

## Visualizando lo invisible: excursiones escolares para encender el entusiasmo de los niños por los microbios<sup>#</sup>

Terry J. McGenity<sup>1</sup>, Amare Gessesse<sup>2</sup>, John E. Hallsworth<sup>3</sup>, Esther Garcia Cela<sup>4</sup>, Carol Verheecke-Vaessen<sup>5</sup>, Fengping Wang<sup>6</sup>, Max Chavarria<sup>7</sup>, Max M. Haggblom<sup>8</sup>, Søren Molin<sup>9</sup>, Antoine Danchin<sup>10</sup>, Eddy J. Smid<sup>11</sup>, Cédric Lood<sup>12</sup>, Charles S. Cockell<sup>13</sup>, Corinne Whitby<sup>1</sup>, Shuang-Jiang Liu<sup>14</sup>, Nancy P. Keller<sup>15</sup>, Lisa Y. Stein<sup>16</sup>, Seth R. Bordenstein<sup>17</sup>, Rup Lal<sup>18</sup>, Olga C. Nunes<sup>19</sup>, Lone Gram<sup>20</sup>, Brajesh K. Singh<sup>21</sup>, Nicole S. Webster<sup>22</sup>, Cindy Morris<sup>23</sup>, Sharon Sivinski<sup>24</sup>, Saskia Bindschedler<sup>25</sup>, Pilar Junier<sup>25</sup>, André Antunes<sup>26</sup>, Bonnie K. Baxter<sup>27</sup>, Paola Scavone<sup>28</sup>, Kenneth Timmis<sup>29</sup>

<sup>1</sup> School of Life Sciences, University of Essex, Colchester, UK; [tjmcgen@essex.ac.uk](mailto:tjmcgen@essex.ac.uk).

<sup>2</sup> Department of Biological Sciences and Biotechnology, Botswana International University of Science and Technology, Palapye, Botswana.

<sup>3</sup> Institute for Global Food Security, School of Biological Sciences, Queen's University Belfast, Belfast, Northern Ireland.

<sup>4</sup> School of Life and Medical Science, University of Hertfordshire, Hatfield, UK.

<sup>5</sup> Cranfield Soil and Agrifood Institute, Cranfield University, Cranfield, UK.

<sup>6</sup> School of Life Sciences and Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China.

<sup>7</sup> Escuela de Química, Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica & Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot), CeNAT-CONARE, San José, Costa Rica.

<sup>8</sup> Department of Biochemistry and Microbiology, Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA.

<sup>9</sup> Novo Nordisk Foundation Center for Biosustainability, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

<sup>10</sup> Institut Cochin, 24 rue du Faubourg Saint-Jacques, 75014 Paris, France.

<sup>11</sup> Food Microbiology, Wageningen University and Research, Wageningen, The Netherlands.

<sup>12</sup> Department of Microbial and Molecular Systems, Centre of Microbial and Plant Genetics, Laboratory of Computational Systems Biology, KU Leuven, 3001 Leuven, Belgium; Department of Biosystems, Laboratory of Gene Technology, KU Leuven, 3001 Leuven, Belgium.

<sup>13</sup> School of Physics and Astronomy, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland, UK.

<sup>14</sup> Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China.

<sup>15</sup> Department of Medical Microbiology and Immunology, University of Wisconsin - Madison, USA.

<sup>16</sup> Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada.

<sup>17</sup> Department of Biological Sciences, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, USA.

<sup>18</sup> The Energy and Resources Institute, Lodhi Road, New Delhi-110003, India.

<sup>19</sup> Department of Chemical Engineering, University of Porto, 4200-465 Porto, Portugal.

<sup>20</sup> Department of Biotechnology and Biomedicine, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.

<sup>21</sup> Hawkesbury Institute for the Environment, University of Western Sydney, Penrith, Australia.

<sup>22</sup> Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia; Australian Centre for Ecogenomics, University of Queensland, Brisbane, Australia

<sup>23</sup> INRAE, Pathologie Végétale, 84140, Montfavet, France.

<sup>24</sup> Albuquerque, New Mexico, USA.

<sup>25</sup> Institut de Biologie, Universite de Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland.

<sup>26</sup> State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology (MUST), Taipa, Macau SAR, China.

<sup>27</sup> Great Salt Lake Institute, Westminster College, Salt Lake City, Utah, USA.

<sup>28</sup> Department of Microbiology, Instituto de Investigaciones Biologicas Clemente Estable, Montevideo, Uruguay.

<sup>29</sup> Institute of Microbiology, Technical University Braunschweig, Germany; [kntimmis@gmail.com](mailto:kntimmis@gmail.com)

**\*Corresponding author:**

[tjmcgen@essex.ac.uk](mailto:tjmcgen@essex.ac.uk), Tel: +44 1206 872535, Fax +44 1206 872592

#Versión española de McGenity, Terry J., et al. "Visualizing the invisible: class excursions to ignite children's enthusiasm for microbes." *Microbial Biotechnology* (2020), traducido por Dr Esther Garcia-Cela, Dr Max Chavarria y Dr Paola Scavone

**Declaraciones de interés:** ninguna.

**Palabras clave :** educación en microbiología; alfabetización en microbiología; ciencia ciudadana; microbiología de alimentos; biotecnología agrícola; biotecnología industrial y ambiental; microbiología de salud pública; microbios y arte

## Resumen

Recientemente hemos argumentado que debido a que los microbios tienen una generalizada —a menudo vital— influencia en nuestras vidas, y que, por tanto, sus funciones deben tomarse en cuenta en muchas de las decisiones a las que nos enfrentamos, la sociedad debe alfabetizarse en microbiología, a través de la introducción de temas relevantes de microbiología en el currículo escolar (Timmis *et al.* 2019. *Environ Microbiol* **21**: 1513-1528). La actual pandemia de Coronavirus es un claro ejemplo de por qué la alfabetización en microbiología es un facilitador crucial de decisiones políticas informadas, particularmente aquellas que involucran la preparación de sistemas de salud pública para brotes de enfermedades y pandemias. Sin embargo, una barrera importante para lograr una apreciación generalizada de las contribuciones microbianas para nuestro bienestar y el del planeta, es el hecho de que los microbios rara vez son visibles: la mayoría de las personas solo son periféricamente conscientes de ellos, excepto cuando enferman con una infección. Y es la enfermedad, más que todas las actividades positivas mediadas por microbios, lo que da color a la percepción pública de los "gérmenes" y les otorga su mala imagen. Es imperativo hacer visibles los microbios, darles vida y forma a los niños (y adultos) y contrarrestar los conceptos erróneos prevalentes mediante la exposición a imágenes de microbios que capturan la imaginación y ejemplos de sus efectos beneficiosos, acompañados de una narración equilibrada. Esto generará asociaciones mentales automáticas entre las entradas de información cotidianas, así como las experiencias visuales, olfativas y táctiles, por un lado, y los microbios/comunidades microbianas responsables, por el otro. A su vez, dichas asociaciones promoverán la conciencia de los microbios y de las muchas consecuencias positivas y vitales de

sus acciones, y facilitarán y alentarán la incorporación de tales consecuencias en los procesos de toma de decisiones relevantes. Si bien la enseñanza de temas de microbiología en la escuela primaria y secundaria es clave para este objetivo, un programa estratégico para exponer a los niños directa y personalmente a procesos microbianos tanto naturales como manipulados por el hombre, y los resultados de sus acciones, a través de excursiones de clase cuidadosamente planificadas, pueden ser instrumentos para dar vida a los microbios para los niños y, colateralmente, sus familias. Con el fin de alentar la inclusión de excursiones de clase centradas en la microbiología en los planes de estudios actuales, sugerimos e ilustramos aquí algunas posibilidades relacionadas con los temas de: alimentos (una de las preocupaciones favoritas de la mayoría de los niños), agricultura (junto con la horticultura y la acuicultura), salud y medicina, medio ambiente y biotecnología. Y, aunque no toda la infraestructura microbiológicamente relevante estará al alcance de las escuelas, generalmente hay acceso a un mercado, una tienda local de alimentos, una planta de tratamiento de aguas residuales, una granja, un cuerpo de agua superficial, etc., las cuales puede brindar oportunidades para visualizar los microorganismos en acción. Si los niños a veces consideran que el presente es mundano, incluso aburrido, generalmente están entusiasmados con el pasado y el futuro, por lo que, cuando sea posible, las visitas a los museos locales (el pasado) y las instituciones de investigación que promueven las fronteras del conocimiento (el futuro), son altamente recomendables, así como aprovechar el entusiasmo natural de los investigadores locales para usar el valor educativo de las excursiones presenciales y virtuales. Los niños también están fascinados por lo desconocido, por lo que, paradójicamente, la invisibilidad de los microbios los convierte en objetos especialmente fascinantes para la visualización y exploración. Al describir algunas de las opciones para excursiones de microbiología, y proporcionar sugerencias para temas de discusión y considerar su valor educativo, nos esforzamos en ampliar las perspectivas de las excursiones de clase actuales con el fin de: 1) inspirar a los maestros y administradores escolares a incorporar más excursiones de microbiología en los planes de estudio; 2) alentar a los microbiólogos a apoyar las excursiones escolares y, en general, involucrarse en dar vida a los microbios para los niños; 3) instar a los líderes de las organizaciones (biofarmacia, industrias alimentarias, universidades, etc.) a dar a las actividades de divulgación escolar un lugar más destacado en su cartera de misiones, y 4) transmitir a los responsables políticos los beneficios de proporcionar a las escuelas fondos, materiales y flexibilidad para esfuerzos educativos más allá del aula.

## Introducción

La ubicuidad de los microbios, sus múltiples actividades y su influencia dominante en la salud de toda la vida, los entornos locales y el planeta, requieren una comprensión de los procesos microbianos relevantes para la toma de decisiones de forma informada y basada en la evidencia en todos los niveles de la sociedad. Estos van desde el individuo (por ejemplo, en relación con la dieta, higiene, vacunación, propiedad de mascotas, elección de productos de limpieza domésticos) hasta gobiernos y organizaciones internacionales (por ejemplo, suministro de agua limpia, gestión del cambio climático, seguridad alimentaria, monitoreo y control de la propagación de patógenos y resistencia a los antibióticos) (Timmis *et al.*, 2019). Los productos y actividades microbianas son fundamentales para remediar los principales problemas sociales (por ejemplo, degradando los contaminantes tóxicos y los desechos, logrando un mayor rendimiento de los cultivos, produciendo plásticos biodegradables, asegurando el suministro de nuevos medicamentos, incluidos antibióticos y proporcionando combustibles sostenibles), y por lo tanto son clave para decisiones políticas dirigidas a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ver editorial de Timmis *et al.*, 2017a, y artículos asociados en el número especial de *Microbial Biotechnology*), incluida la provisión de oportunidades para el espíritu empresarial, el crecimiento económico y

la generación de empleo (Timmis *et al.*, 2017b). Los microbios brindan servicios de soporte vital a los humanos, otros animales y las plantas que ellos habitan, y constituyen el sistema de soporte vital de la Tierra al conducir ciclos biogeoquímicos. En consecuencia, la microbiología es un campo de investigación excepcionalmente dinámico, con importantes descubrimientos realizados a una velocidad frenética. La nueva comprensión así adquirida constituye una base cada vez más confiable que puede ayudar a la toma de decisiones en todos los niveles, pero, para conectar la comprensión y la toma de decisiones, es necesario alcanzar la alfabetización de la sociedad en microbiología.

En el corazón del avance de la alfabetización en microbiología se encuentra la educación y la inspiración de los niños, quienes típicamente tienen un apetito voraz por el conocimiento, y son fácilmente estimulados por el dinamismo y la emoción del tema. La comprensión de la existencia de sus propios microbiomas, y la intimidad de las relaciones que los niños tienen con sus amigos microbianos, los cautivará, estimulará su curiosidad natural y disparará su imaginación y pasión.

**Sin embargo, existe un impedimento importante para enseñar a los niños acerca de los microbios, este es su tamaño microscópico, que les impide ser retratados por el profesor y notados en el ambiente cuando los niños están fuera de casa (las excepciones incluyen organismos fúngicos fructíferos, líquenes, aguas eutróficas y biopelículas). Por lo tanto, los microbios son entidades esencialmente abstractas que no son aparentes como socios mayoritarios de las comunidades en las que vivimos, y responsables de los muchos procesos que ocurren dentro y alrededor de nosotros. Es primordial que permitamos que los niños evocuen imágenes mentales de microbios, para establecer y apreciar los vínculos entre los procesos microbianos naturales y los controlados por el ser humano, por un lado, y los microbios subyacentes y sus actividades, por el otro.**

El apego emocional de los niños pequeños a los animales "lindos" y los osos de peluche se basa en que son visibles y, en la mayoría de los casos, tocables/acurrucables. Por supuesto, los hongos, como manifestaciones macroscópicas de subunidades microbianas, son generalmente más reconocibles, como objetos decorativos que imitan hongos y muebles ubicuos en las áreas de juego de los niños (Fig. 1), pero esta es la excepción.



**Fig. 1. Los hongos van de la mano con las criaturas del folclore en el patio de recreo del Jardín Botánico de Ginebra. Foto de Kenneth Timmis.**

Y, como hemos dicho (Timmis *et al.*, 2019), es esencial que los microbios "transiten de la abstracción a la percepción pictórica, y tomen su posición legítima en la psique humana. Las ayudas visuales ocuparán así el centro del escenario... y la arena explosiva del arte microbiano estimulará la imaginación... A medida que los microbios pasen de lo abstracto y

tomen forma, se volverán reales; ¡Los niños tendrán sus favoritos! A los ositos de peluche y las ovejas lanudas se les unirán Methano, el astuto Wolbo y la espinosa Diatomata, todos ellos con sus personajes individuales (antropocéntricos) asignados por los ágiles fabricantes de juguetes". Los microbios reales pero invisibles se convierten en juguetes visibles, acurrucables y con nombres. Incluso pueden convertirse en personajes de libros de cuentos y dibujos animados de televisión, con cosas buenas y malas extraídas del mundo microbiano real.

**Si bien los juguetes y las obras de arte darán vida a los microbios y les darán forma a los niños más pequeños, y en algunos casos informarán sobre las funciones microbianas individuales, las actividades microbianas naturales y controladas por el hombre seguirán siendo esencialmente abstractas. Para remediar este déficit, es crucial exponer a los niños a ejemplos tangibles y fácilmente comprendidos de actividades microbianas importantes. Los mecanismos tradicionales para esto son los experimentos en clase y las salidas/excursiones organizadas en clase, que permiten a los niños experimentar e investigar personalmente objetos y procesos en sus entornos naturales. Las excursiones en clase son un medio particularmente agradable para crear vínculos entre los microbios y sus actividades, para hacer tangibles las actividades microbianas y para sumergir a los niños en la microbiología.**

Al introducir a los niños a lugares de trabajo, plantas operativas o sitios de campo, las excursiones pueden demostrar la naturaleza integrada de los temas y llevar la realidad al aprendizaje, estimulando así la curiosidad natural (ver Knapp, 1996; Behrendt y Franklin, 2014), que puede ser especialmente pronunciada en aquellos que no prosperan en el aula tradicional (Ofsted, 2008). Las excursiones de microbiología pueden cosechar beneficios adicionales cuando se realizan en entornos naturales, para lo cual existe una creciente evidencia de un mejor aprendizaje, así como un estímulo para desarrollar un sentido de responsabilidad por la gestión ambiental (Ballantyne y Packer, 2002; Kuo *et al.*, 2019). Introducir a los niños a la microbiología más allá del aula a través de eventos organizados también proporciona un puente y enriquece su aprendizaje informal de los entornos cotidianos y sus actividades (Bell *et al.*, 2009), como mirar televisión (por ejemplo, imágenes del mar: recordar microbios constituyen el 65% de la biomasa marina; Bar-On *et al.*, 2018), salir a caminar (por ejemplo, notar la diversidad de los líquenes en las paredes y los techos), visitar las tiendas (por ejemplo, ¡la levadura hizo esa baguette!) o un museo (p. ej., las manchas oscuras en ese documento antiguo podrían ser hongos).

**Las excursiones en clase no son solo eventos educativos y divertidos para niños y maestros por igual, sino también introducciones invaluable a futuras opciones profesionales, que pueden conducir a la orientación profesional, trabajos de verano, pasantías y contactos. También proporcionan un ambiente educativo diferente y exponen a los alumnos a los nuevos "maestros" con una diversidad de personalidades y estilos de enseñanza, lo que puede ser enriquecedor.**

Hacer que los microbios cobren vida a través de las excursiones escolares puede estimular mucho la imaginación y las emociones de los niños al exponer algunas de las características más excepcionales o extraordinarias de los microbios y sus manifestaciones, tales como: ser las primeras formas de vida en evolucionar, habitar y poblar la Tierra (y probablemente la última); su capacidad de crecer en ambientes extremos (aguas termales, hielo, subsuelo profundo, en el interior de cristales de sal; Fig. 2), y la cuestión de si pueden existir en otros planetas (y, de hecho, si la vida en la Tierra podría haber sido "sembrada" de microbios de otros planetas -

panspermia?); la ubicuidad y la tenacidad de los microbios y el hecho de que nos siguen al espacio en nuestros cuerpos y naves espaciales; microbios que contribuyen a aproximadamente la mitad del oxígeno que respiramos, impulsando la evolución de los "organismos superiores", los eucariotas, y por lo tanto los humanos (por ejemplo, a través de las mitocondrias y los cloroplastos); su presencia en y sobre humanos en grandes cantidades, aproximadamente igual al número de células humanas (e influyendo en nuestro bienestar); belleza inherente (por ejemplo, *Thiomargarita namibiensis*, una de las bacterias más grandes conocidas; Schulz, 2012), adaptaciones inusuales (por ejemplo, *Magnetospirillum magneticum* que contiene nano-ímanes para navegar utilizando el campo geomagnético de la Tierra; Chen *et al.*, 2010), y otras formas enigmáticas (p. ej. *Haloquadratum walsbyi* plana y cuadrada; Fig. 2).

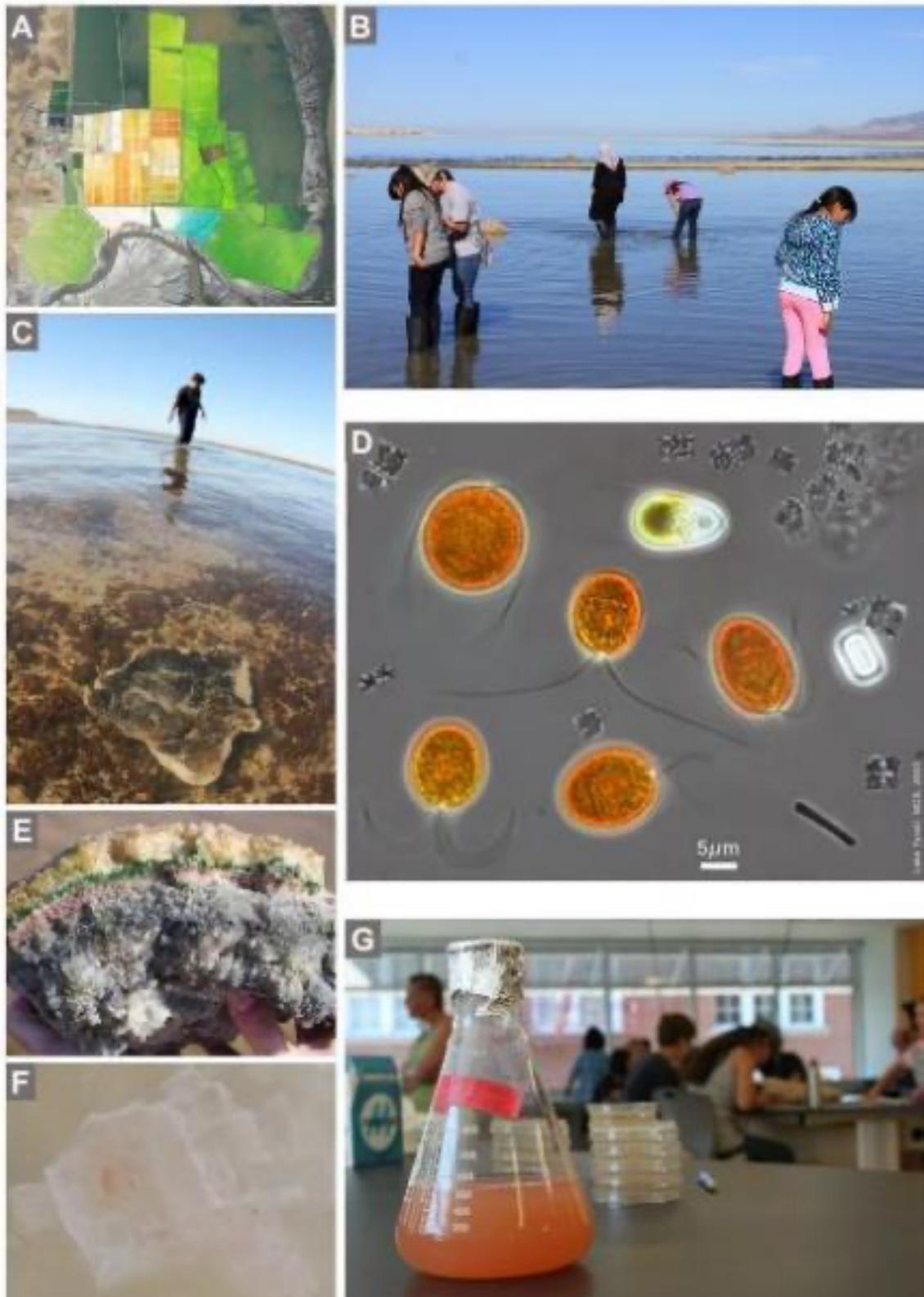


Fig. 2. Explorando ambientes hipersalinos y microbios extremadamente halófilos. Sus colores vivos, adaptaciones extremas, aplicaciones biotecnológicas y facilidad de crecimiento hacen que los halófilos sean muy atractivos para los niños. La fabricación de sal marina, con su papel fundamental en la conservación de alimentos, ayudó a las regiones y civilizaciones a prosperar. Por lo tanto, la interconexión de microbios, alimentos e historia se puede explorar visitando entornos hipersalinos o comprando sal marina y alimentos salados en tiendas locales. A) Vista satelital de las salinas de Bhavnagar, India, que muestra vívidos estanques rojos, naranjas y verdes en los que el agua de mar se evapora dejando sal (el campo de visión es de  $\sim 10 \text{ km}^2$ ). Los colores se deben a los pigmentos de los microbios halófilos en las salmueras de diferente salinidad. Los pigmentos rojo/naranja de haloarchaea

y *Dunaliella salina* (ver D), estimulan la absorción de la radiación solar, lo que aumenta las tasas de evaporación, lo que resulta en una producción de sal más rápida. B) Una maestra y su clase se dirigen a Great Salt Lake (Utah, EE. UU.) para recolectar muestras para estudiar bajo microscopios de campo. C) Un estudiante investiga las biopelículas que forman estructuras similares a la estromatolita en Great Salt Lake, impresionantes depósitos de carbonato de calcio precipitados por la acción de cianobacterias. D) Imagen microscópica del hipersalino Lake Tyrell, Australia (salinidad > 20% p/v), en el que podemos identificar tentativamente el clorófito eucariota, *Dunaliella salina* (cultivada comercialmente para la producción del carotenoide  $\beta$ - caroteno, que se usa ampliamente como un colorante alimentario natural, así como un precursor de la vitamina A), que vive junto al haloarqueón, *Haloquadratum walsbyi*, que tiene células planas de forma cuadrada con vesículas de gas que permiten su flotación a la superficie, adquiriendo mayor probabilidad de adquirir oxígeno (la barra de escala es 5  $\mu$  m). E) Corteza de yeso del fondo de un estanque de salina poco profunda (~20% p/v de salinidad) en Eilat, Israel, que muestra comunidades microbianas en capas de microbios fototróficos. La capa superior naranja-marrón está probablemente dominada por cianobacterias unicelulares; la capa verde por cianobacterias filamentosas; y la capa púrpura por bacterias anóxicas de azufre púrpuras. Estos microbios usan la luz como fuente de energía, y su estratificación se explica por la tolerancia diferencial a la luz ultravioleta y al oxígeno, y su capacidad para usar luz de diferentes longitudes de onda en la fotosíntesis. Las bacterias anóxicas de azufre púrpuras están adaptadas para usar la luz en el extremo rojo del espectro, que está menos atenuada por la profundidad que la luz en el extremo azul, y se benefician al vivir cerca de las bacterias anaerobias reductoras de sulfato (capa gris directamente debajo de la capa púrpura), que producen sulfuro de hidrógeno. Este compuesto se divide para formar azufre oxidado de una manera similar a los fotótrofos oxigenados, como las cianobacterias, que producen oxígeno a partir del agua. Dichas capas de comunidades microbianas pueden desencadenar debates sobre química (los donantes y productos de electrones), física (difusión de oxígeno y sulfuro de hidrógeno, espectro electromagnético), geología (fósiles microbianos en yeso) y conceptos ecológicos (interacciones entre especies y partición de nicho). F) Un cristal de sal (halita) de color rojo hecho en laboratorio debido a la presencia de haloarchaea atrapada dentro de pequeñas bolsas de salmuera dentro del cristal (el cristal central mide aproximadamente 0.5 x 0.5 cm). Esta es una estrategia de supervivencia utilizada por haloarchaea para evitar la desecación. Siguen siendo viables dentro de la halita, y la evidencia sugiere que algunas haloarchaea pudieron sobrevivir durante el tiempo geológico dentro de la halita enterrada. Algunas haloarchaea desempeñan un papel importante en la hidrólisis de biopolímeros en ambientes salados, como los utilizados en la producción de salsas de pescado. Cuando consumimos las salsas, o sal marina, ¡consumimos haloarchaea! G) Durante una excursión, los estudiantes pueden recolectar muestras de las cuales pueden inocular los medios (en este caso para desarrollar halófilos extremos) después de regresar al aula, llevar los microorganismos recolectados en el campo al laboratorio y conectar aún más a los estudiantes con su entorno. Foto A de la NASA <https://earthobservatory.nasa.gov/>. Fotos B, C, G por el Instituto Great Salt Lake. Foto D por Mike Dyall-Smith. Foto E por Andreas Thywißen.

Con este editorial, nos esforzamos por promover excursiones en clase en microbiología práctica y, para facilitar este fin y alentar a los maestros a considerar las opciones disponibles, proporcionamos una lista no exhaustiva de posibles excursiones y procesos o productos microbianos para explorar. El conocimiento local, junto con la comprensión del papel de la microbiología en los procesos que se enumeran a continuación, son evidentemente clave para identificar los viajes y actividades escolares más estimulantes. También proporcionamos algunas sugerencias sobre la preparación de excursiones, para maximizar el disfrute y la adquisición de información por parte de la clase, y optimizar las interacciones entre clase y lugar.

Durante la preparación de esta Editorial, el SARS-CoV-2 comenzó a hacer su propia excursión global a la población humana con consecuencias devastadoras, causando miles de muertes en el proceso. Obviamente, las medidas de distanciamiento social implementadas para desacelerar la propagación del virus hacen que las excursiones escolares al momento de escribir este editorial no sean deseables y, en la mayoría de los países, imposibles (¡tal vez esto sea el editorial más inoportuno!). Sin embargo, la pandemia pasará, dejando a los niños con muchas preguntas sobre cómo se transmiten los patógenos a través de especies y de persona a persona, cómo se puede reducir o interrumpir la transmisión, por qué las personas infectadas se ven afectadas en diferentes grados y cómo se puede prevenir o tratar la enfermedad. Lo cierto es que la pandemia

COVID-19 tendrá un gran impacto en los niños, desde muchos ángulos diferentes, y crear una generación de jóvenes que son mucho más conscientes de, y curiosos por la microbiología. Por lo tanto, es más importante que nunca, aprovechar esta curiosidad proporcionando oportunidades para obtener una visión equilibrada del mundo microbiano.

### Sugerencias para excursiones en clase

Las sugerencias dadas a continuación para las excursiones en clase se clasifican por conveniencia en siete categorías (Fig. 3), pero muchas actividades y temas de discusión asociados se discutirán en varios encabezados. Además, se debe alentar la identificación de asociaciones entre categorías.



Fig. 3. Categorías de excursiones discutidas en el texto.

