

Aves y microbios: una historia de compañía que ha evolucionado con el tiempo

Maisy: ¿Cómo pueden los pájaros carpinteros crear nidos en madera?



Los pájaros carpinteros construyen sus casas con la ayuda de hongos. Ilustración de José Arce Gómez.

Mónica Rojas-Gómez ^{1,4}, Diego Rojas-Gätjens ¹ & Max Chavarría ^{1,2,3}

¹Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot), CeNAT-CONARE, San José, ²Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA), Universidad de Costa Rica, San José, ³Escuela de Química, Universidad de Costa Rica, San José, ⁴Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

Pájaros y microbios

Historia

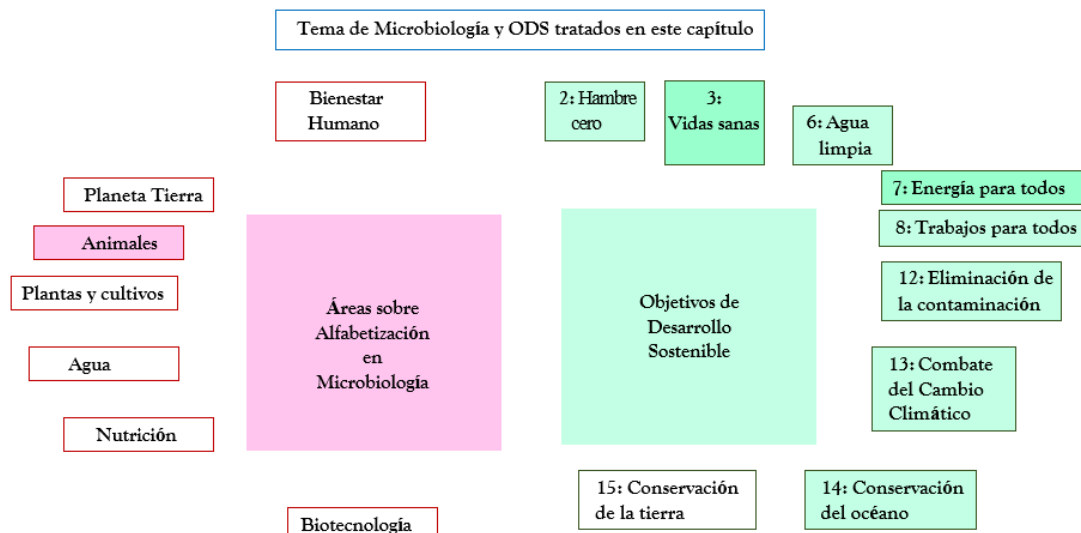
Muchas especies de aves viven con microbios en su cuerpo (plumaje, piernas, pico y ojos) y dentro de ellas (estómago e intestino); La gran mayoría de estos son inofensivos. Las interacciones permiten un intercambio de materia orgánica y moléculas entre las partes, trayendo muchos beneficios mutuos. Los microbios ayudan a las aves a realizar diversas tareas dentro de un ecosistema, mientras que los microbios aprovechan esto para propagarse y alimentarse más fácilmente.

En esta lección, encontraremos ejemplos de cómo los microbios interactúan con diferentes especies de aves para servir diversos propósitos dentro de un ecosistema. Primero, abordaremos el caso de la asociación de microbios con pájaros carpinteros, que ayudan a estas aves a construir sus casas. También discutiremos cómo los pájaros carpinteros y otras especies de aves usan sus propias plumas para alinear sus nidos y matar microbios patógenos. La increíble asociación entre aves y microbios también se reflejará con la discusión de obras que muestran que los microbios determinan el color del plumaje de ciertas aves, así como la importancia de los microbios que habitan las glándulas preen de las aves y emiten los olores que cumplen la función de mejorar la comunicación y la búsqueda de una pareja. Finalmente, discutiremos sobre los microbios que habitan el tracto gastrointestinal de las aves que juegan un papel muy importante en su salud. ¡Todos los detalles de estos ejemplos se verán a continuación!

