

TRABAJO DE REVISIÓN

Aplicaciones Potenciales de la Microbiología Forense. Revisión narrativa.

Potential Applications of Forensic Microbiology. A Narrative Review.



Mireya Matamoros Zelaya ¹: <https://orcid.org/0000-0002-4082-7593>

Carolina Inostroza ¹: <https://orcid.org/0000-0002-1176-9160>



¹Ministerio Público, Dirección de Medicina Forense, Unidad de Investigación y Docencia, Tegucigalpa, Honduras.

²Universidad de los Andes, Facultad de Odontología, Santiago de Chile, Chile.

Correspondencia a: mireyam556@yahoo.com

Palabras clave

Microbiología Forense, Tanatomiobioma, Microbioma humano, Necrobioma, Bioterrorismo, Intervalo postmortem, Medicina legal.

Keywords

Forensic Microbiology, Tanatomiobiome, Necrobiome, Post-mortem Interval, Legal medicine, Bioterrorism, Human microbiome.

Citar como

Matamoros M, Inostroza C. Aplicaciones Potenciales de la Microbiología Forense. Revisión narrativa. Rev. cienc. forenses Honduras. 2025; 11(2): 16-32
Doi:10.5377/rcfh.v11i2.22421

Historia del artículo

Recepción: 9 -1- 2026

Aprobación: 29 -04- 2026

Declaración de relaciones actividades financieras y conflictos de interés

Ninguna

Agradecimientos

A los revisores por fortalecer la calidad del artículo.

Uso de herramientas de IA

No declarado.

RESUMEN

Objetivo: Realizar una revisión bibliográfica narrativa para exponer las generalidades de la disciplina y las aplicaciones potenciales más relevantes de la microbiología en el campo forense, enfatizando las relacionadas a la investigación del cálculo del Intervalo *Postmortem*, la investigación de causas de muerte y el bioterrorismo.

Introducción: Hasta hace pocos años la microbiología era muy poco reconocida como disciplina forense; sus aplicaciones más frecuentes se relacionaban a la identificación de agentes etiológicos de infecciones, en las investigaciones de bioterrorismo o en la investigación de delitos sexuales entre otros; fueron los avances en las metodologías analíticas como la secuenciación de última generación, la genómica, la metagenómica, la bioinformática y la inteligencia artificial, así como el impulso recibido por el proyecto del microbioma humano, las que catapultaron las potenciales aplicaciones de esta disciplina en el campo forense que van, desde la identificación humana, hasta aplicaciones de geolocalización entre otras; sin embargo, a pesar de los avances y aplicaciones potenciales, sus aplicaciones prácticas, así como su implementación en los casos reales no siempre son tan dinámicas, ya que se presentan algunos desafíos para su utilización rutinaria.

Metodología: Se realizó una revisión bibliográfica, en las bases de datos PubMed, Google académico labs, Science direct; desde 1980 a 2026; utilizando una combinación de palabras clave en inglés y español: Microbiología Forense, Tanatomiobioma, Necrobioma, Intervalo *postmortem*, Medicina legal, Bioterrorismo, Microbioma humano.

Resultados: Se seleccionaron 55 artículos a los que se tuvo acceso completo y seis sitios web relevantes.

Conclusión: La microbiología forense es una poderosa herramienta que requiere de más investigación, estandarización y validación de procedimientos, para su adopción rutinaria en los entornos forenses, especialmente en Latinoamérica y en las aplicaciones relacionadas al cálculo del Intervalo *Postmortem* y en la investigación de causas de muerte.

ABSTRACT

Objective: To conduct a narrative literature review to present the general aspects of the discipline and the most relevant potential applications of microbiology in the forensic field, emphasizing those related to the investigation of Postmortem Interval calculation, the investigation of causes of death, and bioterrorism.

Introduction: Until a few years ago, microbiology was not widely recognized as a forensic discipline; its most frequent applications were related to the identification of etiological agents of infections, in bioterrorism investigations, or in the investigation of sexual offenses, among others. Advances in analytical methodologies such as next-generation sequencing, genomics, metagenomics, bioinformatics, and artificial intelligence, as well as the impetus provided by the Human Microbiome Project, catapulted the potential applications of this discipline in the forensic field, ranging from human identification to geolocation applications, among others. However, despite the advances and potential applications, its practical applications and implementation in real-world cases are not always so dynamic, as some challenges arise for its routine use.

Methodology: A literature review was conducted in the PubMed, Google Scholar Labs, and ScienceDirect databases, covering the period from 1980 to 2026, using a combination of English and Spanish keywords: Forensic Microbiology, Thanatomicrobiome, Necrobiome, *Postmortem* Interval, Legal Medicine, Bioterrorism, Human Microbiome.

Results: Fifty-seven articles with full access and four relevant websites were selected.

Conclusion: Forensic microbiology is a powerful tool that requires further research, standardization, and validation of procedures for its routine adoption in forensic settings, especially in Latin-American and applications such as calculating the postmortem interval and investigating causes of death.

INTRODUCCIÓN

Se entiende como microbiología forense a la aplicación del estudio de los microorganismos para resolver asuntos legales; también se define como “la disciplina científica dedicada a analizar evidencia de bioterrorismo, bio crimen, o una liberación involuntaria de microorganismos o toxinas con fines de atribución”¹.

La microbiología forense es una disciplina que combina las técnicas de identificación de microorganismos, tradicionales y moleculares, la epidemiología, así como la ómica (genómica, proteómica, transcriptómica y metabolómica); el aprendizaje automático y profundo, entre otras. Y pese a que es una disciplina relativamente reciente en el área forense, sus aplicaciones potenciales son extensas y van en aumento. Sin embargo, pesar de sus potencialidades aún se requiere de más investigación al respecto, para que sea una herramienta aplicable de manera rutinaria en los laboratorios forenses.

Esta revisión expone las generalidades de la disciplina, enfatizando las relacionadas a la investigación del cálculo del Intervalo *Postmortem* (IP), en la investigación de causas de muerte y del bioterrorismo.

MÉTODOLOGÍA

Se realizó una revisión en las bases de datos PubMed, Google académico y Science Direct, desde 1980 a 2026; de publicaciones que abordan las aplicaciones de la microbiología en el campo forense, utilizando las palabras clave y

sus combinaciones, tanto en inglés como en español: Microbiología Forense, Tanatomiobioma, Necrobioma, Intervalo *postmortem*, Medicina legal, Bioterrorismo, Microbioma humano.

