari, C., Venkateswaran, N., Pires, S. M., Mughini-Gras, L., Huntington, B., Rushton, J., Pigott, D., & Devleeschauwer, B. (2023). Animal sources of antimicrobial-resistant bacterial infections in humans: a systematic review. *Epidemiology and Infection*, 151, artículo e143. <https://doi.org/10.1017/s0950268823001309>
- Fernández, M. L., Burgos, M. J. G., Pulido, R. P., & Gálvez, A. López, R. L. (2017). Biocide tolerance and antibiotic resistance in *Salmonella* isolates from hen eggshells. *Foodborne Pathogens and Disease*, 14(2), 89-95. <https://doi.org/10.1089/fpd.2016.2182>
- Fung, F., Huei, W., & Menon, S. (2018). Food safety in the 21st century. *Biomedical Journal*, 41(2), 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2018.03.003>
- Fyfe, C., Grossman, T. H., Kerstein, K., & Sutcliffe, J. (2016). Resistance to macrolide antibiotics in public health pathogens. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(10), artículo a025395. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a025395>
- Garcia, R. C. L., Rodrigues, R. D., Garcia, E. C. L., & Rigatto, M. H. (2023). Comparison between colistin and polymyxin B in the treatment of bloodstream infections caused by carbapenem-resistant *Pseudomonas aeruginosa* and *Acinetobacter baumannii-calcoaceticus* complex. *Antibiotics*, 12(8), artículo 1317. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12081317>
- Garneau-Tsodikova, S., & Labby, K. J. (2015). Mechanisms of resistance to aminoglycoside antibiotics: overview and perspectives. *MedChemComm*, 7(1), 11-27. <https://doi.org/10.1039/c5md00344j>
- Grande, M. J., Fernández, M. L., Pérez, R., Gálvez, A., & López, R. (2016). Virulence factors and antimicrobial resistance in *Escherichia coli* strains isolated from hen egg shells. *International Journal of Food Microbiology*, 238, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.08.037>
- Grossman, T. H. (2016). Tetracycline antibiotics and resistance. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(4), artículo a025387. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a025387>
- Guernier-Cambert, V., Trachsel, J., Atkinson, B., Oladeinde, A., Anderson, C. L., Bearson, S. M., Monson, M. S., & Looft, T. (2024). Tetracycline resistance gene transfer from *Escherichia coli* donors to *Salmonella* Heidelberg in chickens is impacted by the genetic context of donors. *Veterinary Microbiology*, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2024.110294>
- Guier-Serrano, M., Davidovich-Young, G., Wong-González, E., & Cubero-Castillo, E. (2021). Calidad microbiológica y fisicoquímica y sabor de huevos de gallina de producción convencional o pastoreo. *Agronomía Mesoamericana*, artículo 45264. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.46140>
- Giono-Cerezo, S., Santos-Preciado, J. I., Del Rayo Morfín-Otero, M., Torres-López, F. J., & Alcántar-Curiel, M. D. (2020). Resistencia antimicrobiana. Importancia y esfuerzos por contenerla. *Gaceta Médica de México*, 156(2), 172-180. <https://doi.org/10.24875/gmm.20005624>
- Han, C., Chen, Y., Shi, L., Chen, H., Li, L., Ning, Z., Zeng, D., & Wang, D. (2023). Advances in eggshell membrane separation and solubilization technologies. *Frontiers In Veterinary Science*, 10, artículo 1116126. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1116126>

- Hinson, C., Tonouhewa, A., Azokpota, P., Daube, G., Korsak, N., & Sessou, P. (2025). Global prevalence and antibiotic resistance profiles of bacterial pathogens in table eggs: A systematic review and meta-analysis. *Veterinary World*, 18(4), 939-954. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2025.939-954>
- Hu, L., Cao, G., Brown, E. W., Allard, M. W., M, L., MA, Khan, A. A., & Zhang, G. (2020). Antimicrobial resistance and related gene analysis of *Salmonella* from egg and chicken sources by whole-genome sequencing. *Poultry Science*, 99(12), 7076-7083. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.011>