El contexto de la microbiología y la sociedad

La Microbiología: microbiota; diversidad microbiana; interacciones de microorganismos con aves; Mecanismos de simbiosis.

Problemas de sostenibilidad: pérdida de biodiversidad; cambio climático; economía circular; energía; producción de alimentos y seguridad; contaminación ambiental; salud humana; Pandemias globales.



Microbios y aves: la microbiología

1. ***Los microbios han estado interactuando con las aves durante mucho tiempo.*** Hace aproximadamente 3,5 mil millones de años, los microbios aparecieron como las primeras y únicas formas de vida en nuestro planeta Tierra. Entonces, cuando las aves evolucionaron de los dinosaurios hace 150 millones de años, los microbios ya conocían los secretos de la vida y los trucos para interactuar de manera más rentable con estos animales. En general, las interacciones entre microbios y aves tienen una larga historia evolutiva y han jugado un papel crucial en la configuración de la vida en nuestro planeta.

Muchas especies de aves viven con microbios en sus cuerpos (plumaje, piernas, pico y ojos) y dentro de ellas (estómago e intestino), y la gran mayoría de estas interacciones son inofensivas. En general, permiten un intercambio de materia orgánica y moléculas entre las partes, trayendo muchos beneficios mutuos. Los microorganismos ayudan a las aves a realizar diversas tareas dentro de un ecosistema, mientras que los microbios aprovechan las aves para propagarse y alimentarse más fácilmente. ¡Ambos se benefician de esta convivencia! A continuación, encontraremos ejemplos de cómo los microbios interactúan con diferentes especies de aves para servir diversos propósitos dentro de un ecosistema.

2. ***Los microbios se asocian con pájaros carpinteros de cresta roja para ayudarlos a crear sus hogares.*** El pájaro carpintero de cresta roja (*Picoides borealis*) es un pájaro criador cooperativo que vive en grupos familiares. Este pájaro en peligro usa su pico para cavar grandes agujeros en la corteza de los árboles para formar su nido; es la única ave que elige árboles vivos en lugar de los muertos para formar estas cavidades. El trabajo que hace el pájaro carpintero requiere mucha energía y tiempo: en general, se necesitan entre un año y una década para completar su hogar. Y el trabajo es aún más arduo que este, porque cada miembro de la familia necesita su propio nido. Sin embargo, una vez que construyen sus casas o nidos, estas aves pueden usarlas durante muchos años.

Para reducir el trabajo de construir nidos en los tallos de los árboles, los pájaros carpinteros de cresta roja forman asociaciones con microbios que tienen la capacidad de romper la madera. Estos microbios son hongos que se conocen como hongos celulolíticos, es decir, tienen la capacidad de descomponer o suavizar la celulosa (la celulosa es el componente principal de los troncos de los árboles). Estos hongos se descomponen y suavizan los agujeros donde los pájaros carpinteros cavan, lo que hace que sea más fácil para estas aves construir sus casas. Al mismo tiempo, estas aves ayudan a los hongos a dispersarse y encontrar otras fuentes de nutrientes, transportando las esporas en sus plumas, piernas y pico.