#### 1. *Fabricación y suministro de alimentos, incluidos mercados locales y tiendas de alimentos.*

##### Contexto

Un suministro adecuado de alimentos de buena calidad es esencial para la salud humana, y "Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria" es un objetivo clave de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas (Willett *et al.*, 2019). Además, la comida y la bebida contribuyen a la cultura humana, la civilización y la *alegría de vivir*. Y, no del todo irrelevante para este discurso, la comida es un tema de gran interés para la mayoría de los niños. Para muchos alimentos, los microbios desempeñan un papel fundamental en su fabricación, la mejora del valor nutricional, la conservación y la posible descomposición o transmisión de enfermedades transmitidas por los alimentos. Y, a su vez, nuestra dieta influye mucho en nuestro microbioma, con consecuencias para nuestra salud (Kolodziejczyk, 2019). Por lo tanto, existe el nexo crítico entre *alimentos, microbios y salud* para explorar, y las decisiones personales que resultan de él. Luego hay una creciente conciencia del vínculo entre la elección de alimentos y las crisis mundiales como el cambio climático, el *ganado - producción de gases de efecto invernadero - nexo del calentamiento global*, lo que lleva a decisiones sobre cambios en el comportamiento, como la reducción del consumo de carne. Por supuesto, los niños participan, a veces apasionadamente, en el debate sobre el calentamiento global y algunos están liderando esfuerzos para cambios en las políticas. Muchos de ellos son conscientes de la conexión *comida - clima*, y por lo tanto están motivados para aprender acerca de los alimentos, las contribuciones de los microbios en la industria alimentaria, las interacciones entre los alimentos y el microbioma intestinal y sus consecuencias para la salud ecofisiológica.

Los alimentos fermentados fueron probablemente los primeros alimentos procesados. Ellos probaron ser un elemento clave del desarrollo humano y la expansión, debido a su capacidad para preservar granos de cereales, legumbres, verduras, leche y carne, a menudo mejorando el valor nutricional y proporcionando alimentos durante todo el año. Por necesidad, y sin duda

un elemento de azar, creció una gran cantidad de alimentos y bebidas fermentados, con una diversidad de sabores, texturas, colores y olores fascinantes que se convirtieron en parte del patrimonio cultural de una sociedad o región. El queso es un ejemplo particularmente instructivo, con su enorme gama de variaciones, y combina aspectos históricos (se cree que la fabricación del queso se originó al menos hace 7500 años), culturales, culinarios (hay muchas formas de usar el queso en la preparación de alimentos) y aspectos olfativos. Los alimentos fermentados se pueden usar fácilmente en la enseñanza escolar, no solo para comprender la microbiología subyacente, sino también su importancia en la dieta y la cultura humana, y los temas clave de la conservación y seguridad de los alimentos.

#### Sugerencias

Las visitas a los mercados locales, las tiendas de alimentos y las compañías de alimentos permitirán a los niños explorar una amplia gama de productos (además de los alimentos fermentados) e ingredientes que se derivan de los microbios o sus procesos, que incluyen: microbios como alimento (hongos *Quorn*, *espirulina* cianobacteriana), diversos metabolitos microbianos (Kallscheuer, 2018) que se agregan a los alimentos (aminoácidos, vitaminas, polisacáridos extracelulares, ácido acético y ácido cítrico) y enzimas (Raveendran *et al.*, 2018) (Fig. 4). Además de las organizaciones enumeradas a continuación, se pueden visitar o contactar universidades y centros de investigación con especialistas en microbiología de alimentos (ver Sección 5) para solicitar asesoramiento sobre fabricantes de alimentos en el área local.

- Fabricantes de alimentos fermentados:
  - Productos lácteos, tales como: yogur, queso, kumis, kéfir
  - Productos cárnicos, tales como: salami, nem chua, kargyong
  - Productos de pescado y mariscos tales como: salsas de pescado (nam pla, jeotgal, nuoc cham, ngari, salsa Worcestershire) y pescado (surströmming, hongeo-hoe)
  - Verduras, tales como: kimchi, chucrut, aceitunas
  - Raíces, tales como: productos de yuca (mocaf, fufu)
  - Legumbres, tales como: pastas/salsas de soja (tempeh, miso, doenjang, natto, kinema, salsa de soja), pastas del algarrobo africano (soubbala, iru), otras (tempeh de lupino)
  - Cereales, tales como: dosa, tape, ang-kak, ogi
  - Alimentos y bebidas especiales, tales como: chocolate, café, kombucha
  - Bebidas alcohólicas, como: cerveza (desde cervezas a base de cebada a gran escala hasta cervezas locales a base de mijo o agave), sake, vino y bebidas destiladas
- Fabricantes de pan
- Fabricantes de vinagre
- Fabricantes vegetarianos y de alimentos saludables, tales como: cultivos iniciadores para alimentos y bebidas fermentadas, probióticos y prebióticos, algas, cianobacterias, *Quorn*, derivados de levadura (por ejemplo, *marmita*, *vegemita*, *cenovis*)
- Fabricantes de suplementos alimenticios tales como: vitaminas, aminoácidos (y edulcorantes artificiales derivados de aminoácidos)
- Fabricantes de aditivos para alimentos y bebidas, tales como: sabores y potenciadores del sabor (por ejemplo, ácido glutámico, vainillina), colorantes (por ejemplo, carotenoides, riboflavina), antioxidantes (por ejemplo, ácido cítrico), espesantes (por ejemplo, goma de xantano, glicerol)
- Fabricantes de jarabes de maíz altos en fructosa

- Laboratorios de control de calidad de microbiología de alimentos (por ejemplo, fabricantes de alimentos, mataderos, procesadores de alimentos, importadores de alimentos y agencias de seguridad alimentaria)
- Agencias de normas alimentarias (por ejemplo, detección de patógenos, detección de delitos alimentarios y procedencia de alimentos)

#### *Algunos temas de discusión*

Durante una visita a una tienda de alimentos, los niños pueden ser desafiados a identificar la contribución microbiana al proceso de producción de alimentos y sus ingredientes (Fig. 4). Por ejemplo, mirar la oferta de pizza fresca/congelada brinda una oportunidad considerable para explorar la participación microbiana en la producción de este alimento favorito (levadura en el aumento de la base de masa, bacterias de ácido láctico en la producción de queso y salami, champiñones en rodajas, fermentación microbiana de aceitunas). El tema del abastecimiento local de alimentos, así como el rejuvenecimiento de los métodos tradicionales de conservación de fermentación, los cuales agregan valor nutricional y limitan el desperdicio de alimentos (Campbell-Platt, 1994; Brüssow, 2007; Katz, 2012; Tamang *et al.*, 2016; El Sheikha, 2018; Willet *et al.*, 2019), son temas fascinantes para explorar con los niños. Específicamente, se les puede pedir que identifiquen varios conceptos, además de la fermentación, para reducir el deterioro microbiano (es decir, decapado con vinagre, agregar azúcar o sal, secar, congelar, refrigerar, envasar al vacío y enlatar), y discutir cómo funcionan. Este ejercicio puede seguirse en la escuela con experimentos relativamente simples para evaluar las hipótesis dirigidas por los estudiantes sobre los métodos que mejor conservan los alimentos mientras mantienen su valor nutricional. Una manera maravillosa de aprender sobre la fermentación microbiana, junto con aspectos de la cultura y la seguridad alimentaria, es hacer alimentos fermentados en el aula, idealmente acompañados de la creación de hipótesis y el diseño de experimentos para probarlos, por ejemplo, probar qué sucede si no se agrega el cultivo iniciador. (Meléndez, 2019; Verran *et al.*, 2019).

Si bien el azúcar puede servir para preservar ciertos alimentos, con demasiada frecuencia se agrega en exceso para atraer a los consumidores, lo que afecta la salud de muchas maneras, por ejemplo, caries, obesidad y diabetes. En particular, la controversia rodea el uso de jarabe de maíz con alto contenido de fructosa (JMAF), un edulcorante comúnmente agregado a los alimentos procesados y fabricado mediante un proceso de múltiples etapas impulsado por enzimas microbianas (Crabb y Shetty, 1999). Las discusiones pueden considerar: la Guerra Fría como un estímulo para el desarrollo de JMAF en los Estados Unidos debido a la reducción de los suministros de caña de azúcar; los tipos de enzimas involucradas y por qué/cómo se obtienen algunas de los extremófilos (particularmente los termófilos); y, dado que la intolerancia/mala absorción a la fructosa es relativamente común, problemas de malestar intestinal, el microbioma intestinal y la elección de alimentos.

La huella de carbono asociada con los alimentos, particularmente la producción de carne, ha llevado a discusiones renovadas sobre fuentes alternativas de alimentos, incluidos alimentos, piensos y suplementos a base de microbios. La idea de comer microbios puede inicialmente ser vista con temor por muchos niños, hasta que descubren que esos microbios y productos microbianos ya los han consumido, como las setas, quesos, sal, alimentos fermentados, extracto de levadura, *Quorn* o *Spirulina*. Se debe alentar a los estudiantes a tener en cuenta, que los microbios pueden ser seguros para comer, los biopolímeros microbianos que los forman, y que podrían satisfacer las necesidades nutricionales de los animales. Los requisitos económicos y

energéticos asociados con el cultivo de microbios deberían ser una consideración primordial, lo que debería llevar a discusiones sobre la diversidad de los procesos metabólicos microbianos y su capacidad para crecer utilizando materias primas baratas. Al respecto, el posible uso de bacterias autótrofas, aeróbicas, oxidantes de hidrógeno para generar proteínas como suplemento alimenticio, proporciona un caso de estudio informativo (Sillman *et al.*, 2019).

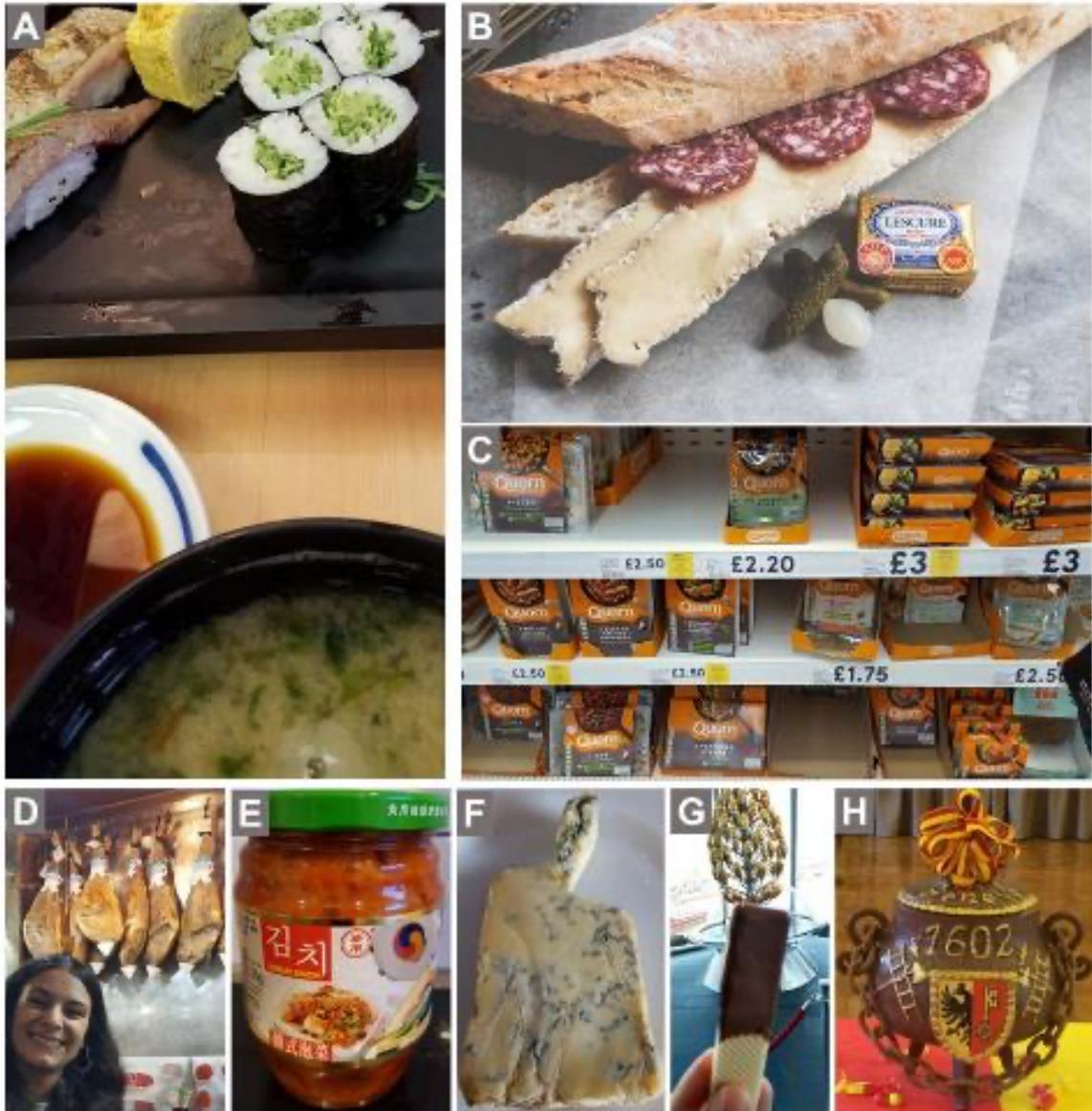


Fig. 4. Un viaje a la tienda de alimentos o una comida puede convertirse en una aventura de descubrimiento microbiológico. A) Desayuno en el mercado de Tsukiji, Japón. El miso en la sopa miso es una pasta japonesa tradicional producida por la fermentación de los granos de soja salados con *kōji*, que también se hace por fermentación de arroz o cebada con el hongo *Aspergillus oryzae*. La salsa de soja se elabora fermentando granos de soja salados y trigo por una comunidad compleja de hongos y bacterias hidrolíticas, así como bacterias lácticas. El arroz de sushi se prepara con un vinagre dulce de vino de arroz (mirin) para darle un sabor delicado, dulce pero fuerte. El vinagre se puede preparar a partir de casi cualquier solución azucarada mediante una fermentación alcohólica seguida de una fermentación acética. En Japón, el vinagre tradicionalmente deriva del arroz y el arroz fermentado *kōji*. B) Baguette de salami y brie con pepinillos. Casi todos los alimentos en esta imagen requieren microbios para su producción: la levadura de panadería (*Saccharomyces cerevisiae*) hace que la masa del pan crezca; Las especies de *Penicillium* y las bacterias lácticas se encuentran entre los microbios involucrados en la producción de salami y brie; Las bacterias productoras de ácido acético producen el vinagre a

partir de bebidas alcohólicas para los encurtidos. C) El impulso hacia la reducción de la carne en la dieta ha abierto un mercado para una gama de productos sin carne, lo que lleva a un resurgimiento en las ventas de Quorn, que está hecho de micelio filamentosos del hongo del suelo *Fusarium venenatum*. D) Jamones curados en seco en un bar en Salamanca, España. El jamón español se cura tradicionalmente en salmuera con sal marina, a menudo con nitrato de sodio agregado para reducir la actividad del agua en una medida que impide el crecimiento de organismos de descomposición. E) Kimchi, un alimento básico en Corea, se está volviendo popular en todo el mundo. La col, junto con numerosas variaciones de verduras y especias, se sala y se somete a una fermentación dominada por bacterias lácticas. Los beneficios para la salud de este producto salado y a menudo picante son ampliamente reportados (Tamang et al., 2016). F) El queso Stilton, que además de requerir bacterias de lácticas y otros microbios en su fabricación, se inocula con *Penicillium roqueforti* para producir las venas azules que contribuyen al sabor distintivo. G) Chocolate de la fábrica Lindt en Colonia, Alemania: una forma divertida de aprender sobre la historia y la microbiología del chocolate. H) El chocolate se moldea en una multitud de formas artísticas que estimulan los sentidos, especialmente de los niños. El ejemplo que se muestra es el de la "marmita" de Ginebra, una representación de chocolate de un caldero de sopa que contiene verduras de mazapán, hecha cada año para el festival de "Escalade", la celebración de la derrota de un asalto a la ciudad en 1602. La leyenda cuenta que una anciana (Catherine Cheynel o Mère Royaume), que estaba haciendo sopa de verduras por la noche, vio a los atacantes que estaban escalando las paredes de la ciudad, dio la alarma y les arrojó el caldero de sopa caliente. Por cierto, Marmite -el producto del extracto de levadura supuestamente desarrollado por un científico alemán, Justus von Liebig, que usa levadura sobrante de la elaboración de cerveza en Burton upon Trent, Reino Unido- deriva del nombre francés "marmite", ya que se vende en macetas con una forma similar al caldero. Fotos A, CF de Terry McGenity, B de Jez Timms en Unsplash , G de Mairi McGenity y H de Kenneth Timmis.

## 2. Operaciones agrícolas, hortícolas y acuícolas.

### Contexto

La agricultura utiliza vastas extensiones de tierra, proporciona empleos y medios de subsistencia a millones de personas y, junto con la acuicultura, produce la mayor parte de los alimentos necesarios para la supervivencia y el crecimiento de la población humana mundial, nuestros animales de trabajo y mascotas de compañía, así como materiales renovables para uso directo (p. ej. para ropa o construcción) o conversión a productos químicos o energía útiles. La producción de alimentos a través de la acuicultura está aumentando rápidamente, y ahora abastece a más de la mitad de los peces y mariscos del mundo para consumo humano (FAO 2016). Pero, la necesidad de alimentar a una población humana en crecimiento requiere una mayor mejora de la producción, a través de la intensificación sostenible de la agricultura y la acuicultura (es decir, una mayor producción de alimentos con un impacto ambiental reducido; Godfray y Garnett, 2014; Cavicchioli *et al.*, 2019). El aumento de la producción de alimentos frente a la incesante reducción del área disponible y la calidad de las tierras agrícolas - la crisis del suelo - es un reto enorme. La toma de decisiones en la política y práctica agrícola es una tarea difícil, compleja y a veces polémica, debido, por ejemplo, a la competencia entre la producción de alimentos y energías renovables, así como a las prácticas agrícolas y los eventos climáticos extremos relacionados con el calentamiento global que causan la pérdida de suelos y superficie agrícola. Luego está el conflicto entre el alto rendimiento y la sostenibilidad, por ejemplo: el uso de promotores de crecimiento y antibióticos en el ganado que conducen a la contaminación y la propagación de la resistencia a los antibióticos; escorrentía de fertilizantes que resulta en la eutrofización de lagos, ríos y mares costeros; y pesticidas que contaminan suelos y cuerpos de agua, incluyendo los que suministran el agua potable, con consecuencias para los insectos que no eran el objetivo (por ejemplo, los polinizadores, ingenieros de los ecosistemas), otros animales incluyendo seres humanos, plantas, y microbios.

Los microbiomas de plantas y animales contribuyen enormemente a la salud de sus huéspedes y, por lo tanto, a los rendimientos de las plantas de cultivo y los animales de alimentación en la

agricultura y la acuicultura (Mueller *et al.*, 2015; Martin *et al.*, 2017; Trivedi *et al.*, 2017). Además, los suelos agrícolas necesitan comunidades microbianas diversas y activas para mantener la estructura del suelo, superar a los patógenos, aumentar la disponibilidad de nutrientes, proporcionar resistencia al estrés y, en general, promover el crecimiento de las plantas (Reid y Greene, 2013; McNear, 2013; Lee *et al.*, 2020). Del mismo modo, se requieren diversas comunidades microbianas para mantener cuerpos de agua saludables para la acuicultura (Dittmann *et al.*, 2017).

**A pesar de su influencia crucial en la productividad animal y vegetal, las contribuciones microbianas generalmente están ausentes de las consideraciones políticas y prácticas de la agricultura y acuicultura, y las decisiones resultantes, por lo que la base de evidencia disponible de tales decisiones es incompleta y por lo tanto defectuosa. La alfabetización en microbiología adquirida a través de la educación infantil es esencial para el desarrollo de políticas y decisiones basadas en evidencia en la agricultura y la acuicultura relacionadas con la alimentación de los ciudadanos del mundo, la conservación de suelos productivos, la reducción de la contaminación ambiental y la eutrofización, minimizando el agotamiento de oxígeno de las aguas y sus consecuencias letales resultantes para la vida silvestre acuática, y por lo tanto la sostenibilidad. Por lo tanto, las excursiones a las operaciones de agricultura, horticultura o acuicultura pueden ser fascinantes para que los niños experimenten personalmente los orígenes de los alimentos que aparecen en sus platos, e importantes para aumentar la conciencia de los grandes desafíos mundiales y sus componentes de microbiología.**

#### *Sugerencias*

A continuación, describimos algunas de las formas en que los microbios influyen en el medio ambiente y la producción de alimentos, que pueden explorarse contactando a los propietarios para organizar visitas a granjas (arables, ganado, mariscos y peces), bosques y centros hortícolas. Muchas universidades, organismos y centros de investigación (véase Sección 5) se pueden visitar para obtener una comprensión más íntima de la microbiología subyacente. También hay industrias que abastecen a los sectores de la agricultura y la acuicultura, que proporcionan los cultivos microbianos que se añaden a los suelos para promover la salud y el crecimiento de las plantas (biofertilizantes), y a las aguas de acuicultura como probióticos o para reciclar el exceso de nutrientes de las heces y organismos muertos (Martínez-Córdova *et al.*, 2015). Finalmente, las granjas escolares o comunitarias proporcionan una excelente manera para que los niños se involucren más en los suelos, plantas, animales, incluidos los peces, mariscos y sus microbiomas. Donde el espacio y el costo son muy importantes, se pueden cultivar hongos comestibles inoculando bolsas de compost con esporas. Esto también puede servir como base para un experimento agrícola, por ejemplo, probando el efecto de la humedad y la temperatura sobre la tasa de formación del cuerpo fructífero.

- Una granja de arables, cultivos de hongos e instalaciones de horticultura, facilitan la exploración de:
  - Fijación de nitrógeno: nódulos de raíz rizobial en leguminosas (Fig. 5); nódulos en árboles comúnmente utilizados en agrosilvicultura y recuperación de tierras, como las especies de *Casuarina*, formadas por el género actinobacteriano *Frankia*; cianobacterias asociadas con el helecho acuático *Azolla* en arrozales
  - Micorrizas e intercambio de nutrientes: hongos micorrícicos arbusculares y hongos ectomicorrícicos

- Biofertilizantes
  - Inhibidores de nitrificación para restringir la pérdida de N y la escorrentía de nitrato a las aguas circundantes.
  - Microbios como agentes de control biológico, por ejemplo, *Bacillus thuringiensis* (Bt) y otros microbios que matan plagas de insectos, hongos que atrapan nemátodos
  - Ingeniería genética de plantas (y la aplicación del agente bacteriano responsable de la enfermedad de la “corona de agallas”, *Agrobacterium tumefaciens*; Fig. 5)
  - Retirada de linaza para hacer lino
  - Identificación y protección contra patógenos de plantas, agentes de deterioro de cultivos y sus toxinas asociadas (Fig. 5)
  - Cultivo de hongos: preparación de sustrato (fermentación/compostaje de estiércol), producción de semilla, producción de cuerpos fructíferos
- Granjas ganaderas, para explorar:
    - Ensilado: el papel de las bacterias lácticas en las fermentaciones para extender la vida del forraje y la calidad nutricional (Fig. 5)
    - Suplementos alimenticios, como aminoácidos y antibióticos sintetizados por bacterias.
    - Fitosomas: enzimas agregadas a la alimentación animal para mejorar la biodisponibilidad de fósforo
    - Heces animales como representantes de los biorreactores microbianos complejos del tracto gastrointestinal, incluido el microbioma ruminal, donde los microbios ayudan a la digestión de los alimentos ricos en celulosa (y, en el proceso, producen mucho metano)
    - Desechos animales y la economía circular: producción de biogás y propagación de estiércol, lodo, digestato de la digestión anaerobia, que recicla los fertilizantes de N y P y enriquece la diversidad microbiana de los suelos.
    - Métodos para reducir la carga microbiana de los alimentos, por ejemplo, mediante pasteurización de la leche.
    - Identificación y protección de patógenos del ganado.
- Granjas de peces y mariscos, para explorar:
    - Ácidos grasos poliinsaturados derivados de microbios para enriquecer la alimentación viva (por ejemplo, rotíferos y *Artemia*)
    - Medidas para mejorar la resistencia a las enfermedades mediante la adición de cultivos como probióticos / biocontrolados
    - Complementando la dieta de pescados y mariscos con prebióticos como ácidos grasos de cadena corta y el compuesto de almacenamiento microbiano, polihidroxialcanoato, para mejorar la salud de la comunidad del tracto gastrointestinal y obtener protección contra patógenos (por ejemplo, Defoirdt *et al.*, 2009)
    - Medidas para mejorar la calidad del agua para la acuicultura, por ejemplo, mediante la eliminación microbiológica de sulfuro de hidrógeno y amoníaco.
    - Métodos para reducir la carga microbiana de los moluscos que se alimentan por filtración, por ejemplo, por depuración (Fig. 5)
    - Identificación y protección de patógenos de peces y mariscos.

### *Algunos temas de discusión*

Numerosas oportunidades de aprendizaje surgen de la investigación de microbios en la agricultura. Por ejemplo, los nódulos de la raíz en las leguminosas son manifestaciones visibles de microbios invisibles que median una actividad excepcionalmente importante, a saber, la fijación de nitrógeno por bacterias simbióticas que proporcionan nitrógeno a las plantas en una forma que puede usarse, por ejemplo, para la producción de proteínas, facilitando así el crecimiento de las plantas. (Fig. 5). De manera similar, las observaciones de hifas fúngicas en estrecha asociación con raíces de las plantas pueden servir para introducir el papel de hongos micorrízicos. El descubrimiento por los niños guiados por el maestro, de nódulos de las raíces y hongos asociadas a plantas pueden provocar discusiones acerca de: simbiosis planta-microorganismo en la rizosfera –la íntima interfaz de microbioma entre la raíz de la planta y el suelo– donde procesos fisiológicos fundamentales impulsados microbiológicamente determinan la disponibilidad de: a) nutrientes, como nitrógeno y fósforo, esenciales para el crecimiento de las plantas, b) hormonas que estimulan el crecimiento de las plantas, c) inhibidores de patógenos que suprimen los microbios que causan enfermedades de las raíces. También se ha demostrado que los microbiomas de raíz protegen a las plantas contra la sequía, las temperaturas extremas y otras tensiones.

Las visitas a granjas y centros de jardinería se pueden vincular a la educación sobre el uso de la tierra y el suelo como recurso, la "crisis del suelo" (Koch *et al.*, 2013) y las funciones beneficiosas de los microbios en la formación/mantenimiento de un suelo saludable y productivo. Por ejemplo, además de contribuir a la formación del suelo por la meteorización de las rocas (Napieralski *et al.*, 2019) y la fertilidad del suelo, algunos microbios del suelo "pegan" las partículas del suelo y reducen la pérdida del suelo por el viento y la lluvia, y otros degradan los contaminantes, incluidos los pesticidas agrícolas. El procesamiento de cultivos producidos como fuente de energías renovables o producción de químicos, a menudo implica actividades microbianas, y pueden ser discutidos en el sitio o lejos del mismo. Se puede introducir el concepto de economía circular y explorar preguntas, como la propagación de desechos animales en suelos agrícolas y el potencial de propagar involuntariamente microbios y patógenos resistentes a los antibióticos que también pueden infectar a los humanos (Berendonk *et al.*, 2015). Las enfermedades de las plantas causadas por la roya, el marchitamiento, las agallas y sus manifestaciones visibles, en plantas, pueden ser estímulos para las discusiones sobre las causas de las enfermedades y los diferentes medios de prevención o tratamiento, así como su papel para contribuir a la hambruna e influir en la historia humana. Una infestación visible de cultivos por los pulgones se puede utilizar para introducir el tema de la dependencia del insecto (y *viceversa*) de sus bacterias endosimbióticas, especies de *Buchnera*, y en términos más generales puede servir para introducir el tema de los agentes de control microbiano en la agricultura, como la bacteria que mata insectos *Bacillus thuringiensis* (Bt), utilizada principalmente para matar larvas de lepidópteros (Bravo *et al.*, 2011; Engel y Moran, 2013). Los ganaderos pueden explicar el problema de la tuberculosis bovina, que puede conducir a un debate informado por microbiología sobre la transmisión de enfermedades y los pros y los contras de la eliminación del tejón.

Y, para no olvidar, los suelos son un importante depósito de diversidad microbiana y, por lo tanto, la principal fuente de mantenimiento de la diversidad microbiómica (en humanos y otras formas de vida), que es crucial para la salud de la mayoría de las especies de la biosfera ("Déjenlos comer suciedad", Finlay y Arrieta, 2016), que también es un tema interesante para que los niños exploren.