Se consideraron artículos originales, artículos de revisión, informes de casos, artículos en español e inglés y a los que se tuvo acceso completo, no se incorporaron en esta revisión artículos no relacionados a los objetivos, repetitivos o no relevantes. Asimismo, se consultaron páginas web relevantes para el desarrollo de la temática.

Se identificaron más de 20.000 artículos relacionados con el término “microbiología forense” en las bases de datos consultadas: (11,545 en pubmed, 7621 en Science direct y 40 artículos en Google Académico labs), Tras la revisión y cruce de títulos, revisión de resúmenes y disponibilidad de texto completo, se seleccionaron 55 artículos, los cuales abordan principalmente aplicaciones de la microbiología forense en el cálculo del Intervalo *Postmortem*, la determinación de causas de muerte y la investigación de bioterrorismo. Se consultaron además otros artículos y sitios web para contextualizar de manera más clara las aplicaciones a desarrollar en la revisión, seleccionándose cuatro fuentes adicionales.

La selección de los artículos se realizó en base a la contextualización y uso potencial en la práctica forense de las aplicaciones más relevantes seleccionadas para este artículo. Debido a la gran cantidad de artículos publicados en la temática; se optó por una revisión narrativa para resumir de manera clara y sencilla las principales aplicaciones de la microbiología en el campo forense y su capacidad de incorporación en el trabajo rutinario.

Tras la revisión y cruce de títulos, revisión de resúmenes y disponibilidad de texto completo, se seleccionaron 55 artículos, los cuales abordan principalmente aplicaciones de la microbiología forense en el cálculo del IP, la determinación de causas de muerte y la investigación de bioterrorismo. Se consultaron además otros artículos y sitios web para contextualizar de manera más clara las aplicaciones a desarrollar en la revisión, seleccionándose cuatro fuentes adicionales.

PROGRESIÓN DE LA DISCIPLINA

Comúnmente se asocia a la microbiología, con el estudio de los microorganismos para entender sus características, funciones biológicas, mecanismos de patogenicidad y resistencia, especialmente en el área clínico-epidemiológica e industrial, sin embargo, es importante considerar que en el campo forense este mismo conocimiento se aplica siguiendo las reglas de la investigación criminalística y de identificación, con fines de atribución. Actualmente las aplicaciones de la microbiología forense son diversas, destacando aquellas en las que las metodologías de abordaje rutinario, muestran limitaciones, como:

1.-La identificación humana: Las investigaciones indican que albergamos una microbiota personal que esta influenciada por características como el sexo, la raza, el estado de salud, entre otras. Esta además se configura mediante el intercambio con el entorno en procesos de adquisición y transmisión definidos. Se considera que el microbioma personal podría constituir una especie de huella digital, lo que facilitaría su aplicación forense, como herramienta de identificación alternativa a los estudios de ADN, siendo su abundancia relativa con respecto al ADN una ventaja frente a este; por lo que se estima que, podría ser útil, especialmente en los casos en los que no es posible recuperar ADN ²⁻⁴.

2.-En el rastreo de microorganismos: como en el bioterrorismo o en los casos en que los microorganismos son

utilizados como bioarmas, por ejemplo, el conocido caso del Dr. Richard Schmidt acusado de la transmisión deliberada del virus de inmunodeficiencia humana (VIH) para causar la muerte de su amante⁵.

3.-En el estudio de causas de muerte y muerte súbita asociada a microorganismos: la microbiología *postmortem* es una herramienta específica que puede proporcionar apoyo crucial para la determinación de la causa de la muerte, ya sea mediante el abordaje con métodos tradicionales enfocado al aislamiento de los microorganismos o con los enfoques moleculares y los estudios del microbioma^{6,7}.

4.-Para descartar muertes con responsabilidad profesional: ya sea las asociadas a infecciones no detectadas *antemortem*, o las adquiridas intrahospitalariamente por negligencia en el manejo de los pacientes⁷. Fernández-Rodríguez y cols.⁸, describen que “los principales motivos médico-legales de solicitud de análisis microbiológico en la autopsia forense son”:

- La muerte inesperada en el adulto, con sospecha de origen infeccioso;
- La muerte súbita infantil (MSI);
- La investigación de supuesta mala praxis por sospecha de infección hospitalaria;
- La muerte cardíaca en la que se sospecha una “miocarditis viral”.

5.- En el cálculo del Intervalo *Postmortem*: las comunidades bacterianas son parte esencial del proceso de descomposición cadavérica, además su persistencia, abundancia, sumado a los avances tecnológicos en el área molecular y la inteligencia artificial, perfilan el uso de la microbiología forense *postmortem* como un análisis que fortalece otros enfoques aplicados actualmente en el cálculo del IP⁹.

6.-En la identificación de tejidos y fluidos: las comunidades microbianas pueden proporcionar evidencia de contactos humanos y sus fluidos corporales. La distribución del microbioma difiere según la parte del cuerpo (boca, vagina, intestino, piel etc.), sumado a la persistencia y abundancia de las muestras; por lo que el estudio del microbioma se postula como una herramienta con gran potencial en las ciencias forenses¹⁰⁻¹².

7.-En la inferencia de la geolocalización: la geolocalización conecta a un individuo con un lugar o ubicación; la composición de la microbiota varía según la ubicación geográfica, al clima, las precipitaciones, la altitud, el suelo, la alimentación y las fuentes de energía del entorno, entre otros; por lo tanto, la microbiota específica que compone una zona determinada podría vincular a una persona o un objeto con un lugar específico. El microbioma es sitio específico, modelos desarrollados con inteligencia artificial indican que, al combinar la información del microbioma con evidencia de otras fuentes, es posible identificar la ubicación real¹⁰⁻¹⁵.

8.-En la investigación de delitos sexuales: el estudio de microorganismos como *Neisseria gonorrhoeae* y *Chlamydia trachomatis*, así como el VIH y el virus del herpes (1 y/o 2) forman parte de los protocolos de atención de las víctimas en algunos países; así como la detección de parásitos de transmisión sexual como *Tichomonas vaginalis*, *Entamoeba histolytica*, entre otros¹⁶; teniendo la microbiología forense su utilidad más realista en los casos de delitos sexuales contra los niños.

La aplicación de los estudios del microbioma en las investigaciones forenses es prometedora, especialmente en la investigación de los delitos sexuales; ya que la composición de la microbiota es distinta para cada individuo y varía

en función del sitio anatómico estudiado¹⁷⁻²¹. Durante las relaciones sexuales con penetración, con y sin el uso de condón, hay un intercambio de microorganismos^{3,20,21}, lo que permitiría identificar el microbioma de los participantes.

