

Microbiología forense

Mi microbioma no es como el de los demás, y hay pruebas que lo demuestran.



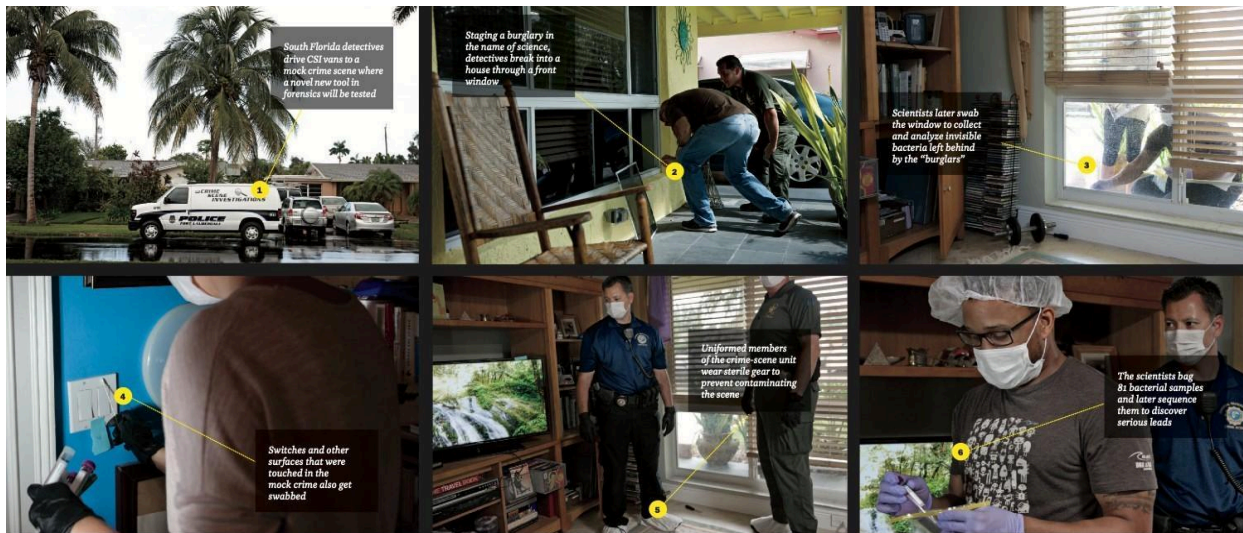
Tasia Bryson¹ y Jarrad Hampton-Marcell²

¹Dept. Counseling & School Psychology, University of Massachusetts-Boston, Boston, MA y² Dept. of Biological Sciences, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL, USA

Microbiología forense

Línea de tiempo

Un componente fundamental de cualquier investigación forense es la recuperación e identificación de pruebas en el lugar del delito, que ayudan a los investigadores a resolverlo. Estas pruebas pueden ir desde testigos en el lugar del delito hasta huellas dactilares y/o ADN recuperados de un objeto. Además de las anteriores, otro tipo común de pruebas son los rastros, que son objetos macroscópicos o microscópicos dejados por el contacto entre el sospechoso y el lugar del delito. Por ejemplo, la suciedad del zapato del sospechoso puede dar a los investigadores una pista sobre el lugar en el que suele residir o trabajar, y las fibras de la ropa del sospechoso pueden utilizarse para compararlas con las fibras encontradas en la víctima, lo que proporciona pruebas circunstanciales de que el sospechoso estuvo presente en el lugar del delito. Recientemente, los investigadores han empezado a explorar si nuestro microbioma puede utilizarse para identificar a las personas y los lugares en los que han estado. Los seres humanos contienen tantas células microbianas como humanas, y constantemente vertemos millones de microbios en nuestro entorno inmediato. Esto convierte a los microbios en una intrigante señal biológica que se puede rastrear y perfilar, de forma similar a como los investigadores utilizan las huellas dactilares y el ADN para identificar a las personas. Así pues, el estudio de los microbiomas humanos puede convertirse en la próxima herramienta forense, dado su potencial para identificar a cualquier persona de una población.