- Hu, Y., Yang, X., Li, J., Lv, N., Liu, F., Wu, J., Lin, I. y. C., Wu, N., Weimer, B. C., Gao, G. F., Liu, Y., & Zhu, B. (2016). The bacterial mobile resistome transfer network connecting the animal and human microbiomes. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(22), 6672-6681. <https://doi.org/10.1128/aem.01802-16>
- Hulaj, B., Çabeli, P., Goga, I., Taylor, N., Hess, C., & Hess, M. (2016). Survey of the prevalence of *Salmonella* species on laying hen farms in Kosovo. *Poultry Science*, 95(9), 2030-2037. <https://doi.org/10.3382/ps/pew149>
- Islam, M. S., Hossain, M. J., Sobur, M. A., Punom, S. A., Rahman, A. M. M. T., & Rahman, M. T. (2023). A systematic review on the occurrence of antimicrobial-resistant *Escherichia coli* in poultry and poultry environments in Bangladesh between 2010 and 2021. *BioMed Research International*, 2023(1), artículo 2425564. <https://doi.org/10.1155/2023/2425564>
- Jahantigh, M., Samadi, K., Dizaji, R. E., & Salari, S. (2020). Antimicrobial resistance and prevalence of tetracycline resistance genes in *Escherichia coli* isolated from lesions of colibacillosis in broiler chickens in Sistan, Iran. *BMC Veterinary Research*, 16(1), artículo 267. <https://doi.org/10.1186/s12917-020-02488-z>
- Jaimés-Dueñez, J., Ramírez-Villamizar, L. H., Barragán-Díaz, C. A., Cárdenas, E., & Niño-Bayona, J. V. (2022). Review: antibiotic residues in meat, a public health problem in Colombia. *Spei Domus*, 18(1), 1-26. <https://doi.org/10.16925/2382-4247.2022.01.06>
- Jonaidi-Jafari, N., Khamesipour, F., Ranjbar, R., & Kheiri, R. (2016). Prevalence and antimicrobial resistance of *Campylobacter* species isolated from the avian eggs. *Food Control*, 70, 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.05.018>
- Jure, M. A., Condorí, M. S., Terrazzino, G. P., Catalán, M. G., Campo, A. L., Zolezzi, G., Chinen, I., Rivas, M., & Castillo, M. (2015). Aislamiento y caracterización de *Escherichia coli* O157 en productos cárnicos bovinos y medias reses en la provincia de Tucumán. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(2), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.03.006>
- Kang, M. S., Park, J. H., & Kim, H. J. (2021). Predictive modeling for the growth of *Salmonella* spp. in liquid egg white and application of scenario-based risk estimation. *Microorganisms*, 9(3), artículo 486. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030486>
- Kapena, M. S., Muma, J. B., Mubita, C. M., & Munyeme, M. (2020). Antimicrobial resistance of *Escherichia coli* and *Salmonella* in raw retail table eggs in Lusaka, Zambia. *Veterinary World*, 13(11), 2528-2533. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.2528-2533>

- Kebede, I. A., & Duga, T. (2022). Prevalence and antimicrobial resistance of *Salmonella* in poultry products in Central Ethiopia. *Veterinary Medicine International*, 2022, artículo 8625636. <https://doi.org/10.1155/2022/8625636>
- Kempf, I., Jouy, E., & Chauvin, C. (2016). Colistin use and colistin resistance in bacteria from animals. *International Journal Of Antimicrobial Agents*, 48(6), 598-606. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2016.09.016>
- Khan, A. S., Georges, K., Rahaman, S., Abebe, W., & Adesiyun, A. A. (2021). Occurrence, risk factors, serotypes, and antimicrobial resistance of *Salmonella* strains isolated from imported fertile hatching eggs, hatcheries, and broiler farms in Trinidad and Tobago. *Journal of Food Protection*, 85(2), 266-277. <https://doi.org/10.4315/jfp-21-236>
- Khan, S., McWhorter, A. R., Moyle, T. S., & Chousalkar, K. K. (2021). Refrigeration of eggs influences the virulence of *Salmonella* Typhimurium. *Scientific Reports*, 11(1), artículo 18026. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97135-4>
- Kim, J., Ko, J., Kim, J., Jeong, J., Kim, C., Shin, I., & Kim, T. (2023). Oral bioavailability and egg drug residue of lincomycin in laying hens after different treatment. *Poultry Science*, 103(1), artículo 103147. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103147>
