

Tuberculosis humana, bovina y zoonótica en México: un desafío para la salud pública y la ganadería desde el enfoque Una Salud

Human, bovine, and zoonotic tuberculosis in Mexico: a challenge for public health and livestock from a One Health perspective

Susana Flores-Villalva¹, Eric Iván Barajas-Rico², y Cristian Alfredo Segura-Cerda^{3*}

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Salud Animal e Inocuidad. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), CDMX, México.

² Posgrado en Innovación Biotecnológica. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Guadalajara, México.

³ Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI- CIATEJ. CDMX, México.

*Autor de correspondencia: Cristian Alfredo Segura-Cerda, csegura@ciatej.mx

Palabras clave:

Una Salud, tuberculosis bovina, tuberculosis humana, tuberculosis zoonótica, vacunas.

Keywords:

One Health, bovine tuberculosis, human tuberculosis, zoonotic tuberculosis, vaccines.

Resumen

La tuberculosis es un desafío para la salud humana y la salud animal en México. Su incidencia ha aumentado considerablemente en los últimos años en ambos contextos y requiere estrategias de prevención, diagnóstico y tratamiento efectivos con urgencia. La circulación de las micobacterias entre humanos y animales es un punto crítico para la atención de la enfermedad. Ante este panorama, el enfoque *Una Salud* de la Organización Mundial de la Salud provee de un redimensionamiento del problema y coloca en el centro estrategias compartidas de diagnóstico y prevención que tienen potencial de generar un impacto en la incidencia de la tuberculosis en humanos y animales. Este artículo analiza el contexto de la tuberculosis en humanos y animales, así como la aplicación potencial del enfoque *Una Salud* en México, reconociendo los retos que se enfrentan y las tecnologías que buscan mitigar el impacto de la tuberculosis en la salud pública y la producción pecuaria.

Abstract

Tuberculosis presents a significant challenge to both human and animal health in Mexico. Its incidence has increased considerably in recent years in both contexts, urgently necessitating effective strategies for prevention, diagnosis, and treatment. The circulation of mycobacteria between humans and animals represents a critical point in addressing the disease. Against this backdrop, the One Health approach advocated by the World Health Organization provides a reframing of the problem, highlighting shared diagnostic and prevention strategies that have the potential to reduce the incidence of tuberculosis in both humans and animals. This article analyzes the context of tuberculosis in humans and animals, as well as the potential application of the One Health approach in Mexico, acknowledging the challenges faced and the technologies that aim to mitigate the impact of tuberculosis on public health and livestock production.

Recibido: 18 de marzo 2025
Revisado: 20 de mayo 2025
Aceptado: 28 de mayo 2025
Publicado: 21 de julio 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

Las micobacterias patógenas son microorganismos ubicuos que producen enfermedades en humanos y animales. Desde el punto de vista microbiológico, se reconocen micobacterias patógenas de lento crecimiento, micobacterias oportunistas de lento crecimiento, micobacterias oportunistas de rápido crecimiento y micobacterias saprófitas de rápido crecimiento (Johansen et al., 2024). Entre ellas, las micobacterias patógenas de lento crecimiento, representadas por el complejo *Mycobacterium tuberculosis*, que incluyen a *M. tuberculosis*, *M. canettii*, *M. africanum*, *M. caprae*, *M. microti*, *M. pinnipedii*, *M. orygis*, *M. mungi*, *dassie bacillus*, *chimpanzee bacillus*, *M. bovis* (Macedo Couto et al., 2019), son las que producen enfermedad en humanos y animales (Figura 1).

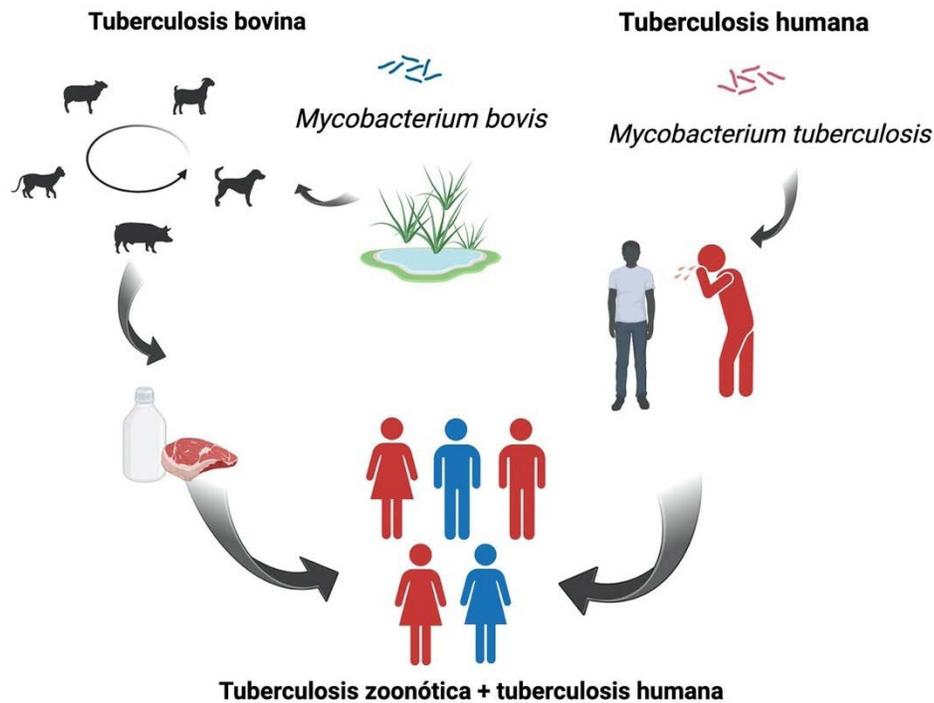


Figura 1. Interconexión entre tuberculosis humana, bovina y zoonótica. Distintas cepas del complejo *Mycobacterium* infectan a humanos (hTB), animales domésticos y de vida silvestre (bTB). La transmisión de tuberculosis de ganado a humanos por diversas vías genera casos de tuberculosis zoonótica (zTB). En México, las tres entidades se encuentran activas y requieren un enfoque integral para su atención.