La microbiología forense ha evolucionado significativamente en las últimas dos décadas, principalmente debido al desarrollo de técnicas moleculares como la secuenciación de ADN, la metagenómica y el análisis bioinformático. Sin embargo, el interés para fines legales de los microorganismos nace con el hombre mismo; el registro más antiguo que se tiene del uso de los microorganismos como armas, proviene de una serie de textos hititas, que data de 1500 AC, los cuales enviaron carneros infectados, con tularemia causada por la bacteria *Francisella tularensis*, a sus enemigos²². Pese a que desde los años 90's se publicaron casos en los cuales se aplicó el estudio de microorganismos para resolver casos forenses^{5, 23}, estas primeras investigaciones aplicando la microbiología forense se centraron en establecer la patogenicidad y la causa de muerte tanto en personas como en animales.

A partir del año 2001, tras los ataques con *Bacillus anthracis* en Estados Unidos, surgió la necesidad de establecer una disciplina científica orientada a la atribución de agentes biológicos en contextos criminales o terroristas. Se expuso la necesidad de crear una disciplina denominada "Microbiología Forense", por lo que, a través del Buro Federal de Investigación (FBI), de Estados Unidos, creó el 29 de julio de 2002 el Grupo de Trabajo Científico sobre Genética y Ciencia Forense Microbiana (SWGMPF) que agrupo científicos de diversas disciplinas del gobierno, la academia y el sector privado, cuyo objetivo principal fue sentar las bases para desarrollar y conceptualizar la disciplina^{1,24,26}.

Posteriormente, el Proyecto del Microbioma Humano, iniciado en 2007 permitió comprender la diversidad microbiana humana y su posible aplicación en identificación forense y análisis de evidencia biológica²⁷.

**La microbiología forense ha evolucionado
significativamente en las últimas dos décadas,
principalmente debido al desarrollo de técnicas
moleculares como la secuenciación masiva de última
generación de ácidos nucleicos, la metagenómica y el
análisis bioinformático.**

¿QUÉ SE ENTIENDE POR MICROBIOMA HUMANO?

El concepto de microbioma humano engloba distintas perspectivas (definiciones ecológicas, definiciones dependientes del huésped, definiciones genómicas o basadas en los métodos, entre otras etc.)²⁸, en esta revisión utilizaremos el sugerido por Joshua Lederberg, quien acuñó el término "microbioma", para significar el conjunto de secuencias genómicas de la comunidad ecológica de microorganismos comensales, simbióticos y patógenos que comparten nuestro espacio corporal²⁶; incluyendo protozoos, hongos, bacterias, y virus, que componen la microbiota⁵, así como su actividad (elementos estructurales, metabolitos/moléculas señales y las condiciones ambientales circundantes).

La microbiota es el conjunto de microorganismos "vivos" que conviven en un área definida²⁷. Se estima que el número de bacterias que habitan el cuerpo humano es 10 veces mayor que el número de células, sin embargo, hasta antes del proyecto "microbioma humano", era muy poco lo que se conocía de la microbiota y su relación con la salud y la enfermedad"²⁸.

El enfoque tradicional del estudio de las bacterias, se centraba en las patógenas o en las de interés comercial, no obstante, los estudios han desvelado que las bacterias que colonizan la superficie y el interior de nuestro cuerpo son esenciales para la vida y que la identidad y el grado de diversidad de la microbiota en un mismo individuo varía de una persona a otra. Con los métodos tradicionales, más del 80% de los microorganismos no podían cultivarse y/o aislarse, fueron los avances tecnológicos en la secuenciación del ADN y el desarrollo de la metagenómica los que hicieron posible el análisis del microbioma humano²⁹.

De la información obtenida del estudio del microbioma humano e investigaciones posteriores se resumen algunos hallazgos que impulsaron la adopción de la microbiología como una disciplina con amplias aplicaciones en el campo forense:

- Cada ser humano porta su propio conjunto, "individual" de microbios, que se adquieren temprano en la vida, difieren entre entornos y poblaciones, y pueden persistir durante años^{30,31}.
- La diversidad microbiana se manifiesta de manera diferente en diferentes nichos ecológicos del cuerpo: Piel, intestino, boca, vagina etc.^{17, 30}.
- La microbiota ambiental puede ser sitio específica; la ubicación geográfica, es más importante que el tipo de suelo para determinar la composición de la comunidad microbiana: las comunidades del mismo sitio, pero de diferentes tipos de suelo, aunque significativamente diferentes entre sí, tienen muchas más similitudes entre sí que las comunidades del mismo tipo de suelo, pero de diferentes sitios geográficos¹⁷.
- El microbioma humano puede moldear la ecología microbiana de diferentes lugares p. ej., hogares, oficinas y ciudades. El microbioma tiene una dinámica de "transmisión", la relación entre las bacterias del microbioma cutáneo humano y el microbioma de superficies u objetos, puede rastrearse³.
- El microbioma humano es un sistema altamente dinámico que se altera por múltiples factores, incluyendo los componentes espaciales y temporales, y que están asociados a factores como la edad, el sexo, los hábitos de vida, la ubicación geográfica, la ocupación o la interacción con otras personas, animales y entornos^{3,32,33}.

APLICACIONES DE LA MICROBIOLOGÍA FORENSE EN CÁLCULO DEL INTERVALO POSTMORTEM

Los estudios revisados indican que las comunidades microbianas asociadas a los cadáveres siguen patrones de sucesión relativamente predecibles durante el proceso de descomposición^{34, 35}.

El microbioma *postmortem* es la comunidad de microorganismos procariotas y eucariotas asociados con la descomposición, busca comprender como evolucionan las comunidades microbianas internas y externas después de la muerte. El estudio del microbioma *postmortem* se puede dividir en dos componentes principales^{18, 36-40}:

-El tanatomiobioma que es el estudio de los microbios que colonizan los órganos y orificios internos después de la muerte, caracteriza la dinámica microbiana dentro de los órganos humanos internos.

-El necrobioma (comunidad microbiana epinecrótica), compuesto por microorganismos que residen o se desplazan en la superficie (p. ej., tejidos epiteliales superficiales, membranas mucosas orales y orificios distales del tracto digestivo) de cadáveres en descomposición; se relaciona específicamente con las comunidades microbianas superficiales asociadas con un cadáver humano

Diversos trabajos experimentales han demostrado que la composición del tanatomiobioma y del necrobioma cambia de manera dependiente del tiempo, lo que ha llevado a proponer el concepto de "reloj microbiano" para estimar el IP. Sin embargo, la mayoría de los estudios han sido realizados en modelos animales o en condiciones experimentales controladas, lo que limita su aplicación directa en casos forenses reales^{33, 34}.