- Kragh, M. L., Scheel, N. H., Leekitcharoenphon, P., & Hansen, L. T. (2025). Repeated biocide treatments cause changes to the microbiome of a food industry floor drain biofilm model. *Frontiers In Microbiology*, 16, artículo 1542193. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1542193>
- Krišová, M., & Kožárová, I. (2018). Detection of Residues of antimicrobial compounds in eggs by the rapid screening methods. *Folia Veterinaria*, 62(3), 48-55. <https://doi.org/10.2478/fv-2018-0027>
- Kulshreshtha, G., D'Alba, L., Dunn, I. C., Rehault-Godbert, S., Rodriguez-Navarro, A. B., & Hincke, M. T. (2022). Properties, genetics and innate immune function of the cuticle in egg-laying species. *Frontiers In Immunology*, 13, artículo 838525. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.838525>
- Kulshreshtha, G., Ward, C., Calvert, N. D., Benavides-Reyes, C., Rodriguez-Navarro, A. B., Diep, T., & Hincke, M. T. (2024). Effect of egg washing and hen age on cuticle quality and bacterial adherence in table eggs. *Microorganisms*, 12(10), artículo 2027. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12102027>
- Kuppusamy, S., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2024). Tetracycline and fluoroquinolone antibiotics contamination in agricultural soils fertilized long-term with chicken litter: Trends and ravages. *The Science of The Total Environment*, 946, artículo 174286. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174286>
- Leão, C., Silveira, L., Usié, A., Gião, J., Clemente, L., Themudo, P., Amaro, A., & Pista, A. (2024). Genetic diversity of *Salmonella enterica* subsp. *enterica* Serovar Enteritidis from human and non-human sources in Portugal. *Pathogens*, 13(2), artículo 112. <https://doi.org/10.3390/pathogens13020112>
- Li, H., & Xu, H. (2024). Mechanisms of bacterial resistance to environmental silver and antimicrobial strategies for silver: A review. *Environmental Research*, 248, artículo 118313. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118313>

- Li, Y., Yang, X., Zhang, H., Jia, H., Liu, X., Yu, B., Zeng, Y., Zhang, Y., Pei, X., & Yang, D. (2020). Prevalence and antimicrobial susceptibility of *Salmonella* in the commercial eggs in China. *International Journal of Food Microbiology*, 325, artículo 108623. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108623>
- Lima, É., Oliveira, M. B., & Freitas, A. (2023). Antibiotics in intensive egg production: Food Safety tools to ensure regulatory compliance. *Food Chemistry Advances*, 3, artículo 100548. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100548>
- Liu, W., Zhang, J., Guo, A., Chen, Q., Gu, L., Ruan, Y., & Zhang, X. (2020). The specific biological characteristics of spoilage microorganisms in eggs. *LWT*, 135, artículo 110069. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110069>
- Luyckx, K., Van Coillie, E., Dewulf, J., Van Weyenberg, S., Herman, L., Zoons, J., Vervaet, E., Heyndrickx, M., & De Reu, K. (2016). Identification and biocide susceptibility of dominant bacteria after cleaning and disinfection of broiler houses. *Poultry Science*, 96(4), 938-949. <https://doi.org/10.3382/ps/pew355>
- Mahmoud, B. Y., Semida, D. A., Elnesr, S. S., Elwan, H., & El-Full, E. A. (2022). Approaches of egg decontamination for sustainable food safety. *Sustainability*, 15(1), artículo 464. <https://doi.org/10.3390/su15010464>
- Maillard, J., & Pascoe, M. (2023). Disinfectants and antiseptics: mechanisms of action and resistance. *Nature Reviews Microbiology*, 22(1), 4-17. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00958-3>
- Mansour, A., & Hamid Toweir, A. I. (2022). Isolation and identification of pathogenic bacteria from table egg (eggshells) sold in Benghazi market, Libya. *International Journal of Environmental & Agriculture Research*, 8(3), 1-6.