Una visita a una instalación de acuicultura marina o de agua dulce, aparte del interés en ver el proceso de cría de peces/moluscos/crustáceos, y las diferentes etapas de desarrollo, proporciona una plataforma excelente para explorar redes alimentarias (por ejemplo, fitoplancton (y sus beneficiosos heterotróficos asociados) -zooplancton- peces), y por lo tanto la interconexión de la vida, así como los problemas del uso de promotores de crecimiento y la contaminación de nutrientes/heces que pueden conducir a la eutrofización y la limitación de oxígeno de los cuerpos de agua.



Fig. 5. Los efectos beneficiosos y perjudiciales de los microbios pueden investigarse en una excursión a una granja, centro de horticultura o instalación de acuicultura. A) Tanques de depuración que contienen ostras de roca del Pacífico (*Magallana gigas*, anteriormente *Crassostrea gigas*) cosechadas en el estuario de Colne, Reino Unido, por Colchester Oyster Fisheries. El agua entrante se trata con luz ultravioleta para reducir su carga microbiana. Este proceso proporciona tiempo para que las ostras que se alimentan por filtro eliminen cualquier patógeno que hayan acumulado mientras estaban en las aguas del estuario, antes de ser vendidas. Además de proporcionar una fuente de proteína potencialmente sostenible, los bivalvos son importantes ingenieros de ecosistemas. Por ejemplo, ayudan a mejorar la eutrofización directamente al absorber nitrógeno y fósforo para el crecimiento de la cáscara y el tejido, e indirectamente al crear sitios anóxicos que estimulan las bacterias desnitrificantes que convierten el nitrato soluble en gas nitrógeno (van der Schatte Olivier *et al.*, 2018). B) Nódulos que albergan bacterias fijadoras de nitrógeno en las raíces de Southern Pea, también conocido como caupí (*Vigna unguiculata*), un importante cultivo alimenticio en los trópicos semiáridos. C) Melocotonero (*Prunus persica*) con agalla de la copa, un crecimiento canceroso causado por la especie bacteriana *Agrobacterium tumefaciens*. D) *Aspergillus flavus*, un hongo patógeno oportunista que crece en el maíz. *A. flavus* es el principal productor de aflatoxina B1, la micotoxina más cancerígena conocida hasta ahora (Gasperini *et al.*, 2019). E) Microbiota visible en un árbol de mango de 50 años (Kolkata, India). Los diversos colores en la corteza reflejan en gran medida las diferentes comunidades microbianas (por ejemplo, algas, hongos, líquenes) que colonizan los hábitats a los que están mejor adaptados. Los factores clave que influyen en la distribución microbiana incluyen: exposición al sol, disponibilidad de agua y secreciones del árbol. Por lo tanto, los árboles presentan una ilustración viva de la biosfera microbiana en una serie de gradientes ambientales. F) Las balas de ensilaje para la alimentación animal durante todo el año se envuelven en plástico (se usaron envoltorios de color rosa y azul para crear conciencia sobre el cáncer de mama y el cáncer de próstata, respectivamente), en Gåseberg Sheep Farm, Lysekil Municipality, Suecia. Antes de envolver el heno en plástico, su contenido de humedad se optimiza y luego se revisa regularmente para mantener las condiciones ideales para la fermentación de ácido láctico y al mismo tiempo disminuir el riesgo de deterioro. El consumo de oxígeno por parte de los microbios aeróbicos, seguido de la producción de condiciones ácidas por las bacterias lácticas (como parte de una comunidad diversa de microbios), minimiza el crecimiento de organismos de descomposición. Lübeck y Lübeck (2019) proporcionan una revisión clara de cómo las bacterias lácticas y otros microbios convierten los cultivos verdes (pastos, legumbres y la parte verde de los cultivos como las zanahorias) en una gama de productos alimenticios agrícolas. Foto A de Alex Shakspeare, B

*de Dave Whiting publicada bajo la [Licencia de Documentación Libre de GNU](#) , C de la [Universidad de Georgia Plant Pathology](#), [Universidad de Georgia](#), [Bugwood.org](#), con licencia de [Creative Commons Attribution 3.0 License](#) , D de [Alessandra Marcon Gasperini](#), E por [John E. Hallsworth](#), F por [W.carter](#) bajo la [dedicación de dominio público universal Creative Commons CC0 1.0](#) .*

### *3. Sector medioambiental y Biotecnológico.*

#### *Contexto*

Los microbios son una pieza angular tanto para el sector medioambiental como para el biotecnológico, los cuales contribuyen en la sostenibilidad del crecimiento económico a través de una creciente variedad de productos y procesos. Estos van desde plantas de tratamiento de aguas residuales municipales hasta nuevas empresas de biotecnología, e incluyen grandes empresas químicas con un amplio historial que han adoptado últimamente los procesos biológicos en sus líneas de producción. Estas empresas pueden identificarse a través del conocimiento local, directorios, búsquedas en Internet, preguntando a los alumnos y colegas de profesión acerca de los trabajos de sus familiares, así como contactando universidades locales y centros de investigación.

La responsabilidad social requiere que todos aprendan lo que sucede con los desechos que producimos, para que transitemos de una mentalidad negacionista al tirar de la cadena del inodoro o al vaciar la basura en el contenedor, hacia una plena consciencia de los procesos, necesidades y costos de los productos y desechos derivados de nuestra actividad diaria. Una excursión a una planta de tratamiento de aguas residuales / instalación de reciclaje puede proporcionar una experiencia microbiológica particularmente interesante y amplia, y casi todas las ciudades tienen una (Fig. 6). Las compañías de agua a menudo ofrecen visitas a sus instalaciones y cuentan con profesionales especializados y microbiólogos en sus plantillas. El componente olfativo asegura una visita memorable, y el cambio de olor mientras avanza por la planta de tratamiento demuestra que los procesos microbiológicos subyacentes están funcionando. El tratamiento de aguas residuales elimina gran parte de los residuos que producimos y canalizamos hacia el sistema de eliminación de aguas residuales. También elimina una fracción importante de los patógenos presentes en las mismas y, por lo tanto, reduce enormemente la transmisión de enfermedades y nuestra carga de infección. Actualmente, el tratamiento de aguas residuales se centra no solo en la destrucción de residuos sino también en: la recuperación de recursos (especialmente los macronutrientes nitrógeno y fósforo, pero potencialmente oro y otros metales preciosos); la recuperación de energía en forma de gas metano a través de digestores anaerobios; y la creación de productos de valor agregado como biopolímeros. Por lo tanto, desempeña un papel central en una serie de facetas de la economía circular y el desarrollo social. Las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales también pueden demostrar la destrucción de desechos, como productos químicos contaminantes, producidos por las actividades productivas de las empresas.

#### *Sugerencias*

- Instalaciones de tratamiento / reciclaje de aguas residuales / aguas residuales: lodos activados, filtros de goteo, digestores anaerobios que producen biogás y digestatos, etc. También alternativas de baja tecnología, como por ejemplo fosas sépticas, biorreactores simples, humedales artificiales, instalaciones de compostaje, eliminación / recuperación de nutrientes, creación de

productos de valor agregado (Morgan-Sagastume et al., 2010; Nielsen, 2017; Vriens et al., 2017) (Fig. 6)

- Empresas de suministro de agua potable: crecimiento de algas / cianobacterias (tóxicas) en embalses, contaminación del agua subterránea, métodos de filtración, métodos de desinfección.
- Laboratorios de pruebas de calidad del agua: demanda biológica de oxígeno, prueba de ATP, pruebas de cultivo o métodos de biología molecular, pruebas para coliformes, *Escherichia coli*, *Legionella pneumophila*, *Cryptosporidium* spp., norovirus
- Empresas de compostaje de residuos y aquellas dedicadas a la medición de emisiones de gases de efecto invernadero así como la formación de bioaerosoles.
- Los vertederos y el tratamiento de lixiviados.
- Empresas que desarrollan / emplean métodos de biofiltración para eliminar compuestos orgánicos volátiles, sulfuro, etc.
- Empresas involucradas en la biorremediación / desintoxicación de contaminantes ambientales, como petróleo, grasas de restaurantes, aceites y grasas, solventes clorados, explosivos, metales pesados.
- Industrias de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón) y empresas que les prestan servicios.
- Empresas que utilizan microbios para lixiviar / extraer metales de minerales de baja riqueza.
- Empresas que emplean métodos microbiológicos para capturar carbono.
- Empresas que desarrollan herramientas de biomonitorio ambiental, p. Ej. biosensores, ensayo de Microtox, indicadores de microalgas, índices de la comunidad microbiana
- Productores de enzimas: laboratorios de investigación, instalaciones de prueba a escala piloto, instalaciones de producción, laboratorios de control de calidad.
- Fabricantes de productos químicos de plataforma de base biológica: p. ácido itacónico, propano-2-diol, isopreno, acrilamida
- Fabricantes de herramientas para biología molecular: p. Ej. Proteína fluorescente verde, enzimas, vectores de clonación, CRISPR-Cas9 para la edición del genoma
- Fabricantes de aromas, saborizantes, pigmentos, solutos compatibles para productos de salud y bienestar (por ejemplo, ectoína), etc.
- Fabricantes de biopolímeros / bioplásticos / biosurfactantes: p. celulosa microbiana, polihidroxialcanoatos; polilactato, goma de xantano
- Empresas que usan alfombrillas de celulosa bacterianas o de hongos para fabricar muebles, telas, embalajes, tintes para ropa, etc.
- Industrias que utilizan enzimas microbianas, incluidos los sectores de papel, cuero, detergentes y procesamiento de alimentos.
  - Plantas de producción de biocombustibles (bioetanol, biobutanol, hidrocarburos microbianos, biodiesel y biogás)
  - Empresas agroquímicas: laboratorios de investigación, instalaciones de producción, laboratorios de control de calidad, por ejemplo, laboratorios involucrados en el desarrollo de nuevos pesticidas basados en metabolitos microbianos
- Biofundiciones
- Institutos gubernamentales / agencias reguladoras

#### *Algunos temas de discusión*

Se pueden abordar diversos temas de microbiología durante una visita a una planta de tratamiento de aguas residuales, dependiendo del grupo de edad y los intereses de los estudiantes y maestros, tales como: formación de flóculos / biopelículas, ciclo de nutrientes, ciclo del agua, procesos aeróbicos versus anaeróbicos, agentes patógenos, resistencia a los antimicrobianos, digestión anaeróbica y la formación de biogás y digestatos (Fig. 6). Si miramos con detenimiento

los lechos de filtro, podremos observar infinidad de microorganismos y macroorganismos que contribuyen al proceso de tratamiento de aguas residuales, dando pie fácilmente a debatir acerca de las redes alimentarias. La toma de muestras que contengan tanto protozoos como metazoos microbianos en bacterias puede dar lugar a una fascinante actividad al observarlos bajo el microscopio. Incluso sin un microscopio, los niños pueden ver las larvas de mosquitos quironómidos que se alimentan de las biopelículas microbianas, lo que las mantiene en continuo crecimiento y óptimamente activas, además de evitar que los filtros se obstruyan. En los vertederos, los niños pueden explorar aspectos microbianos de: las fuentes del olor y cómo los microbios también se pueden usar para eliminar compuestos volátiles malolientes, tasas diferenciales de degradación de diferentes materiales, plásticos biodegradables, contaminación por lixiviados y remediación microbiana, erosión costera, así como el impacto de los desechos de los vertederos que ingresan al mar, o la generación y aprovechamiento de metano producido por el vertedero. Y, dado que normalmente estos emplazamientos coexisten con otros usos del suelo, como la agricultura o el uso residencial, queda clara la necesidad de reducir la expansión de los vertederos y los problemas clave de separación, reciclaje, recuperación de recursos, así como el papel fundamental de los microorganismos en estos procesos. Esto brinda una excelente oportunidad para introducir nuevos temas de debate sobre la toma de decisiones acerca de nuestro estilo de vida actual, que debería alentar a las futuras generaciones a valorar y conservar los recursos.

Al visitar las compañías petroleras o sus operaciones de campo, o aquellas organizaciones que brindan servicios a la industria petrolera, los alumnos pueden descubrir el papel fundamental que juegan los microbios en la limpieza de derrames de petróleo, como por ejemplo, debido a fugas en los tanques de almacenamiento de las estaciones de servicio. Es también una excelente oportunidad para conocer otros procesos impulsados por microbios, tales como: el agotamiento in situ de sulfuro en los yacimientos de petróleo mediante el fomento de bacterias reductoras de nitrato, la biodesulfuración de petróleo crudo y carbón, la recuperación de petróleo mejorada microbianamente y la prevención de la corrosión de estructuras metálicas inducida microbianamente. El impacto de las industrias de combustibles fósiles en el clima, y la medida en que los combustibles a base de petróleo y otros productos aún deben tener un lugar en la sociedad, son temas pertinentes para el debate. Sin embargo, al considerar fuentes alternativas de energía y químicas, por ejemplo, al visitar plantas de bioetanol u otras plantas de biocombustibles, los alumnos no solo ampliarán sus conocimientos sobre el proceso biológico subyacente, sino que también serán conscientes del origen de la materia prima y podrán deliberar sobre el costo ambiental y social de su producción, es decir, el debate de combustible versus alimentos. Luego, los alumnos pueden considerar por qué es preferible producir azúcar (como precursores de algunos biocombustibles) a partir de fuentes alternativas, particularmente residuos de material lignocelulósico (por ejemplo, papel de desecho, paja), seguido de una discusión sobre los tipos de microbios que degradan la lignina y celulosa, dónde se pueden encontrar y cómo aprovechar sus actividades.

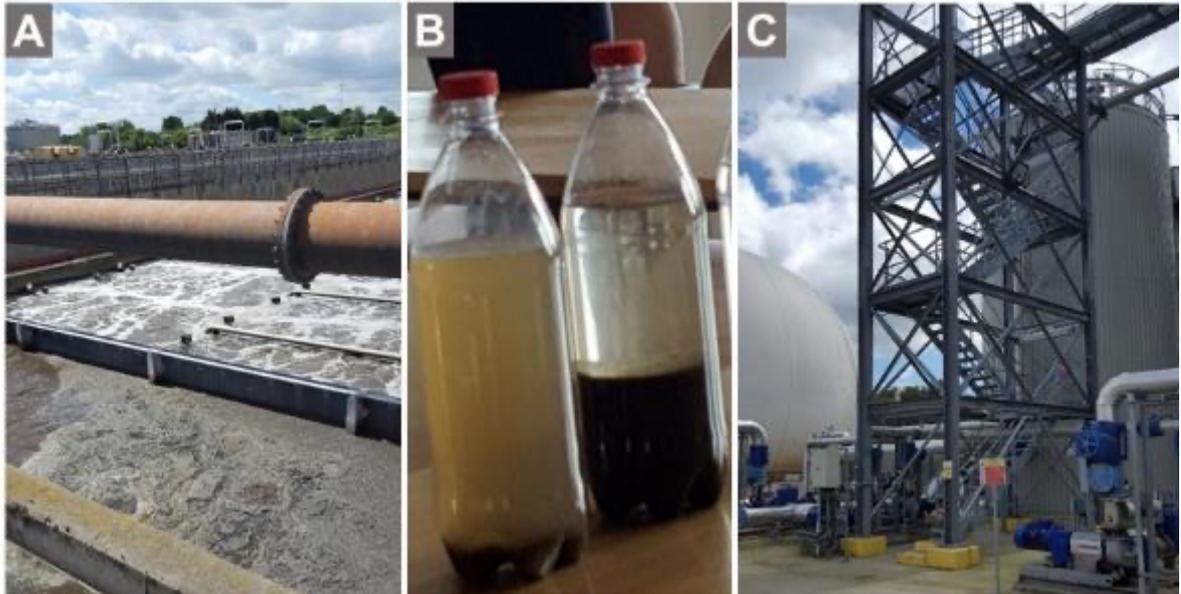


Fig. 6. Plantas de tratamiento de aguas residuales como una oportunidad para ver a los microbios como los últimos recicladores. A) Planta de reciclaje de aguas residuales de Colchester dirigida por Anglian Water. La imagen muestra parte del tratamiento de lodos activados, mediante el cual se alienta la formación de flóculos, debido a la actividad microbiana, incluida la especie bacteriana productora de polímeros extracelulares *Zoogloea ramigera*. Los flóculos ricos en microbios orgánicos pueden sedimentarse (ver B): algunos se reciclarán para sembrar los tanques de lodo activado y el resto se puede usar para producir biogás (ver C). B) La botella de la derecha ilustra cómo se sedimenta el lodo activado, separando así los sólidos y dejando líquido razonablemente transparente con una carga orgánica reducida. La botella de la izquierda muestra un asentamiento incompleto debido a una comunidad microbiana de lodo activado subóptima. C) La parte aguas arriba de la instalación de digestión anaeróbica en la planta de reciclaje de aguas residuales de Colchester. El lodo de la planta y las localidades circundantes se somete a calentamiento, pasteurización e hidrólisis, antes de la etapa de digestión anaerobia, impulsada por *Archaea* metanogénicas. El metano resultante se usa para generar electricidad y puede almacenarse en el domo de biogás que se muestra a la izquierda. Fotos de Terry McGenity.

#### 4. Sector de la salud y la medicina

##### Contexto

Los niños, por razones de ingenuidad inmunológica, una educación excesivamente higiénica en sus primeros años, así como su confinamiento en el aula durante las horas lectivas, son particularmente susceptibles a las infecciones. El sufrimiento físico y mental causado por la enfermedad microbiana afecta considerablemente a los niños, sobre todo debido a las ausencias escolares y el subsecuente estrés de ponerse al día. Con frecuencia estos hechos los motiva a querer aprender más y, a veces, elegir una carrera en microbiología o medicina. La propaganda mal evidenciada sobre los supuestos efectos negativos de la vacuna ha llevado a la reaparición de algunas enfermedades microbianas bien contenidas o casi eliminadas (por ejemplo, sarampión, polio). Los brotes de agentes patógenos que causan enfermedades caracterizadas por altas tasas de mortalidad (por ejemplo, el virus del Ébola) o una alta infecciosidad que permite la propagación de epidemias o pandemias (por ejemplo, el SARS-CoV-2 que causa COVID-19) ocurren regularmente. Crucialmente, el aumento global de la resistencia a los antimicrobianos en patógenos previamente tratables significa que muchas infecciones en la actualidad se han convertido en una amenaza para la vida (Timmis et al., 2019) y se prevé que se conviertan en una causa importante de morbilidad y mortalidad en el futuro.

Por otro lado, actualmente podemos observar emocionantes avances que vinculan el microbioma humano con el bienestar, que prometen conducir a nuevos paradigmas para el diagnóstico, la prevención y la terapia de las condiciones de salud física y mental que se originan en las perturbaciones del microbioma. El, por ahora, ejemplo clásico de restauración de microbiota perturbada: el uso exitoso de trasplantes de microbiota fecal para tratar infecciones recurrentes o refractarias por *Clostridium difficile* promovidas por la terapia con antibióticos, está alentando la evaluación de intervenciones similares para otras afecciones (Mullish et al., 2018). Y la terapia con bacteriófagos (otra estrategia ecológica para tratar las infecciones bacterianas) está tomando una vez más gran importancia en la actualidad (Brüssow, 2017; Gordillo Altamirano y Barr, 2019; Fig. 7).

Algunos de los lugares obvios e interesantes para aprender sobre el sector médico pueden no ser prácticos para las excursiones escolares, especialmente para los niños más pequeños, por ejemplo, visitas a los hospitales para conocer los procedimientos de higiene en las unidades de cuidados quirúrgicos e intensivos y la importancia de la inmunosupresión, así como clínicas de atención primaria de salud para descubrir los procedimientos de diagnóstico, qué revelan las muestras clínicas y qué pruebas se llevarán a cabo. Sin embargo, otros, especialmente los hospitales universitarios, pueden contar con instalaciones educativas que pueden acomodar excursiones en clase, e incluso, algunas clínicas de atención primaria de salud también pueden disponer de estas instalaciones o estar disponibles para visitas organizadas, por lo que siempre merece la pena preguntar. Generalmente, los centros de atención primaria y los hospitales de salud suelen estar asociados con enfermedad, lo que hace que algunos niños los vean con aprensión, por lo que las visitas en una capacidad de aprendizaje pueden ser muy útiles para establecer familiaridad y crear una percepción más positiva y equilibrada.

Algunos laboratorios de diagnóstico puede que acepten visitas escolares, y las agencias de salud pública a menudo tienen departamentos dedicados a la difusión, y también pueden permitir / promover las visitas. Los centros académicos, las sociedades científicas y los museos ofrecen oportunidades para aprender sobre el papel de los microbios en la salud y la enfermedad, y los trabajadores de la salud a menudo visitan las escuelas para hablar sobre temas microbiológicos, como las enfermedades de transmisión sexual. La exploración de las oportunidades que ofrecen los programas de extensión del sistema de salud y la disponibilidad de profesionales entusiastas de la salud para actividades de extensión pueden mejorar significativamente los beneficios educativos de las excursiones centradas en la salud y los seguimientos en la escuela.

#### *Sugerencias*

A continuación, se detallan algunas organizaciones centradas en la microbiología relacionadas con la salud:

- Hospitales
- Clínicas y centros de atención primaria.
- Agencias de salud pública.
- Laboratorios de patología y diagnóstico, incluidas las pruebas de resistencia a los medicamentos.
- Laboratorios y/ o hospitales veterinarios
- Empresas farmacéuticas: laboratorios de investigación, instalaciones de producción, laboratorios de control de calidad, p. involucrado en nuevos medicamentos basados en metabolitos microbianos

- Fabricantes de enzimas utilizadas en medicina.
- Empresas que desarrollan kits de diagnóstico para detectar patógenos o sus efectos.

#### *Algunos temas de discusión*

Con el fin de garantizar una narrativa equilibrada, antes de analizar los patógenos y las enfermedades, es útil recordar a los estudiantes las formas en que los microbios promueven la salud o reducen el riesgo de enfermedades, tales como: dirección del desarrollo del sistema inmunitario en los bebés por microbiomas, inhibición de microbiomas de colonización y reproducción de patógenos en las superficies corporales, uso biotecnológico de microbios y productos microbianos para crear vacunas y terapias, destrucción de patógenos por actividades microbianas en el tratamiento de aguas residuales, preservación de alimentos por fermentación, mejora del rendimiento del cultivo, degradación de contaminantes, etc.

Los estudiantes pueden disfrutar aprendiendo sobre la enfermedad y se benefician de imágenes claras y contextualizadas de los patógenos causales relevantes en discusión, en términos de su tamaño (por ejemplo, en relación con algo que el grupo de edad en particular reconocería), tipo (por ejemplo, bacterias, virus, protozoos), y fuente / reservorios de infección. Los juegos epidemiológicos (p. Ej., “Solve the Outbreak” del Centro para el Control de Enfermedades del Reino Unido), que incorporan elementos de trabajo de detective forense, proporcionan una forma esclarecedora de ilustrar cómo puede propagarse la enfermedad.

Se deben aprovechar las oportunidades para relacionar los peligros de infección con la vida cotidiana. Por ejemplo, la discusión sobre los modos de transmisión y su prevención es particularmente interesante para los niños pequeños que juegan en el exterior de sus viviendas y/o tienen animales de compañía, y pueden incluir útilmente la transmisión a través de picaduras de insectos vectores de transmisión. Los ejemplos incluyen *Borrelia burgdorferi*, una especie bacteriana que causa la enfermedad de Lyme y se transmite por garrapatas que residen en la hierba, y *Plasmodium*, un género protozoario con varias especies que causan la malaria, que se transmite por los mosquitos. Las zoonosis, la transmisión de agentes infecciosos de los animales de reservorio a los humanos, también incluyen a *Borrelia*, cuyos huéspedes principales son los mamíferos, y los serotipos de *Salmonella*, que infectan a los pollos y pueden transmitirse a los humanos a través de los alimentos si no mantenemos una buena higiene y cocinamos adecuadamente carne. Particularmente tónica es la evolución genética de los patógenos animales, como el VIH, así como el SARS, MERS y otros coronavirus, para convertirse en patógenos humanos (Cui et al., 2019; Brüßow, 2020). Todos estos temas permiten al profesor discutir prácticas relevantes para ayudar a restringir la propagación de patógenos, como: lavarse las manos antes de manipular alimentos o comer y después de ir al baño, gestión ambiental (por ejemplo, tratamiento de agua para el cólera), distanciamiento social (por ejemplo, evitar contactos físicos, como sacudir / abrazar las manos, cuarentena durante epidemias como la causada por el coronavirus), protección (por ejemplo, rociar con repelente de mosquitos para la malaria, usar preservativos para evitar enfermedades de transmisión sexual), vacunación, así como tratamientos (por ejemplo, si o no usar antibióticos). Estos temas pueden llevar a la discusión de temas más amplios, incluyendo One Health (ver páginas web de la OMS), estrategias de salud pública basadas en la naturaleza integrada de la salud humana, animal y ambiental, que se enfoca en los componentes clave relevantes para la salud en esta red interactiva. En este contexto, un tema importante de discusión es la propagación de la resistencia a los antibióticos mediante el uso de antibióticos en la agricultura y la acuicultura. Además, estos temas personalmente relevantes, y a

veces aterradores, brindan la oportunidad de considerar la difusión de información errónea a través de Internet y, por lo tanto, la importancia del método científico, la ética y la investigación comunicativa.

Los laboratorios de diagnóstico y salud pública pueden enseñar a los estudiantes los diferentes niveles de patogenicidad e infecciosidad de los patógenos, y por lo tanto, la contención necesaria para un manejo seguro, así como los diferentes medios de detección, tipificación y cuantificación (Fig. 7). A los estudiantes de los niveles superiores se les puede presentar la aplicación de métodos moleculares para la detección de patógenos, por ejemplo, utilizando la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), cuyo fundamento fue el descubrimiento de la bacteria termofílica, *Thermus aquaticus*, de coloridas fuentes termales en el Parque Nacional de Yellowstone, que fue la fuente de la ADN polimerasa termoestable que hizo posible la PCR. Las visitas a las compañías farmacéuticas se centrarán en el desarrollo y la fabricación de medicamentos terapéuticos, por ejemplo, para enfermedades microbianas y el proceso de descubrimiento de fármacos. La inspiración para muchos productos farmacéuticos a menudo proviene de la naturaleza, y ayudará a los niños a valorar los microbios si reconocen que son la fuente de gran parte de esa inspiración o de los productos en sí. Por lo tanto, es útil establecer conexiones con las sensaciones cotidianas, como el olor del suelo después de la lluvia causado por especies de *Streptomyces* productoras de geosmina, la fuente de una variedad de antibióticos y otros productos farmacéuticos. Un desarrollo natural de esta discusión sería considerar el papel que tales metabolitos secundarios juegan en la naturaleza.