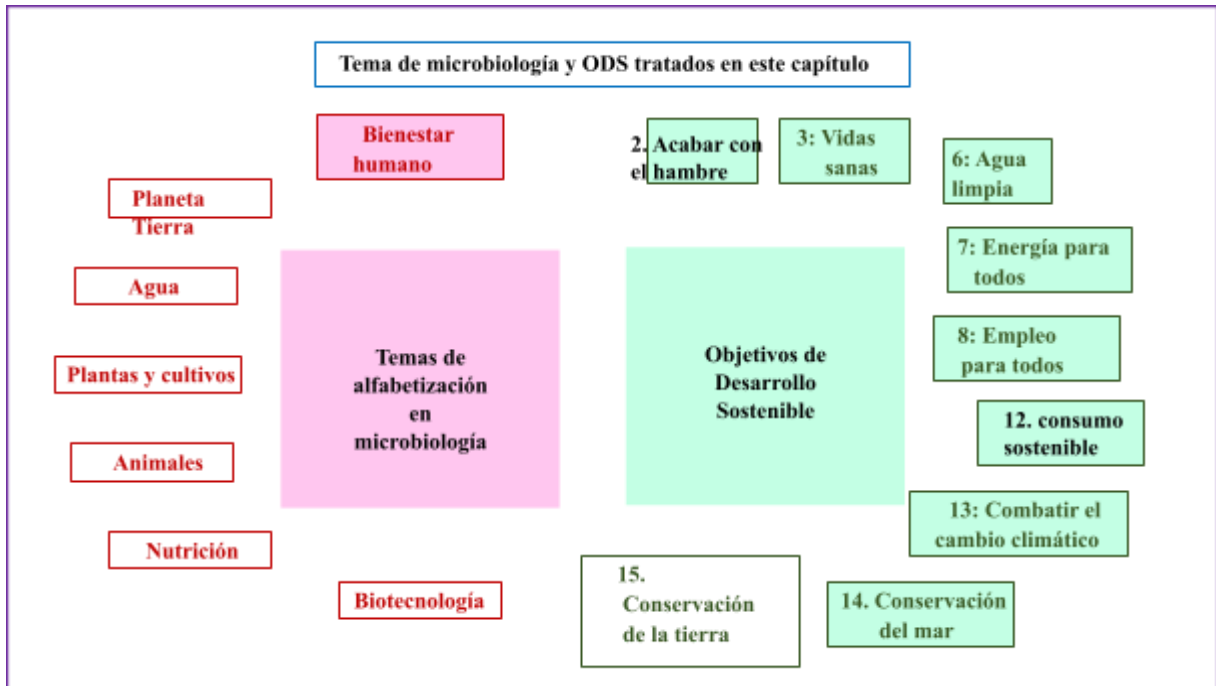


La imagen anterior muestra los pasos recomendados para recoger pruebas microbianas en la escena de un crimen, que reflejan los procedimientos ya establecidos por los investigadores de la escena del crimen. Dado que los microbiomas pueden encontrarse en cualquier lugar, las pruebas recogidas utilizadas para comprobar la presencia de ADN también podrían utilizarse para detectar los taxones microbianos presentes.

La microbiología y el contexto social

La microbiología: análisis del microbioma; cambios en función del tiempo en la microbiota de la escena del crimen. *Cuestiones de sostenibilidad:* ciudades y asentamientos humanos seguros; sociedades pacíficas e inclusivas, y justicia para todos.

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez



Microbiología forense: la microbiología

1. *¿Qué son los microbiomas?* Un microbioma es el conjunto de microorganismos (bacterias, arqueas, hongos, etc.) que se encuentran en un entorno. Los microbiomas se encuentran en todas partes, incluidos los seres humanos, los animales, las plantas, el suelo, los edificios e incluso el aire. Y lo que es más importante, el microbioma de cada entorno es único: el microbioma de una planta será totalmente distinto del microbioma de la casa de alguien. Los seres humanos, por ejemplo, contenemos más de 10 billones de microorganismos, que en conjunto pesan casi tanto como el cerebro humano. El microbioma humano desempeña un papel esencial en la digestión, influye en el comportamiento y protege de las bacterias patógenas, entre otras muchas funciones. En última instancia, nuestros microbiomas desempeñan un papel importante en la formación de nuestra salud y sirven como marcadores rastreables sobre el estilo de vida y los entornos en los que residimos.