La descomposición humana, es el resultado de los procesos de descomposición interna y su interrelación con la microbiota ambiental, la sucesión microbiana sigue una línea de tiempo predecible, con cambios de aerobios facultativos en la autólisis a anaerobios obligados (como *Clostridium spp* y *Bacteroides spp*) durante la etapa enfisematosa; seguidos de anaerobios mixtos y la interacción con taxones asociados al suelo en la descomposición activa y avanzada, y microbios degradadores de queratina y colágeno en la etapa de la reducción y esqueletización^{18,34,36-38}.

Tras la muerte, debido al cese de la actividad del sistema inmune, los microorganismos presentes en el tracto gastrointestinal pueden invadir no solo los tejidos y órganos circundantes, sino también desplazarse a través de los sistemas circulatorio y linfático, iniciando el proceso de descomposición en un entorno rico en nutrientes, mediado por la autólisis tisular. A medida que avanza la descomposición, la diversidad de las comunidades microbianas disminuye, produciéndose una transición de una comunidad de bacterias aeróbicas a una comunidad de bacterias anaeróbicas^{18, 39}.

El tanatomiobioma de ciertos órganos no se ve afectado inmediatamente por microorganismos asociados al intestino que proliferan rápidamente después de la muerte humana, Tuomisto y Col.⁴⁰; demostraron que los órganos internos como el hígado y el líquido pericárdico permanecen estériles hasta cinco días después de la muerte. A medida que un cuerpo humano se descompone, los microbios proliferan en la sangre, el bazo, el hígado, el corazón y el cerebro de una manera dependiente del tiempo; por lo tanto, la presencia y cantidad de microorganismos variarán según el respectivo órgano y el IP. A medida que el cuerpo humano se descompone, el tanatomiobioma dentro de los órganos internos cambia a medida que avanza el tiempo^{18, 39}.

Varias de las aplicaciones descritas requieren metodologías analíticas complejas, herramientas bioinformáticas y modelos basados en inteligencia artificial que no están disponibles en la mayoría de los institutos forenses.

Las aplicaciones del estudio de la microbiota presenta ventajas en relación a los cálculos del IP basados en la entomología y se estima que es aplicable y factible, siempre y cuando se trabaje con protocolos estandarizados no solo en la toma de muestras (tendientes a disminuir la contaminación), sino en su interpretación^{25,41}. Sin embargo, cuando se trata de los estudios del microbioma en el cálculo del IP, aunque son prometedores y tienen un enorme potencial, su aplicación práctica se ve limitada por el hecho que los estudios ómicos y las herramientas de aprendizaje profundo no están disponibles en la mayor parte de los institutos forenses por tanto su alcance aún es limitado. Las aproximaciones al momento no han trascendido el campo experimental y se requiere más investigación en entornos ambientales con un alto nivel de biodiversidad ya que los cálculos del IP difieren de acuerdo al microhábitat estudiado; se requiere más investigación acerca de la influencia de factores ambientales, de composición del hábitat entre otros factores.

APLICACIONES DE LA MICROBIOLOGÍA FORENSE EN EL ESTUDIO DE LAS CAUSAS DE MUERTE

Los estudios revisados sugieren que los análisis microbiológicos *postmortem* pueden contribuir a la determinación de la causa de muerte, especialmente en casos de infecciones sistémicas, sepsis, infecciones del sistema nervioso central o miocarditis. No obstante, diversos autores advierten que la interpretación de los resultados microbiológicos *postmortem* debe realizarse con cautela, debido a fenómenos como la translocación bacteriana *postmortem*, la contaminación durante el muestreo o la propagación agónica de microorganismos⁴²⁻⁴⁸.

Un aislamiento no necesariamente es indicativo de causalidad (etiología). Pese a esto, los estudios microbiológicos cada vez son más aceptados y utilizados como bioindicadores de la causa de muerte, su aplicación es especialmente útil en casos donde se sospecha sepsis, infecciones del sistema nervioso central, infecciones cardiacas, muerte inexplicada o en la sospecha de infecciones no diagnosticadas y tienen relevancia especialmente cuando los resultados se correlacionan con los hallazgos de la autopsia, de la bioquímica *postmortem* y los hallazgos histopatológicos^{31,41-46}, o cuando se identifican marcadores microbianos específicos en ciertas causas de muerte como por ejemplo en la asfixia por sumersión o en algunas intoxicaciones^{28,46-48}.

Cammatti y cols ⁴⁸, propusieron, para la interpretación de los análisis microbiológicos *postmortem* para la atribución de la causa de muerte, el flujo de trabajo que se muestra en la figura 1.



Figura 1: Flujo de trabajo en las investigaciones microbiológicas *postmortem*, tomado de Camatti y cols.⁴⁸.

En general se recomienda la recolección de muestras de al menos dos sitios de muestreo diferentes como el procedimiento estándar en los casos en que se presume una infección y se estima que si se recupera un cultivo puro de los fluidos corporales obtenidos en la autopsia, esto es sugestivo de una infección *antemortem*, mientras que un perfil mixto podría indicar una invasión *postmortem*. Múltiples cultivos *postmortem* de diferentes sitios de muestreo aumentan la probabilidad de identificar el agente etiológico de la infección *antemortem*⁴⁹.

BIOTERRORISMO

Las armas biológicas diseminan organismos o toxinas causantes de enfermedades para dañar o matar a seres humanos, animales o plantas. La bio-guerra es el uso intencional de agentes biológicos, como armas en escenarios de guerra o bio-guerra, en este contexto las armas biológicas pueden utilizarse en la infección de ganado o productos agrícolas para causar escasez de alimentos y pérdidas económicas o la creación de catástrofes medioambientales; cuando el ataque es contra una población civil hablamos de "Bioterrorismo". Los microorganismos o sus toxinas se utilizan frecuentemente para cometer bio-delitos, ya sea utilizándolos para causar una enfermedad; matar, debilitar o causar pánico en un individuo específico o un grupo limitado de individuos, para asesinatos políticos, o los motivados por razones personales como venganza, celos o el deseo de obtener ganancias monetarias mediante extorsión^{22,50-52}.