Fuente: elaboración propia

En humanos, la tuberculosis es producida por *Mycobacterium tuberculosis*, mientras que, en animales, principalmente ganado, el agente etiológico es *Mycobacterium bovis*. Además, existe evidencia de la transmisión de *M. bovis* de ganado a los humanos, lo que se conoce como tuberculosis zoonótica (Olea-Poppelka et al., 2017). La infección de humanos, ganado y la transmisión entre ambos producen tres entidades



de relevancia epidemiológica: la tuberculosis humana (hTB), la tuberculosis bovina (bTB) y la tuberculosis zoonótica (zTB). Estas forman parte de un ciclo de infección natural, que se ve favorecido por la constante interacción entre humanos y animales.

En México, estas tres entidades (hTB, bTB y zTB) se encuentran activas y contribuyen a la propagación de la enfermedad entre humanos y el ganado. Su interacción genera daños a la salud humana, pérdida de vidas y costos asociados al tratamiento de la enfermedad, mientras que en animales afecta la salud y la productividad del sector ganadero del país. En conjunto, las tres entidades tienen afectaciones a la economía, la sociedad y el ambiente (Tabla 1). La atención de estas entidades requiere un enfoque holístico e integrador, que permita comprender las variaciones en la patogenia y transmisión de la enfermedad, que deriven en la creación de programas de control y prevención que protejan simultáneamente la salud humana y animal (Miller & Olea-Popelka, 2013).



Tabla 1. Aspectos relevantes de las características, el impacto económico y los medios de diagnóstico, tratamiento y prevención de la tuberculosis humana, bovina y zoonótica en México

Aspecto	Tuberculosis humana (hTB)	Referencia	Tuberculosis bovina (bTB)	Referencia	Tuberculosis zoonótica (zTB)	Referencia
Agente etiológico	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	(Mokrousov et al., 2024)	<i>Mycobacterium bovis</i>	(Khairullah et al., 2024)	<i>Mycobacterium bovis</i>	(Duffy et al., 2024)
Hospederos	Humanos	(Mokrousov et al., 2024)	Ganado doméstico (vacas y cabras), reservorios (ovejas, cerdos, perros y gatos) y otros en vida silvestre como civetas, zarigüeyas y ciervos	(Mohamed, 2020)	Humanos	(Duffy et al., 2024)
Mecanismo de transmisión	Inhalación de aerosoles infecciosos	(Mokrousov et al., 2024)	Inhalación de aerosoles infecciosos. Ingesta de pastos, alimentos o agua contaminados. En menor medida por vía transplacentaria	(Khairullah et al., 2024)	Consumo de leche no pasteurizada, alimentos contaminados o adquisición por exposición ocupacional y aerosoles entre vida silvestre	(Khairullah et al., 2024; Mia et al., 2022)
Incidencia en México	27,000 casos en 2023	(WHO, 2024)	16% en ganado productor de leche y 1% en ganado productor de carne. Estimación nacional de la prevalencia entre 0.1 y 0.5%	(Pérez-Guerrero et al., 2008), SENASICA, 2025	Se estima que 26% de los casos de TB corresponden a zTB	(Bobadilla-del Valle et al., 2015)
Impacto económico	El costo promedio de la atención de pacientes con tuberculosis no complicada es de \$937,789 dólares americanos anuales	(Pando, 2019)	Estimaciones sugieren pérdidas de 70,000 dólares americanos anuales por finca infectada	(Céspedes Meneses, 2022)	Las pérdidas económicas producidas por la zTB no han sido estimados en México	
Diagnóstico de la enfermedad	Síntomas clínicos y además: prueba de tuberculina y ensayo de liberación de interferón gamma, tomografías de tórax, cultivo de <i>M. tuberculosis</i> .	(Kontsevaya et al., 2024)	Signología clínica y además examinación <i>ante-mortem</i> : prueba de tuberculina, simple o comparativa, ensayo de liberación de interferón gamma, ELISA. Examinación post-mortem, inspección sanitaria, cultivo de <i>M. bovis</i> .	(Borham et al., 2022)	Los procedimientos de laboratorio más comúnmente utilizados para diagnosticar la tuberculosis no diferencian <i>M. tuberculosis</i> de <i>M. bovis</i>	(World Health Organization, 2017)
Tratamiento	Antibióticos de primera y segunda línea.	(Alsayed & Gunosewoyo, 2023)	No se aplican tratamientos al ganado diagnosticado.		Antibióticos de primera y segunda línea	(Alsayed & Gunosewoyo, 2023)
Vacunación	El Bacilo de Calmette-Guérin (BCG) es la única vacuna indicada para prevenir la tuberculosis miliar y su uso es extendido.	(WHO, 2024)	BCG no autorizada para su uso en animales debido a que interfiere con el resultado de pruebas diagnósticas.	(Chandran et al., 2019)	El Bacilo de Calmette-Guérin (BCG) produce niveles variables de protección contra la zTB.	(Fromsa et al., 2024)



La tuberculosis humana, bovina y zoonótica en México

Tuberculosis humana (hTB) en México

La hTB ha resurgido como la principal causa de muerte por enfermedad infecciosa tras la pandemia de COVID-19. Entre 2020 y 2023, el número de nuevos casos en México aumentó un 50 %, alcanzando su nivel más alto en los últimos 15 años, con 27,000 casos reportados y 4,589 muertes durante 2023 (World Health Organization [WHO], 2024). Entre estos casos, la forma más frecuente de la hTB es la pulmonar (81% de los casos), mientras que la infección extrapulmonar es menos frecuente (WHO, 2024). Más de la mitad de los municipios de México reportan casos activos de tuberculosis cada año, y la mayor incidencia de casos se reporta en los estados de Baja California, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Tabasco, que tienen una incidencia de hTB mayor al doble que el promedio de la incidencia nacional (SINAVE, 2023). A pesar de que México se considera un país con baja incidencia de hTB, los daños que causa a la salud y sus implicaciones sociales y económicas impactan negativamente la calidad de vida de los pacientes.