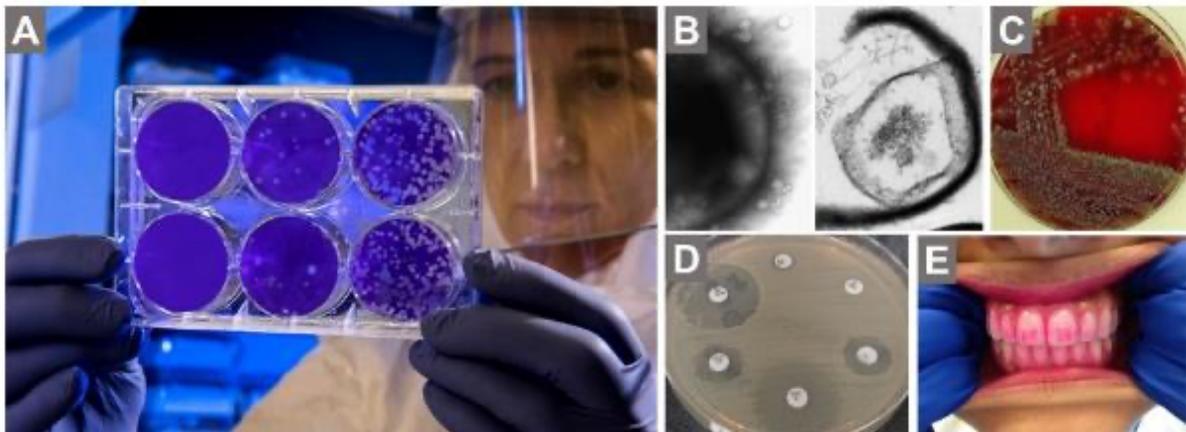


Fig. 7. Los laboratorios de diagnóstico y salud pública permiten a los estudiantes investigar diferentes formas de cultivar, detectar observar los microbios, y aprender sobre el tratamiento de patógenos. A) Ensayo de placa viral para cuantificar el virus de la gripe. Las diluciones de la muestra se agregan a una línea celular humana y se incuban. La mancha púrpura muestra células que no están infectadas con el virus, mientras que las zonas claras (placas) indican infección viral y lisis celular. B) Algunos laboratorios pueden realizar microscopía electrónica, dando una visión fascinante de la forma, el tamaño y la ultraestructura de bacterias y virus. Estas imágenes son micrografías electrónicas de transmisión de la bacteria *Clostridium difficile*, atacadas por bacteriófagos. Izquierda, superficie de una célula intacta de *C. difficile*, que muestra un gran número de bacteriófagos unidos, la mayoría con cabezas hexagonales vacías, que representan bacteriófagos que han inyectado su ADN en la bacteria. Derecha, Parte de una célula de *C. difficile* que se ha abierto debido a la proliferación de bacteriófagos en su interior, que producen enzimas que lisan la membrana celular. La altura de ambas imágenes es  $\sim 800$  nm. C) Muestra de hisopo de garganta inoculada en una placa de agar sangre, que muestra colonias de *Streptococcus pyogenes*, el agente causante de la amigdalitis y otras enfermedades, identificadas por  $\beta$ -hemólisis (la producción de zonas claras alrededor de colonias bacterianas, resultante de la lisis de los glóbulos rojos por la hemolisina producida por el patógeno). D) Prueba de sensibilidad a antibióticos de *Staphylococcus aureus* utilizando el método de difusión de disco. *S. aureus* es un ejemplo de un patógeno, frecuentemente adquirido en el hospital, que ha desarrollado resistencia a múltiples antibióticos. Se extiende un cultivo de la bacteria en la placa de agar, y luego se colocan en la placa discos que contienen diferentes antibióticos. Durante la incubación, se desarrolla un césped bacteriano. Una zona de limpieza en el césped alrededor de un disco

indica que la bacteria es sensible al antibiótico correspondiente, lo que contribuye al diagnóstico y a las estrategias de tratamiento. E) La tinción de biopelículas de dientes (placa) con tabletas reveladoras de placa proporciona una forma visual y memorable de llevar a casa la importancia de una buena higiene dental para eliminar la placa y así prevenir la caries dental y la enfermedad periodontal (tenga en cuenta los diferentes significados del término "placa" aquí y en A). Foto A por CDC en Unsplash, B por Stefan Hyman con muestras de Martha Clokie, Universidad de Leicester, C por Aurélie Villedieu, D por Selwa Alsam, E está licenciada bajo la licencia internacional Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International.

### ***5. Centros de investigación, excursiones académicas y participación de los estudiantes en proyectos de investigación.***

#### **Contexto**

Muchas escuelas se encuentran a poca distancia de un centro de investigación académica, donde los niños pueden experimentar la vanguardia del descubrimiento a través de una amplia variedad de medios enumerados a continuación. Dentro de la academia, generalmente se fomentan las actividades de divulgación, y a menudo se organizan días de puertas abiertas. Muchas sociedades académicas y una amplia variedad de publicaciones brindan consejos sobre cómo transmitir la ciencia a los niños y al público en general (por ejemplo, Bowater y Yeoman, 2012; Westenberg, 2016; Illingworth y Prokop, 2017). Los centros académicos tienen una ventaja sobre muchos entornos comerciales o industriales ya que es probable que tengan laboratorios que puedan acomodar demostraciones, experimentos prácticos y aplicaciones bioinformáticas. También pueden ser una buena fuente de contactos con la industria relevante, p. a través de sus parques tecnológicos / científicos y conexiones de investigación. Además, las visitas a un centro académico a menudo pueden facilitar la elección de temas de estudio y crear contactos útiles para futuras prácticas en empresa, así como de cara a la educación universitaria.

**Involucrar a los niños directamente en actividades de investigación, por ejemplo, uniéndose a microbiólogos que realizan trabajo de campo, proporciona experiencia de primera mano de cómo es ser un microbiólogo. Como ejemplo de un ejercicio organizado por la Universidad Técnica Danesa, y apoyado por patrocinadores industriales, los niños de la escuela recolectaron muestras para aislar bacterias ácido-lácticas y llegaron a los titulares de diversos medios de comunicación al descubrir 10 nuevas especies. Dichas actividades y/o proyectos de ciencia ciudadana o experimentos en masa a gran escala, brindan experiencia directa del método científico, incluyendo el establecimiento de hipótesis, el diseño experimental y la resolución de problemas. Es importante destacar que esto fomentará el entusiasmo por la investigación microbiológica, y los principios aprendidos se pueden aplicar para abordar problemas complejos encontrados en la vida adulta.**

Las escuelas pueden participar en una variedad de actividades de ciencia ciudadana, muchas de las cuales no requieren una visita a un centro académico cercano, ya que las instrucciones y los materiales se pueden proporcionar u obtener fácilmente. La "Iniciativa del Pequeño Mundo", desarrollada en la Universidad de Yale como un programa de ciencia ciudadana en el que los estudiantes aíslan microbios de su entorno local e identifican los antibióticos producidos por ellos, se ha convertido en un programa de investigación más amplio (Davis et al., 2017). También

se ha adaptado en varios otros países, p. Fomentar la participación de los niños en edad escolar e incluir aspectos del aprendizaje de servicio (Valderrama et al., 2018), es decir, combinar los objetivos de aprendizaje con el servicio comunitario (Webb, 2017). Los estudiantes de posgrado de la Universidad de Rutgers proporcionan otro ejemplo de aprendizaje en servicio, los cuales dirigen un laboratorio móvil desde el cual, entre otras actividades, presentan a los escolares la propagación de infecciones microbianas (Irizarry-Barreto et al., 2018). DTU Bioengineering también tiene un modelo efectivo, mediante el cual los estudiantes dirigen una organización llamada Biotech Academy, que ofrece divulgación y enseñanza en las escuelas.<sup>7</sup>

**La iniciativa llamada "¡Descubre los microbios desde dentro!: Proyecto Wolbachia" se basa en el hecho de que los artrópodos representan aproximadamente el 85% de todas las especies animales, y los endosimbiontes bacterianos, *Wolbachia* spp., se encuentran en al menos el 40% de todas las especies de artrópodos, por lo que la microbiología de inmersión en este mundo simbiótico es accesible a todos los alumnos y aulas de todo el mundo. Este proyecto permite investigar una amplia selección de artrópodos y hábitats, e involucra a los niños en la búsqueda de Wolbachia y sus bacteriófagos.**

### *Sugerencias*

Las sociedades, organizaciones benéficas y fundaciones financian y organizan eventos, y apoyan y movilizan a los científicos, con el cometido de involucrar a las escuelas y al público en la ciencia. Los profesores y los alumnos pueden aprovechar estos eventos al ser miembros y / o suscribirse a las listas de correo. Casi todos los centros académicos, y / o los departamentos tienen personal responsable de actividades de divulgación, que pueden proporcionar información sobre lo que pueden ofrecer entre los siguientes:

- Exhibir actividades de investigación, incluidos estudios de casos de investigación con un amplio impacto social, como parte de visitas a escuelas, cursos o jornadas públicas
- Proporcionar enlaces a los parques científicos / tecnológicos asociados, dando una idea de las empresas spin-out y las pequeñas y medianas empresas que realizan investigación y desarrollo en etapas tempranas, en muchas de las áreas enumeradas en secciones anteriores.
- Organizar y / o apoyar proyectos de campo, experimentos prácticos de laboratorio y bioinformática (cuando sea apropiado, con una visita de seguimiento a la clase de la escuela para presentar los resultados y discutir las interpretaciones)
- Proporcionar seminarios y entrevistas de forma remota (por ejemplo, seminarios web, entrevistas de Skype), especialmente en respuesta a publicaciones científicas de alto impacto.
- Preparación y suministro de recursos didácticos (por ejemplo, sitios web, juegos y videos) y préstamo de equipos (ver "Importación de excursiones a la escuela y excursiones virtuales" a continuación)
- Asesoramiento sobre actividades asociadas con días / semanas de promoción microbiológica (por ejemplo, Día Internacional de Microorganismos, Día de Hongos del Reino Unido, Día Mundial del Microbioma, Semana Mundial de Concientización sobre Antibióticos)
- Apoyar proyectos a gran escala con el público como recolectores de muestras, observadores, analistas, experimentadores y / o sujetos directos de investigación, por ejemplo:
  - o American Gut (Debelius et al., 2016; McDonald et al., 2018)
  - o Biodiversidad del ombligo (Hulcr et al., 2012)
  - o Vida salvaje de nuestros hogares (Barberán et al., 2015)
  - o Big Compost Experiment (dirigido por el University College London)
  - o Índice de bolsitas de té, que mide la biodegradación microbiana (Keuskamp et al., 2013)
  - o ¡Descubre los microbios desde dentro! El Proyecto Wolbachia (Bordenstein et al., 2010)

- o Small World Initiative (Davis et al., 2017)
- o Tiny Earth (dirigida por la Universidad de Wisconsin-Madison)
- o La comunidad Microcosmos de usuarios de Foldscope (Cybulski et al., 2014; ver Sección 6)
- o Foldit (Cooper et al., 2010)
- Apoyar proyectos que se benefician del asesoramiento de expertos, principalmente para estudiantes de educación superior, pero también abiertos a escolares mayores, por ejemplo:
  - o Día de muestreo del océano (Kopf et al., 2015; Schnetzer et al., 2016)
  - o Concurso internacional de máquinas de ingeniería genética (iGEM) (Smolke, 2009)

#### *Algunos temas de discusión*

Los temas a discutir dependerán del área de investigación presentada, y pueden ser guiados por el experto en microbiología, y / o los indicadores deben estar disponibles en los sitios web relevantes. Por ejemplo, el "Big Compost Experiment" invita al público a seleccionar envases bioplásticos y probar su biodegradación, lo que fomenta el aprendizaje sobre la química y (micro) biología de los diferentes tipos de bioplásticos, así como el proceso de compostaje (Fig. 8). La discusión podría extenderse fácilmente para incluir el tema más amplio de la contaminación plástica como se describe en la siguiente sección.



**Fig. 8. Degradación de bioplásticos en compost.** A) Tiras (20.8 x 4.5 cm) de polihidroxibutirato (izquierda), un plástico biodegradable producido por bacterias (que cumple el papel de reserva de carbono en la naturaleza) y polipropileno (derecha), un plástico no biodegradable derivado del petróleo. B) abono de jardín en el que se colocaron las tiras, después de asegurarlas con cintas de nylon, que sirvieron como "bolsas de basura". C) El polihidroxibutirato (abajo) muestra signos claros de biodegradación después de 15 días de incubación, mientras que el polipropileno (arriba) permanece sin cambios. Fotos de Terry McGenity.

## ***6. Excursiones de campo***

### *Contexto*

Una ventaja de las excursiones de campo es que pueden realizarse en entornos locales accesibles, incluidos los sitios urbanos y los terrenos dentro de la escuela, reduciendo así los costos, limitando la interrupción de las clases programadas y permitiendo visitas repetidas (Howarth y Slingsby, 2004). Y, aunque los agentes microbianos individuales que subyacen a la actividad a experimentar no se pueden ver a simple vista, los grupos / redes de células, biopelículas y limos pueden ser visibles, y las actividades en sí pueden ser experimentadas por los sentidos, visualmente y en algunos casos, al tacto, olfato, sabor (¡con alimentos conocidos!) o sonido (ver el apartado Discusión).

Los niños están encantados de descubrir seres animados previamente invisibles y objetos inanimados, y quedan cautivados por los nuevos mundos microscópicos que descubren en las

muestras que han tomado. Por lo tanto, enfatizamos la importancia de que cada escuela tenga al menos un microscopio. Sin embargo, la curiosidad de un niño puede disminuir en el trayecto desde el campo hasta el aula o en la cola, esperando su turno para poder usar el microscopio, lo que hace que las herramientas portátiles y asequibles como el Foldscope sean extremadamente valiosas para las excursiones microbiológicas. Al ensamblar su propio Foldscope o bien al observar el utilizado por todo el grupo, los niños aprecian la tecnología existente detrás del microscopio óptico. Además, el sentido de propiedad en el caso de que cada niño posea uno, junto con la capacidad de ver sus muestras de inmediato, mejorará el disfrute y la sensación de descubrimiento de los niños. El mantra "lo pequeño es hermoso" se traduce en realidad a medida que los microbios invisibles se revelan, se vuelven tangibles, ingresan en la memoria del niño, para ser automáticamente recordados y vinculados a un hábitat y / o actividad microbiana relevante. Además, compartir sus logros y experiencias con la comunidad global de Foldscope es divertido y refuerza el interés y la recompensa de sus estudios: ¡se convierten en miembros activos de una red mundial de descubrimiento de lo microscópicamente desconocido!

En algunas situaciones, es posible que los maestros incorporen experimentos de campo simples en sus excursiones, que involucren observaciones y perturbaciones, con o sin dispositivos de medición simples. Esto tiene la virtud de extender los experimentos de clase a los experimentos de campo, y revelar el vínculo esencial entre los dos para obtener una imagen realista del funcionamiento microbiano y la contribución a los procesos ambientales.

Se explora una amplia gama de manifestaciones microbianas en el maravilloso libro "A Field Guide to Bacteria" (Dyer, 2003) así como en el excelente sitio web "Explorando lo invisible". Aquí se presentan algunas ideas de cientos de posibilidades.

Los microbios y sus actividades a menudo son más obvios de lo que pensamos, y el entorno urbano con sus piedras / materiales de construcción, estructuras de madera, monumentos y cementerios ofrece oportunidades para explorar el papel de los microbios en la vida cotidiana como arquitectos de la construcción y la decadencia (ver " Este es el sitio web de Microgeografía "y la Fig. 9 para ejemplos). Los constructores incluyen especies utilizadas para reparar monumentos al facilitar la formación de cemento a través del carbonato de calcio (Gao et al., 2019). También se ha propuesto que las sustancias poliméricas extracelulares (limo rico en polisacáridos) producidas por microbios que degradan la celulosa sirven como aglutinantes en la construcción de edificios de barro (Vissac et al., 2017). Ninguna superficie está libre de microbios, y las colonias microbianas pueden verse en edificios, lápidas, monumentos y rocas en forma de hongos melanizados, algas verdes, líquenes multicolores y minerales formados microbianamente (manganeso y óxidos de hierro, oxalato de calcio) en la piedra, mortero, yeso o estuco (Gadd, 2017; Fig. 9). Dichas biopelículas, costras y pátinas pueden provocar un deterioro (por ejemplo, a través de bacterias productoras de ácido, arqueas y hongos) o protección (por ejemplo, por biopelículas hidrófobas que evitan el ingreso del agua) (Gadd, 2017). Por lo tanto, los objetos de piedra cotidianos proporcionan la base para visualizar microbios, sus interacciones y los efectos de sus diversas actividades.

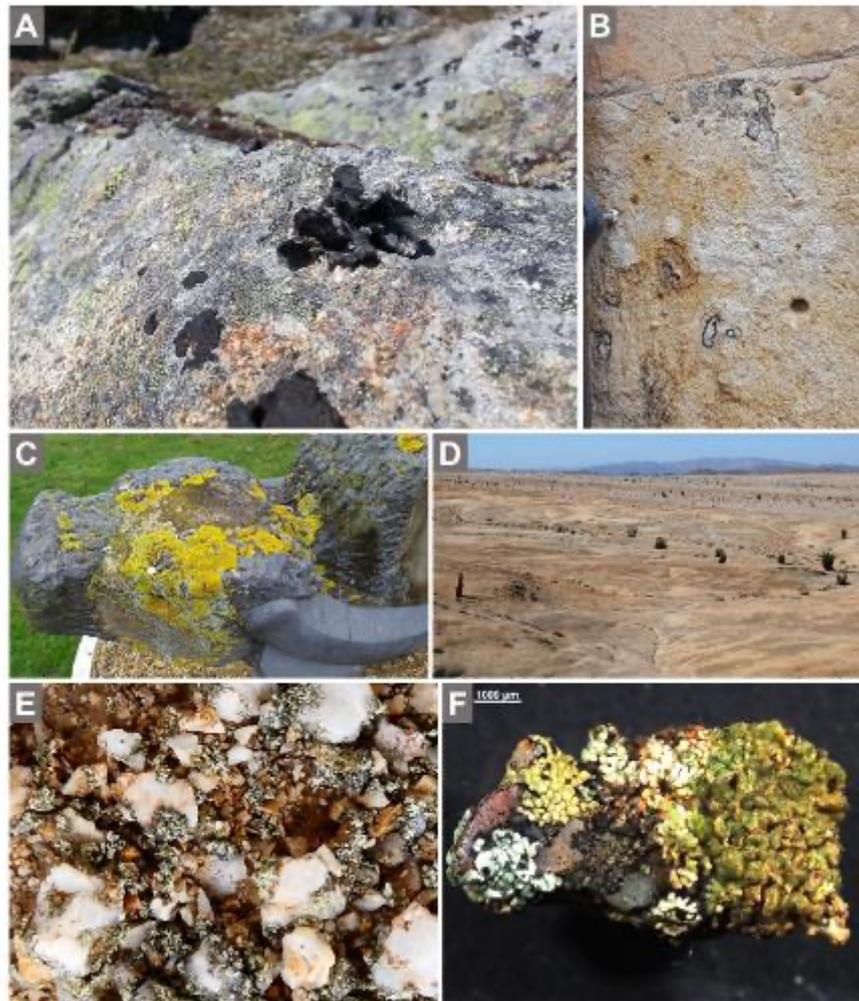


Fig.9.

Pieles vivas sobre rocas. A) Diversos líquenes, incluidas formas foliares negras, en una roca en el oeste de Groenlandia. B) Los líquenes y hongos, incluidas las formas de anillo negro en un edificio de piedra arenisca, que, junto con las comunidades microbianas, contribuyen al biodeterioro de la piedra arenisca de Villamayor, la piedra de construcción principal de la ciudad de Salamanca, Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO. El campo de visión es de ~ 20 x 20 cm. C) Líquenes en una vaca de piedra, Milton Keynes, Reino Unido. D) El paisaje aparentemente árido del Parque Nacional, Pan de Azúcar, del desierto costero de Atacama está cubierto por pequeñas piedras blancas que tienen 6 mm de diámetro (denominado grano). Los patrones negros son causados por líquenes, cianobacterias, algas verdes y hongos que colonizan la superficie y las

estructuras internas de los granos policristalinos. Estos organismos también concatenan los granos individuales que forman costras biológicas del suelo (denominado corteza de arena; Jung et al., 2010). E) Primer plano de la corteza arenosa después de un evento de niebla. Principalmente los líquenes en su etapa húmeda son visibles creciendo unidos a las piedras arenosas. F) Piedra de un solo grano cubierta por varios líquenes junto con hongos microscópicos (principalmente Lichenothelia). Muchos ejemplos de microbios como parte del paisaje urbano se pueden ver en el sitio web "Esto es microgeografía". Fotos A-C propiedad de Terry McGenity y D-F propiedad de Patrick Jung.

Las conchas fosilizadas de microbios eucariotas compuestas por carbonato de calcio (especialmente los coccolitóforos y foraminíferos) son el componente principal de la tiza, que sirve como material de construcción (por ejemplo, partes de la Abadía de Westminster en Londres) y todavía se usa para escribir en pizarras en muchas aulas de todo el mundo. Los niños quedan fascinados cuando se dan cuenta de que tales objetos cotidianos, la roca debajo de sus pies y las formaciones naturales icónicas, como los Acantilados Blancos de Dover (Fig. 10), son los restos de microbios que florecieron en los océanos. La roca dolostona es un material de construcción ampliamente utilizado, con ejemplos que incluyen la abadía de York (Reino Unido) y el Muro de los Lamentos en Jerusalén. A diferencia de la tiza, las conchas se derivan de organismos multicelulares más grandes, pero se entiende que los microbios, específicamente las bacterias anaerobias reductoras de sulfato en los sedimentos marinos son responsables de gran parte de la formación del principal mineral de dolostona, la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (Krause et al., 2012). Muchos otros restos o signos de actividad microbiana aparecen en el registro de rocas, como los microbiolitos y las formaciones de hierro en bandas (Fig. 10),



Fig. 10. Floración de microbios. A) Imagen satelital de una floración blanca lechosa del coccolitóforo fototrópico, *Emiliania huxleyi*, en el Mar del Norte. Esta especie de microalga eucariota tiene una pared de carbonato de calcio que, cuando la floración se colapsa (debido a la muerte causada por el ataque de un virus y / o el pastoreo), puede hundirse en el fondo marino. Por lo tanto, los coccolitóforos juegan un papel en el secuestro de carbono de la atmósfera y su transferencia a los sedimentos marinos. La floración más verde en la parte inferior de la imagen puede estar dominada por diatomeas, que, debido a sus paredes de sílice vidriosas, también pueden manifestarse en el registro de rocas como tierra de diatomeas. B) Los Acantilados Blancos de Dover, Reino Unido, hechos de tiza de las paredes de carbonato de calcio de los coccolitóforos y foraminíferos que se asentaron en el fondo del mar en el período Cretácico. C) La bacteria gigante, *Thiomargarita namibiensis*, se puede ver en este núcleo de sedimento del Sistema de Afluencia de Benguela de la costa de Namibia. Asemajando cadenas de perlas blancas, es decir, una cadena de células conectadas, que se puede ver en el sedimento. Las células individuales tienen un diámetro de 0.4 mm, por lo que, inusualmente para una bacteria, se puede ver a simple vista. No es móvil y, por lo tanto, depende de las corrientes para suministrar su aceptor terminal de electrones, nitrato, que se acumula en una gran vacuola. El sulfuro, que proporciona su fuente de energía, es abundante en la zona anaeróbica más profunda debido a su producción por bacterias reductoras de sulfato. También hay una biopelícula espesa y gelatinosa en la parte superior del sedimento. El ancho de la imagen es de 5 cm. D) Fossilización en acción. Microbiolitos gigantes que se han formado en los últimos miles de años debido a la actividad microbiana junto con altas concentraciones de carbonato en el agua dulce Laguna Bacalar en la península de Yucatán en México. Las cianobacterias son los microbios fotosintéticos dominantes, cuya actividad eleva el pH local, lo que, junto con las actividades de la comunidad microbiana heterotrófica asociada, fomenta la precipitación de carbonatos. Las sustancias poliméricas extracelulares pegajosas producidas por los microbios también atrapan los granos detríticos. Los microbiolitos pueden tener capas acumulativas (estromatolitos) o una estructura más coagulada (trombolitos), y ambos son abundantes en el registro de rocas, con algunos que datan de hasta 3500 millones de años (anteriores a la evolución de la fotosíntesis oxigenada, y por lo tanto plantean preguntas sobre los microbios responsable de su formación). Las capas o coágulos típicamente representan biopelículas o colonias de cianobacterias, respectivamente (Gischler et al., 2008). E) Formación de hierro en bandas en Fortescue Falls, Australia, con franjas ricas en hierro (bandas más oscuras) y sílice (bandas más claras) formadas a partir del hierro oxidado que se hunde en el fondo marino, principalmente en el Eón de Archean. La forma en que los minerales de hierro ferroso se oxidaron en la Tierra primitiva aún está en debate. El mecanismo puede haber sido la fotosíntesis oxigenada por los antepasados de las cianobacterias modernas o la fotosíntesis dependiente de hierro, que no requiere ni produce oxígeno (Robbins et al., 2019; Thompson et al., 2019). Foto A de la NASA (<https://earthobservatory.nasa.gov>), B de Immanuel Giel bajo la licencia Creative Commons Attribution-Share

Dos grupos eucariotas diversos y distintos, los hongos con sus redes de hifas y cuerpos fructíferos (Fig. 11), y los mohos de limo con sus células multinucleadas masivas y cuerpos fructíferos (Fig. 12), proporcionan una representación visual fascinante y a menudo hermosa del mundo microbiano. Willis (2018) y Kew Gardens (Londres, UK) proporcionan información importante sobre el estado de los hongos del mundo: Por un lado, se encargan del mantenimiento y actualización de la página web sobre hongos preciosos, mientras que Glime (2019) proporciona información bien ilustrada sobre los mohos de limo.

Los hongos son atractivos para los niños dado que a menudo son morfológicamente diferentes, y los cuerpos fructíferos de basidiomicetos están impregnados de folclore; por ejemplo, la *Amanita muscaria* no solo posee propiedades insecticidas y alucinógenas, sino también es hogar de elfos y pequeños seres mitológicos. Los cuerpos fructíferos también son fascinantes porque son dinámicos, cambian de forma y a menudo colorean y huelen a medida que envejecen. A veces se los puede ver liberando una gran cantidad de esporas (por ejemplo, bolas de espuma). Las redes de hifas fúngicas se pueden ver a simple vista mirando pan mohoso, madera degradada y debajo de la hojarasca en el lecho del bosque. Del mismo modo, los rizomorfos fúngicos, como los de *Armillaria mellea*, se pueden identificar en el campo. La belleza de los cuerpos efímeros de fructificación, junto con la extensión y la longevidad de muchos micelios fúngicos (los organismos más grandes son hongos: el micelio de *Armillaria mellea* puede extenderse por varios kilómetros), fascina a los niños y puede estimular la discusión sobre los ciclos de vida fúngicos, la defensa química y señalización (y enlace a la producción de antimicrobianos), interacciones positivas y negativas con plantas y roles en la biodegradación.



**Fig. 11. Fungi.** A) "Anillo de hadas" de un hongo Basidiomycete no identificado alrededor de un pino en la Universidad de Warwick, Reino Unido, una manifestación superficial de una red micelial subterránea. B) Colonia de la levadura rica en melanina *Hortaea werneckii* (campo de visión es ~ 1 cm<sup>2</sup>). C) Tres cuerpos fructíferos gigantes de *Calvatia gigantea* en Wivenhoe Woods, Reino Unido, cada uno de unos 30 cm de diámetro. El himenio, es decir, la capa de tejido a partir de la cual se forman las esporas es interno. Una muestra de este tamaño liberaría alrededor de cinco billones de esporas (Li, 2011). D) Cuerpos de fructificación de basidiomicetos en el borde de madera en descomposición. E) Cuerpos fructíferos de un basidiomiceto (*Inonotus hispidus*), alojado en el tronco de un árbol en el norte de Inglaterra. La hispidina, un metabolito fenólico producido por esta especie, es un antioxidante con posibles aplicaciones farmacéuticas. F) Cuerpo fructífero de *Amanita muscaria* en Wivenhoe Woods, Reino Unido. G) Cuerpo de fructificación de Amethyst Deceiver (*Laccaria* sp.) En Wivenhoe Woods, Reino

Unido. H) Imagen estereoscópica de la parte inferior de un cuerpo fructífero de basidiomiceto con el himenio alojado en branquias (supuestamente identificado como *Hygrophorus* sp.; el radio es de 1 cm approx.). I) Roya (muy probablemente *Puccinia aristidae*) sobre un ejemplar de *Chenopodium album* en un jardín en St. Saturnin-les-Avignon, Francia. Las copiosas urediosporas se han extendido sobre las piedras detrás de la planta, coloreándolas de naranja. J) Rizomorfos fúngicos de un hongo parásito saprófito (*Armillaria mellea*) en el tronco de un árbol podrido en Broc, Suiza. Estas estructuras son muy resistentes y pueden explorar sus entornos en varios metros de distancia para buscar nutrientes y luego translocar los fluidos bidireccionalmente. Hay muchos recursos excelentes para la enseñanza de la micología, en particular "Paquete de actividades de la escuela primaria de hongos". Fotos A, C, D, E, F, G de Terry McGenity, B de Polona Zalar, H de Saskia Bindschedler, I de Cindy Morris y J de Andrea Lohberger.



**Fig. 12.** A) Plasmodio de *Physarum polycephalum* (ameba multinucleada unicelular capaz de propagarse rápidamente) sobre madera podrida. B) Cuerpo fructífero (esporocarpo) de *Diachea radiata* en la hojarasca de un árbol de hoja perenne, *Bellucia grossularioides*, cerca de Yangambi en la República Democrática del Congo. Se pueden ver excelentes videos de estos fascinantes organismos en Internet. Foto A por Frankenstoen, bajo la licencia Genérica Creative Commons Attribution 2.5, y B por Myriam de Haan, Jardín Botánico Meise.