En el contexto del bioterrorismo, la microbiología forense se centra en la identificación, caracterización y atribución de los agentes biológicos utilizados. La literatura destaca el desarrollo de metodologías moleculares capaces de diferenciar cepas microbianas y rastrear su origen, lo que resulta fundamental para la investigación

El uso de los microbios como armas de guerra es tan antiguo como la humanidad y la historia registra varios programas de desarrollo de armas biológicas:

En el marco de la Segunda Guerra Sino-Japonesa (1937-1945), y coincidiendo en parte con la II Guerra Mundial, el Ejército Imperial Japonés desarrolló un ambicioso programa de investigación de armas biológicas y químicas, poniendo en marcha experimentos a gran escala con seres humanos, acciones planificadas y lideradas por el microbiólogo Shirō Ishii⁵³.

Durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), el programa estadounidense de armas biológicas comenzó de forma oficial en 1943 bajo el gobierno de Franklin D. Roosevelt, programa que fue cerrado posteriormente por el presidente Nixon⁵². En Europa se documentó que Alemania y Francia desarrollaron programas de bioarmas.

En el 2001 Estados Unidos fue víctima de un ataque utilizando *B. Anthracis*, lo que puso en debate la necesidad de contar con laboratorios microbiológicos con un enfoque forense y modelar la disciplina^{1,25}.

Los agentes biológicos que se pueden usar como armas, se clasifican en tres categorías según su facilidad de diseminación o transmisión, tasa de mortalidad, perturbación social, preparación de salud pública y requisitos de planificación de salud pública⁵⁴.

Entre los patógenos y toxinas de interés se describen:

1. Bacterias: *Bacillus anthracis*, *Burkholderia mallei*, *Burkholderia pseudomallei*, *Brucella melitensis*, *Brucella suis*, *Clostridium botulinum*, *Francisella tularensis*, *Yersinia pestis*, *Coxiella burnetti*, *Mycoplasma capricolum*, *Mycoplasma mycoides*.
2. Virus: Virus de la fiebre del Valle del Rift, Virus de la peste bovina, Virus Nipah, Virus de la fiebre catarral maligna, Virus de la enfermedad de Newcastle, Virus de Akabane, Virus de la gripe aviar, Virus de la peste porcina africana, Virus del Ébola, Virus de la estomatitis vesicular, Virus de la enfermedad vesicular porcina, Virus de la encefalitis equina venezolana, Virus de la encefalitis japonesa, Virus Hendra, Virus de la viruela caprina, Virus de la fiebre aftosa, Virus de la lengua azul, Virus de la viruela del camello, Virus de la peste porcina clásica, Virus de la encefalitis equina del este.
3. Hongos: *Coccidioides immitis*.
4. Toxinas: Abrina, toxina Shiga, aflatoxina, toxina botulínica, toxina épsilon de *Clostridium perfringens*, conotoxina, diacetoxiscirpenol (DAS), ricina, saxitoxina, tetrodotoxina, enterotoxina estafilocócica, toxina T-2, toxina de *Clostridium botulinum*.

El bioterrorismo tiene un alto potencial destructivo; desde el punto de vista de la microbiología forense el mayor reto es establecer la fuente del bio agente y asociarlo con los perpetradores, (atribución); para lo cual se requiere no solo conocimientos en las metodologías de detección de los microorganismos o sus microbiomas, sino también de entrenamiento específico en criminalística e investigación criminal que permita establecer el nexo causal y su atribución (científica y legal), así como de un marco jurídico adecuado no solo nacional, sino también internacional⁵⁵.

Un reto importante para la microbiología forense es diferenciar entre un brote, una liberación accidental o una intencional. Por lo cual se requiere más capacitación e investigación; así como el fortalecimiento de la capacidad de

respuesta en los países indistintamente de los ingresos de estos, ya que como quedo evidenciado en la recién pasada pandemia Covid-19, la capacidad instalada especialmente en las redes de laboratorio fue crucial para abordar la pandemia.

DISCUSIÓN

Los estudios revisados indican que la microbiología forense constituye un campo emergente dentro de las ciencias forenses, impulsado principalmente por el desarrollo de herramientas moleculares como la secuenciación masiva, la metagenómica y el análisis bioinformático. Estas tecnologías han permitido caracterizar comunidades microbianas humanas, animales y ambientales con un nivel de resolución previamente imposible, abriendo nuevas posibilidades para su aplicación en la investigación criminal.

Las investigaciones y aplicaciones potenciales de la microbiología forense van en aumento, no obstante, sus aplicaciones prácticas en los casos reales no siempre son tan dinámicas, ya que se presentan algunos desafíos para su utilización rutinaria^{36, 41, 56-60}.

En el Intervalo Postmortem (IP)

Uno de los campos más prometedores de aplicación de la microbiología forense es la estimación del IP, mediante el análisis de las comunidades microbianas asociadas al proceso de descomposición. Los estudios revisados indican que el tanatomiobioma y el necrobioma siguen patrones de sucesión relativamente predecibles a lo largo del tiempo, lo que ha llevado a proponer el concepto de “reloj microbiano” como herramienta potencial para estimar el IP.

No obstante, la aplicación de estos enfoques en la práctica forense aún presenta limitaciones importantes. La mayoría de los estudios se han realizado en modelos experimentales o en condiciones ambientales controladas, lo que dificulta extrapolar los resultados a escenarios forenses reales, donde intervienen múltiples factores ambientales como temperatura, humedad, biodiversidad microbiana del entorno y características del sustrato. Por ello, se requieren más investigaciones en diferentes contextos geográficos y ambientales para validar estos modelos.

Un reto importante para la microbiología forense y sus aplicaciones en el bioterrorismo es diferenciar entre un brote, una liberación accidental de una intencional. Por lo que es indispensable más capacitación, investigación y fortalecimiento de la infraestructura, especialmente en los países de bajos ingresos, ya que el bioterrorismo tiene implicaciones globales, requiere de una estrategia global de prevención y detección

Determinación de la causa de muerte

En el abordaje clásico de la microbiología forense orientado al aislamiento de microorganismos durante la autopsia, la interpretación de los hallazgos microbiológicos continúa siendo compleja. A diferencia de la microbiología clínica, las investigaciones forenses deben abordar cuestiones relacionadas con la causalidad, el tiempo y la responsabilidad legal, muchas veces en ausencia de antecedentes clínicos *antemortem*. En este contexto, la detección de microorganismos no necesariamente implica una relación causal con la muerte ni constituye evidencia concluyente de infección *antemortem*⁴⁰.