La incidencia de la hTB en México tiene como factores determinantes los factores sociodemográficos. En un reporte de caso en 2004 donde se realizó la prueba de Mantoux en una comunidad indígena del estado de Puebla, se encontró una prevalencia de 24.3% de pruebas de tuberculina positivas (Hernández Zarza, 2004), mientras que ese mismo año la incidencia de tuberculosis en el país se estimó en 21 casos por cada 100,000 habitantes en la población general (WHO, 2005). Más adelante, en el 2016, un reporte donde se realizó la prueba de tuberculina en migrantes que cruzan la frontera norte de México y San Luis, en Estados Unidos, mostró un porcentaje de positividad del 34 al 50% (Oren et al., 2016), cuando la estimación de casos de hTB se estimó en 23 casos por cada 100,000 habitantes en la población general (WHO, 2017). El contraste de la incidencia encontrada en la población indígena en el estudio de 2004 y en población migrante con los reportes nacionales sugiere que los factores sociales y demográficos a los que están expuestas estas poblaciones son clave para la estimación de la prevalencia de la enfermedad.

La influencia de comorbilidades como la Diabetes Mellitus tipo 2 (DM2) o la infección por el Virus de Inmunodeficiencia Humana (VIH) contribuye de manera importante en la incidencia de hTB, como han reportado estudios en Sinaloa y Nuevo León, donde se estima que los casos de comorbilidad de hTB con DM2 o HIV contribuyen con el 21.64 y 24.5% en los casos totales reportados, respectivamente (Medrano et al., 2023; Zacarias-Hernandez et al., 2025). Un estudio realizado en el estado de Oaxaca sugiere que la contribución de la DM2 a los casos de hTB se



debe, en parte, a que esta comorbilidad aumenta la falla al tratamiento de la hTB y la tasa de progresión de la tuberculosis latente a activa de manera significativa, debido a la influencia de la hiperglucemia sobre los mecanismos infectivos de *M. tuberculosis* y a que el control de la tuberculosis en su estado latente depende del ambiente metabólico en el que se desarrolla (Yague-Santiago et al., 2022). Por otro lado, la contribución del HIV a la incidencia de tuberculosis se estima en 11% de los casos totales de hTB en el país (WHO, 2024). Esta co-incidencia resulta de una asociación directa entre la carga viral y la progresión de la hTB, como sugiere un estudio realizado entre pacientes de Ciudad de México, el Estado de México, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Guerrero y Morelos (Valencia-Trujillo et al., 2024). Estudios de grupos internacionales destacan que esta conexión se debe a la inmunosupresión que induce el HIV en los pacientes permite la reactivación de la tuberculosis y su rápida progresión (Girardi et al., 2022). En conjunto, estas comorbilidades contribuyen significativamente sobre la incidencia de la hTB en México.

La presencia de la hTB deriva en costos asociados que afectan a la población. El costo promedio de la atención de pacientes con tuberculosis no complicada ha sido estimado en \$3,892 dólares americanos por año, mientras que para pacientes con complicaciones estos costos ascienden a \$17,952 dólares americanos en el centro del país en 2003 (Vargas RM, 2003), mientras que en 2018 esta cifra ascendió a \$937,789 dólares americanos (Pando, 2019). Además, estudios recientes muestran que en México el 51.93% de los hogares de personas que son diagnosticadas con tuberculosis enfrentan costos catastróficos asociados con ella, incluyendo gastos médicos directos, gastos médicos no directos y costos indirectos (Portnoy et al., 2023). En contraste con estos costos, la mayor parte de los pacientes que son atendidos en el centro del país pertenecen a un sector sociodemográfico bajo. Estudios retrospectivos han asociado la disminución de la inversión en el tratamiento y prevención de la tuberculosis con aumentos en la incidencia de la hTB en México (Paz-Ayar, 2018), mostrando que la hTB produce no sólo daños a la salud sino a la economía del país.

Tuberculosis bovina (bTB) en México

La bTB es causada primariamente por *M. bovis*, una bacteria con un amplio rango de hospederos, incluidos animales domésticos y animales silvestres. Entre los animales domésticos, el ganado vacuno y las cabras son considerados reservorios de *M. bovis*; mientras que las ovejas, cerdos, perros y gatos se consideran huéspedes amplificadores (Bezoz et al., 2014).

Al igual que en los humanos, la infección en el ganado bovino se produce principalmente por inhalación de aerosoles infecciosos, afectando primariamente



el tracto respiratorio, aunque también ocurre por ingestión de pastos, alimentos y agua contaminados, y con menor frecuencia por vía transplacentaria (Khairullah et al., 2024). Así mismo, recientemente ha aumentado el interés en caracterizar la transmisión de *M. bovis* entre especies domésticas y silvestres, mostrándose aspectos relevantes como la transmisión intra e inter especies por convivencia (Bouchez-Zacria et al., 2024), además de evidencias que sugieren persistencia del bacilo en algunas especies (Sabio et al., 2020). Los animales infectados no muestran signos clínicos en etapas tempranas de la enfermedad, aunque hay secreción intermitente de la bacteria en secreciones nasales, orales y en leche. En etapas avanzadas puede haber fiebre, debilidad y emaciación gradual, aunque con frecuencia algunos animales no presentan signos clínicos incluso cuando presentan lesiones graves de tuberculosis miliar (Khairullah et al., 2024).

La incidencia de tuberculosis bovina (bTB) en México presenta variaciones importantes según el tipo de ganado y la región, según datos más recientes de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], la mayor prevalencia de bTB se concentra en aproximadamente el 30% de los estados, siendo Jalisco, Baja California, Michoacán, Veracruz, Guanajuato, Durango, Nayarit, Zacatecas, Chihuahua, Puebla, Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo los estados con las tasas más altas, aunque existen variaciones regionales significativas dentro de cada entidad (SADER, 2025). A nivel nacional, el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria indica que la mayor parte del territorio se encuentra en fase de escasa prevalencia nivel I, con prevalencias que oscilan entre 0.1% y 0.5% (SENASICA, 2025).