### Sugerencias

Los microbios son organismos ubicuos, y tanto las universidades locales como otro tipo de organizaciones para la protección de la vida silvestre con frecuencia están predispuestos a ofrecer consejos así como organizar visitas y/o actividades. Aquí, enumeramos una variedad de entornos donde la microbiología se puede ver en acción.

- Edificios antiguos, monumentos, muros, etc., con crecimientos de algas, hongos, bacterias, arqueas y líquenes (Fig. 9)
- Se pueden visitar los cementerios locales para introducir los líquenes a los estudiantes, incluida una discusión sobre la naturaleza de su simbiosis, su uso como indicadores de contaminación del aire y cómo el tamaño y la diversidad de su colonia pueden relacionarse con la fecha en que se erigió la lápida (Samsudin et al. , 2012).
- Pinturas y tapices degradados y descoloridos en edificios antiguos.
- Esporas de hongos, moho en duchas / lavabos alrededor de la escuela, descomposición, podredumbre seca, deterioro de alimentos.
- Formaciones geológicas (potencialmente) resultantes de microbios y sus actividades, p. Ej. tiza, estromatolitos, tierra de diatomeas, formaciones de hierro en bandas (Fig. 10); (Una buena pregunta a realizar a los alumnos es si los microbios construyeron la Catedral de San Pablo en Londres, para iniciar una conversación sobre el papel de las biopelículas microbianas en la fabricación de granos de arena oolíticos que se litifican para formar piedra caliza oolítica)
- Estromatolitos modernos (pregunte por qué no son tan comunes ahora como en el pasado) (Fig. 10)
- Los suelos plantean numerosas preguntas microbiológicas: ¿Cuál es el papel microbiano en la formación, estructura y salud del suelo? ¿Qué microbios y compuestos volátiles derivados son responsables del olor del suelo?; ¿Qué microbios forman costras del suelo del desierto? (Fig. 9);

¿Qué otras marcas microbianas macroscópicas se pueden ver (por ejemplo, nódulos radiculares fijadores de nitrógeno; Fig.5)

- Excursiones en bosques / pastizales para ver y discutir sobre los hongos y mohos allí presentes: identificación de hongos, cuerpos fructíferos y sus esporas; hongos mutualistas de plantas con estructuras ectomicorrícicas; hongos patógenos con manchas en las hojas (mildiu, manchas de alquitrán de arce, rizomorfos de *Armillaria*); hongos saprofitos (redes debajo de la hojarasca, pudriciones blancas y marrones); Los mohos limosos son evolutivamente distintos de los hongos, pero a menudo crecen en hábitats similares y se alimentan de microbios (Fig. 11, 12)
- Marismas, manglares y sus esteras microbianas (distinga diatomeas, euglenoides, etc.), pregunte si hay fotótrofos bacterianos anoxigenados y use material para hacer una columna Winogradsky; busque esteras blancas de bacterias oxidantes de azufre) (Fig. 13)
- La costa, el río, el suelo, p. identificando y cuantificando plásticos, preguntando por qué los polímeros (bio) se degradan a diferentes velocidades
- Cuerpos de agua eutróficos / no eutróficos (distinguir diferentes algas eucariotas y cianobacterias) (Fig. 14)
- Estanques anaeróbicos versus arroyos aireados con presas construidas (tenga en cuenta el olor y las burbujas del sedimento)
- Arrecifes de coral (endosimbiontes fotosintéticos de *Symbiodinium*; capa mucosa rica en microbios)
- Hongos bioluminiscentes y bioluminiscencia en el mar causados por dinoflagelados eucariotas de vida libre o endosimbiontes bacterianos de calamares y peces (siga esto con el aislamiento de bacterias bioluminiscentes, por ejemplo, frotándose los ojos de calamar en placas de agar marino)
- Cuevas con biopelículas, biominerales (por ejemplo, leche de luna), pinturas hechas con pigmentos microbianos, arte rupestre biodeterioro
- Montones de compost (pregunte por qué están calientes)
- Nidos de insectos, p. Ej. hormigueros, termiteros o colmenas de abejas para discutir: asociaciones de insectos y microorganismos, jardines de hongos como fuente de alimento, control microbiológico de patógenos para la colonia de insectos, fuentes de nuevos fármacos antimicrobianos
- Fuentes de azufre (bacterias fototróficas anóxicas, bacterias filamentosas oxidantes de azufre, bacterias reductoras de sulfato y olor a huevos podridos)
- Fuentes de hierro (oxidación de hierro y fuentes microbianas para reducir el hierro)
- Brillos iridiscentes en la superficie de los estanques, charcos y zanjas que a veces se confunden con los derrames de petróleo, pero que son causados por bacterias oxidantes de hierro y lípidos liberados por las células.
- Paisajes industriales degradados, p. ríos acidificados por drenaje de minas (por ejemplo, Rio Tinto, España), antiguos sitios mineros, fábricas de gas, plantas químicas en restauración por bioremediación o fitorremediación
- Ambientes extremos, especialmente donde las comunidades microbianas dominantes son visibles, p. salinas rojas, lagos de sal (Fig. 2), lagos alcalinos (con flamencos que se alimentan de las especies de cianobacterias frecuentemente dominantes, *Arthrospira platensis*), manantiales termales viscosos y coloridos, nieve rosa o roja, también llamada sandía o nieve de sangre (a menudo con la dominante especie de microalgas *Chlamydomonas nivalis*, que pertenece a la misma familia que *Dunaliella salina*; Fig.2)



**Fig.13. Manifestaciones microbianas de actividades fototróficas y de reducción-oxidación.**

A) Cantos rodados y guijarros en Río Sucio (Río sucio) en Costa Rica, que son de color naranja debido a la presencia de schwertmannita, un mineral generado por la actividad de bacterias oxidantes de hierro, como *Gallionella* spp. (que utilizan hierro reducido como forma de energía, oxidándolo para formar minerales oxidados). B) Cáscara de sedimento plano en el lodo que muestra una biopelícula gelatinosa gruesa rica en diatomeas (microalgas fototróficas eucariotas con paredes de sílice) en la parte superior del sedimento rico en arcilla. Las diatomeas son los principales productores primarios en este ecosistema y, mediante la producción de sustancias poliméricas extracelulares pegajosas, estabilizan el sedimento, lo que limita la erosión costera. C) Sedimento tubular del lodo de Tillingham, Reino Unido (los agujeros son de unos 8 cm de diámetro), mostrando las esteras doradas formadas por diatomeas en la superficie, y la transición a sedimento gris-negro en la profundidad causada por bacterias anaerobias reductoras de sulfato que liberan sulfuro que reacciona con hierro para formar sulfuro de hierro negro. D) Núcleo de sedimento extraído de C, incubado en la luz, que muestra cómo las diatomeas y otros microbios fototróficos producen burbujas de oxígeno

visibles en la superficie. E) Un corte transversal del sedimento que se muestra en D, que ilustra cómo los animales excavadores como el gusano de trazo (*Hediste diversicolor*) pueden introducir oxígeno más profundamente en el sedimento y así fomentar la actividad de los microbios aeróbicos, como los microbios oxidantes de hierro, que conducen a la formación de un anillo de óxido alrededor de los agujeros. G) Quemando metano del lago en la Universidad de York, Reino Unido. El sedimento se agitó para liberar burbujas de metano (producidas por *Archaea metanogénica* anaeróbica), recogido en un embudo y posteriormente se le prendió fuego. Este fenómeno puede ocurrir sin ayuda humana, con la luz fantasmal resultante que engendra mitos y leyendas en todo el mundo, como Will-o'-the-Wisp y los fuegos fatuos. H) Columnas Winogradsky creadas con sedimento y celulosa de una marisma de Essex. La columna de la izquierda está dominada por fotótrofos anoxigenicos de azufre morado, mientras que la columna de la derecha está dominada por fotótrofos anoxigenicos de azufre verde, los cuales son bacterias que usan la luz como fuente de energía, pero en lugar de dividir el agua y generar oxígeno (como en las diatomeas en D) dividen el sulfuro de hidrógeno. El sulfuro es producido por bacterias anaerobias reductoras de sulfato que se encuentran en el sedimento negro. Foto A por Max Chavarría, B por Graham J.C. Underwood, C, D E, G por Terry Mcenity, F por Paul Shields y James Chong.

### *Algunos temas de discusión*

Mientras explora el entorno construido con sus alumnos, es pertinente preguntarles: ¿Por qué las estructuras de madera se deterioran más rápidamente que las de piedra?, ¿Por qué necesitan más protección contra los microbios y por qué los marcos de ventanas y fascias de madera han sido reemplazados en gran medida por el plástico? El papel de los microbios celulolíticos y ligninolíticos en el deterioro debería plantearse de una forma natural tras estas preguntas (Fig. 14). Posteriormente, es probable que el problema del plástico sea un tema de discusión, con preguntas como: ¿Por qué la mayoría de los plásticos son resistentes a la biodegradación y cuáles son los problemas globales causados por los plásticos no biodegradables?, ¿De dónde podemos obtener plásticos biodegradables (microbios, plantas, crustáceos, etc.)? Estas preguntas pueden provocar que los estudiantes diseñen experimentos para evaluar la biodegradabilidad de diferentes polímeros (Fig. 8) y, por lo tanto, llevarlos a establecer cultivos para cultivar microbios degradantes de polímeros.



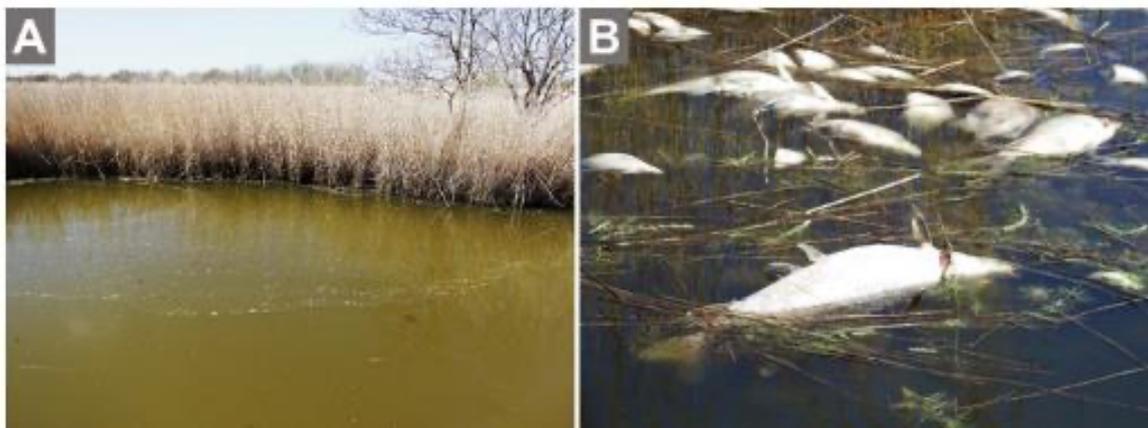
**Fig. 14.** Se pueden encontrar objetos en descomposición en todo tipo de entornos y proporcionan la base para discutir la microbiología subyacente de la descomposición y el reciclaje de nutrientes. Por ejemplo, se puede preguntar a los niños quién está comiendo este bote podrido en la orilla del río Deben, cerca de Woodbridge, Reino Unido, y cómo lo hacen, introduciendo a los niños a las enzimas extracelulares e intracelulares. Se puede alentar a los niños a considerar dónde más se encuentran la podredumbre y el reciclaje (por ejemplo, hojas en el bosque, alimentos en el refrigerador, cercas en el jardín, desechos en los vertederos), cuándo es beneficioso / dañino y cómo se puede inducir o prevenir. Foto de Kenneth Timmis.

Otro tema interesante para grupos de una edad ya avanzada es el ciclo eterno de la vida y la muerte, y la participación de los microbios en este proceso. Una excursión focalizada en la asignatura de Historia puede ser también aprovechada para realizar una visita a un cementerio local. Esto puede llevar a una discusión sobre la cremación, las huellas de carbono de los diferentes medios de eliminación de nuestros restos corpóreos (incluido el compostaje), el tema de los empastes de mercurio en los dientes y las deposiciones de mercurio existentes en lugares a favor del viento de los crematorios, la resistencia al mercurio en los microbios y la aplicación de microbios resistentes al mercurio en la desintoxicación de afluentes de desagües contaminados con mercurio (Canstein et al., 1999).

Es valioso combinar diferentes actividades de campo para obtener una comprensión más completa e integrada de la ecología de un sistema, brindando oportunidades para considerar las redes tróficas, el ciclo de nutrientes, etc. (Barberán et al., 2016). Al investigar un estanque de rocas, además de usar una lupa para ver el zooplancton, un microscopio puede hacer visibles los microbios e iniciar una discusión sobre su abundancia e importancia en diversos procesos del ecosistema, señalando que cada milímetro cúbico (el tamaño de una semilla de amapola) alberga aproximadamente 10.000 virus (Suttle, 2007), 600 bacterias (incluidas 150 cianobacterias), nueve

microalgas, seis Archaea (Karner et al., 2001) y, en promedio, menos de un protozoo (Zubkov et al., 2007). Entonces, si pudiera tomar muestras a 100 m por debajo de la superficie del agua de mar, la contribución relativa de Archaea aumentaría enormemente, ya que en algunos lugares su ocurrencia es la misma que la de las Bacterias (Karner et al., 2001).

Los lagos de agua dulce son generalmente transparentes debido a concentraciones relativamente bajas de macronutrientes, nitrógeno y fósforo, lo que limita el crecimiento y la abundancia de microbios fototróficos. Pero, con un aporte estacional o esporádico de nutrientes (p. Ej., Escorrentía de tierras agrícolas), el cuerpo de agua puede volverse de un color verde turbio y profundo debido a las densas floraciones de microbios, como cianobacterias o microalgas eucariotas, un proceso conocida como eutrofización (Chislock et al., 2013). A medida que mueren las microalgas, los microbios heterótrofos aeróbicos consumen sus restos orgánicos, lo que conduce al agotamiento del oxígeno, lo que puede provocar la muerte de los animales acuáticos que dependen del oxígeno, incluidos los peces. Además, algunas microalgas producen toxinas que envenenan a los animales que viven en el lago (Fig. 15) y, cuando esto sucede, los niños tienen prohibido nadar o pescar en el lago. Tener la flexibilidad para que la clase salga e inspeccione tal flor, especialmente cuando está en las noticias locales, puede brindar múltiples beneficios educativos. Tal excursión no solo estimulará una discusión sobre los procesos microbiológicos subyacentes, sino que también debería conducir a una exploración del vínculo entre nuestros requisitos alimentarios, las prácticas agrícolas y sus efectos ambientales. Además, es probable que las familias interesadas pregunten a sus hijos / hermanos sobre su visita y, por lo tanto, continúen el proceso de aprendizaje no solo para el estudiante sino para toda la familia.



**Fig. 15. Floraciones de algas y algas nocivas.** A) Floración del dinoflagelado, *Pymnesium parvum* en Norfolk Broads, Reino Unido. Este dinoflagelado es una microalga eucariota fotosintética que produce una toxina que puede ocasionar importantes daños económicos. B) Algunos de los cerca de 30,000 peces muertos por el dinoflagelado floreciente, *Pymnesium parvum* en Norfolk Broads, Reino Unido en abril de 2015. *Photos propiedad de Martin Rejzek.*

## ***7. Museos, zoológicos, acuarios y jardines botánicos***

### *Contexto*

El papel central de la mayoría de los museos es apoyar las visitas escolares, aunque en muchos casos tienen lo "visible", en lugar de lo "invisible", en exhibición. Sin embargo, aquellos con objetos antiguos o recientes, casi siempre se enfrentan a problemas de conservación, incluida la mitigación del deterioro mediado por los microorganismos. Por lo tanto, una visita a dichos museos puede combinarse con otros programas de conservación basados en microorganismos.

Además, hay museos y exposiciones dedicados específicamente a los microorganismos y sus actividades, que reflejan la fascinación del público por éstos, y los museos así contribuyen y promueven los Objetivos de Desarrollo Sostenible (McGhie, 2019; Fig 16). Luego encontramos los zoológicos, acuarios y jardines botánicos, los cuales pueden tener pericia en infecciones microbianas, métodos de control biológico, microbiomas; los hongos a veces se exhiben en los jardines botánicos (como por ej. en el Jardín Kew en Londres; Willis, 2018) mientras que los mohos han sido recientemente introducidos en la colección del Parc Zoologique de Paris. Las visitas a establos, santuarios de animales u hogares para perros/gatos pueden proporcionar un medio más local y rentable para combinar el amor típico de los niños por los animales y aprender sobre la contribución microbiana a la salud y la enfermedad. Sin embargo, para tales excursiones, la experiencia en microbiología probablemente deberá provenir del maestro o de un colaborador externo.

### *Sugerencias*

La oficina de coordinación de visitas en museos locales, zoológicos, acuarios o jardines botánicos debe poder asesorar sobre investigaciones, exposiciones o actividades microbiológicas que podrían formar parte de una visita escolar. En el presente editorial, destacamos algunos museos y exposiciones centrados en la microbiología. Como el hogar de tantos innovadores microbiológicos, y de algunos de los museos más inusuales, no es sorprendente que los Países Bajos alberguen el museo más grande del mundo dedicado a la microbiología; El Museo Micropia en Amsterdam es una rareza entre los museos al enfocarse en la microbiología de una manera tan atractiva e impactante. Otro se encuentra en el Instituto Butantan en Brasil. La Colección Wellcome Trust, Londres, Reino Unido, ha mostrado durante muchos años al público el papel de los microorganismos en las enfermedades y la salud humana, y existe una creciente adopción de exhibiciones y actividades microbiológicas itinerantes en otros museos, tales como: la exposición BioArt y Bacteria, y la exposición Mundo Bacteriano con su gigante *Escherichia coli* inflable (Fig. 16), la exposición Microbiota en La Cité des Sciences en París, Francia, la exposición Brote (“Outbreak”) en el Museo Smithsonian de las Ciencias y el Mundo en una gota: exploraciones fotográficas de vida microbiana en el Museo de Historia Natural de Harvard, EE. UU. El Proyecto Eden (Cornwall, Reino Unido) se centra en los Mundos Invisibles. La cabina de fotografía bioluminiscente fue una exposición interactiva itinerante que utilizó bioluminiscencia bacteriana para permitir imágenes fantasmales de humanos. Una exposición innovadora e inmersiva en el Exploratorium Science Museum en San Francisco, EE. UU. Allí se utilizó el comportamiento sensible a la luz de la especie *Euglena* para dar la impresión de que el microorganismo eucariota estaba bailando con los visitantes mientras en realidad evitaba su sombra (Lam et al., 2019). Más inusualmente, a un conjunto de datos de metagenómica microbiana se le han puesto música (Larsen, 2016), y las burbujas de los microorganismos fermentativos se han utilizado para tocar melodías relajantes en una exhibición interactiva llamada Fermentophone (Fig.16). Es importante destacar que hay también museos asociados con microbiólogos inspiradores, como por ejemplo el Museo Beijerinck en Delft (Países Bajos), el Museo del Instituto Robert Koch en Berlín (Alemania), el museo de Alexander Fleming en Londres (Reino Unido) y la casa de Louis Pasteur en Arbois (Francia).

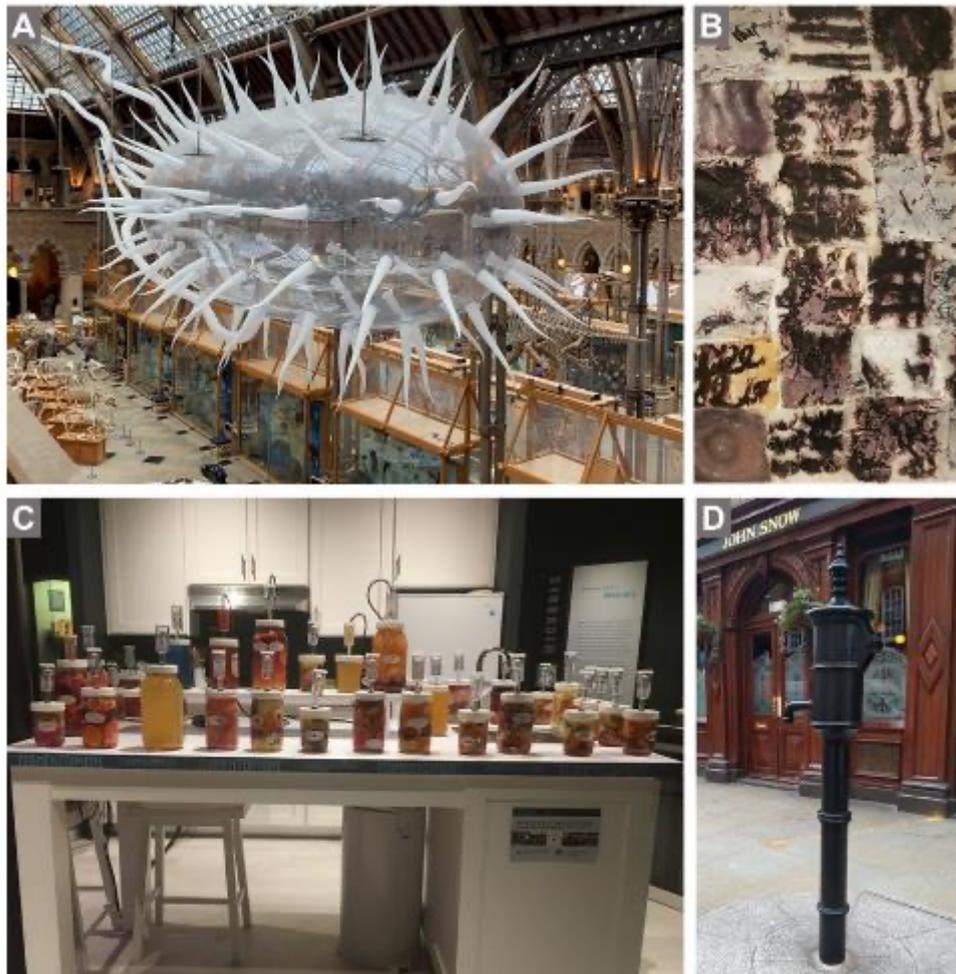


Fig. 16. **Exposiciones microbianas.** A) La escultura gigante de *E. coli* creada por Luke Jerram fue la pieza central de la Exposición Mundial de Bacterias. La pieza de 28 metros de largo es 5 millones de veces más grande que una célula microbiana real y destaca algunas de sus estructuras externas, como flagelos y pilis. B) "La búsqueda de nuevos antimicrobianos" creada por Anna Dumitriu en colaboración con Maggie Smith y Nicholas Read, fue parte de la exposición "BioArt and Bacteria". Esta pieza enmarcada está compuesta de seda, bacterias inactivadas de *Streptomyces* salvajes y genéticamente modificadas, madera, cartón y vidrio. Ambas exhibiciones se mostraron en el Museo de Historia Natural de Oxford, Reino Unido. Redfern y col. (2020) proporcionan más ejemplos de exposiciones que tienen como objetivo resaltar el tema de la resistencia a los antibióticos. C) El Fermentophone, diseñado por Joshua Rosenstock, consiste en tarros de fermentación de frutas y verduras que producen burbujas de CO<sub>2</sub>, que son recogidas por micrófonos sumergidos y convertidas a diferentes sonidos, creando una relajante y estéticamente agradable visualización, además de comestible. Más aún, los visitantes pueden hacer sus propios fermentos y agregarlos a la exhibición viva, que se muestra aquí en acción en el Museo de Historia Natural de Harvard, EE. UU. D) La réplica de la bomba de agua ubicada en Broad Street afuera de la casa de John Snow en Londres, Reino Unido, es un ejemplo de la historia de la microbiología, donde se inició la epidemiología. Mediante un trabajo de detective meticuloso, el hombre de Yorkshire, John Snow, identificó la bomba de agua como la fuente de un brote de cólera en 1854, salvando vidas a corto plazo al quitar el mango de la bomba y a largo plazo al reconocer el papel de las aguas residuales como la fuente de la enfermedad transmitida por el agua. Hay microbiólogos famosos e historias microbiológicas asociadas con muchas ciudades, que los maestros pueden incluir en una excursión para animar el tema. Foto A de André Antunes, B de Carol Verheeecke-Vaessen, C de Joshua Rosenstock y D de Mairi McGenity.

#### *Algunos temas de discusión*

Los niños tienden a ser conscientes del valor de los organismos superiores, como el de las abejas melíferas y su rol como polinizadores, y reconocen el poder y la belleza de las especies centinelas en peligro de extinción como los leopardos de Amur. Los adolescentes también entienden el valor más amplio de la biodiversidad y su conservación. Por lo tanto, una visita a un zoológico, acuario, jardín botánico o museo ofrece una oportunidad ideal para alentar el debate sobre la

contribución de los microorganismos en la salud y los esfuerzos en la conservación de los animales (Bahrndorff et al., 2016; Trevelline et al., 2019) y las plantas (Berg y Raaijmakers, 2018). La dificultad para mantener a algunos animales en zoológicos, como los perezosos de tres dedos, se ha atribuido a la obtención de la dieta adecuada para apoyar sus microbiomas internos y externos especializados (Dyer, 2003; Pauli et al., 2014; Dill-McFarland et al., 2016; Fig.17). Estos animales son fascinantes además desde el punto de vista microbiológico ya que transportan en las grietas de su pelaje pequeños “huertos” microbianos portátiles que le proporcionan valiosos nutrientes a pedido (Fig. 17). Los flamencos en los zoológicos pueden perder su pigmentación rosa, ya que no se alimentan de sus habituales cianobacterias ricas en carotenoides y microalgas (directa o indirectamente), que imparten la coloración rosa en su hábitat natural (Dyer, 2003).

Los emblemas para escuelas, pueblos, estados, etc., es que pueden entregar mensajes poderosos sobre temas de importancia local y servir como fuentes de orgullo cívico. Nueva Jersey tiene a *Streptomyces griseus* productor de antibióticos como su microorganismo estatal, mientras que Oregon, famosa por su producción de cerveza artesanal, tiene *Saccharomyces cerevisiae*, por lo que los microorganismos han sido adoptados como emblemas importantes. Por lo tanto, una excursión de microbiología puede mejorarse pidiéndoles a los niños que piensen qué microorganismos merece ser considerado para su emblema escolar, municipal o estatal. Los adolescentes pueden ser desafiados a considerar qué microorganismo desean conservar y por qué, por ejemplo por su rareza, belleza o valor para los humanos. Esta pregunta seguramente evocará una respuesta que puede explorarse más a fondo discutiendo por qué tenemos una menor probabilidad innata de querer conservar los organismos pequeños, pero por qué deberíamos hacerlo.

Será informativo considerar las consecuencias de las extinciones microbianas y cómo conservar los microorganismos; por ejemplo, centrándose en los hábitats, los recursos genéticos de los hábitats o en microorganismos cultivados (Cockell y Jones, 2009; Paul y Mormile, 2017). En el caso de proteger o preservar hábitats, que por supuesto es clave para proteger especies de plantas y animales en peligro de extinción, los niños pueden/deben ser alentados a desarrollar un sentido de orgullo en sus ecosistemas locales a medida que comienzan a aprender sobre los microorganismos que se encuentran allí. Al considerar la preservación de los cultivos microbianos, los niños pueden conocer los valiosos papeles que desempeñan los Centros de Recursos Biológicos de Dominio Microbiano (Antunes et al., 2016), que también pueden ser una excursión interesante.

Finalmente, la mayoría de los zoológicos tienen hormigas, generalmente hormigas cortadoras de hojas tropicales, que pueden provocar debates sobre sus interacciones con los microorganismos, especialmente las diferentes formas en que cultivan hongos y el papel de las bacterias productoras de antibióticos asociadas (Chomicki y Renner, 2017; Whitaker y Stolzmann, 2019). Los niños están particularmente fascinados por las interacciones que inducen cambios de comportamiento extraños en los animales, por ejemplo, el hongo *Ophiocordyceps* sp. que utiliza hormigas carpinteras como vehículo de reproducción y dispersión, creando las llamadas hormigas zombis (Hughes et al., 2011; Araújo y Hughes, 2019; Fig. 17). Y por supuesto, esto puede desencadenar discusiones sobre los variados efectos de comportamiento que las especies de *Wolbachia* tienen en diversos insectos hospedadores (ver Sección 5).