En este contexto, la detección de microorganismos no necesariamente implica una relación causal con la muerte ni constituye evidencia concluyente de infección *antemortem*⁴⁰. Factores como la translocación bacteriana *postmortem*, la contaminación durante la toma de muestras o el tratamiento antibiótico previo al fallecimiento pueden dificultar la interpretación de los resultados microbiológicos. Por ello, los análisis microbiológicos deben interpretarse de manera integrada con los hallazgos de autopsia, los estudios histopatológicos, la bioquímica *postmortem* y los antecedentes médico-legales del caso.

Diversos estudios sugieren que las comunidades microbianas presentan características particulares dependiendo del entorno geográfico, lo que podría permitir asociar personas u objetos con determinadas ubicaciones, por lo que sus aplicaciones en la investigación criminal y en la determinación de la manera de muerte, tiene potencial. Sin embargo, este enfoque enfrenta importantes desafíos:

A diferencia de los marcadores genéticos como el ADN que es relativamente estable, el microbioma es altamente dinámico y se ve influenciado por múltiples factores intrínsecos del individuo (estado de salud,

edad, estilo de vida) y extrínsecos (entorno, clima, tipo de sustrato o interacción con otras personas). Asimismo, la microbiota ambiental presente en los sustratos puede interferir con la identificación de fluidos corporales basada en el microbioma, lo que dificulta la atribución precisa de la fuente, especialmente en escenarios con mezclas microbianas⁶¹.

Limitaciones actuales y perspectivas futuras

A pesar de su potencial, la microbiología forense enfrenta diversas limitaciones que dificultan su aplicación rutinaria en el ámbito judicial. Entre ellas destacan la falta de protocolos estandarizados para la toma y análisis de muestras, la variabilidad del microbioma humano y ambiental, la necesidad de infraestructura tecnológica avanzada y la escasez de bases de datos microbiológicas comparativas.

Asimismo, varias aplicaciones descritas requieren metodologías analíticas complejas, herramientas bioinformáticas y modelos basados en inteligencia artificial que no están disponibles en la mayoría de los institutos forenses, especialmente en países de ingresos medios o bajos. Además, aún existen pocos estudios que aborden aspectos éticos, la aceptabilidad jurídica y la presentación de este tipo de evidencia en los tribunales.

Pese a estas limitaciones, el potencial de la microbiología forense es incuestionable. La enorme cantidad de material microbiano presente en el cuerpo humano y en el ambiente, así como su persistencia en diversos sustratos, ofrece nuevas oportunidades para la identificación de contacto entre personas, objetos y lugares, incluso en escenarios donde otros indicios biológicos han sido eliminados.

Las investigaciones futuras deberán centrarse en el desarrollo de protocolos estandarizados de muestreo, la creación de bases de datos microbiológicas de referencia y la validación de modelos predictivos en diferentes contextos ambientales.

A pesar de su potencial, la microbiología forense enfrenta diversas limitaciones que dificultan su aplicación rutinaria. Entre ellas destacan la falta de protocolos estandarizados para la toma y análisis de muestras, la variabilidad del microbioma humano y ambiental, la necesidad de infraestructura, tecnología avanzada y la escasez de bases de datos comparativas.

Será fundamental evaluar la aceptabilidad legal de este tipo de evidencia en los sistemas judiciales y fortalecer la colaboración interdisciplinaria entre microbiología, bioinformática, medicina legal y criminalística.

Las aplicaciones del microbioma más ampliamente descritas en la literatura, aunque prometedoras, enfrentan varios obstáculos que deben considerarse e investigarse más a fondo antes que pueda cumplir sus promesas actuales de convertirse en una parte integral del conjunto de herramientas forenses en el futuro.

CONCLUSIONES

La microbiología forense representa una poderosa herramienta con un gran potencial para fortalecer la investigación médico-legal y criminalística. No obstante, se requiere mayor investigación, estandarización y validación de los procedimientos antes de su incorporación rutinaria en los laboratorios forenses, especialmente en contextos latinoamericanos donde existen importantes diferencias ambientales, epidemiológicas y de infraestructura instalada. Asimismo, resulta fundamental fortalecer los procesos de recolección de muestras biológicas, particularmente en personas fallecidas, ya de por sí limitadas, así como mejorar los criterios de interpretación de los resultados microbiológicos para fines de atribución en el ámbito judicial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Budowle B, Schutzer SE, Einseln A, Kelley LC, Walsh AC, Smith JA, et al. Public health. Building microbial forensics as a response to bioterrorism. Science. 2003;301(5641):1852-3. doi: 10.1126/science.1090083.
- 2.- Franceschetti L, Lodetti G, Blandino A, Amadasi A, Bugelli V. Exploring the role of the human microbiome in forensic identification: opportunities and challenges. Int J Legal Med. 2024 ;138(5):1891-1905. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00414-024-03217-z>
- 3.- Tozzo P, D'Angiolella G, Brun P, Castagliuolo I, Gino S,