En México, la industria ganadera genera ganancias de \$171,507 millones de pesos por la producción de carne y \$73,955 millones de pesos por la producción de leche (Pesquera, 2023; Van Der Zwan et al., 2024). La bTB causa severas pérdidas económicas en la industria ganadera, debido a que, tras el diagnóstico, los animales infectados son cuarentenados y sacrificados de acuerdo con el “Acuerdo para la operación de la Campaña Nacional contra la Tuberculosis Bovina (*Mycobacterium bovis*)”. Aunque no existen cifras económicas nacionales sobre los efectos de la bTB, un estudio donde se estimó el valor de la pérdida económica en una finca donde se encuentra un foco de infección estima que ésta podría alcanzar los 790,000 dólares americanos (Céspedes Meneses et al., 2022).

El control de la bTB en México incluye la detección de la enfermedad por prueba de tuberculina y ensayo de liberación de interferón gamma (SADER, 2024). Sin embargo, estas pruebas están limitadas para detectar la infección con certeza en los animales, debido a la reactividad cruzada por exposición a otras micobacterias no pa-



tógenas, así como los costos asociados a su implementación y características logísticas, que las hacen de limitado acceso (Rothel et al., 1992). Por otro lado, el actual Acuerdo para la operación de la campaña nacional contra la tuberculosis bovina sugiere eliminar progresivamente animales infectados con *M. bovis* y criar reemplazos libres de la infección, estrategia que ha demostrado reducir la prevalencia de la enfermedad en ciertos escenarios (Lakew et al., 2024). Sin embargo, la aplicación de estas acciones requiere evaluaciones a largo plazo que consideren su viabilidad, aplicabilidad y los costos económicos y operativos en las distintas unidades de producción lechera.

Riesgo de infección entre humanos y animales: la tuberculosis zoonótica (zTB)

En la última década, la TB zoonótica ha llamado la atención de las autoridades sanitarias internacionales quienes incluyeron esta zoonosis entre las enfermedades infecciosas desatendidas reemergentes (Macedo Couto et al., 2019).

Aunque existe en forma pulmonar, usualmente la zTB está asociada a formas extrapulmonares y suele transmitirse a través del consumo de leche no pasteurizada (WHO, 2017). A pesar de que en México, el 72% de la producción láctea se pasteuriza o industrializa y el 28% se consume cruda o se transforma en derivados lácteos (SADER, 2024), un estudio retrospectivo de los casos de hTB durante 15 años mostró que el 26% de los casos de TB correspondieron a casos de zTB, una cifra mucho más alta de lo esperada, de los cuales el 65% de los casos correspondieron a casos de TB extrapulmonar, mientras que el 35% fueron casos de TB pulmonar (Bobadilla-del Valle et al., 2015).

La TB zoonótica es más frecuente en los grupos ocupacionales que tienen un mayor riesgo de exposición a la infección, como los granjeros, veterinarios y trabajadores de rastro (Devi et al., 2021). La infección por *M. bovis* en humanos es clínicamente indistinguible en términos clínicos, radiológicos y anatomopatológicos en comparación de los casos de infección por *M. tuberculosis*. Además, algunos estudios indican una mayor letalidad entre los pacientes infectados por *M. bovis* en comparación de aquellos infectados por *M. tuberculosis*, posiblemente debido a la mayor frecuencia de tuberculosis miliar, mayor mortalidad en pacientes coinfectados con VIH, o incluso la presencia de resistencia a medicamentos. Sin embargo, se requieren más estudios para confirmar estos datos (Macedo Couto et al., 2019; Olea-Popelka et al., 2017).

Debido a su contribución a los daños generados a la salud humana y animal, la zTB fue incluida en el plan mundial para poner fin a la TB 2016-2020 y representa uno de los 17 objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la Naciones Unidas (Nations, 2015).



El enfoque *Una Salud* para prevenir y diagnosticar la tuberculosis humana, bovina y zoonótica

El enfoque *Una Salud* de la Organización Mundial de la Salud es un enfoque integrado que tiene por objetivo balancear y optimizar la salud de personas, animales y ecosistemas. Esta estrategia reconoce la conexión directa que existe entre el ambiente, los animales, plantas y humanos, y la describe como entes interdependientes (One Health High-Level Expert et al., 2022). En el caso de la tuberculosis, el enfoque *Una Salud* reconoce la necesidad de contar con métodos diagnósticos y preventivos de la tuberculosis humana, bovina y zoonótica, que produzcan bienestar simultáneo en humanos y animales.

Trabajar el problema conjunto de la hTB, bTB y zTB en México requiere balancear el conocimiento de frontera de la tuberculosis en humanos y animales. Mientras que gran parte de la evidencia sobre la interacción hospedero-patógeno se ha descrito para la hTB, poco se conoce sobre los mecanismos inmunes y la relación bovino-bacteria en la bTB. En relación con este tema, actualmente se desarrolla en México un proyecto con el objetivo de caracterizar cómo una infección natural por *M. bovis* influye en el fenotipo y la función de los neutrófilos bovinos mediante el análisis de subpoblaciones de neutrófilos y células T $\gamma\delta$ en ganado bovino infectado de forma natural, con el objetivo de identificar nuevas vías para modificar las respuestas de estas células *in vivo* y potenciar la respuesta a la vacunación (Flores Villalva, 2024). Además de este avance, se requiere caracterizar respuestas celulares y humorales que permitan comprender las bases necesarias para desarrollar vacunas y métodos diagnósticos eficientes para la bTB.