- Mulchandani, R., Wang, Y., Gilbert, M., & Van Boeckel, T. P. (2023). Global trends in antimicrobial use in food-producing animals: 2020 to 2030. *PLOS Global Public Health*, 3(2), artículo e0001305. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0001305>
- Newberry, R. C., & Tarazona, A. M. (2016). Behavior and welfare of laying hens and broiler chickens. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 24(3), 301-302. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.324686>
- Nuanmuang, N., Leekitcharoenphon, P., Njage, P. M. K., Gmeiner, A., & Aarestrup, F. M. (2023). An Overview of antimicrobial resistance profiles of publicly available *Salmonella* genomes with sufficient quality and metadata. *Foodborne Pathogens and Disease*, 20(9), 405-413. <https://doi.org/10.1089/fpd.2022.0080>
- Obianwuna, U. E., Oleforuh-Okoleh, V. U., Wang, J., Zhang, H., Qi, G., Qiu, K., & Wu, S. (2022). Potential implications of natural antioxidants of plant origin on oxidative stability of chicken albumen during storage: A review. *Antioxidants*, 11(4), artículo 630. <https://doi.org/10.3390/antiox11040630>
- Ovung, A., & Bhattacharyya, J. (2021). Sulfonamide drugs: structure, antibacterial property, toxicity, and biophysical interactions. *Biophysical Reviews*, 13(2), 259-272. <https://doi.org/10.1007/s12551-021-00795-9>
- Owusu-Doubreh, B., Appaw, W. O., & Abe-Inge, V. (2022). Antibiotic residues in poultry eggs and its implications on public health: A review. *Scientific African*, 19, artículo e01456. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01456>

- Ozdemirel, H. O., Ulusal, D., & Celik, S. K. (2021). Streptomycin and nalidixic acid elevate the spontaneous genome-wide mutation rate in *Escherichia coli*. *Genetica*, 149(1), 73-80. <https://doi.org/10.1007/s10709-021-00114-w>
- Pan, Y., Zeng, J., Zhang, L., Hu, J., Hao, H., Zeng, Z., & Li, Y. (2024). The fate of antibiotics and antibiotic resistance genes in Large-Scale chicken farm Environments: Preliminary view of the performance of National veterinary Antimicrobial use reduction Action in Guangdong, China. *Environment International*, 191, artículo 108974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108974>
- Park, S., Choi, S., Kim, H., Kim, Y., Kim, B., Beuchat, L. R., & Ryu, J. (2015). Fate of mesophilic aerobic bacteria and *Salmonella enterica* on the surface of eggs as affected by chicken feces, storage temperature, and relative humidity. *Food Microbiology*, 48, 200-205. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.01.003>
- Patiño, P., Perez, V., Torres, A., Di Filippo, G. (2018). Uso de biocidas y mecanismos de respuesta bacteriana. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 37(3), 1–17.