2. *¿Qué es la medicina forense? La medicina forense* es el método científico para resolver delitos, que se inició a finales del siglo XIX. La criminalística se centra en objetos o sustancias relevantes para el delito que se analizan mediante metodologías de distintas disciplinas científicas, como la química, la biología y la física. Por ejemplo, el ADN puede recogerse en la escena de un crimen para identificar a posibles sospechosos. Por otra parte, la química puede aplicarse para etiquetar un material no identificado y/o un líquido descubierto. Los agentes del orden confían en los científicos para que les proporcionen pistas que ayuden a reconstruir los hechos del delito. Y lo que es más importante, los forenses también ayudan a **absolver a** individuos que son inocentes. Por ello, el proceso por el que los investigadores recogen las pruebas, la forma en que se manipulan y transportan al laboratorio y los métodos utilizados para llegar a una conclusión son aspectos importantes y requieren atención al detalle por parte de todos los implicados.

3. Detección de indicios en la escena de un crimen. Uno de los avances más significativos de la medicina forense ha sido la introducción y el desarrollo de las pruebas de *rastreo*. Las pruebas de rastreo se emplean habitualmente para reconstruir escenas del crimen, así como las personas y objetos implicados. Pueden ser desde pequeños fragmentos de pruebas físicas, como fibras capilares o trozos de cristal, hasta tejidos o restos humanos dejados en el lugar del delito. Aunque las pruebas de rastros a menudo pasan a un segundo plano con respecto a las pruebas de ADN, se han convertido en una herramienta fundamental para las investigaciones forenses y proporcionan pistas sobre los hechos que tuvieron lugar. Más recientemente, los investigadores forenses han empezado a explorar si pueden utilizar el microbioma de una persona como herramienta forense. Dado que los microbiomas humanos son relativamente exclusivos del individuo y se vierten en los espacios en los que éste reside, el microbioma humano es en cierto modo similar a los perfiles de ADN, que se utilizan desde hace décadas.



Los taxones microbianos podrían utilizarse para identificar a las personas. Dado que el microbioma de cada persona es único, se cree que cada persona es portadora de un conjunto de taxones microbianos que sólo se encuentran en ella. Los investigadores pueden aprovechar esta singularidad para relacionar a los sospechosos con los taxones microbianos recogidos en la escena de un crimen.

4. Los seres humanos albergan microbios que identifican a su huésped. Los seres humanos son portadores de una combinación microbiana altamente individual que es tan única como una huella dactilar humana. Y lo que es más importante, los seres humanos desprenden unos 36 millones de células microbianas cada hora en el entorno en el que residen, principalmente de la piel expuesta. Los científicos han demostrado que es posible identificar a las personas únicamente por sus microbios. Además, los objetos que tocamos reflejan sistemáticamente los microbiomas que se encuentran en nuestra piel y en nuestro tracto gastrointestinal. Se ha identificado de forma rutinaria a personas a través de sus cuartos de baño, teléfonos móviles, pomos de puertas, suelos y muchas otras superficies de nuestros hogares, lugares de trabajo y hospitales. La capacidad de relacionar a las personas con su entorno

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

únicamente en función de su microbioma resulta intrigante para los investigadores. Por ejemplo, esto permite relacionar a sospechosos de robos con pruebas físicas a través de su microbioma.

5. Los microbiomas son etiquetas de localización. Iniciativas como *el Proyecto Microbioma de la Tierra (EMP)* y *el Proyecto Tripa Americana (AGP)* han demostrado que las comunidades microbianas son claramente diferentes en función de la ubicación geográfica. El EMP y el AGP se encuentran entre los dos mayores proyectos científicos impulsados por ciudadanos hasta la fecha, con más de 100.000 muestras proporcionadas por personas interesadas en comprender su salud o el mundo que les rodea. Gracias a estos esfuerzos, los científicos han podido identificar microbios en todo el mundo, así como a las personas que habitan estos entornos. Ahora comprendemos mejor cómo nos afecta la dieta, cómo afectan los cambios de pH a la vida acuática y cómo se establecen los microbios en los entornos construidos, como casas y hospitales. El suelo, las plantas e incluso el aire de los distintos entornos sirven como firmas microbianas rastreables. Recientemente, esto se ha aplicado a entornos urbanos como las ciudades, donde las oficinas de Nueva York frente a las de Chicago son claramente diferentes en su composición microbiana. Esto permite situar a los sospechosos en la escena de un crimen si visitaron una ciudad.