- Caenazzo L. Skin microbiome analysis for forensic human identification: what do we know so far?. *Microorganisms*. 2020 ;8(6):873. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060873>.
- 4.- Díez López C, Vidaki A, Kayser M. Integrating the human microbiome in the forensic toolkit: Current bottlenecks and future solutions. *Forensic Sci Int Genet*. 2022;56:102627. DOI:10.1016/j.fsigen.2021.102627
- 5.- Budowle B, Harmon R. HIV legal precedent useful for microbial forensics. *Croat Med J* . 2005 ;46(4):514-21. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16100753/>
- 6.- Zhu Y, Villalba JA, Kasten J, DeLeon Carnes M, Bhatnagar J, Zumwalt R. Sudden death with Lyme disease myocarditis: a case report. *Am J Forensic Med Pathol*. 2025;46(4):319-322.
- 7.- Stassi C, Mondello C, Baldino G, Ventura Spagnolo E. Post-mortem investigations for the diagnosis of sepsis: a review of literature. *Diagnostics (Basel)*. 2020;10(10):849. doi: 10.3390/diagnostics10100849.
- 8.- Fernández-Rodríguez A, Alberola J, Cohen MC. Análisis microbiológico post mórtem. *Enferm Infec Microbiol Clin* . 2013 ;31(10):685-91. Disponible en: <https://ln.run/dPawj>
- 9.- Wang X, Le C, Jin X, Feng Y, Chen L, Huang X, et al. Estimating postmortem interval based on oral microbial community succession in rat cadavers. *Heliyon*. 2024;10(11):e31897. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31897.
- 10.- Haarkötter C, Saiz M, Gálvez X, Medina-Lozano MI, Álvarez JC, Lorente JA. Usefulness of microbiome for forensic geolocation: a review. *Life (Basel)*. 2021 ;30;11(12):1322. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8707258/>
- 11.- Cho HW, Eom YB. Forensic analysis of human microbiome in skin and body fluids based on geographic location. *Front Cell Infect Microbiol*. 11:695191. doi: 10.3389/fcimb.2021.695191.
- 12.- Dobay A, Haas C, Fucile G, Downey N, Morrison HG, Kratzer A, et al. Microbiome-based body fluid identification of samples exposed to indoor conditions. *Forensic Sci Int Genet*. 40:105–113. doi: 10.1016/j.fsigen.2019.02.010
- 13.- Huang L, Xu C, Yang W, Yu R. A machine learning framework to determine geolocations from metagenomic profiling. *Biol Direct*. 2020;15(1):27. doi: 10.1186/s13062-020-00278-z
- 14.- Clarke T, Brinkac L, Greco C, Alleyne AT, Carrasco P, Inostroza C, et al. Sampling from four geographically divergent young female populations demonstrates forensic geolocation potential in microbiomes. *Sci Rep*. 2022 ;12(1):18547. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36329122/>
- 15.- Lei Y, Li M, Zhang H, Deng Y, Dong X, Chen P, et al. Comparative analysis of the human microbiome from four different regions of China and machine learning-based geographical inference. *mSphere*. 2025;10(1):e0067224. doi: 10.1128/msphere.00672-24.
- 16.- Fernández-Huerta M, Zarzuela F, Barberá MJ, Arando M, Esperalba J, Rodríguez V, et al. Sexual transmission of intestinal parasites and other enteric pathogens among men who have sex with men presenting gastrointestinal symptoms in an sti unit in barcelona, spain: a cross-sectional study. *Am J Trop Med Hyg*. 2019;101(6):1388-91. DOI: 10.4269/ajtmh.19-0312.
- 17.- Costello EK, Lauber CL, Hamady M, Fierer N, Gordon JI, Knight R. Bacterial community variation in human body habitats across space and time. *Science*. 2009;326(5960):1694-7. DOI: 10.1126/science.1177486
- 18.-Suvitha MR, Afrin Sona AS, Jose L, Priyatha CV, Siva Prasad MS. Application of microbiome in forensics: a critical review. *J Pure Appl Microbiol*. 2025;19(4):2441-56. doi: 10.22207/JPAM.19.4.37
- 19.- Dixon R, Egan S, Payne M, Mullally C, Chapman B.

La transferencia bacteriana durante las relaciones sexuales como herramienta de detección forense. *Iscience*. 2025;28(2):111861

20.- Fenner A. Sexual transfer of bacteria for forensic use. *Nat Rev Urol* . 2025 ; 22(5):253. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41585-025-01037-3>

21.- Tambuzzi S, Maciocco F, Gentile G, Boracchi M, Bailo P, Marchesi M, et al. Applications of microbiology to different forensic scenarios - a narrative review. *J Forensic Leg Med*. 2023;98:102560

22.- Benítez-Pérez MO, Reyes-Roque AC, Gómez-Pacheco R, Calderón-Medina NA, Moreira-Silverio B, Godoy-León R. Armas biológicas: antecedentes históricos, producción y usos en diferentes etapas de la guerra biológica. *Arch méd Camagüey*. 2024 [Consultado 15 de diciembre de 2025]; 28: e10132. Disponible en: <https://revistaamc.sld.cu/index.php/amc/article/view/10132>

23.- Bosch X. (1998). Hepatitis C outbreak astounds Spain. *351(9113)*, 1-. doi:10.1016/s0140-6736(05)79465-4

24.- Ravel J, Jiang L, Stanley ST, Wilson MR, Decker RS, Read TD, et al. The complete genome sequence of *Bacillus anthracis* Ames "Ancestor". *J Bacteriol*. 2009;191(1):445-6. DOI: 10.1128/JB.01347-08

25.- Budowle B, Murch R, Chakraborty R. Microbial forensics: the next forensic challenge. *Int J Legal Med*. 2005;119(6):317-30. doi: 10.1007/s00414-005-0535-y.

26.- NIH HMP Working Group; Peterson J, Garges S, Giovanni M, McInnes P, Wang L, et al. The NIH human microbiome project. *Genome Res*. 2009;19(12):2317-23. doi: 10.1101/gr.096651.109.

27.- National Institutes of Health. Human Microbiome Project (HMP). Washington: NIH; 2025. Disponible en: <https://commonfund.nih.gov/hmp>

28.- Berg G, Rybakova D, Fischer D, Cernava T, Vergès MC, Charles T, et al. Microbiome definition re-visited: old

concepts and new challenges. *Microbiome*. 2020;8(1):103. DOI: 10.1186/s40168-020-00875-0

29.- Baylor College of Medicine. The human microbiome: the basics. Houston: Baylor College of Medicine; sf. Disponible en: <https://www.bcm.edu/departments/molecular-virology-and-microbiology/emerging-infections-and-biodefense/microbiome>

30.- The Integrative HMP, Research Network Consortium. The integrative human microbiome project. *Nature*. 2019 ;569(7758):641-48. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6784865/>

31.- Heidrich V, Valles-Colomer M, Segata N. Human microbiome acquisition and transmission. *Nat Rev Microbiol*. 2025 ;23(9):568-84. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41579-025-01166-x>

32.- García MG, Pérez-Cárceles MD, Osuna E, Legaz I. Impact of the human microbiome in forensic sciences: a systematic review. *Appl Environ Microbiol*. 2020 ;86(22):e01451-20. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/AEM.01451-20>

33.- Dass M, Abbai NS, Ghai M. The human skin microbiome: factors affecting individuality and application in forensic investigations. *Int J Legal Med*. 2026 ;140(2):1067-84. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00414-025-03610-2>.