La vacunación contra la hTB, bTB y zTB puede ser un método efectivo para controlar la incidencia de la tuberculosis; sin embargo, enfrenta retos en los tres frentes. En la hTB, la vacunación con BCG ha resultado poco eficaz para reducir la incidencia de la tuberculosis, principalmente porque no reduce la transición de la forma latente a la forma activa de la enfermedad, y por tanto no reduce la diseminación de la bacteria (Kuan et al., 2020). El desarrollo de reemplazos o refuerzos de BCG para prevenir la hTB enfrenta múltiples retos técnicos, de los cuales resultan relevantes al menos dos: la ausencia de marcadores de protección replicables que puedan usarse como indicadores de eficacia de candidatos a vacuna en sus etapas tempranas de desarrollo, lo cual produce que candidatos vacunales avancen en su evaluación clínica y finalmente sean descartados en etapas avanzadas de su estudio (Wang et al., 2024), la ausencia de modelos animales de experimentación que imiten todos los aspectos de la hTB, que reduce la posibilidad de evaluar el efecto de los



candidatos a vacuna sobre aspectos relevantes de la inmunopatología de la infección por *M. tuberculosis* y la progresión de esta (Hunter et al., 2023).

En el caso de la bTB, la vacuna BCG no induce protección contra la infección por *M. tuberculosis*; sin embargo, presenta ventajas como reducir la gravedad de la enfermedad (Milián-Suazo et al., 2022) y reducir la transmisión natural de la enfermedad (Fromsa et al., 2024). El desarrollo de vacunas efectivas para prevenir la bTB enfrenta como principales retos: (1) que la vacunación con bacterias vivas atenuadas, como BCG, induce respuestas inmunes que interfieren en las pruebas diagnósticas, como la prueba de la tuberculina, induciendo falsos positivos al diagnóstico de la enfermedad (Balseiro et al., 2020; Flores-Villalva et al., 2012) y (2) la brecha de conocimiento sobre los mecanismos de transmisión de *M. bovis* intra e interespecie, así como la ausencia de tecnologías diagnósticas específicas de la bTB, que permitan la evaluación de candidatos a vacuna en ganado y especies con las que conviven (Miller et al., 2025). En el caso de la zTB, la vacunación es un aspecto que no ha sido explorado; sin embargo, los desarrollos vacunales para prevenir la hTB y la bTB podrían tener un efecto sobre la incidencia de esta forma de tuberculosis en la comunidad. Los primeros desarrollos de vacunas contra TB con un enfoque *Una Salud* han propuesto aproximaciones computacionales que permiten desarrollar epítomos vacunales probando antigenicidad en modelos *in silico* de humanos y bovinos (Shey et al., 2025). No obstante, este enfoque se enfrenta a limitaciones en el conocimiento hospedero-patógeno en el caso de la bTB y requiere futura validación para desarrollar vacunas trans-especie.

En el área de diagnóstico, abordar la problemática de la hTB, la bTB y la zTB con un enfoque *Una Salud* requiere el desarrollo de plataformas especie-específicas. En el caso de la hTB y zTB, se requieren diagnósticos que tomen en cuenta aspectos comunes de *M. tuberculosis* y *M. bovis* en humanos y ganado con alta sensibilidad y especificidad, de manera que permitan diferenciar la infección por estas bacterias en la clínica. En este sentido, se están desarrollando pruebas diagnósticas empleando el uso de targets moleculares, uso de inteligencias artificiales y el screening de moléculas expresadas en diferentes etapas de la enfermedad para su aplicación en hTB y zTB (Huang et al., 2022). Por otro lado, para enfrentar el reto de los diagnósticos falsos positivos de bTB en el ganado, se han propuesto desarrollos de pruebas diagnósticas que diferencien a los animales infectados de los vacunados (DIVA, por las siglas en inglés de “Detecting Infected amongst Vaccinated Animals”), que utilizan antígenos que no son expresados ni secretados por BCG como ESAT6 y CFP10, y que resultan en una detección altamente sensible y específica (Flores-Villalva et al., 2012). Actualmente no existen plataformas diagnósticas desarrolladas con enfoque



One Health para hTB y bTB en simultáneo, y esto constituye un área que necesita ser abordada con especial énfasis en países donde la zTB es prevalente.

Conclusiones

La tuberculosis humana, bovina y zoonótica están estrechamente ligadas en México. La propagación de la infección se ve favorecida por una continua convivencia entre personas y el ganado. El desarrollo de intervenciones profilácticas y diagnósticas de la tuberculosis en sus tres formas requiere del enfoque *Una Salud*. Bajo este esquema, los desarrollos de vacunas y diagnósticos deben tener un carácter inter-especie, soportado por una mejor comprensión de las interacciones hospedero-patógeno en humanos y ganado, además de contemplar aspectos regulatorios específicos en cada escenario. La atención de la tuberculosis en México con el enfoque *Una Salud* podría impactar positivamente en la calidad de vida de las personas, reduciendo costos de tratamiento y mejorando el bienestar social, y también puede impactar económicamente en las actividades relacionadas con la ganadería. Se requiere que las nuevas investigaciones de hTB, bTB y zTB tengan un enfoque transversal y amplio, que incluya aspectos humanos y bovinos para su desarrollo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

Los autores reciben financiamiento de The VALIDATE Network para desarrollar investigación de vacunas contra la tuberculosis en México a través de los fellowships “Evaluation of the efficacy of BCG Δ BCG1419c vaccination plus a booster of EsxG/EsxH-derived peptides to prevent tuberculosis progression caused by *Mycobacterium tuberculosis* strains prevalent in Latin America” y “Elucidating the microbicidal and regulatory functions of bovine neutrophils during a natural *Mycobacterium bovis* infection”.