6. El microbioma después de la muerte. Incluso después de la muerte, el microbioma puede seguir dando pistas a los investigadores. Los microbios suelen ser un indicador fiable del tiempo que lleva muerto un individuo. Esto se debe a que post-mortem la microbiota de una persona cambia siguiendo un patrón particular a lo largo del tiempo, cambios que tienen lugar más lenta o más rápidamente, dependiendo del frío o el calor que haga, lo que crea un "reloj microbiano de la muerte". Y lo que es más importante, el microbioma puede servir como indicador de la forma en que alguien ha muerto, lo que permite a los investigadores determinar potencialmente si la escena del crimen coincide con el lugar donde murió una persona y si fue por causas naturales o no.



Los investigadores trabajan actualmente en entornos inteligentes, en los que se incorporan sensores capaces de rastrear taxones microbianos a la arquitectura existente en las ciudades, como farolas, edificios y medios de transporte público, entre otros muchos. El objetivo es permitir una vigilancia activa de los entornos construidos y detectar al instante cambios desfavorables o amenazas. Esto ayudaría a acortar los tiempos de respuesta y posiblemente a prevenir brotes.

7. Desarrollo de rastreadores microbianos. Investigadores y empresas han empezado a desarrollar nuevas tecnologías para abordar los retos que plantea la incorporación del microbioma a la investigación forense, desde dispositivos de seguimiento hasta bases de datos que permiten recopilar información sobre las viviendas. Un avance reciente ha sido el uso de sensores microbianos del aire, que son dispositivos que analizan los microbios aerosolizados. Si

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

bien esto es importante para comprender cómo se propagan las enfermedades y los microorganismos, también podría identificar comunidades microbianas ajenas a su entorno, es decir, identificar a un intruso en una vivienda, basándose en los microbios que emite. Además, se han colocado sensores microbianos en inodoros para seguir el estado de salud de una persona, en sistemas de abastecimiento de agua para rastrear la propagación de patógenos y en ciudades para vigilar posibles brotes epidémicos. Sin embargo, llevará tiempo desarrollar estas herramientas para que sean fiables, precisas y eficaces tanto para las fuerzas del orden como para los investigadores.

8. *Objetivos para el futuro*

Objetivo 1: Identificar los taxones microbianos que difieren sistemáticamente entre las personas. Lo que hace único al microbioma es la multitud y diversidad de microbios que existen en los seres humanos. En teoría, no hay dos seres humanos que tengan las mismas combinaciones microbianas. Sin embargo, muchos de los microbios que albergan los seres humanos pueden cambiar su abundancia en respuesta a los cambios ambientales. Es pertinente identificar los taxones microbianos que se encuentran universalmente en todos los humanos pero que son únicos en estructura o genoma entre los individuos. Esto facilitaría la adopción del microbioma, ya que se asemejaría a la elaboración de perfiles de ADN mediante repeticiones cortas en tándem, que se considera la norma de oro en medicina forense.

Objetivo 2: Desarrollar una base de datos de microbiomas humanos. Los **microbiomas humanos** se han estudiado ampliamente, y los investigadores han realizado numerosos estudios que relacionan los microbios humanos con el estilo de vida de un individuo, así como con su lugar de residencia. A diferencia de los perfiles de ADN, alojados en una única base de datos unificada (CODIS), los datos sobre el microbioma humano están dispersos y son dispares. Con el fin de incorporar plenamente el microbioma como herramienta forense, están desarrollando una base de datos a la que los investigadores y las fuerzas del orden puedan acceder colectivamente para mejorar las normas y directrices que se aceptan y aprueban en las investigaciones forenses.