**Fig. 17. Interacciones animales-microorganismo inusuales y visibles.** A) Un gorgojo adulto en un árbol cubierto de líquenes (en Alta Floresta, estado de Mato Grosso, en la sección sur de la Amazonía brasileña) infectado con el hongo *Ophiocordyceps curculionum*. Los objetos que parecen antenas con extremos anaranjados/rojos son en realidad cuerpos fructíferos fúngicos. Las especies de *Ophiocordyceps* son parásitos de escarabajos y otros insectos. El comportamiento del escarabajo infectado cambia para que aterrice a cierta altura (~ 1 m) en el tronco de un árbol. Cuando infecta a las hormigas, modifican el comportamiento de su hospedero, convirtiéndolas en "zombis" que se mueven a lo largo de la vegetación, bloqueando sus mandíbulas en ubicaciones precisas de la parte inferior de las hojas donde se optimiza el desarrollo de hongos. Las hormigas fijas e infectadas generalmente se colocan sobre senderos de alimentación para que las esporas de *Ophiocordyceps* puedan infectar a otras hormigas (Araújo y Hughes, 2019). B) Un perezoso macho de tres dedos de garganta marrón con pelaje verde. El pelaje de los perezosos tiene grietas transversales únicas que retienen la humedad y, por lo tanto, apoyan el crecimiento hidropónico de una amplia gama de microalgas y cianobacterias eucariotas. Los perezosos comen las microalgas altamente digeribles y ricas en lípidos, que complementan su dieta pobre consistente exclusivamente en hojas (Pauli et al., 2014). Fotos de Margaret Adams.

### Consejos para preparar una excursión.

Behrendt y Franklin (2014) y el Consejo para Aprender afuera de la Clase (The Council for Learning Outside the Classroom LOfC) ofrecen consejos útiles sobre cómo ejecutar y evaluar actividades, incluidas las visitas y excursiones. Existe una gran cantidad de evidencia que muestra que el aprendizaje activo promueve el rendimiento de los estudiantes (Freeman et al., 2014). Por lo tanto, para obtener el máximo beneficio de las excursiones, es importante que el anfitrión desarrolle actividades atractivas y apropiadas para la edad. Al enseñar microbiología a niños pequeños, el enfoque debe estar en el descubrimiento, la maravilla y el asombro hacia los microorganismos, el respeto por los mismos y la comprensión de que son miembros del mundo natural como todos los demás organismos más familiares. Luego, los niños pueden conocer los roles que desempeñan los microorganismos y los servicios que prestan, como el reciclaje y la degradación. Para los adolescentes, puede haber un mayor enfoque en problemas globales y la integración/redes de procesos microbianos.

Los siguientes puntos proporcionan algunos consejos generales y algunos específicos de microbiología que pueden ser útiles al prepararse para una excursión.

1. Infórmese sobre la disponibilidad de posibles excursiones de interés microbiológico dentro de un radio práctico de la escuela (las excursiones más alejadas también se pueden realizar en ocasiones especiales o excursiones conjuntas con otras escuelas).
2. Decidir si solo se puede realizar una o más excursiones.
3. Familiarícese con los procesos microbiológicamente relevantes.

4. Póngase en contacto con varias organizaciones y haga preguntas, tales como:
  - a. Si es posible una visita
  - b. Qué temas serán cubiertos
  - c. Si han sido anfitriones de grupos escolares anteriormente y, de ser así, quiénes fueron los maestros principales. Se puede contactar a uno o más de estos para una evaluación y asesoramiento sobre cómo se pueden maximizar los beneficios.
  - d. Si existen problemas logísticos, el tamaño de las habitaciones que se visitarán es adecuado para el número integrantes del grupo (una habitación con capacidad para ocho no es útil para una clase de 30, que se extenderá por el pasillo y no verá/escuchará qué está pasando)
  - e. Si se puede mostrar/discutir cualquier otra cosa de interés.
5. Decida cuáles de las posibilidades son las mejores opciones para la clase, seleccione la mejor y tenga al menos una en reserva. Consulte al menos dos, como se indica a continuación, para obtener una comparación.
6. Haga una cita para conocer a la/las persona/personas que organizan/dirigen la visita en el sitio. Pregunte si sería posible conocer también a algún personal de reemplazo que se haría cargo, en caso de que una enfermedad o cualquier otra cosa impida que la persona a cargo no esté disponible ese día.
7. Durante la visita, trate de ver de primera mano lo que se mostrará y explicará a la clase, o lo que se experimentará, y determine:
  - a. cómo preparan una visita de clase
  - b. qué se introducirá y explicará específicamente
  - c. si la edad y el nivel de conocimiento de los niños son apropiados para la visita, y si la información que se presentará durante la excursión coincide con los requisitos del grupo
  - d. qué oportunidades existen para actividades prácticas
  - e. el presentador propuesto: proporción de estudiantes - trate de tener grupos pequeños para maximizar las interacciones
  - f. qué cuestiones de seguridad deben tenerse en cuenta para completar una evaluación exhaustiva de riesgos
  - g. si las instalaciones son adecuadas para estudiantes con discapacidades o necesidades especiales o si estarán disponibles o si se pueden realizar los ajustes necesarios.
8. Haga hincapié en el valor del humor, interactividad y entusiasmo en las presentaciones/explicaciones, en las actividades prácticas y de dar tiempo suficiente para preguntas, debates y moverse por el lugar.
9. Evaluar la capacidad del presentador/presentadores para involucrar a los niños, comunicarse y crear interés y entusiasmo por el tema: las personas extrovertidas, humorísticas (bulliciosas) - animadores - son preferibles a las personas calladas, académicas y aquellas que no pueden proyectar sus voces a la parte de atrás del grupo.
10. Solicite posibles fechas de visita compatibles con su propio horario de clases.
11. Después de marcar más de una opción, discuta las posibles visitas con colegas que tengan experiencia en excursiones de clase y/o experiencia microbiológica.
12. Seleccione la que sea más informativa, atractiva y entretenida para la clase, luego fije la fecha y hora de la visita. Confirme los detalles de los temas que se presentarán a la clase y verifique que el personal de reemplazo estará en espera en caso de que las personas responsables no estén disponibles.
13. En una discusión de seguimiento con el anfitrión seleccionado:

- a. Explore cualquier tema o enfoque adicional o alternativo desencadenado por la visita que pueda ser valioso para los niños visitantes
  - b. Prepárese para la excursión, solicite literatura, idealmente incluyendo un resumen, y explore videos en línea que aborden los procesos microbianos que se mostrarán (varios pueden estar disponibles como parte de la Iniciativa de Alfabetización en Microbiología).
14. Antes de la visita, en la medida de lo posible, enseñe la microbiología relevante a la clase, discuta la visita, pida a los niños que preparen/sugieran preguntas.
15. Diseñe hojas de trabajo, o use material proporcionado por su anfitrión, para usar durante la visita, incluido si es relevante, la posibilidad de dibujar imágenes bajo el microscopio y explore actividades de seguimiento después de la visita.
16. Considere permitir que los niños se lleven a casa un recuerdo microbiológico, por ejemplo. realizando tarjetas postales o calendarios a partir de imágenes de sus cultivos de agar o de imágenes de micro/estereoscópicas.
17. ¡Disfrutar!
18. Luego, evalúe qué salió bien y qué podría mejorarse para una excursión futura.

### **Acercar las excursiones a la escuela y excursiones virtuales.**

Si bien la novedad de las excursiones proporciona beneficios de aprendizaje incomparables, están claramente asociadas con un costo logístico y financiero. Donde la logística es prohibitiva, o no hay fondos para este propósito, existen alternativas disponibles. La estrategia más obvia es invitar al aula a un orador que trabaje en un área microbiológica. Un exalumno, especialmente si es carismático, que puede relacionarse fácilmente con la clase y las circunstancias locales, puede ser particularmente valioso. Dichos oradores externos pueden usar imágenes, videos, accesorios y cuando sea posible, reemplazar/intercalar una charla con actividades prácticas, según corresponda para la edad del grupo de edad. Por ejemplo, Couto (2017) proporciona una forma imaginativa de introducir *biofilms* o biopelículas a niños de 4 a 6 años, y Vrentas et al. (2011) llevan a los estudiantes a un imaginario MicroSafari. Tales actividades prácticas e interactivas (y más, por ejemplo, la cabeza de un insecto con *Ophiocordyceps* creciendo fuera de ella (Fig. 17), comida maloliente (Fig. 4), sedimento de lodos activados (Fig. 6), generar electricidad a partir de lodos y microorganismos), son particularmente memorables y pueden evocar un interés duradero en la microbiología.

Los oradores y los maestros pueden usar una gran cantidad de recursos, especialmente a través de Internet (por ejemplo, Guarner y Niño, 2016) para atraer a los estudiantes al mundo de los microorganismos. Algunos videos ilustran conceptos importantes que serían mucho más difíciles de transmitir por otros medios. Por ejemplo, el diseño experimental a gran escala y el uso inteligente de las imágenes tomadas en el tiempo dieron como resultado una demostración muy poderosa de la evolución bacteriana en acción mediante el uso de la placa Crecimiento y Evolución Microbiana (del inglés Microbial Evolution and Growth Arena MEGA) (Baym et al., 2016). Las sociedades microbiológicas nacionales e internacionales, junto con muchos centros académicos, proporcionan excelentes recursos en sus sitios web y, además, dada la importancia de los microorganismos para todas las disciplinas científicas, otras sociedades y organizaciones científicas, desde la astrobiología hasta la zoología, tienen recursos centrados en la microbiología. El Programa Internacional para el Descubrimiento de los Océanos (IODP) por ejemplo, tiene recursos útiles para educar a los niños sobre la biosfera profunda. La iniciativa e-Bug de Salud Pública de Inglaterra proporciona un excelente material para escolares de diferentes edades, incluidas lecciones sobre resistencia a los antimicrobianos, cuyo valor para mejorar la

comprensión del problema se ha demostrado por parte de los niños en la India (Fernandes et al., 2019).

Las redes sociales, junto con otros medios de comunicación, presentan noticias de microbiología que pueden disparar debates en clase sobre temas de actualidad y/o controvertidos. Las redes sociales también proporcionan un vehículo para enseñar microbiología, utilizando una variedad de enfoques, desde dibujos animados informativos hasta cursos interactivos (López-Goñi et al., 2016). Los cómics, con sus imágenes, narrativa y metáforas, son una forma divertida de aprender sobre microbiología (Scavone et al., 2019). Hay una creciente disponibilidad de juegos, los del estilo match 4, como Micro-Match de Comic-Bacterias y el Mundo Invisible de Proyecto Edén, así como juegos en línea como los desarrollados por la iniciativa e-Bug de Salud Pública de Inglaterra (Farrell et al., 2011) o el Centro para el Control de Enfermedades (Resuelva el Brote "Solve the Outbreak") y el Museo Americano de Historia Natural (Bacterias en la cafetería). Foldit es un juego de ciencia ciudadana (dirigido a adolescentes y adultos) que aprovecha las habilidades de reconocimiento de patrones humanos y resolución de acertijos para determinar las estructuras de proteínas (Cooper et al., 2010). Un desafío actual es diseñar estructuras de proteínas que bloqueen la interacción de la proteína espiga del coronavirus con las células hospederas, como un paso hacia el desarrollo de fármacos antivirales. La referencia al uso de la microbiología en la ciencia ficción o la cultura popular puede despertar el interés de los niños, pero generalmente debe considerarse como un punto de partida para la discusión, por ejemplo ¿Cuáles son los microorganismos en los lagos de sal rosa que son objeto de un episodio de "Go Jettlers"? Sin embargo, la improbabilidad de que los humanos se infecten con *Ophiocordyceps* sp. y se conviertan en zombies, como se imagina en el videojuego "El último de nosotros" (del inglés "The Last of Us"), puede necesitar acompañamiento.

**Los oradores visitantes permiten la interacción de los niños con microbiólogos profesionales, especialmente en clases estándar en lugar de grandes grupos. Sin embargo, se puede llegar a muchos más niños en edad escolar si más microbiólogos preparan y comparten videos educativos. Los beneficios educativos podrían mejorarse mediante la participación de compañías de producción y maestros para ayudar con la estética y el contenido. Dichos videos en línea brindan más control a los maestros, quienes pueden incorporar el material de video al plan de estudios en el momento más apropiado, pausar el video y discutir puntos clave (o tratar temas de disciplina). El tema de tales videos podría incluir excursiones de microbiología y presentar un fenómeno en torno al cual gira el resto de la presentación, por ejemplo cómo obtener combustible de tus heces. La participación de las empresas comerciales en la producción de ayudas visuales requerirá financiamiento de agencias de financiación y fuentes filantrópicas, a quienes se alienta a dedicar recursos para tales fines.**

Por otro lado, la interacción con los científicos se puede lograr de forma remota, lo cual es particularmente valioso para las comunidades aisladas. Mecanismos notables para hacer esto son "Soy un científico sácame de aquí" y "Skype con un científico". Ambos mecanismos brindan la oportunidad de hacer preguntas, comprender mejor cómo es ser un científico y aprender que los científicos provienen de todos los ámbitos de la vida, elevando así las aspiraciones de los niños. Este último une a los científicos con las aulas de todo el mundo y podría usarse para integrar al científico como participante virtual en partes de una excursión escolar.

Algunas ubicaciones de campo son remotas o de difícil acceso, en cuyo caso las transmisiones en vivo, por ejemplo a través de Facebook, pueden inculcar algo de la emoción de la actividad microbiológica. Un ejemplo reciente de lo más destacado fue realizado por una escuela de

En el futuro, más expediciones de campo a hábitats microbianos inusuales deberían, siempre que sea posible, financiarse, planificarse y ejecutarse de tal manera que se pueda lograr un componente educativo, y la emoción y los logros científicos de la expedición se compartan con niños de diferentes edades. La realidad virtual y la realidad aumentada son ahora opciones viables y extra sensoriales para las escuelas, como simples espectadores tienen un costo entre \$ 5 y 10, junto con aplicaciones gratuitas de realidad virtual en teléfonos inteligentes, permiten una experiencia inmersiva en expediciones, ya sea preparadas (por ejemplo, desde Google Expeditions) o de fabricación casera (Minocha et al., 2018).

formación de posgrado en la Biosfera Hipersalina Profunda (financiada por EU COST Action MedSalt) consistente en un descenso de más de un kilómetro en la mina de sal de Boulby y al Laboratorio Subterráneo de Boulby (Fig.18). La visita coincidió con el evento Mine Analogue Research (MINAR) en el que se probaron herramientas en el "Mars Yard" de la mina de sal para futuras exploraciones planetarias. Las entrevistas y demostraciones subterráneas se compartieron utilizando transmisiones en vivo a escuelas y universidades de todo el mundo, lo que ilustra el interés

intrínseco de los niños en la investigación astrobiológica (Cockell et al., 2019). Los institutos de investigación oceanográfica a menudo filman y ponen a disposición gratuitamente, a veces en tiempo real, sus viajes de investigación, incluidas las inmersiones en aguas profundas por sumergibles (Fig. 18).



**Fig. 18.** Las ubicaciones remotas de campo y las instalaciones de investigación pueden acercarse a los niños a través de transmisiones en vivo a las escuelas. A) Estudiantes que visitan el Laboratorio Subterráneo Boulby de STFC, donde el enfoque es la ciencia de radiación de bajo fondo, incluida la búsqueda de Materia Oscura. Además, el laboratorio contiene salas limpias en las que se minimiza la concentración de partículas en el aire (incluidos los microorganismos), junto con una instalación de astrobiología subterránea profunda. B) Los estudiantes midieron el flujo de metano en estanques saturados de sal construidos en el "Mars Yard" de la mina de sal. C) Comunidad viva en filtraciones hidrotermales en la Cordillera del Océano Medio a una profundidad de agua de 3,030 metros. Esta comunidad animal diversa se basa en microorganismos, principalmente bacterias, que crecen mediante el uso de gases que emanan de los respiraderos hidrotermales. Por ejemplo, las bacterias usan sulfuro (o hidrógeno) para obtener energía y dióxido de carbono para producir biomasa y materia orgánica que sustenta la red alimentaria. Tales microorganismos a menudo se encuentran viviendo simbióticamente en la cámara branquial de las almejas y los camarones. Este tipo de simbiosis entre animales y microbios quimiolitotróficos es muy común, no solo en ambientes inusuales como respiraderos hidrotermales (donde el agua y los gases calentados geotérmicamente escapan de las fisuras) y filtraciones frías (donde el flujo de salida es más difuso y más frío que en los respiraderos hidrotermales), pero también ambientes más normales como los sedimentos marinos intermareales (Dubilier et al., 2008). Las nuevas técnicas proporcionan una visión sin precedentes dentro de la escala micrométrica de tales simbiosis hospedero-microorganismo y sus interacciones metabólicas (Geier et al., 2020). Fotos A y B por Terry McGenity, C por MARUM - Centro de Ciencias Ambientales Marinas, Universidad de Bremen (CC-BY 4.0).

## Discusión

*Las excursiones de escolares dan vida a los microbios y sus actividades y alimentan la emoción del descubrimiento*

Un conocimiento básico de la microbiología es un facilitador esencial de algunas de las nuevas decisiones de política que serán necesarias para lograr el desarrollo sostenible de las sociedades humanas y para revertir las prácticas actuales no sostenibles derivadas de decisiones previas inadecuadamente informadas, por lo que es imperativo que la sociedad se vuelva alfabetizada en microbiología (Timmis, et al, 2019). Para que la sociedad alcance la alfabetización en microbiología, los aspectos relevantes de la microbiología deben convertirse en un componente esencial de la educación básica. Afortunadamente, la amplitud, profundidad y emoción de la microbiología, junto con sus avances dinámicos de investigación, y especialmente los nuevos descubrimientos sobre nuestros microbiomas, lo convierten en un tema perfecto para estimular las mentes jóvenes y curiosas. Los microorganismos tienen una influencia generalizada en nosotros y en nuestro medio ambiente, y los resultados de las actividades microbianas son muy tangibles para los niños: observe la cantidad de productos en las tiendas que tienen un origen o componente microbiano. Es casi seguro que como consecuencia, exista una considerable experiencia que atestigua el hecho de que la exposición de los niños a la microbiología puede encender una verdadera pasión por el tema. El objetivo principal de esta editorial es promover las excursiones en clase como un poderoso medio para fomentar el interés en los microorganismos, a través de la experimentación e involucramiento con el mundo microbiano de una manera muy individual, personal e íntima. Sin embargo, otros objetivos igualmente importantes son: involucrar a los maestros y estimularlos a considerar el valor de las excursiones escolares, reconocer y alentar a aquellos académicos que ya participan en llevar la microbiología a los niños en diversos entornos, para inducir a otros a participar en la introducción de la microbiología en educación básica y para apoyar a las escuelas en sus esfuerzos (Redfern et al. 2013). Con esta editorial, buscamos motivar a las escuelas para que amplíen su cartera y frecuencia de excursiones, y a los grupos académicos de microbiología para compartir más ideas, recursos y tiempo para permitir que una audiencia más amplia de niños y adultos, pueda experimentar con microorganismos y microbiólogos en acción.

***Las excursiones de microbiología cruzan los límites de la disciplina y pueden beneficiar el aprendizaje de otras materias.***

Los ejemplos proporcionados en este editorial se centran en la microbiología, pero ninguno será exclusivamente así, y tampoco debería serlo. Las excursiones brindan la oportunidad de explorar cuestiones sociales, culturales y de civilización, tanto globales (por ejemplo, materias primas utilizadas en los procesos discutidos, como cuestiones relacionadas con su comercio, transporte y huella de carbono) y locales (por ejemplo, orgullo regional en los productos, oportunidades de empleo local, impacto medioambiental de los procesos), todos los cuales son componentes clave de cualquier programa de estudios de geografía. De hecho, las excursiones pueden demostrar cómo la integración del conocimiento y la comprensión de una gama de otras disciplinas son esenciales para las empresas exitosas, aprovechando: ingeniería, física, matemáticas (por ejemplo, diseño y construcción de fermentadores para la producción y recuperación de productos microbianos como enzimas y amino ácidos, cálculo/control de la hidrodinámica del flujo de agua en el tratamiento de aguas residuales), química (identificación de compuestos aromatizantes en la microbiología de los alimentos), biología (en salud humana, el modo de acción de las drogas, cómo funcionan las enzimas, herramientas de biología molecular como la edición de genes y la reacción en cadena de la polimerasa, creada a través de investigaciones innovadoras en

microbiología), economía (viabilidad económica a largo plazo de las empresas y diversificación al convertir los desechos en material rentable), historia (por ejemplo, el papel de la industria en el crecimiento y la identidad de la región, cómo las infecciones microbianas han contribuido a eventos pasados, incluida la erradicación de civilizaciones), servicios de ciencias sociales y psicología (la naturaleza y el papel de las partes interesadas en todo tipo de problemas, como el uso de promotores de crecimiento en la cría de animales y los impactos sobre la resistencia a los medicamentos en patógenos, los comportamientos humanos en respuesta a pandemias, los desafíos sociales y logísticos asociados con las pruebas de patógenos como el virus del Ébola); tecnología (cómo funciona y se controlan infraestructuras claves como salas limpias y tanques de fermentación), arte y diseño (por ejemplo, cómo se comercializa un producto, degradación y restauración de objetos de arte desde manuscritos antiguos hasta películas cinematográficas), así como problemas de ética (huella de carbono industrial, experimentación con animales y bienestar animal). Por lo tanto, las excursiones deben dar a los niños la sensación de que los trabajos más gratificantes requerirán que sean adaptables e integren ideas de una variedad de temas.

El corolario de esto es que la comprensión de la microbiología, colateralmente apoya la comprensión en una variedad de otras disciplinas. En consecuencia, las excursiones que no están diseñadas principalmente para tener un enfoque microbiológico aún pueden presentar la emoción del mundo invisible de los microorganismos a los niños, como se ejemplifica en una serie de temas de discusión asociados con las excursiones sugeridas.

Lo más importante, y especialmente porque las excursiones de microbiología pueden incorporar múltiples temas, pueden exponer/elevar la conciencia de los problemas locales y los Grandes Desafíos globales, proporcionar oportunidades únicas para explorarlos y debatirlos, e inculcar un sentido de responsabilidad comunitaria global y alentar la participación en colectivos y esfuerzos que buscan soluciones.

***Las excursiones de microbiología pueden facilitar la conciencia sobre la microbiología y mejorar el aprendizaje al proporcionar una experiencia multisensorial***

Es bien sabido que la estimulación de múltiples sentidos mejora el aprendizaje (Shams y Seitz, 2008) y las excursiones proporcionan situaciones ideales en las que los microorganismos y sus actividades se pueden ver, tocar, oler, a veces probar y ocasionalmente escuchar. Las manifestaciones visuales de las aglomeraciones microbianas y sus actividades son de importancia central en el aprendizaje de la microbiología, y muchos ejemplos se encuentran dispersos a lo largo de esta editorial. Pero, hay más formas en que los microorganismos y sus actividades pueden estimular nuestros sentidos, como se describe aquí.

***Vista***

Los microorganismos dentro de un estanque escolar, por ejemplo, solo cobrarán vida para los niños cuando puedan verlos a nivel de una sola célula bajo un microscopio o estereomicroscopio, es decir, cuando puedan descubrir el tamaño relativo de los microorganismos, la división celular, la motilidad y cómo son comidos por protozoos y pequeños invertebrados. A los niños generalmente les encanta la acción visual, cuanto más frenética, mejor, y hay pocos ejemplos en la naturaleza con más acción frenética que los que se encuentran en el agua de un estanque. El

examen microscópico de los portaobjetos de vidrio que quedan en un estanque a lo largo del tiempo permitirá a los niños observar la colonización microbiana y la producción de biopelículas o *biofilms*, y así explorar conceptos ecológicos como la sucesión, que normalmente se ejemplifica en organismos más grandes. También es agradable y educativo para los niños observar colonias microbianas de diferentes formas, texturas y colores que crecen en placas de agar inoculadas con muestras que han tomado durante una excursión (Fig. 19).



Fig. 19. Un conjunto de colonias microbianas que crecen en placas de agar, mostrando diferentes formas, texturas y colores. Se pueden encontrar hermosas imágenes de microorganismos y sus hábitats, junto con un contexto interesante, en el libro titulado "La vida al borde de la vista" (Chimileski y Kolter, 2017). Foto de Scott Chimileski y Roberto Kolter.

### *El tacto*

Tocar una piedra babosa de un estanque o arroyo debería iniciar discusiones sobre los *biofilms* o biopelículas, incluido qué microorganismos las crean, cuál es la naturaleza química del limo, qué beneficios proporciona el limo para los microorganismos que lo producen y quizás que otros microorganismos hay en él. Cualquier disgusto exhibido por algunos niños puede atenuarse (o tal vez aumentarse) al señalar que ciertamente habrán comido limo microbiano con considerable placer. Por ejemplo, la textura de muchas variedades de helado se ve reforzada por la goma xantana, un polisacárido de alto peso molecular producido por la bacteria *Xanthomonas campestris*. Luego, los niños pueden considerar dónde encontrar *biofilms*: filtros de goteo en plantas de tratamiento de aguas residuales, biofiltros de aire, mohos en cuevas (Macaldy et al., 2007), el fondo de las cortinas de baño, grifos y lavabos sin lavar, las superficies de las tuberías de drenaje, dientes y catéteres. La discusión podría extenderse para considerar la ubicuidad de los *biofilms* o biopelículas, sus beneficios para el medio ambiente y la salud (por ejemplo, las "segundas pieles" de plantas y animales que protegen contra los patógenos, los *biofilms* o biopelículas en los desechos y el tratamiento de la contaminación) junto con sus efectos nocivos (por ej. corrosión, caries, así como albergar patógenos y protegerlos contra antimicrobianos y desinfectantes).

### *El olfato y el gusto*

Los niños tienen una aguda conciencia del olfato, por lo que la exploración de olores microbianos es una forma poderosa de relacionar los microorganismos con la percepción sensorial. En algunos casos, puede ser interesante preguntar a los niños "¿qué son los olores y cómo los detectamos?". Los olores son químicos volátiles que son reconocidos por los receptores olfativos en la nariz (se ha sugerido que podemos distinguir hasta un billón de olores diferentes; Bushdid et al., 2014). Los volátiles no solo son importantes para nosotros para anticipar y apreciar un buen curry o reaccionar ante situaciones desagradables o peligrosas, como alimentos que se han estropeado o una fuga de gas, sino que los microorganismos los utilizan para comunicarse entre ellos y con otros organismos y así orquestar alguna acción conjunta (Ryu et al., 2003). Para involucrar a los niños, puede ser útil plantear la pregunta: "¿Puedo oler los microorganismos?" y luego pedirles que identifiquen los olores con los que están familiarizados, tal vez categorizados en olores agradables y desagradables, y luego discutir cuál de estos tiene un origen microbiano. Los olores corporales (también de mascotas) que emanan de la caca, la flatulencia, el sudor viejo, los pies malolientes ("con olor a queso") (ver comentarios sobre *Propionibacter* y *Brevibacterium*, más abajo) y el mal aliento son producidos por microorganismos cuando metabolizan químicos en los sitios del cuerpo que habitan. Se ha considerado que las sustancias químicas volátiles producidas por microorganismos a partir de aceites secretados en las axilas tienen propiedades de feromonas, por lo que el microbioma puede actuar como un maestro de marionetas invisible para atraer parejas. Los químicos volátiles en la respiración se están investigando activamente como biomarcadores de enfermedades para procedimientos de diagnóstico no invasivos.

En el exterior, tenemos el agradable olor de las hojas podridas en el suelo en otoño y las pilas de compost durante todo el año y, por supuesto, el olor del suelo después de la lluvia, causado por las especies *Streptomyces* productoras de geosmina, a las que aludimos anteriormente. El olor a huevo podrido derivado de remover el lodo negro en el fondo de un estanque probablemente evocará una respuesta memorable de los niños. Aquí, es informativo descubrir qué microorganismos producen el olor (bacterias reductoras de sulfato), cuál es el químico involucrado, cómo se puede crear (para los adolescentes que han hecho algo de química), dónde viven los microorganismos responsables y por qué pueden ser beneficioso o perjudicial en diferentes escenarios. Esta actividad puede combinarse con la excavación de un hoyo pequeño, en el que la zonificación redox en los sedimentos se puede ver en forma de cambios inducidos microbianamente en el color de los minerales de hierro, desde aeróbico (oxidado) hasta sulfato reductor/sulfidrogénico (gris-negro) (Fig. 13). El olor evocador del mar puede servir como base para una discusión sobre productos químicos volátiles biogénicos, principalmente dimetilsulfuro (DMS), que se produce por la descomposición microbiana del dimetilsulfonopropionato, un metabolito multifuncional que se encuentra en muchos microorganismos marinos que pueden servir como osmolitos, antioxidantes y crioprotectores. Las discusiones podrían entonces centrarse en el papel del DMS en la condensación de nubes y el potencial enfriamiento global, e incluso en cómo las aves marinas usan el DMS como una señal olfativa direccional (Steinke et al., 2011).