Referencias

Alsayed, S. S. R., & Gunosewoyo, H. (2023). Tuberculosis: Pathogenesis, Current Treatment Regimens and New Drug Targets. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5202. <https://doi.org/10.3390/ijms24065202>



- Balseiro, A., Thomas, J., Gortázar, C., & Rialde, M. A. (2020). Development and Challenges in Animal Tuberculosis Vaccination. *Pathogens*, *9*(6), 472. <https://doi.org/10.3390/pathogens9060472>
- Bezoz, J., Álvarez, J., Romero, B., de Juan, L., & Domínguez, L. (2014, 2014/10/01/). Bovine tuberculosis: Historical perspective. *Research in Veterinary Science*, *97*, S3-S4. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2014.09.003>
- Bobadilla-del Valle, M., Torres-González, P., Cervera-Hernández, M. E., Martínez-Gamboa, A., Crabtree-Ramírez, B., Chávez-Mazari, B., Ortiz-Conchi, N., Rodríguez-Cruz, L., Cervantes-Sánchez, A., Gudiño-Enríquez, T., Cinta-Severo, C., Sifuentes-Osornio, J., & Ponce de León, A. (2015, Sep). Trends of *Mycobacterium bovis* Isolation and First-Line Anti-tuberculosis Drug Susceptibility Profile: A Fifteen-Year Laboratory-Based Surveillance. *PLoS Negl Trop Dis*, *9*(9), e0004124. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0004124>
- Borham, M., Oreiby, A., El-Gedawy, A., Hegazy, Y., Khalifa, H. O., Al-Gaabary, M., & Matsumoto, T. (2022, Jun 21). Review on Bovine Tuberculosis: An Emerging Disease Associated with Multidrug-Resistant *Mycobacterium* Species. *Pathogens*, *11*(7), 715. <https://doi.org/10.3390/pathogens11070715>
- Bouchez-Zacria, M., Jabert, P., Reveillaud, E., Richomme, C., & Marsot, M. (2024, Apr). Intra- and interspecies infectious neighbourhoods as determinant parameters for *Mycobacterium bovis* infection among badgers in southwestern France. *Preventive Veterinary Medicine*, *225*, 106146. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2024.106146>
- Céspedes Meneses, L. M., & Ospina Castillo, J. A. (2022). *Afectación económica de la tuberculosis en la producción ganadera y la salud pública* [tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio institucional UC. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/46480>
- Chandran, A., Williams, K., Mendum, T., Stewart, G., Clark, S., Zadi, S., Lanni, F., McLeod, N., Williams, A., Villarreal-Ramos, B., Vordermeier, M., Maroudam, V., Prasad, A., Bharti, N., Banerjee, R., Manjari Kasibhatla, S., & McFadden, J. (2019, Nov 28). Development of a diagnostic compatible BCG vaccine against Bovine tuberculosis. *Scientific Report*, *9*(1), 17791. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54108-y>
- Devi, K. R., Lee, L. J., Yan, L. T., Syafinaz, A. N., Rosnah, I., & Chin, V. K. (2021, Aug). Occupational exposure and challenges in tackling *M. bovis* at human-animal interface: a narrative review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, *94*(6), 1147-1171. <https://doi.org/10.1007/s00420-021-01677-z>

- Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *La ganadería mexicana en cifras*. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/es/articulos/la-ganaderia-mexicana-en-cifras?tab=>
- Duffy, S. C., Marais, B., Kapur, V., & Behr, M. A. (2024, Apr). Zoonotic tuberculosis in the 21st century. *The Lancet Infectious Diseases*, 24(4), 339-341. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(24\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(24)00059-8)
- Flores Villalva, S. (2024). *Elucidating the microbicidal and regulatory functions of bovine neutrophils during a natural Mycobacterium bovis infection*. Validate. <https://www.validate-network.org/fellowship-susana-flores-villalva>
- Flores-Villalva, S., Suárez-Güemes, F., Espitia, C., Whelan, A. O., Vordermeier, M., & Gutiérrez-Pabello, J. A. (2012). Specificity of the Tuberculin Skin Test Is Modified by Use of a Protein Cocktail Containing ESAT-6 and CFP-10 in Cattle Naturally Infected with *Mycobacterium bovis*. *Clinical and Vaccine Immunology*, 19(5), 797-803. <https://doi.org/10.1128/CVI.05668-11>
- Fromsa, A., Willgert, K., Srinivasan, S., Mekonnen, G., Bedada, W., Gumi, B., Lakew, M., Tadesse, B., Bayissa, B., Sirak, A., Girma Abdela, M., Gebre, S., Chibssa, T., Veerasami, M., Vordermeier, H. M., Bakker, D., Berg, S., Ameni, G., Juleff, N., de Jong, M. C. M., Wood, J., Conlan, A., & Kapur, V. (2024). BCG vaccination reduces bovine tuberculosis transmission, improving prospects for elimination. *Science*, 383(6690), eadl3962. <https://doi.org/doi:10.1126/science.adl3962>
- Girardi, E., Caro-Vega, Y., Cozzi-Lepri, A., Musaazi, J., Carriquiry, G., Castelnuovo, B., Gori, A., Manabe, Y. C., Gotuzzo, J. E., D'Arminio Monforte, A., Crabtree-Ramirez, B., & Mussini, C. (2022). The contribution of late HIV diagnosis on the occurrence of HIV-associated tuberculosis. *AIDS*, 36(14), 2005-2013. <https://doi.org/10.1097/QAD.0000000000003321>
- Hernández Zarza, N. M., Sánchez Castillo, L., Olvera Castillo, R., & García Cruz, A. (2004). La técnica de mantoux en población indígena. Caso de estudio. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 17(2), 73-79. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=751>
- Huang, Y., Ai, L., Wang, X., Sun, Z., & Wang, F. (2022, Sep 30). Review and Updates on the Diagnosis of Tuberculosis. *Journal Clinical Medicine*, 11(19), 5826 <https://doi.org/10.3390/jcm11195826>
- Hunter, L., Ruedas-Torres, I., Agullo-Ros, I., Rayner, E., & Salguero, F. J. (2023). Comparative pathology of experimental pulmonary tuberculosis in animal models. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1264833. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1264833>