34.- Metcalf JL, Wegener Parfrey L, Gonzalez A, Lauber CL, Knights D, Ackermann G, et al. A microbial clock provides an accurate estimate of the postmortem interval in a mouse model system. *Elife*. 2013; 15;2:e01104. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3796315/>

35.- Teixeira MJ, Barbosa DJ, Dinis-Oliveira RJ, Freitas AR. Redefining postmortem interval estimation: the need for evidence-based research to bridge science and justice. *Front Microbiol*. 2025;16:1646907. doi: 10.3389/fmicb.2025.1646907

- 36.- Y K, Isukapatla AR. Postmortem microbiome dynamics: review of forensic microbial clock. *J Forensic Leg Med* . 2026 ;117:103024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2025.103024>
- 37.- Oliveira M; Amorim A. Microbial forensics: new breakthroughs and future prospects. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2018;102(24):10377-91. doi:10.1007/s00253-018-9414-6
- 38.- Wu Z, Guo Y, Hayakawa M, Yang W, Lu Y, Ma J, et al. Artificial intelligence-driven microbiome data analysis for estimation of postmortem interval and crime location. *Front Microbiol*. 2024;15:1334703. doi: 10.3389/fmicb.2024.1334703.
- 39.- Can I, Javan GT, Pozhitkov AE, Noble PA. Distinctive thanatomicrobiome signatures found in the blood and internal organs of humans. *J Microbiol Methods*. 2014;106:1-7. doi:10.1016/j.mimet.2014.07.026
- 40.- Tuomisto S, Karhunen PJ, Vuento R, Aittoniemi J, Pessi T. Evaluation of postmortem bacterial migration using culturing and real-time quantitative PCR. *J Forensic Sci*. 2013;58(4):910-6. doi: 10.1111/1556-4029.12124.
- 41.- Lei Y, Li M, Zhang H, Deng Y, Dong X, Chen P, et al. Comparative analysis of the human microbiome from four different regions of China and machine learning-based geographical inference. *mSphere*. 2025;10(1):e0067224. doi: 10.1128/msphere.00672-24.
- 42.- Tsokos M, Püschel K. Postmortem bacteriology in forensic pathology: diagnostic value and interpretation. *Leg Med (Tokyo)*. 2001;3(1):15-22. doi: 10.1016/s1344-6223(01)00002-5.
- 43.- Gunn A, Pitt SJ. Microbes as forensic indicators. *Trop Biomed*. 2012 Consultado];29(3):311-30. Disponible en: https://www.msptm.org/files/311_-_330_Alun_Gunn.pdf
- 44.- Nodari R, Arghittu M, Bailo P, Cattaneo C, Creti R, D'Aleo F, et al. Forensic microbiology: when, where and how. *Microorganisms*. 2024;12(5):988. doi: 10.3390/microorganisms12050988
- 45.- Ventura Spagnolo E, Stassi C, Mondello C, Zerbo S, Milone L, Argo A. Forensic microbiology applications: a systematic review. *Leg Med (Tokyo)*. 2019;36:73-80. doi: 10.1016/j.legalmed.2018.11.002.
- 46.- Speruda M, Piecuch A, Borzęcka J, Kadej M, Ogórek R. Microbial traces and their role in forensic science. *J Appl Microbiol* . 2022 ;132(4):2547-2557. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34954826/>
- 47.- Uchiyama T, Kakizaki E, Kozawa S, Nishida S, Imamura N, Yukawa N. A new molecular approach to help conclude drowning as a cause of death: simultaneous detection of eight bacterioplankton species using real-time PCR assays with TaqMan probes. *Forensic Sci Int*. 2012;222(1-3):11-26. DOI:10.1016/j.forsciint.2012.04.029
- 48.- Camatti J, Bonasoni MP, Santunione AL, Cecchi R, Radheshi E, Carretto E. Postmortem microbiology in forensic diagnostics: interpretation of infectious causes of death and emerging applications. *Diagnostics* . 2026 ;19(2):325. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/diagnostics16020325>
- 49.- Fernández-Rodríguez A, Cohen MC, Lucena J, Van de Voorde W, Angelini A, Ziyade N, et al. How to optimise the yield of forensic and clinical post-mortem microbiology with an adequate sampling: a proposal for standardisation. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*. 2015;34(5):1045-57.
- 50.- Oliveira M, Mason-Buck G, Ballard D, Branicki W, Amorim A. Biowarfare, bioterrorism and biocrime: A historical overview on microbial harmful applications. *Forensic Sci Int* . 2020 ;314:110366. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7305902/>
- 51.- Oficina de Asuntos de Desarme de las Naciones Unidas. *Armas biológicas* . New York: ONU; sf .

Disponible en: <https://disarmament.unoda.org/es/our-work/weapons-mass-destruction/biological-weapons>

52.- Marquina Díaz D, Sánchez JV, Santos de la Sen A. ¿Qué son las armas biológicas? un recorrido por su utilización a lo largo de la historia bélica . Madrid: Universidad Complutense de Madrid; sf. Disponible en: <https://www.ucm.es/otri/noticias-que-son-las-armas-biologicas-un-recorrido-por-su-utilizacion-a-lo-largo-de-la-historia-belica>

53.- López-Muñoz F. Shirō Ishii: el mayor criminal de guerra médico de la historia que nunca fue juzgado. BBC News Mundo . 21 marzo 2021 . Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-56410365>

54.- Mir TUG, Wani AK, Akhtar N, Sena S, Singh J. Microbial forensics: A potential tool for investigation and response to bioterrorism. Health Sci Rev . 2022 ;5:100068. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hsr.2022.100068>

55.- Murch RS. Bioattribution needs a coherent international approach to improve global biosecurity. Front Bioeng Biotechnol. 2015;3:80. doi: 10.3389/fbioe.2015.00080.

56.- Tackmann J, Arora N, Schmidt TSB, Rodrigues JFM, von Mering C. Ecologically informed microbial biomarkers and accurate classification of mixed and unmixed samples in an extensive cross-study of human body sites. Microbiome. 2018;6(1):192. doi: 10.1186/s40168-018-0565-6.

57.- Gouello A, Dunyach-Remy C, Siatka C, Lavigne JP. Analysis of microbial communities: an emerging tool in forensic sciences. Diagnostics (Basel) . 2021 ;12(1):1. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/diagnostics12010001>

58.- Sung J, Rajendraprasad SS, Philbrick KL, Bauer BA, Gajic O, Shah A. The human gut microbiome in critical illness: disruptions, consequences, and therapeutic frontiers. J Crit Care. 2024;79:154436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2023.154436>.

59.- Singh H, Clarke T, Brinkac L, Greco C, Nelson KE. Forensic microbiome database: a tool for forensic geolocation meta-analysis using publicly available 16S rRNA microbiome sequencing. Front Microbiol. 2021;12:644861. DOI:10.3389/fmicb.2021.644861

60.- Logan AC, Cordell B, Pillai SD, Robinson JM, Prescott SL. From Bacillus Criminalis to the Legalome: Will Neuromicrobiology Impact 21st Century Criminal Justice?. Brain Sci . 2025 ;15(9):984. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/brainsci15090984>

61.- Zhang J, Yu D, Zhang L, Wang T, Yan J. Environmental microbiota from substrate may interfere with microbiome-based identification of forensically relevant body fluids: a pilot study. Forensic Sci Int Genet . 2025 ;74:103170. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2024.103174>