En el hogar, hay olores bien conocidos producidos por microorganismos, incluidos los que provienen de los alimentos, como el queso (ver más abajo), salsas obtenidas por fermentación, vinagre y encurtidos de todo tipo, carnes fermentadas, etc. Los mismos olores se pueden experimentar en restaurantes y tiendas de alimentación. Las tiendas y puestos de venta de pescado pueden tener el olor típico del pescado que no es súper fresco. Esta es la trimetilamina, una sustancia química picante producida por bacterias que viven en los peces a partir del óxido de

trimetilamina, una sustancia química versátil hecha por los peces para protegerse contra el efecto desestabilizador de proteínas de la urea, la salinidad y la alta presión (Yancey, 2005). Los sabores de la comida definitivamente proporcionan una forma agradable para que los niños aprendan sobre los microorganismos. Los quesos, por ejemplo, derivan de la leche coagulada, pero pueden tener un sabor y un olor diferentes y tienen una variedad de texturas y pieles, que reflejan los diferentes microorganismos y procesos utilizados en su fabricación. Las comunidades microbianas que se desarrollan son consecuencia, entre otras cosas, del inóculo microbiano, del "ambiente" del queso, por ejemplo la humedad, salinidad, temperatura y pH. El hongo, *Penicillium roqueforti*, crece en las grietas hechas en quesos como el Stilton (Fig.3) y Roquefort, dando el sabor terroso distintivo y las venas azules (Kindstedt, 2014). Los productos de fermentación microbiana proporcionan sabores y texturas interesantes, por ejemplo la bacteria *Propionobacter* sp. produce CO<sub>2</sub> (los agujeros) y acetato/propionato en los típicos quesos alpinos suizos; el mismo género microbiano también contribuye al olor sin lavar en los humanos. Del mismo modo, *Brevibacterium linens* que crece en la superficie de algunos quesos también crece debajo de las uñas de los pies, produciendo un olor distintivo común a ambos. Por lo tanto, desde el queso, la discusión puede centrarse en el origen microbiano del aroma humano y su influencia en la atracción de una pareja.

#### *El oído (y la vista)*

El sonido no es un sentido que comúnmente asociamos con los microorganismos. Sin embargo, el Fermentophone (Fig. 16) aprovecha las burbujas de fermentaciones coloridas para crear música. Las burbujas también se pueden ver y, a veces, se escuchan explotar cuando escapan de la columna de agua a la atmósfera. Los niños a menudo preguntarán qué causa las burbujas y la respuesta dependerá de varios factores, incluida la iluminación. Pero, en un estanque fangoso estancado, es probable que las burbujas del sedimento se formen a partir de metano, lo que puede estimular las discusiones sobre el papel del metano como gas de efecto invernadero. Se recomienda encarecidamente mostrar a los niños videos de la quema de metano que emana de un estanque, con el resultado común de que las conversaciones se centran en la producción personal de metano y su salida, proporcionando así un vínculo entre el individuo y su microbioma, específicamente en este caso su arqueoma (Fig. 13).

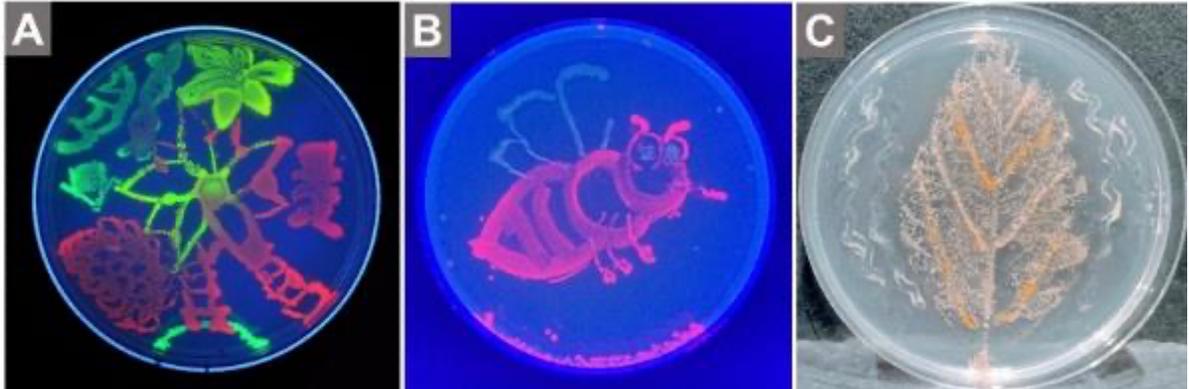
#### *Detección indirecta de actividad microbiana*

La medición de la temperatura de una pila de compost escolar a lo largo del tiempo proporciona otro medio para detectar la actividad microbiana que puede alimentar las discusiones sobre la energía, la descomposición y las interacciones microbianas con otras especies, como los gusanos de compost, que pueden considerarse ingenieros ambientales, y todos ellos microorganismos intestinales importantes que llevan a cabo muchos de los procesos digestivos del compost (Medina-Sauza et al., 2019). Los niños podrían usar un termómetro para registrar con precisión los cambios de temperatura o simplemente usar el tacto para detectar la actividad microbiana al sentir el calor de una varilla de metal insertada en un montón de compost. Existen otras herramientas para detectar actividad microbiana; por ejemplo, el MudWatt (Microbios mágicos; Jude y Jude, 2015) que proporciona un dispositivo barato pero muy efectivo para observar microorganismos reductores de metales en sedimentos/suelos que generan electricidad y luz.

#### ***Las excursiones de microbiología se pueden complementar con una variedad de otras actividades para reforzar el aprendizaje.***

Para todas las excursiones, el aprendizaje puede reforzarse en el aula con actividades de seguimiento: diseño de pósters, presentación de informes estilo noticias, construcción de modelos y obras de arte, incluido el arte en agar, que implica el desarrollo de imágenes utilizando

microorganismos inoculados en placas de agar (Charkoudian et al., 2010; Adkins et al., 2018; Fig.20). La importancia de una visita a una panadería, por ejemplo, aumentará al investigar la producción de gas (usando globos) y el cambio de pH (usando indicadores) en cultivos de levadura en el aula. Después de explorar las contribuciones microbianas a los alimentos en tiendas, instalaciones de fabricación o laboratorios de investigación, es divertido e instructivo que los niños hagan sus propios alimentos fermentados, como el *tempeh* (Fig. 21). Las muestras transportadas de regreso a la clase pueden convertirse en objeto de observación/investigación/experimentación. Estas actividades se ven facilitadas por herramientas como el Foldscope (Cybulski et al., 2014), junto con una gama de productos y tecnologías de código abierto, como centrifugas (Bhamla et al., 2017) y nefelómetros (Wijnen et al., 2014.) Las muestras de sal marina, pescado salado o alimentos fermentados ricos en sal pueden enriquecerse usando medios de cultivo para producir halófilos extremos, como *Halobacterium salinarum*, que se cultiva fácilmente, es seguro para trabajar y es de un color rojo llamativo (Baxter et al., 2012; DasSarma et al., 2016; Fig.2). Las columnas de Winogradsky proporcionan otro medio relativamente simple de explorar las diferentes formas en que los microorganismos obtienen energía, sus interacciones, sucesión y partición de nicho, utilizando barro y agua de entornos locales (Anderson y Hairston, 1999; Fig. 13). El Comité Asesor de Microbiología en las Escuelas (MISAC), que se ha establecido desde hace 50 años, proporciona recursos educativos sobresalientes y de gran alcance, muchos de los cuales han sido adoptados en todo el mundo, para aquellos interesados en enseñar microbiología en las escuelas. Obviamente, cualquier trabajo de clase que involucre el cultivo de microorganismos debe llevarse a cabo de acuerdo con las Buenas Prácticas de Laboratorio Microbiológico (consulte la guía en línea de la Sociedad de Microbiología).



**Fig. 20. Arte en Agar.** Los tres primeros participantes en el concurso Agar Art Kids 2019 de la Sociedad Americana de Microbiología (ASM). A) “El círculo de la vida” de Kate Lin (11 años) usando *E. coli* MM294 pGFPuv (verde), pYellow (amarillo), pCherri (púrpura) y pTang (rosado) creciendo en agar LB + ampicilina, con el apoyo de Cold Spring Harbor Laboratory Centro de aprendizaje de ADN. B) “La abeja melífera” de Manal Faisal Khan (5 años) usando *E. coli* que crece en agar nutritivo. C) “Otoño” de Lilu Good-Martinez (10 años) usando *Methylobacterium extorquens* creciendo en medio mínimo con metanol como fuente de carbono. Felicitaciones a los participantes mencionados anteriormente y gracias a ellos y a la ASM (<https://asm.org/Press-Releases/2019/November-1/ASM-s-5th-Agar-Art-Contest-Showcases-the-Beauty-of>) para estas imágenes. El sitio web “Microbial Art” y la edición de junio de 2017 de la revista SfAM Microbiologist, proporcionan muchos ejemplos de la interacción entre arte/moda y microbiología, y Park (2012) proporciona consejos prácticos para crear arte microbiano.



Fig. 21. Actividad en el aula haciendo tempeh a base a lupino. El tempeh es un alimento indonesio fermentado, generalmente hecho de habas de soja. Aquí los frijoles de soja han sido reemplazados por frijoles lupinos, por ejemplo de *Lupinus angustifolius*. El hongo, *Rhizopus oryzae*, forma una red de micelios blancos que entrelaza los granos de lupino formando un tempeh cortable, listo para marinar o freír. Estas rodajas contienen vitamina B12 gracias al uso de un co-cultivo de *Rhizopus oryzae* con la bacteria *Propionibacterium freudenreichii* de calidad alimentaria que produce vitamina B12, lo que hace que este tipo específico

de tempeh de lupino un excelente reemplazo de la carne (Wolkers-Rooijackers et al., 2018). Los niños pueden inspeccionar las esporas de *Rhizopus oryzae* antes de usarlas para inocular los granos de lupino. Se necesitan 3 días de incubación antes de que las "hamburguesas tempeh" estén listas para cocinar. Foto de Martha Endika.

### ***Resumen y recomendaciones***

Hay una necesidad urgente de que la sociedad adquiera alfabetización en microbiología, y la educación e inspiración de los niños se encuentra en el corazón de este esfuerzo. Un elemento fundamental de esto son las acciones que permitirán a los niños "ver" microorganismos invisibles, al experimentar sus actividades y las consecuencias de tales actividades. Aquí hemos discutido la importancia de las excursiones en clase para experimentar y explorar los microorganismos en acción, hemos proporcionado una variedad de ejemplos y hemos sugerido algunos problemas organizacionales que pueden ser útiles para obtener el máximo beneficio de tales excursiones. Para avanzar en el objetivo de iniciar excursiones de clase en microbiología, hacemos las siguientes recomendaciones:

- Las escuelas implementarán una política explícita de excursiones en clase, durante las cuales se puedan experimentar actividades microbianas y explorar temas relevantes
- Los encargados de la escuela incentivarán a los maestros a organizar excursiones e interacciones con científicos, especialmente con el fin de elevar las aspiraciones de los estudiantes
- Los encargados de formular políticas apoyarán a las escuelas en el desarrollo de excursiones emocionantes y educativamente valiosas, proporcionando flexibilidad en el plan de estudios y de acuerdo a los modestos recursos financieros disponibles
- Los Ministerios de Educación de los Gobierno garantizarán que todas las escuelas estén equipadas con microscopios
- Las organizaciones comerciales, o grupos de organizaciones, agencias y departamentos gubernamentales y ONG que requieren una fuerza laboral alfabetizada en microbiología, contribuirán financiera, material y políticamente para apoyar la educación en microbiología en las escuelas, por ejemplo siguiendo el modelo de <https://novonordiskfonden.dk/en/projects-and-initiatives/life/>
- Las universidades, agencias y organizaciones deben presentar/implementar un apoyo explícito y una recompensa para los empleados (por ejemplo, al incluir la divulgación como criterio de promoción) que se embarcan en actividades que mejoran la alfabetización científica/microbiológica, especialmente con miras a ampliar la participación
- A los profesionales de la microbiología, académicos y maestros en coordinar y mejorar el diálogo, lo que lleve al desarrollo de materiales educativos en línea gratuitos que mejor se adapten a las necesidades de los estudiantes y maestros (por ejemplo, a través de conferencias de la sociedad de microbiología)
- Se debe alentar a las universidades e instituciones de investigación a organizar exposiciones/actividades (móviles) relacionadas con la microbiología o museos temáticos para la educación
- Los organismos de financiación (consejos de investigación, sociedades académicas, etc.) en proporcionar fondos de subvención adecuados para apoyar aplicaciones innovadoras de microbiólogos para involucrar a los niños en un aprendizaje inmersivo y activo fuera del aula
- Reuniones anuales de sociedades científicas para incluir una sesión de puertas abiertas dirigida a las escuelas y al público en general, con actividades prácticas
- Las sociedades de microbiología incluirán la promoción y facilitación de excursiones en clase en el ámbito de sus embajadores
- Los museos (así como los zoológicos, acuarios y jardines botánicos) aumentarán su cometido de promover y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible aumentando la visibilidad de los microorganismos y sus funciones/servicios en los ecosistemas
- Los organismos de radiodifusión para acelerar la inclusión de microorganismos en documentales de vida silvestre acorde con su importancia para el planeta, teniendo en cuenta

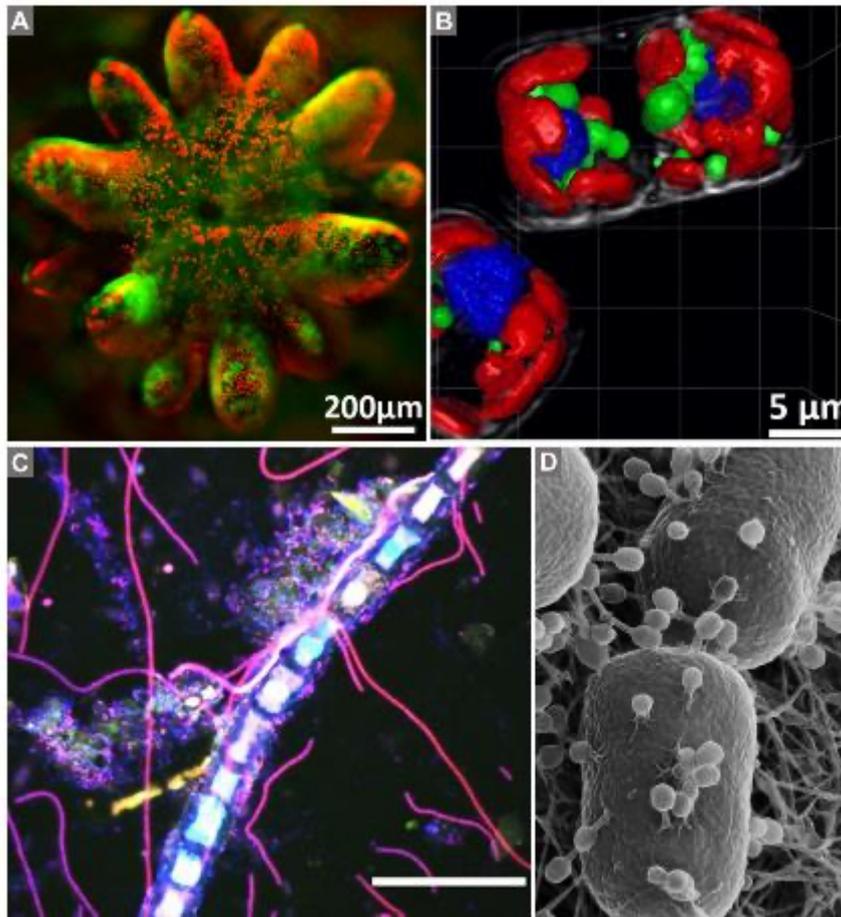


Fig. 22. Las nuevas y diversas técnicas de imagenología hacen que los microorganismos sean más atractivos para la difusión. A) Micrografía de fluorescencia de un pólipo de coral, que muestra la autofluorescencia del tejido coralino (verde) y las algas fotosintéticas *Symbiodinium* que viven dentro (rojo). Para obtener imágenes de estos corales fotosensibles, se construyó un microscopio *light-sheet* personalizado. Esta imagen ganó el concurso Nikon Small World in Motion 2019 y los detalles del método se pueden encontrar en Laissue et al. (2019). B) Micrografía de fluorescencia de la diatomea *Thalassiosira nanae*. Los cloroplastos son rojos, los lípidos neutros verdes, el ADN azul y la pared celular blanca. La microscopía de fluorescencia proporciona información tridimensional de componentes individuales, lo que permite la medición de sus volúmenes. Para más información, ver Chansawang et al. (2016) C)

Imagen de hibridación in situ fluorescente de *biofilms* o biopelículas de un arrecife de coral usando microscopía confocal. Las muestras se hibridaron con la sonda específica de bacterias marcadas con Cy5 (EUB338), la GAM42a marcada con Cy3 (para *Gammaproteobacteria*), la ALF1b marcada con fluoresceína (para *Alphaproteobacteria*) y la Arch915 marcada con Cy3 (para Archaea). Las células que aparecen de color magenta son *Gammaproteobacteria*, las células cian son *Alphaproteobacteria*, las células azules son otras bacterias y las rojas son Archaea. También se pueden observar grandes filamentos de algas autofluorescentes intercalados con las células bacterianas y arqueales más pequeñas. La barra de escala es de 100  $\mu\text{m}$ . D) Imagen de microscopía de iones de helio que muestra el fago T4 infectando *E. coli*. Algunos de los fagos unidos tienen colas contraídas que indican que han inyectado su ADN en el hospedero. Las células bacterianas tienen  $\sim 0.5 \mu\text{m}$  de ancho, equivalente en tamaño a los pequeños puntos vistos en C. Para más información ver Leppänen et al. (2017) Imágenes de time-lapse y videos de organismos vivos (por ejemplo, A), imágenes móviles (por ejemplo, C) y gráficos realistas junto con imágenes de alta resolución para demostrar la posición relativa y detalles muy finos desde escalas de nanómetros a micrómetros (ejemplificado de manera brillante usando criomicroscopía electrónica para ilustrar las estructuras de la superficie celular en *Caulobacter crescentus* por von Kugelgen et al. (2019), todos agregan una dimensión adicional que puede ayudar a atraer a los niños a la maravilla de los microorganismos, sus estructuras, actividades e interacciones. Goodsell y col. (2020) revisan la gran cantidad de técnicas que permiten visualizar máquinas celulares, compartimentos y macromoléculas, y consideran la cuestión importante del uso de la licencia artística, particularmente para estimular el interés y educar a la audiencia no técnica. Fotos A y B de Philippe Laissue. Fotos C por Nicole Webster. Foto D por Miika Leppnen (permiso de Wiley)

## Enlaces a los recursos mencionados o aludidos en el texto

- Recursos educativos en agua de la Albuquerque Bernalillo County Water Utility Authority: <http://www.abcwua.org/education>
- Museo Alexander Fleming en Londres <https://www.imperial.nhs.uk/about-us/who-we-are/fleming-museum>
- Museo Americano de Historia Natural: Juego Bacterias en la Cafetería <https://www.amnh.org/explore/ology/microbiology/bacteria-in-the-cafeteria-game>
- Exhibición Mundo Bacteriano en el Museo de Historia Natural de Oxford <https://microbiologysociety.org/blog/bacterial-world-exhibition-at-the-oxford-museum-of-natural-history.html>
- Museo Beijerinck en Delft <https://www.delta.tudelft.nl/article/whats-hiding-beijerinck-museum>
- Experimento Gran Compost <https://www.bigcompostexperiment.org.uk>
- Cámara Fotográfica de Bioluminiscencia <http://www.annebrodie.com/exploring-the-invisible-new/2014/9/22/bioluminescent-photograph-booth>
- Centro para el Control de Enfermedades (CDC): Juego Resuelva el Brote <https://www.cdc.gov/mobile/applications/sto/web-app.html>
- Comic Bacterias Juego de cartas Micro-Match <https://www.comicbacterias.com/micromatch>
- Consejo para el aprendizaje afuera de la clase (LOtC) <https://www.lotc.org.uk>
- DTU Academia de Bioingeniería y Biotec [www.biotechacademy.dk](http://www.biotechacademy.dk)
- Proyecto Edén- Mundos Invisibles <https://www.edenproject.com/learn/for-everyone/invisible-worlds-massive-open-online-course-mooc>
- Explorando lo invisible <https://exploringtheinvisible.com>
- Foldscope <https://www.foldscope.com>, video en <https://youtu.be/ky-cqSI5mwE> e información de como compartir los descubrimientos microscópicos [microcosmos.foldscope.com](http://microcosmos.foldscope.com)
- Foldit <https://fold.it/portal/>
- Buenas Prácticas de Laboratorio de Microbiología, guía de la Sociedad de Microbiología <https://microbiologyonline.org/teachers/safety-information/good-microbiological-laboratory-practice>
- Soy un científico sácame de aquí <https://imascientist.org.uk>
- Museo de Microbiología del Instituto Butantan en Brasil <http://www.butantan.gov.br/atracoes/museu-de-microbiologia>
- Competición Internacional en máquinas genéticamente modificadas (IGEM) [https://igem.org/Main\\_Page](https://igem.org/Main_Page)
- Día Internacional del Microorganismos <https://fems-microbiology.org/international-microorganism-day/>
- Recursos educativos del Programa Internacional para el descubrimiento de los Océanos (IODP) <http://iodp.tamu.edu/outreach/education.html>
- Blog de Justine Dees: <https://justinedees.com/blog>
- Jardines Kew – protegiendo preciados hongos <https://www.kew.org/read-and-watch/protecting-precious-fungi>
- Casa de Louis Pasteur en Arbois <http://www.terredelouispasteur.fr/en/louis-pasteurs-house>
- Recurso a pedido en para el aprendizaje de ciencia y tecnología La Main à la Pâte: <https://www.fondation-lamap.org/en/international>
- Arte Microbiano, colección de arte realizada por científicos y artistas de todo el mundo <http://www.microbialart.com>
- Placa de crecimiento y evolución microbiana (MEGA) <https://www.youtube.com/watch?v=6mUqbToqAM0>
- Comité de Asesoramiento escolar en Microbiología (MISAC) <http://misac.org.uk/anniversary-articles.html>
- Exhibición Microbiota en La Cité des Sciences en Paris <http://www.cite-sciences.fr/en/ressources/expositions-passees/microbiota/the-exhibition>
- Museo Micropia en Amsterdam <https://www.micropia.nl/en/visit/what-is-micropia/museum-microbes>
- Museo del Instituto Robert Koch en Berlin [https://www.rki.de/EN/Content/Institute/Museum\\_Mausoleum/museum\\_en.html](https://www.rki.de/EN/Content/Institute/Museum_Mausoleum/museum_en.html)
- Paquete de actividades con hongos para niños de educación básica– BBSRC <https://bbsrc.ukri.org/documents/mushroom-pdf/>
- The Novo Nordisk Foundation, LIFE <https://novonordiskfonden.dk/en/projects-and-initiatives/life>
- Ona Salud <https://www.who.int/features/qa/one-health/en>
- Exhibición Brote en el Museo de Ciencia Smithsonian <https://naturalhistory.si.edu/exhibits/outbreak-epidemics-connected-world>
- Iniciativa e-Bug de Salud Pública de Inglaterra <https://www.e-bug.eu>
- Skype con un científico <https://www.skypeascientist.com/talk-to-a-scientist.html>

).

## Agradecimientos

TJM reconoce el apoyo de las siguientes subvenciones del UKRI: STFC "Bio-firmas de gas de rastreo: implicaciones para NOMAD" ST / S001425 / 1) y NERC "FUSED - Funcionalidad de suelos urbanos que apoyan la prestación de servicios del ecosistema" (NE / S005560 / 1). Estamos muy agradecidos con las siguientes personas por proporcionar sugerencias e imágenes: Margaret Adams, Geof Adams, Selwa Alsam, Judith Armitage, Emese Bartha, Ricardo Cavicchioli, Scott Chimileski, James Chong, Joseph Christie-Oleza, Graeme Churchard, Martha Clokie, Mike Dyll-Smith, Martha Endika, Alessandra Marcon Gasperini, Immanuel Giel, Charlotte Gruender, Myriam de Haan, Natalie Hicks, Tanja A. Hofmann, Mike Jetten, Bo Barker Jørgensen, Stefan Hyman, Patrick Jung, Z. Ceren Karahan, Roberto Kolter, Philippe Laissue, Sang Yup Lee, Miika Leppänen, Andrea Lohberger, Derek R. Lovley, Etienne Low-Décarie, Naresh Magan, Margaret McFall-Ngai, Mairi McGenity, Carmen Michán, Corrado Nai, Victor Parro, Sean Paling, Ángeles Prieto Fernández, James I. Prosser, Juan Luis Ramos Martín, Martin Rejzek. Peter Paolo Rivera, Eliora Ron, Joshua Rosenstock, Angela Sessitsch, Alex Shakspeare, Paul Shields, Andriy Sibirny, Nicky Slee, Cindy J. Smith, J. Cameron Thrash, Andreas Thywißen, Jezz Timms, Graham JC Underwood, Joanna Urban, Toungporn Uttarotai, Aurélie Villedieu, Dave Whiting, Polona Zalar, la Sociedad Estadounidense de Microbiología y participantes en la competencia Agar Art, Great Salt Lake Institute, MARUM - Centro de Ciencias del Medio Marino, NASA, Universidad de Georgia. TJM y KT están aún más agradecidos con sus familias por tolerar los largos períodos de ausencia al crear esta Editorial

## Referencias

- Adkins, S.J., Rock, R.K., and Morris, J.J. (2018) Interdisciplinary STEM education reform: dishing out art in a microbiology laboratory. *FEMS Microbiol Lett* **365**: doi:10.1093/femsle/fnx245.
- Anderson, D.C., and Hairston, R.V. (1999). The Winogradsky column and biofilms models for teaching nutrient cycling and succession in an ecosystem. *Amer Biol Teacher* **61**: 453-459.
- Antunes, A., Stackebrandt, E., and Lima, N. (2016) Fuelling the bio-economy: European culture collections and microbiology education and training. *Trends Microbiol* **24**: 77-79.
- Araújo, J.P.M., and Hughes, D.P. (2019) Zombie-ant fungi emerged from non-manipulating, beetle-infecting ancestors. *Curr Biol* **29**: 3735-3738.e2.
- Arce-Rodríguez, A., Puente-Sánchez, F., Avendaño, R., Libby, E., Rojas, L., Cambronero, J.C., Pieper, D.H., Timmis, K.N., and Chavarria, M. (2017) Pristine but metal-rich Río Sucio (Dirty River) is dominated by *Gallionella* and other iron-sulfur oxidizing microbes. *Extremophiles* **21**: 235-243.
- Bahrndorff, S., Alemu, T., Alemneh, T., and Lund Nielsen, J. (2016) The microbiome of animals: implications for conservation biology. *Int J Genomics* **2016**: 5304028.
- Ballantyne, R., and Packer, J. (2002) Nature-based excursions: school students' perceptions of learning in natural environments. *Int Res Geog Env Educ* **12**: 1-19.
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., and Milo, R. (2018) The biomass distribution on Earth. *Proc Natl Acad Sci USA* **115**: 6506-6511.
- Baym, M., Lieberman, T. D., Kelsic, E. D., Chait, R., Gross, R., and Yelin, I., et al. (2016) Spatiotemporal microbial evolution on antibiotic landscapes. *Science* **353**: 1147-1151.
- Barberán, A., Dunn, R.R., Reich, B.J., Pacifici, K., Laber, E.B., and Menninger, H.L. et al. (2015) The ecology of microscopic life in household dust. *Proc Royal Soc B: Biol Sci* **282**: 20151139.
- Barberán, A., Hammer, T.J., Madden, A.A., and Fierer, N. (2016) Microbes should be central to ecological education and outreach. *J Microbiol Biol Educ* **17**: 23-28.
- Baxter, B.K., Butler, J.K., and Kleba, B. (2012) Worth your salt: halophiles in education. In *Advances in Understanding the Biology of Halophilic Microorganisms*. Vreeland R.H. (ed). Dordrecht, Springer. pp. 217-226.
- Behrendt, M., and Franklin, T. (2014) A review of research on school field trips and their value in education. *Int J Environ Sci Edu* **9**: 235-245.
- Bell, P., Lewenstein, B., Shouse, A.W., and Feder, M.A. (eds.) (2009) *Learning science in informal environments*. Washington DC, National Academy Press.
- Berendonk T. U., Manaia C. M., Merlin C., Fatta-Kassinos D., Cytryn E., and Walsh F., et al. (2015) Tackling antibiotic resistance: the environmental framework. *Nat Rev Microbiol* **13**: 310-317.
- Berg, G., and Raaijmakers, J.M. (2018) Saving seed microbiomes. *ISME J* **12**: 1167-1170.
- Bhamla, M. S., Benson, B., Chai, C., Katsikis, G., Johri, A., Prakash, M. (2017) Hand-powered ultralow-cost paper centrifuge. *Nat Biomed Eng* **1**: 0009.