- Johansen, M. D., Spaink, H. P., Oehlers, S. H., & Kremer, L. (2024). Modeling nontuberculous mycobacterial infections in zebrafish. *Trends Microbiol*, *32*(7), 663-677. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2023.11.011>
- Khairullah, A. R., Moses, I. B., Kusala, M. K. J., Tyasningsih, W., Ayuti, S. R., Rantam, F. A., Fauziah, I., Silaen, O. S. M., Puspitasari, Y., Aryaloka, S., Raharjo, H. M., Hasib, A., Yanestria, S. M., & Nurhidayah, N. (2024). Unveiling insights into bovine tuberculosis: A comprehensive review. *Open Veterinary Journal*, *14*(6), 1330-1344. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i6.2>
- Kontsevaya, I., Cabibbe, A. M., Cirillo, D. M., DiNardo, A. R., Frahm, N., Gillespie, S. H., Holtzman, D., Meiwes, L., Petruccioli, E., Reimann, M., Ruhwald, M., Sabiiti, W., Saluzzo, F., Tagliani, E., & Goletti, D. (2024, Sep). Update on the diagnosis of tuberculosis. *Clinical Microbiology and Infection*, *30*(9), 1115-1122. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2023.07.014>
- Kuan, R., Muskat, K., Peters, B., & Lindestam Arlehamn, C. S. (2020, Dec). Is mapping the BCG vaccine-induced immune responses the key to improving the efficacy against tuberculosis? *Journal of Internal Medicine*, *288*(6), 651-660. <https://doi.org/10.1111/joim.13191>
- Lakew, M., Tadesse, B., Srinivasan, S., Aschalew, M., Andarge, B., Kebede, D., Etifu, A., Alemu, T., Yalew, B., Benti, T., Olani, A., Abera, S., Bedada, W., Fromsa, A., Mekonnen, G. A., Almaw, G., Ameni, G., Ashenafi, H., Gumi, B., Bakker, D., & Kapur, V. (2024, Jun 21). Assessing the feasibility of test-and-cull and test-and-segregation approaches for the control of high-prevalence bovine tuberculosis in Ethiopian intensive dairy farms. *Scientific Report*, *14*(1), 14298. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64884-x>
- Macedo Couto, R., Ranzani, O. T., & Waldman, E. A. (2019, Jan 31). Zoonotic Tuberculosis in Humans: Control, Surveillance, and the One Health Approach. *Epidemiologic Reviews*, *41*(1), 130-144. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxz002>
- Medrano, B. A., Lee, M., Gemeinhardt, G., Rodriguez-Herrera, J. E., Garcia-Viveros, M., & Restrepo, B. I. (2023, Oct 13). Tuberculosis presentation and outcomes in older Hispanic adults from Tamaulipas, Mexico. *Medicine (Baltimore)*, *102*(41), e35458. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000035458>
- Mia, M. M., Hasan, M., & Pory, F. S. (2022, Dec). Occupational exposure to livestock and risk of tuberculosis and brucellosis: A systematic review and meta-analysis. *One Health*, *15*, 100432. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2022.100432>
- Milián-Suazo, F., González-Ruiz, S., Contreras-Magallanes, Y. G., Sosa-Gallegos, S. L., Bárcenas-Reyes, I., Cantó-Alarcón, G. J., & Rodríguez-Hernández, E. (2022). Vaccination Strategies in a Potential Use of the Vaccine against Bovine Tuberculosis in Infected Herds. *Animals (Basel)*, *12*(23). <https://doi.org/10.3390/ani12233377>



- Miller, M., Gomez, M. A., Tanner, R., Vermaak, S., Villarreal-Ramos, B., & Group, V. N. O. H. W. (2025, Mar 1). Workshop report: One Health challenges and knowledge gaps in the control of intracellular infections with a focus on tuberculosis and leishmaniasis. *Vaccine*, *53*, 126929. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2025.126929>
- Miller, M., & Olea-Popelka, F. (2013). One Health in the shrinking world: Experiences with tuberculosis at the human–livestock–wildlife interface. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, *36*(3), 263-268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cimid.2012.07.005>
- Mohamed, A. (2020). Bovine tuberculosis at the human-livestock-wildlife interface and its control through one health approach in the Ethiopian Somali Pastoralists: A review. *One Health*, *9*, 100113. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2019.100113>
- Mokrousov, I., Badleeva, M., Mudarisova, R., Kozhevnikov, V., Markhaev, A., Guntupova, A., & Vyazovaya, A. (2024). Increasing circulation of multi-drug resistant tuberculosis strains in Buryatia, high-burden and ethnically diverse region in the Russian Far East. *Tuberculosis (Edinb)*, *149*, 102555. <https://doi.org/10.1016/j.tube.2024.102555>
- Olea-Popelka, F., Muwonge, A., Perera, A., Dean, A. S., Mumford, E., Erlacher-Vindel, E., Forcella, S., Silk, B. J., Ditiu, L., El Idrissi, A., Raviglione, M., Cosivi, O., LoBue, P., & Fujiwara, P. I. (2017). Zoonotic tuberculosis in human beings caused by *Mycobacterium bovis*-a call for action. *The Lancet Infectious Diseases*, *17*(1), e21-e25. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(16\)30139-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)30139-6)
- One Health High-Level Expert, P., Adisasmito, W. B., Almuhairi, S., Behraves, C. B., Bilivogui, P., Bukachi, S. A., Casas, N., Cediell Becerra, N., Charron, D. F., Chaudhary, A., Ciacci Zanella, J. R., Cunningham, A. A., Dar, O., Debnath, N., Dungu, B., Farag, E., Gao, G. F., Hayman, D. T. S., Khaita, M., Koopmans, M. P. G., Machalaba, C., Mackenzie, J. S., Markotter, W., Mettenleiter, T. C., Morand, S., Smolenskiy, V., & Zhou, L. (2022). One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. *PLoS Pathog*, *18*(6), e1010537. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1010537>
- Oren, E., Fiero, M. H., Barrett, E., Anderson, B., Núñez, M., & Gonzalez-Salazar, F. (2016). Detection of latent tuberculosis infection among migrant farmworkers along the US-Mexico border. *BMC Infectious Diseases*, *16*(1), 630. <https://doi.org/10.1186/s12879-016-1959-3>
- Pando, D. A. H. (2019). *Estimación del costo de atención de pacientes con tuberculosis pulmonar para el año 2018 en México* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional UNAM. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000785366>