- Pereira, A., Sidjabat, H. E., Davis, S., Da Silva, P. G. V., Alves, A., Santos, C. D., DaCosta Jong, J. B., Da Conceição, F., De Jesus Felipe, N., Ximenes, A., Nunes, J., Fária, I. D. R., Lopes, I., Barnes, T. S., McKenzie, J., Oakley, T., Francis, J. R., Yan, J., & Ting, S. (2024). Prevalence of antimicrobial resistance in *Escherichia coli* and *Salmonella* species isolates from chickens in live bird markets and boot swabs from layer farms in Timor-Leste. *Antibiotics*, 13(2), artículo 120. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13020120>
- Puglisi, M. J., & Fernandez, M. L. (2022). The health benefits of egg protein. *Nutrients*, 14(14), artículo 2904. <https://doi.org/10.3390/nu14142904>
- Quiceno, J. N. J., & Rodríguez, E. A. (2023). Resistencia bacteriana en ambientes acuáticos: origen e implicaciones para la salud pública. *Revista de la Escuela Nacional de Salud Pública*, 41(3), artículo e351453. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.e351453>
- Rafiq, K., Sani, A. A., Hossain, M. T., Hossain, M. T., Hadiuzzaman, M., & Bhuiyan, M. A. S. (2024). Assessment of the presence of multidrug-resistant *Escherichia coli*, *Salmonella* and *Staphylococcus* in chicken meat, eggs and faeces in Mymensingh Division of Bangladesh. *Heliyon*, 10(17), artículo e36690. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36690>
- Ramírez-Bayard, I. E., Mejía, F., Medina-Sánchez, J. R., Cornejo-Reyes, H., Castillo, M., Querol-Audi, J., & Martínez-Torres, A. O. (2023). Prevalence of plasmida associated tetracycline resistance genes in multidrug-resistant *Escherichia coli* strains isolated from environmental, animal and human samples in Panama. *Antibiotics*, 12(2), artículo 280. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12020280>
- Risalvato, J., Sewid, A. H., Eda, S., Gerhold, R. W., & Wu, J. J. (2025). Strategic detection of *Escherichia coli* in the poultry industry: food safety challenges, one health approaches, and advances in biosensor technologies. *Biosensors*, 15(7), artículo 419. <https://doi.org/10.3390/bios15070419>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). *Per capita egg consumption (kilograms per year)*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-egg-consumption-kilograms-per-year>

- Rodríguez, L., Rueda, J., & González, R. (2015). Prevalencia de bacterias Gram negativas productoras de beta-lactamasas de espectro extendido y betalactamasas tipo AmpC en carne bovina destinada para el consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 17(1), 86-97. <http://www.scielo.org.co/pdf/rsap/v17n1/v17n1a09.pdf>
- Rodríguez-Navarro, A. B., Domínguez-Gasca, N., Muñoz, A., & Ortega-Huertas, M. (2013). Change in the chicken eggshell cuticle with hen age and egg freshness. *Poultry Science*, 92(11), 3026-3035. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03230>
- Sabry, M. A., Abdel-Moein, K. A., Abdel-Kader, F., & Hamza, E. (2020). Extended-spectrum β -lactamase-producing *Salmonella* serovars among healthy and diseased chickens and their public health implication. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 22, 742-748. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2020.06.019>
- Shen, C., He, M., Zhang, J., Liu, J., Su, J., & Dai, J. (2023). Effects of the coexistence of antibiotics and heavy metals on the fate of antibiotic resistance genes in chicken manure and surrounding soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, artículo 115367. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115367>
- Shen, J., Wang, Y., & Schwarz, S. (2013). Presence and dissemination of the multiresistance gene *cfr* in Gram-positive and Gram-negative bacteria. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 68(8), 1697-1706. <https://doi.org/10.1093/jac/dkt092>
- Sodagari, H. R., Varga, C., Habib, I., & Sahibzada, S. (2023). Comparison of antimicrobial resistance among commensal *Escherichia coli* isolated from retail table eggs produced by laying hens from the cage and non-cage housing systems in Western Australia. *Antibiotics*, 12(3), artículo 588. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12030588>
- Suárez-Pérez, A., Corbera, J. A., González-Martín, M., & Tejedor-Junco, M. T. (2022). Antimicrobial resistance patterns of bacteria isolated from chicks of Canary Egyptian vultures (*Neophron percnopterus majorensis*): A “one health” problem? *Comparative Immunology Microbiology and Infectious Diseases*, 92, artículo 101925. <https://doi.org/10.1016/j.cimid.2022.101925>