Objetivo 3: Mejorar la precisión y fiabilidad de la detección. En la actualidad, el microbioma humano carece de la precisión (inferior al 90%) que se considera aceptable en el ámbito forense en comparación con otras técnicas estándar, es decir, el análisis del ADN tiene una precisión aproximada del 99%. Además, esto está muy relacionado con la población de microbiomas que se analizan. A medida que aumenta el número de microbiomas recogidos y analizados, los investigadores y las fuerzas del orden deben sacar las mismas conclusiones una y otra vez.

Objetivo 4: Utilizar el microbioma para ayudar en las investigaciones forenses. Una de las mayores dificultades en cualquier crimen sin resolver es reconstruir los acontecimientos y la cronología de la escena del crimen. Los investigadores del lugar del crimen suelen utilizar una serie de herramientas a su disposición, todas ellas con algunos inconvenientes. La aplicación del microbioma como prueba de rastreo puede ayudar a los investigadores aportando pruebas circunstanciales, con lo que estas "pistas" podrían reducir el tiempo de investigación, conectar las herramientas forenses, aclarar la cronología de los acontecimientos pasados y eliminar a

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

posibles sospechosos. Para comprender mejor el potencial del microbioma en el ámbito forense, es preciso integrarlo regularmente en las investigaciones forenses.

Objetivo 5: Avanzar en la investigación del microbioma. La investigación sobre el microbioma aún está en pañales en comparación con otros campos de investigación, y todavía hay mucho que desconocemos. A medida que aumenten los conocimientos y mejore la tecnología, el microbioma humano y su influencia se harán más evidentes. Mientras tanto, es importante seguir ampliando los límites de la utilidad del microbioma.

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Grandes Retos

• **Objetivo 11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.** La resolución eficaz de los delitos es fundamental para desalentar la delincuencia y, por tanto, para crear y mantener asentamientos seguros e inclusivos. La ciencia forense basada en el microbioma tiene el potencial no sólo de rastrear a las personas a través de los espacios que ocupan, sino también aspectos relativos a sus hábitos y estilo de vida, que contribuyen indirectamente a la resolución y, por tanto, a la disuasión de la delincuencia.

• **Objetivo 16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.** La capacidad de los organismos encargados de la aplicación de la ley para obtener pruebas rigurosas que vinculen inequívocamente a los autores de los delitos constituye el núcleo de la aplicación de la ley y la justicia. La ciencia forense basada en el microbioma tiene un potencial excepcional para contribuir a la resolución de delitos y, por ende, al avance de sistemas de justicia justos y eficaces.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. *Individual*

- a. Participar en la investigación científica ciudadana
 - i. Conozca su propio microbioma
 - ii. Contribuir a crear conocimientos que sirvan de base a futuros experimentos y políticas.
- b. Asistencia a conferencias científicas
 - i. Ofrece la oportunidad de hablar directamente con los científicos
 - ii. Anima a los científicos a ser transparentes sobre sus hallazgos

2. *Políticas comunitarias*

- a. Abogar por políticas que incluyan el microbioma
 - i. Aumenta la transparencia entre los científicos y el público
 - ii. Informa a los funcionarios locales de las necesidades y deseos de los ciudadanos
- b. Adoptar antes las nuevas tecnologías
 - i. Sustituye tecnologías y prácticas obsoletas
 - ii. Ayuda a desarrollar sistemas informados

3. *Políticas nacionales*

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

- a. Creación de una base de datos sobre el microbioma
 - i. Crea un centro de datos al que todos pueden acceder
 - ii. Sirve de referencia para las herramientas y la tecnología que se utilizarán en los análisis forenses.
- b. Establecimiento de normas sobre el microbioma con fines forenses
 - i. Fomenta la reproducibilidad de las pruebas y reduce los sesgos
 - ii. Orienta a los trabajadores en la identificación de puntos fuertes y débiles, lo que permite introducir mejoras.

Participación de los alumnos

1. Debate en clase sobre medicina forense y delincuencia

- a. ¿Dónde pueden producirse delitos?
- b. ¿Qué herramientas pueden utilizar los investigadores para encontrar pistas en la escena de un crimen?
- c. ¿Cómo pueden ayudar los microbiomas a los investigadores?

2. Debate en clase sobre el microbioma humano

- a. ¿Qué sabe actualmente sobre el microbioma?
- b. ¿Cuál es su rutina habitual y cómo puede afectar a su microbioma?
- c. ¿Qué podría cambiar de repente tu microbioma?