- Paz-Ayar, N., Mejía-Rodríguez, I., García-Velasco, L., Alcalá-Martínez, E., Martínez-Vivar, J. C., & Niebla-Fuentes, M. (2018). Determinantes económicos en la incidencia de tuberculosis en México. *Revista de sanidad militar*, 72, 295-299. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-696X2018000400295&lng=es&tlng=es.
- Pérez-Guerrero, L., Milián-Suazo, F., Arriaga-Díaz, C. a., Romero-Torres, C., & Escartín-Chávez, M. (2008). Epidemiología molecular de las tuberculosis bovina y humana en una zona endémica de Querétaro, México. *Salud Pública de México*, 50(4), 286-291.
- Portnoy, A., Yamanaka, T., Nguhiu, P., Nishikiori, N., Garcia Baena, I., Floyd, K., & Menzies, N. A. (2023). Costs incurred by people receiving tuberculosis treatment in low-income and middle-income countries: a meta-regression analysis. *Lancet Glob Health*, 11(10), e1640-e1647. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(23\)00369-8](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(23)00369-8)
- Rothel, J. S., Jones, S. L., Corner, L. A., Cox, J. C., & Wood, P. R. (1992, Jan). The gamma-interferon assay for diagnosis of bovine tuberculosis in cattle: conditions affecting the production of gamma-interferon in whole blood culture. *Australian Veterinary Journal*, 69(1), 1-4. <https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.1992.tb09848.x>
- Sabio, Y. G. J., Bigi, M. M., Klepp, L. I., Garcia, E. A., Blanco, F. C., & Bigi, F. (2020). Does *Mycobacterium bovis* persist in cattle in a non-replicative latent state as *Mycobacterium tuberculosis* in human beings? *Veterinary Microbiology*, 247, 108758. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2020.108758>
- Shey, R. A., Nchanji, G. T., Stong, T. Y. A., Yaah, N. E., Shintouo, C. M., Yengo, B. N., Nebangwa, D. N., Efeti, M. T., Chick, J. A., Ayuk, A. B., Gwei, K. Y., Lemoge, A. A., Vanhamme, L., Ghogomu, S. M., & Souopgui, J. (2025). One Health Approach to the Computational Design of a Lipoprotein-Based Multi-Epitope Vaccine Against Human and Livestock Tuberculosis. *International Journal Molecular Sciences*, 26(4), 1587. <https://doi.org/10.3390/ijms26041587>
- Sistema Nacional de Evaluación de los Derechos Humanos. (s.f.). *Incidencia de tuberculosis pulmonar (por cada 100 mil habitantes)*. Consultado el 12 de junio de 2025 de <https://snedh.segob.gob.mx/indicadores.php?codigo=PUDH:INDI:SaR07b>
- Valencia-Trujillo, D., Ávila-Trejo, A. M., García-Reyes, R. L., Narvaez-Díaz, L., Segura Del Pilar, M., Mujica-Sánchez, M. A., Becerril-Vargas, E., León-Juárez, M., Mata-Miranda, M. M., Rivera-Gutiérrez, S., & Cerna-Cortes, J. F. (2024). Genetic Diversity of *Mycobacterium tuberculosis* Strains Isolated from HIV-Infected Patients in Mexico. *Pathogens*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/pathogens13050428>



- Van Der Zwan, A., Campbell, P. T., Shi, N., De Bortoli, N., & Villanueva-Cabezas, J. P. (2024). Systematic review of knowledge, attitudes, and practices of dairy farmers and consumers towards bovine tuberculosis in low- and middle-income countries. *Preventive Veterinary Medicine*, 232, 106314. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2024.106314>
- Vargas RM, R. N., Salazar LMA, Cano F (2003). Cost of Lung Tuberculosis Treatment: Case National Institute of Respiratory Diseases (INER). *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 16, 219-225. <https://www.medigrapic.com/cgi-bin/new/resumenI.cgi?IDARTICULO=6335>
- Wang, J., Fan, X. Y., & Hu, Z. (2024). Immune correlates of protection as a game changer in tuberculosis vaccine development. *NPJ Vaccines*, 9(1), 208. <https://doi.org/10.1038/s41541-024-01004-w>
- World Health Organization. (2005). *Global tuberculosis control: surveillance, planning, financing. WHO report 2005*. Recuperado de https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/144569/9241562919_eng.pdf?sequence=1
- World Health Organization. (2017). *Global tuberculosis report 2017*. Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565516>
- World Health Organization. (2024). *Global tuberculosis report 2024*. Recuperado de <https://www.who.int/teams/global-programme-on-tuberculosis-and-lung-health/tb-reports/global-tuberculosis-report-2024>
- World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Organisation for Animal Health. (2017). *Roadmap for zoonotic tuberculosis*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/259229>
- Yague-Santiago, Z. L., Ramirez-Diaz, M. D. P., Velazquez-Ramirez, D. D., Zenteno-Cuevas, R., & Luna-Hernandez, J. F. (2022). Factors associated with tuberculosis-diabetes mellitus type 2 binomial in rural population of Oaxaca, Mexico. *The Journal of Infection in Developing Countries*, 16(4), 650-658. <https://doi.org/10.3855/jidc.15543>
- Zacarias-Hernández, J. L., Flores-Arechiga, A., Támez-Guerra, R. S., Rivera-Morales, L. G., Castro-Garza, J., Becerril-Montes, P., Vázquez-Cortés, C. G., de la, O. C. M., Vázquez-Guillen, J. M., & Rodríguez-Padilla, C. (2025). Geographical location and genotyping analysis of pulmonary tuberculosis in the state of Nuevo Leon, Mexico. *Scientific Reports*, 15(1), 7098. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90579-y>