- Bordenstein, S.R., Brothers, C., Wolfe, G., Bahr, M., Minckley, R.L., and Clark, M.E. *et al.* (2010) Using the *Wolbachia* symbiont to teach inquiry-based science: a high school laboratory series. *Am Biol Teach* **72**: 478–483.
- Bowater, L., and Yeoman, K. (2012) *Science communication: a practical guide for scientists*. Chichester, John Wiley & Sons.
- Bravo, A., Likitvivanavong, S., Gill, S.S., and Soberón, M. (2011) *Bacillus thuringiensis*: a story of a successful bioinsecticide. *Insect Biochem Mol Biol* **41**: 423–431.
- Brüssow, H. (2007) *The Quest for Food: A Natural History of Eating*. New York, Springer-Verlag.
- Brüssow, H. (2017) Phage therapy for the treatment of human intestinal bacterial infections: soon to be a reality? *Expert Rev Gastroenterol Hepatol* **19**: 1–4.
- Brüssow, H. (2020) The novel coronavirus – a snapshot of current knowledge. *Microb Biotechnol* doi:[10.1111/1751-7915.13557](https://doi.org/10.1111/1751-7915.13557)
- Bushdid, C., Magnasco, M.O., Voshall, L.B., and Keller, A. (2014) Humans can discriminate more than one trillion olfactory stimuli. *Science* **343**: 1370–1372.
- Campbell-Platt, G. (1994) Fermented foods – a world perspective. *Food Res Int* **27**: 253–257.
- Canstein, H. von, Li, Y., Lünsdorf, H., Timmis, K.N., Deckwer, W.D., and Wagner-Döbler, I. (1999) Removal of mercury from chloralkali electrolysis wastewater by a mercury-resistant *Pseudomonas putida* strain. *Appl Environ Microbiol* **65**: 5279–5284.
- Cavicchioli, R., Ripple, W.J., Timmis, K.N., Azam, F., Bakken, L.R., Baylis, M., Behrenfeld, M.J., Boetius, A., Boyd, P.W., and Classen, A.T. *et al.* (2019) Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. *Nat Rev Microbiol* **17**: 569–586.
- Chansawang, N., Geider, R.J., Obara, B., and Laissue, P.P. (2016) Three-dimensional visualization and quantification of lipids in microalgae using fluorescence microscopy. In *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols: Ultrastructure and Imaging*. McGenity, T.J., Timmis, K.N., and Nogales, B. (eds). New York, Springer. pp 145–161.
- Charkoudian, L.K., Fitzgerald, J.T., Khosla C., and Champlin, A. (2010) In living color: bacterial pigments as an untapped resource in the classroom and beyond. *PLoS Biol* **8**: e1000510.
- Chen, L., Bazylinski, D.A., and Lower, B.H. (2010) Bacteria that synthesize nano-sized compasses to navigate using Earth's geomagnetic field. *Nature Edu Know* **3**: 30.
- Chimileski, S. and Kolter, R. (2017) *Life at the Edge of Sight: A Photographic Exploration of the Microbial World*. Cambridge, MA: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Chislock, M.F., Doster, E., Zitomer, R.A., and Wilson, A.E. (2013) Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Edu Know* **4**: 10.
- Chomicki, G., and Renner, S. S. (2017) The interactions of ants with their biotic environment. *Proc R Soc B Biol Sci* **284**: 20170013.
- Cockell, C.S., and Jones, H.L. (2009) Advancing the case for microbial conservation. *Oryx* **43**: 520–526.
- Cockell, C.S., Holt, J., Campbell, J., Groseman, H., Josset, J-L., Bontognali, T.R.R., Phelps, A., Hakobyan, L., Kuretn, L., and Beattie, A. *et al.* (2019) Subsurface scientific exploration of extraterrestrial environments (MINAR 5): analogue science, technology and education in the Boulby Mine, UK. *Int J Astrobiol* **18**: 157–182.
- Cooper, S., Khatib, F., Treuille, A., Barbero, J., Lee, J., Beenen, M., Leaver-Fay, A., Baker, D., Popović, Z., and Foldit Players (2010) Predicting protein structures with a multiplayer online game. *Nature* **466**: 756–60.
- Couto, J.M. (2017) Biofilms for babies: introducing microbes and biofilms to preschool-aged children. *J Microbiol Biol Educ* **18**: doi:[10.1128/jmbe.v18i1.1273](https://doi.org/10.1128/jmbe.v18i1.1273).
- Crabb, W.D., and Shetty, J.K. (1999) Commodity scale production of sugars from starches. *Curr Opin Microbiol* **2**: 252–256.
- Cui, J., Li, F., and Shi, Z.L. (2019) Origin and evolution of pathogenic coronaviruses. *Nat Rev Microbiol* **17**: 181–92.
- Cybulski, J.S., Clements, J., and Prakash, M. (2014) Foldscope: Origami-Based Paper Microscope. *PLoS ONE* **9**: e98781.
- DasSarma, P., Tuel, K., Nierenberg, S.D., Phillips, T., Pecher, W.T., and DasSarma, S. (2016) Inquiry-driven teaching and learning using the Archaeal microorganism *Halobacterium* NRC-1. *Am Biol Teach* **78**: 7–13.
- Davis, E., Sloan, T., Aurelius, K., Barbour, A., Bodey, E., Clark, B., Dennis, C., Drown, R., Fleming, M., and Humbert, A. (2017) Antibiotic discovery throughout the Small World Initiative: a molecular strategy to identify biosynthetic gene clusters involved in antagonistic activity. *MicrobiolOpen* **6**: e00435.
- Debelius, J.W., Vázquez-Baeza, Y., McDonald, D., Xu, Z., Wolfe, E., and Knight, R. (2016) Turning participatory microbiome research into usable data: lessons from the American Gut Project. *J Microbiol Biol Edu* **17**: 46.
- Defoirdt, T., Boon, N., Sorgeloos, P., Verstraete, W., and Bossier, P. (2009) Short-chain fatty acids and poly-beta-hydroxyalkanoates: (New) biocontrol agents for a sustainable animal production. *Biotechnol Adv* **27**: 680–685.

- Dill-McFarland, K.A., Weimer, P.J., Pauli, J.N., Peery, M.Z., and Suen, G. (2016). Diet specialization selects for an unusual and simplified gut microbiota in two- and three-toed sloths. *Environ Microbiol* **18**: 1391–1402.
- Dittmann, K.K., Rasmussen, B.B., Castex, M., Gram, L., and Bentzon-Tilia, M. (2017) The aquaculture microbiome at the centre of business creation. *Microb Biotechnol* **10**: 1279–1282.
- Dubilier, N., Bergin, C., and Lott, C. (2008) Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis. *Nat Rev Microbiol* **6**: 725–740.
- Dyer, B.D. (2003) *A Field Guide to Bacteria*. Ithaca NY, Cornell University Press.
- El Sheikha, A.F. (2018) Revolution in fermented foods: From artisan household technology to the era of biotechnology. In *Molecular Techniques in Food Biology: Safety, Biotechnology, Authenticity & Traceability*, 1<sup>st</sup> ed. El Sheikha, A.F., Levin, R.E., and Xu, J. (eds). Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd. pp. 241–260.
- Engel, P., and Moran, N.A. (2013) The gut microbiota of insects—diversity in structure and function. *FEMS Microbiol Rev* **37**: 699–735.
- FAO (2016) *The state of the world fisheries and aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all*. Rome, FAO.
- Farrell, D., Kostkova, P., Lazareck, L., Weerasinghe, D., Weinberg, J., Lecky, D.M. *et al.* (2011) Developing e-Bug Web games to teach microbiology. *J Antimicrob Chemother* **66**: v33–v38.
- Fernandes, R., Naik, S., Bhat, A.-G., Shetty, R., Hande, M.-H., Ghafur, A., Rao, M., Kunhikatta, V., and Pathiraj, J.-P.-K. (2019) Knowledge assessment of e-Bug assisted antimicrobial resistance education module in class VII school students of south Indian coastal town of Manipal. *J Clin Med* **8**: 84.
- Finlay, B.B., and Arrieta, M.-C. (2016) *Let them Eat Dirt*. Vancouver, Canada, Greystone Books.
- Freeman, S., Eddy, S.L., McDonough, M., Smith, M.K., Okoroafor, N., Jordt, H., and Wenderoth, M.P. (2014) Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proc Natl Acad Sci USA* **111**: 8410–8415.
- Gadd, G.M. (2017) Geomicrobiology of the built environment. *Nature Microbiol* **2**: 16275
- Gao, R., Luo, Y., and Deng, H.W. (2019) Experimental study on repair of fractured rock mass by microbial induction technology. *Royal Soc Open* **6**: 191318.
- Gasparini, A.M., Rodriguez-Sixtos, A., Verheecke-Vaessen, C., Garcia-Cela, E., Medina, A., and Magan, N. (2019) Resilience of biocontrol for aflatoxin minimization strategies: climate change abiotic factors may affect control in non-GM and GM-maize cultivars. *Front Microbiol* **10**: 2525.
- Geier, B., Sogin, E.M., Michellod, D., Janda, M., Kompauer, M., Dubilier, N., and Liebeke, M. (2020) Spatial metabolomics of in situ host-microbe interactions at the micrometre scale. *Nat Microbiol* **5**: 498–510.
- Gischler, E., Gibson, M.A., and Oschmann, W. (2008) Giant holocene freshwater microbialites, Laguna Bacalar, Quintana Roo, Mexico. *Sedimentology* **55**: 1293–1309.
- Glime, J.M. 2019. Slime molds: biology and diversity. In: Glime, J.M. Bryophyte Ecology. Volume 2. Bryological Interaction. Ebook sponsored by Michigan Technological University and the International Association of Bryologists.
- Godfray, H.C.J., and Garnett, T. (2014) Food security and sustainable intensification. *Philos Trans R Soc B* **369**: 20120273.
- Goodsell, D.S., Olson, A.J., and Forli, S. (2020) Art and science of the cellular mesoscale. *Trends Biochem Sci* doi.org/10.1016/j.tibs.2020.02.010.
- Gordillo Altamirano, F.L., and Barr, J.J. (2019) Phage therapy in the postantibiotic era. *Clin Microbiol Rev* **32**: e00066–18.
- Guarner, J., and Niño, S.M. (2016) Microbiology learning and education online. *J Clin Microbiol* **54**: 1203–1208.
- Howarth, S., and Slingsby, D. (2004) Biology fieldwork in school grounds: a model of good practice in teaching science. *School Sci Rev* **87**: 99–105.
- Hughes, D.P., Anderson, S., Hywel-Jones, N.L., Himaman, W., Bilen, J., and Boomsma, J.J. (2011) Behavioral mechanisms and morphological symptoms of zombie ants dying from fungal infection. *BMC Ecol* **11**: 13.
- Hulcr, J., Latimer, A.M., Henley, J.B., Rountree, N.R., Fierer, N., Lucky, A., Lowman, M.D., and Dunn, R.R. (2012) A jungle in there: Bacteria in belly buttons are highly diverse, but predictable. *PLoS ONE* **7**: e47712.
- Illingworth S, and Prokop A. (2017) Science communication in the field of fundamental biomedical research (editorial). *Sem in Cell Dev Biol* **70**: 1–9.
- Irizarry-Barreto, P., Coletta, S., and Scott, K. (2018) Using a mobile laboratory to promote college-level outreach and graduate student engagement in precollege STEM literacy. *J Microbiol Biol Educ* **19**: 19.1.33.
- Jude, C.D., and Jude, B.A. (2015) Powerful soil: Utilizing microbial fuel cell construction and design in an introductory Biology course. *J Microbiol Biol Educ* **16**: 286–288.
- Jung, P., Baumann, K., Lehnert, L.W., Samolov, E., Achilles, S., Schermer, M., and Wraase, L.M. *et al.* (2010) Desert breath – how fog promotes a novel type of soil biocenosis, forming the coastal Atacama Desert’s living skin. *Geobiol* **18**: 113–124.

- Kallscheuer N. (2018). Engineered microorganisms for the production of food additives approved by the European Union – a systematic analysis. *Front Microbiol* **9**: 1746.
- Karner, M.B., DeLong, E.F., and Karl, D.M. (2001) Archaeal dominance in the mesopelagic zone of the Pacific Ocean. *Nature* **409**: 507–510.
- Katz, S.E. (2012) *The art of fermentation: an in-depth exploration of essential concepts and processes from around the world*. White River Junction, VT, Chelsea Green Publishing;
- Keuskamp, J., Dingemans, B., Lehtinen, T., Sarneel, J., and Hefting, M. (2013). Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods Ecol Evol* **4**: 1070-1075.
- Kindstedt, P.S. (2014) The basics of cheesemaking. In *Cheese and Microbes*. Donnelly, C.W. (ed). Washington, DC, American Society for Microbiology. pp. 17-38.
- Knapp, C.E. (1996) Just beyond the classroom: Community adventures for interdisciplinary learning. Charleston, WVERIC Clearinghouse on Rural Education and Small Schools, Charleston West Virginia <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED388485.pdf>.
- Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., and Crawford, J. *et al.* (2013) Soil security: solving the global soil crisis. *Global Policy* **4**: 434–441
- Kolodziejczyk, A.A., Zheng, D., and Elinav, E. (2019) Diet–microbiota interactions and personalized nutrition. *Nature Rev Microbiol* **17**: 742–753.
- Kopf, A., Bicak, M., Kottmann, R., Schnetzer, J., Kostadinov, I., and Lehmann, K. *et al.* (2015) The ocean sampling day consortium. *Gigascience* **4**: s13742-015.
- Krause, S., Liebetrau, V., Gorb, S., Sánchez-Román, M., McKenzie, J.A., and Treude, T. (2012) Microbial nucleation of Mg-rich dolomite in exopolymeric substances under anoxic modern seawater salinity: New insight into an old enigma. *Geology* **40**: 587–590.
- Kuo, M., Barnes, M., and Jordan, C. (2019) Do experiences with nature promote learning? Converging evidence of a cause-and-effect relationship. *Front Psychol* **10**: 305.
- Laissue, P.P., Gu, Y., Qian, C., and Smith, D.J. (2019) Light-induced polyp retraction and tissue rupture in the photosensitive, reef-building coral *Acropora muricata*. *BioRxiv* doi.org/10.1101/862045.
- Lam, A.T., Ma, J., Barr, C., Lee, S.A., White, A.K., Yu, K., and Riedel-Kruse, I.H. (2019) First-hand, immersive full-body experiences with living cells through interactive museum exhibits. *Nature Biotechnol* **37**: 1238-1241.
- Leppänen, M., Sundberg, L-R., Laanto, E., de Freitas Almeida, G.M., Papponen, P., and Maasilta, I.J. (2017) Imaging bacterial colonies and phage-bacterium interaction at sub-nanometer resolution using helium-ion microscopy. *Adv Biosyst* **1**: 1700070.
- Larsen, P. (2016) More of an art than a science: using microbial DNA sequences to compose music. *J Microbiol Biol Educ* **17**: 129-132.
- Lee, S., Trinh, C.S., Lee, W.J., Jeong, C.Y., Truong, H.A., Chung, N., Kang, C.S., and Lee, H. (2020) *Bacillus subtilis* strain L1 promotes nitrate reductase activity in Arabidopsis and elicits enhanced growth performance in Arabidopsis, lettuce, and wheat. *J Plant Res* doi:10.1007/s10265-019-01160-4.
- Li, D-W. (2011) Five trillion basidiospores in a fruiting body of *Calvatia gigantea*. *Mycosphere* **2**: 457–462.
- López-Goñi, I., Martínez-Viñas, M.J., Antón, C.V., González, A., Brown-Jaque, M., García-Lobo, J., Sánchez, M., Vilchez, J., and Robledo-Mahón, T. *et al.* (2016) Twitter as a tool for teaching and communicating microbiology: The #microMOOCSEM Initiative. *J Microbiol Biol Educ* **17**: 492–494.
- Lübeck, M.L., and Lübeck, P.S. (2019) Application of lactic acid bacteria in green biorefineries. *FEMS Microbiol Lett* **366**: 1–8.
- Macalady, J.L., Jones, D.S., and Lyon, E.H. (2007) Extremely acidic, pendulous cave wall biofilms from the Frasassi cave system, Italy. *Environ Microbiol* **9**: 1402–1414.
- Martin, F.M., Uroz, S., and Barker, D.G. (2017) Ancestral alliances: plant mutualistic symbioses with fungi and bacteria. *Science* **356**: eaad4501.
- Martínez-Córdova, L.R., Emerenciano, M., Miranda-Baeza, A., and Martínez-Porchas, M. (2015) Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: an updated review. *Rev Aquacult* **7**: 131-148.
- McDonald, D., Hyde, E., Debelius, J.W., Morton, J.T., Gonzalez, A., and Ackermann, G., *et al.* (2018) American gut: an open platform for citizen science microbiome research. *mSystems* **3**: e00031-18.
- McGhie, H.A. (2019) Museums and the Sustainable Development Goals: a how-to guide for museums, galleries, the cultural sector and their partners. Curating Tomorrow, UK.
- McNear Jr., D.H. (2013) The rhizosphere - roots, soil and everything in between. *Nature Edu Know* **4**: 1.
- Medina-Sauza, R.M., Álvarez-Jiménez, M., Delhal, A., Reverchon, F., Blouin, M., Guerrero-Analco, J.A., Cerdán, C.R., Guevara, R., Villain, L., and Barois, I. (2019) Earthworms building up soil microbiota, a review. *Front Environ Sci* **7**: 81.
- Meléndez, J. (2019) Teaching microbiology by celebrating traditional foods and cultures from Morocco and Perú. *J Microbiol Biol Educ* **20**: 20.1.11.

- Minocha, S. Tilling, S., and Tudor, A-D. (2018) Role of virtual reality in Geography and Science. In *Knowledge Exchange Seminar Series, Learning from New Technology*, 25 Apr 2018, Belfast.
- Morgan-Sagastume, F., Karlsson, A., Johansson, P., Pratt, S., Boon, N., Lant, P., and Werker, A. (2010) Production of polyhydroxyalkanoates in open, mixed cultures from a waste sludge stream containing high levels of soluble organics, nitrogen and phosphorus. *Water Res* **44**: 5196-5211.
- Mueller, U.G., and Sachs, J.L. (2015) Engineering microbiomes to improve plant and animal health. *Trends Microbiol* **23**: 606-617.
- Mullish, B.H., Quraishi, M.N., and Segal, J.P. *et al.* (2018) The use of faecal microbiota transplant as treatment for recurrent or refractory *Clostridium difficile* infection and other potential indications: joint British Society of Gastroenterology (BSG) and Healthcare Infection Society (HIS) guidelines. *Gut* **67**: 1920-1941.
- Nielsen, P.H. (2017) Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. *Microb Biotechnol* **10**: 1102-1105.
- Napieralski, S.A., Buss, H.L., Brantley, S.L., Lee, S-Y., Xu, H-F, and Roden, E.E. (2019) Microbial chemolithotrophy mediates oxidative weathering of granitic bedrock. *Proc Natl Acad Sci USA* **116**: 26394-26401.
- Ofsted (2008) Learning outside the classroom. Ofsted Report <https://www.lotc.org.uk/wp-content/uploads/2010/12/Ofsted-Report-Oct-2008.pdf>.
- Park, S.F. (2012) Microbiology at home: a short non-laboratory manual for enthusiasts and bioartists. <https://exploringtheinvisible.files.wordpress.com/2013/11/manual2013.pdf>.
- Paul, V.G., and Mormile, M.R. (2017) A case for the protection of saline and hypersaline environments: a microbiological perspective. *FEMS Microbiol Ecol* **93**: fi x091.
- Pauli, J.N., Mendoza, J.E., Steffan, S.A., Carey, C.C., Weimer, P.J., and Peery, M.Z. (2014) A syndrome of mutualism reinforces the lifestyle of a sloth. *Proc R Soc B* **281**: 20133006.
- Raveendran, S., Parameswaran, B., Ummalyma, S.B., Abraham, A., Mathew, A.K., Madhavan, A., Rebello, S., and Pandey, A. (2018) Applications of microbial enzymes in food industry. *Food Technol Biotechnol* **56**: 16-30.
- Redfern, J., Burdass, D., and Verran, J. (2013) Practical microbiology in schools: a survey of UK teachers. *Trends Microbiol* **21**: 557-559.
- Redfern, J., Bowater, L., Coulthwaite, L., and Verran, J. (2020) Raising awareness of antimicrobial resistance among the general public in the UK: the role of public engagement activities. *JACAntimic Res* **2**: dlaa012.
- Reid, A., and Greene, S.E. (2013) How microbes can help feed the world. American Academy of Microbiology, Washington DC.
- Robbins, L.J., Funk, S.P., Flynn, S.L., Warchola, T.J., Li, Z., Lalonde, S.V., Rostron, B.J., Smith, A.J., Beukes, N.J., de Kock, M.O., Heaman, L.M., Alessi, D.S., and Konhauser, K.O. (2019) Hydrogeological constraints on the formation of Palaeoproterozoic banded iron formations. *Nat Geosci* **12**: 558-563.
- Ryu, C.-M., Farag, M. A., Hu, C.-H., Reddy, M. S., Wei, H.-X., Pare, P. W., *et al.* (2003) Bacterial volatiles promote growth in Arabidopsis. *Proc Natl Acad Sci USA* **100**: 4927-4932.
- Samsudin, M. W., Zakaria, Z., Daik, R., Meerah, T. S., Abdullah, S. I., and Halim, N. (2012) Lichens in the environment as a laboratory for environmental and science education. *Procedia – Soc Behav Sci* **59**: 627-634.
- Scavone, P., Carrasco, V., Umpiérrez, A., Morel, M., Arredondo, D., and Amarelle, V. (2019) Microbiology can be comic. *FEMS Microbiol Lett* **366**: fnz171.
- Schnetzer, J., Kopf, A., Bietz, M.J., Buttigieg, P.L., Fernandez-Guerra, A., and Ristov, A.P., *et al.* (2016) MyOSD 2014: Evaluating oceanographic measurements contributed by citizen scientists in support of Ocean Sampling Day. *J Microbiol Biol Edu* **17**: 163.
- Schulz, H.N. (2002) *Thiomargarita namibiensis*: giant microbe holding its breath. *ASM News* **68**: 122-127.
- Shams, L., and Seitz, A.R. (2008) Benefits of multisensory learning. *Trends Cogn Sci* **12**: 411-417.
- Sillman, J., Nygren, L., Kahiluoto, H., Ruuskanen, V., Tamminen, A., and Bajamundi, C. *et al.* (2019) Bacterial protein for food and feed generated via renewable energy and direct air capture of CO<sub>2</sub>: Can it reduce land and water use? *Global Food Security* **22**: 2211-9124.
- Smolke, C.D. (2009) Building outside of the box: iGEM and the BioBricks Foundation. *Nature Biotech* **27**: 1099-1102.
- Steinke, M., Exton, D.A., and McGenity, T.J. (2011) Challenges to the bio(geo)chemist: marine gases. *Biochemist* **33**: 20-25.
- Suttle, C.A. (2007) Marine viruses - major players in the global ecosystem. *Nat Rev Microbiol* **5**: 801-812.
- Tamang, J.P., Watanabe, K., and Holzapfel, W.H. (2016). Review: diversity of microorganisms in global fermented foods and beverages. *Front Microbiol* **7**: 377.
- Thompson, K.J., Kenward, P.A., Bauer, K.W., Warchola, T., Gauger, T., Martinez, R. *et al.* (2019) Photoferrotrophy, deposition of banded iron formations, and methane production in Archean oceans. *Sci Adv* **5**: eaav2869.
- Timmis, K.N., de Vos, W.M., and Ramos, J.L., *et al.* (2017a) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Microb Biotechnol* **10**: 984-987.

- Timmis, K.N., de Lorenzo, V., and Verstraete, W., *et al.* (2017b) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. *Microb Biotechnol* **10**: 1137–1144.
- Timmis, K., Cavicchioli, R., Garcia, J.L., Nogales, B., Chavarría, M., Stein, L., McGenity, T.J., Webster, N., Singh, B.K., and Handelsman, J. *et al.* (2019) The urgent need for microbiology literacy in society. *Environ Microbiol* **21**: 1513–1528.
- Trevelline, B.K., Fontaine, S.S., Hartup, B.K., and Kohl, K.D. (2019) Conservation biology needs a microbial renaissance: a call for the consideration of host-associated microbiota in wildlife management practices. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* **286**: 20182448.
- Trivedi, P., Schenks, P.M., Wallenstein, M.D., and Singh, B.K. (2017) Tiny microbes, big yields: enhancing food crops production with biological solutions. *Microb Biotechnol* **10**: 999–1003.
- Valderrama, M.J., González-Zorn, B., Calvo de Pablo, P., Díez-Orejas, R., Fernández-Acero, T., Gil-Serna, J., de Juan, L., Martín, H., Molina, M., and Navarro-García, F. *et al.* (2018) Educating in antimicrobial resistance awareness: adaptation of the Small World Initiative program to service-learning. *FEMS Microbiol Lett* **365**: fny161.
- van der Schatte Olivier, A., Jones, L., Vay Le, L., Christie, M., Wilson, J., and Malham, S.K. (2018) A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture. *Rev Aquacult* doi:10.1111/raq.12301
- Verran, J., Redfern, J., Moravej, H., and Adebola, Y. (2019) Refreshing the public appetite for 'good bacteria': menus made by microbes. *J Biol Edu* **53**: 34-46.
- Vissac, A., Bourges, A., Gandreau, D., Anger, R., and Fontaine, L. (2017) Argiles & biopolymères - les stabilisants naturels pour la construction en terre. Villefontaine, CRAterre éditions.
- von Kügelgen, A., Tang, H., Hardy, G.G., Kureisaite-Ciziene, D., Brun, Y.V., Stansfeld, P.J., Robinson, C.V., and Bhara, T.A.M. (2019) *In situ* structure of an intact lipopolysaccharide-bound bacterial surface layer. *Cell* **180**: 348-358.e15.
- Vrentas, C.E., Zinnen, T., and Huebert Lima, D.J. (2011) The MicroSafari: a journey into microbiology, an expedition into engagement. *J Microbiol Biol Educ* **12**: 61–63.
- Vriens, B., Voegelin, A., Hug, S.J., Kaegi, R., Winkel, L.H.E., Buser, A.M., and Berg, M. (2017) Quantification of element fluxes in wastewaters: a nationwide survey in Switzerland. *Environ Sci Technol* **51**: 10943– 10953.
- Webb, G. (2017) A review of microbiology service learning. *FEMS Microbiol Lett* **364**: fnx032.
- Westenberg, D.J. (2016) The engaged microbiologist: bringing the microbiological sciences to the K-12 community. *J Microbiol Biol Educ* **17**: 29-31.
- Whitaker, M.R.L., and Stolzmann, B.J. (2019) Species interactions and ants. *Front Young Minds* **7**: 53.
- Wijnen, B., Anzalone, G.C., and Pearce, J.M. (2014) Open-source mobile water quality testing platform. *Water Sanit Hyg Dev* **4**: 532–537.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., and Wood A. *et al.* (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet Comm* **393**: 447–492.
- Willis, K.J. (ed.) (2018) State of the World's Fungi 2018. Report. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Wolkers-Rooijackers, J.C.M., Endika, M.F., and Smid, E.J. (2018) Enhancing vitamin B<sub>12</sub> in lupin tempeh by *in situ* fortification. *LWT Food Sci Technol* **96**: 513–518.
- Yancey, P.H. (2005) Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses. *J Exp Biol* **208**: 2819–2830.
- Zubkov, M.V., Mary, I., Woodward, E.M.S., Warwick, P.E., Fuchs, B.M., Scanlan, D.J., and Burkill, P.H. (2007) Microbial control of phosphate in the nutrient-depleted North Atlantic subtropical gyre. *Environ Microbiol* **9**: 2079-2089.