- Tang, K. L., Caffrey, N. P., Nóbrega, D. B., Cork, S. C., Ronksley, P. E., Barkema, H. W., Polachek, A. J., Ganshorn, H., Sharma, N., Kellner, J. D., & Ghali, W. A. (2017). Restricting the use of antibiotics in food-producing animals and its associations with antibiotic resistance in food-producing animals and human beings: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Planetary Health*, 1(8), 316-327. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(17\)30141-9](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(17)30141-9)
- Tooke, C. L., Hinchliffe, P., Bragginton, E. C., Colenso, C. K., Hirvonen, V. H., Takebayashi, Y., & Spencer, J. (2019). β -Lactamases and β -Lactamase inhibitors in the 21st Century. *Journal of Molecular Biology*, 431(18), 3472-3500. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2019.04.002>
- Torres, M. C., Vieira, T. R., Cardoso, M. R., Siqueira, F. M., & Borba, M. R. (2022). Perception of poultry veterinarians on the use of antimicrobials and antimicrobial resistance in egg production. *Poultry Science*, 101(9), artículo 101987. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101987>

- Trimble, M. J., Mlynářčík, P., Kolář, M., & Hancock, R. E. (2016). Polymyxin: alternative mechanisms of action and resistance. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(10), artículo a025288. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a025288>
- Van Boeckel, T. P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B. T., Levin, S. A., Robinson, T. P., Teillant, A., & Laxminarayan, R. (2015). Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of The National Academy of Sciences*, 112(18), 5649-5654. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112>
- Wang, B., Zhu, Y., Liu, S., Zhang, H., Guan, T., Xu, X., Zheng, X., Yang, Z., Zhang, T., Zhang, G., & Xie, K. (2024). Quantitative analysis of erythromycin, its major metabolite and clarithromycin in chicken tissues and eggs via QuEChERS extraction coupled with ultrahigh-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Food Chemistry X*, 22, artículo 101468. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101468>
- Wang, N., Yang, X., Jiao, S., Zhang, J., Ye, B., & Gao, S. (2014). Sulfonamide-resistant bacteria and their resistance genes in soils fertilized with manures from Jiangsu Province, Southeastern China. *PLoS ONE*, 9(11), artículo e112626. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112626>
- Whiley, H., & Ross, K. (2015). *Salmonella* and Eggs: from production to plate. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 12(3), 2543-2556. <https://doi.org/10.3390/ijerph120302543>
- Windhorst, H. W. (2023). *The remarkable dynamics of the global poultry industry -50 years in retrospective - Part 1: global egg production and trade*. *Zootecnica Poultry Magazine*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19233.07524>
- World Health Organization (WHO). (2024, 4 octubre). *Food safety*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>
- Wu, Q., Shabbir, M. A. B., Peng, D., Yuan, Z., & Wang, Y. (2021). Microbiological inhibition-based method for screening and identifying of antibiotic residues in milk, chicken egg and honey. *Food Chemistry*, 363, artículo 130074. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130074>
- Yamak, U. S., Sarica, M., Erensoy, K., & Ayhan, V. (2020). The effects of storage conditions on quality changes of table eggs. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 16(1), 71-81. <https://doi.org/10.1007/s00003-020-01299-6>
- Yang, N. (2021). Egg production in China: Current status and outlook. *Frontiers in Agricultural Science and Engineering*, 8(1), 25-34. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020363>
- Zafar, W., Sumrra, S. H., Hassan, A. U., & Chohan, Z. H. (2023). A review on 'sulfonamides': their chemistry and pharmacological potentials for designing therapeutic drugs in medical science. *Journal of Coordination Chemistry*, 76(5-6), 546-580. <https://doi.org/10.1080/00958972.2023.2208260>
- Zhang, L., Bai, Y., Tao, J., Yang, S., Tu, C., Liu, L., Huang, X., Li, L., & Qin, Z. (2024). Effects of feeding chicken egg yolk antibodies on intestinal cell apoptosis, oxidative stress and microbial flora of tilapia (*Oreochromis niloticus*) infected with *Streptococcus agalactiae*. *Fish & Shellfish Immunology*, 150, artículo 109596. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109596>
- Zhang, T., Nickerson, R., Zhang, W., Peng, X., Shang, Y., Zhou, Y., Luo, Q., Wen, G., & Cheng, Z. (2024). The impacts of animal agriculture on One Health—Bacterial zoonosis, antimicrobial resistance, and beyond. *One Health*, 18, artículo 100748. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2024.100748>