3. Simulacro de robo

¡Vamos a divertirnos! En clase, pensad en un posible robo. Identifica a una persona de la clase para que actúe como sospechoso y el resto de compañeros serán detectives. Los detectives deben utilizar lo que saben sobre microbios para identificar todos los errores que cometió el sospechoso.

- a. ¿Qué pudieron averiguar los detectives sobre el robo?
- b. ¿Cómo pueden utilizarse los microbiomas para demostrar que el sospechoso cometió el delito?

4. Sensibilización de los alumnos

- a. Los microbios pueden ser beneficiosos para las fuerzas de seguridad a la hora de resolver delitos. Enumere tres formas en que pueden utilizarse los microbios para aportar pruebas.
- b. Los microbiomas desempeñan un papel importante en la conformación de nuestra salud y sirven como marcadores rastreables sobre nuestro estilo de vida. ¿Se te ocurren tres formas en las que los microbios podrían identificar el estilo de vida cotidiano de una persona?
- c. ¿Crear un escenario que requiera el uso de microbios para resolver un problema?

Base empírica, lecturas complementarias y material didáctico

Fierer, N., Lauber, C. L., Zhou, N., McDonald, D., Costello, E. K., & Knight, R. (2010). Identificación forense mediante comunidades bacterianas de la piel. *Actas de la Academia*

Un marco educativo en microbiología centrado en la niñez

Nacional de Ciencias, 107(14), 6477-6481.

Hampton-Marcell, J. T., Lopez, J. V., & Gilbert, J. A. (2017). El microbioma humano: una herramienta emergente en medicina forense.

Hampton-Marcell, J. T., Larsen, P., Anton, T., Cralle, L., Sangwan, N., Lax, S., ... & Gilbert, J. A. (2020). Detecting personal microbiota signatures at artificial crime scenes. *Forensic science international*, 313, 110351.

Hewitt, K. M., Gerba, C. P., Maxwell, S. L., & Kelley, S. T. (2012). Abundancia y diversidad de bacterias en espacios de oficinas en tres áreas metropolitanas. *PloS one*, 7(5), e37849.

Lax, S., Smith, D. P., Hampton-Marcell, J., Owens, S. M., Handley, K. M., Scott, N. M., ... & Gilbert, J. A. (2014). Análisis longitudinal de la interacción microbiana entre los seres humanos y el ambiente interior. *Science*, 345(6200), 1048-1052.

Lax, S., Hampton-Marcell, J. T., Gibbons, S. M., Colares, G. B., Smith, D., Eisen, J. A., & Gilbert,

J. A. Análisis forense del microbioma de teléfonos y zapatos. *Microbiome*. 2015; 3: 21.

Meadow, J. F., Altrichter, A. E., & Green, J. L. (2014). Los teléfonos móviles transportan el microbioma personal de sus propietarios. *PeerJ*, 2, e447.

Metcalf, J. L., Parfrey, L. W., Gonzalez, A., Lauber, C. L., Knights, D., Ackermann, G., ... & Knight, R. (2013). A microbial clock provides an accurate estimate of the post-mortem interval in a mouse model system. *elife*, 2, e01104.

Glosario

Pruebas de rastreo: materiales y objetos físicos que se transfieren de una fuente a otra y son recogidos por los funcionarios encargados de hacer cumplir la ley -normalmente en el lugar del delito- durante una investigación.

Macroscópico: visible a simple vista y que no requiere microscopio

Microscópico: tan pequeño que se necesita un microscopio para verlo

Circunstancial: que apunta indirectamente a algo pero no es un vínculo directo

Comensal: Establecimiento de una relación estrecha con un huésped generalmente sin consecuencias negativas
Microbioma: conjunto de microorganismos en un entorno determinado, incluido el cuerpo de una persona o parte de su cuerpo

Absolver: Estar libre de culpa o culpabilidad

Entorno urbano: lugar o zona con una población densa, a menudo referido al número de personas en la zona.

Post-mortem: examen de un cadáver para determinar la causa de la muerte
Plantilla: personas dedicadas a una actividad que generalmente trabajan para la misma empresa o área.