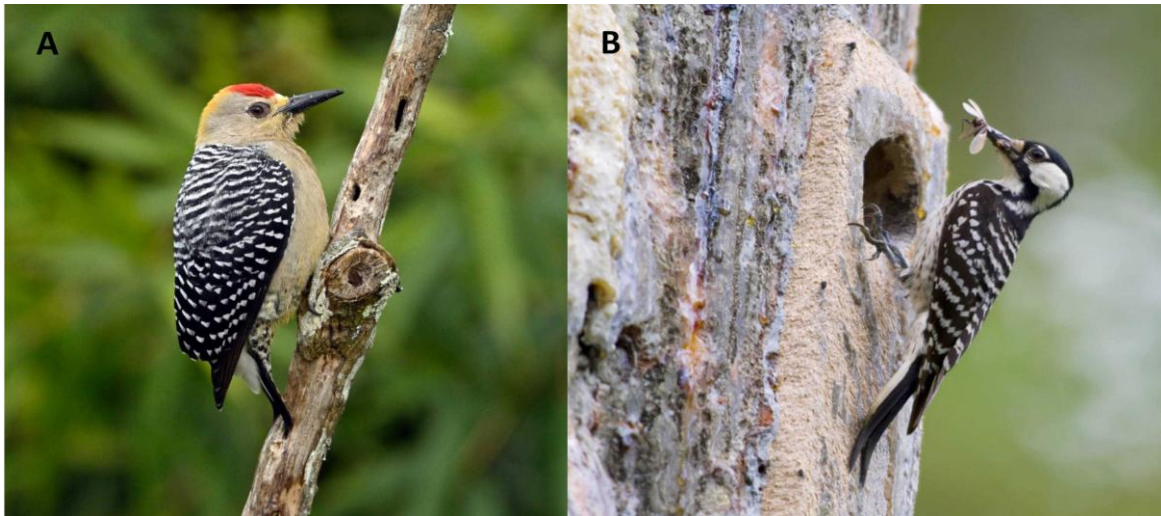
Históricamente, se pensó que los pájaros carpinteros de cresta roja tenían una asociación con un solo hongo llamado *Porodaedalea pini*, pero recientemente se ha demostrado que las excavaciones de estas aves albergan una diversidad de hongos, lo que sugiere que estas aves no tienen uno, sino muchos hongos asociados. La asociación entre pájaros carpinteros y hongos de cresta roja es un ejemplo de simbiosis. Una relación simbiótica se define como la interacción conjunta que tienen dos organismos diferentes, un proceso de asociación íntima, el producto de una historia evolutiva entrelazada. Pueden ser de diferentes tipos, y cuando en esta interacción conjunta se benefician, se llama mutualismo.

3. ***Los microbios de pájaros carpinteros de cresta roja son antiinfecciosos y ayudan a***

reducir la enfermedad en el nido. Algunos microbios patógenos o que causan enfermedades pueden afectar la salud de los pájaros carpinteros de cresta roja cuando están en sus nidos, por lo que estas aves han tenido que desarrollar algunas estrategias defensivas. Uno es la asociación con microbios beneficiosos con capacidades antimicrobianas, antivirales y citotóxicas. Por ejemplo, se ha observado que los pájaros carpinteros inoculan sus nidos a través de sus heces con un hongo llamado *Acaromyces ingoldii*. Este hongo les ayuda a eliminar los ácaros y otros ectoparásitos, y por lo tanto ayuda a mantener sus nidos limpios y libres de parásitos que causan enfermedades.

R: El pájaro carpintero de Hoffmann (*Melanerpes hoffmannii*) es un pájaro endémico de América Central, residente del sur de Honduras hasta Costa Rica; B: el pájaro carpintero de cresta roja (*Picoides borealis*) vive en los bosques de pinos del sureste de los Estados Unidos.

Los hongos de degradación de madera ayudan a los pájaros carpinteros de cresta roja a construir sus hogares. Los pájaros carpinteros de cresta roja (*Picoides borealis*) viven en los bosques de pinos del sureste de los Estados Unidos. Estas aves juegan un papel muy importante como "ingenieros del ecosistema": forman cavidades en los árboles para crear sus propios hogares y, cuando se mueven, las cavidades son utilizadas por otras especies en el ecosistema. Lo más curioso de esto es que estas aves no trabajan solas en la construcción de sus casas, pero obtienen ayuda de hongos con capacidad de degradación de madera. Un grupo de investigadores del Centro de Investigación de Micología Forestal del Servicio Forestal de los Estados Unidos en Wisconsin, demostró experimentalmente una simbiosis entre pájaros carpinteros y hongos. Capturaron pájaros carpinteros en un bosque de Carolina del Norte y tomaron muestras de hisopos de los picos, piernas y alas de pájaros capturados. El equipo encontró una amplia gama de esporas fúngicas, incluidas muchas que causan decadencia de madera. Para ver si los pájaros carpinteros se asocian con hongos y los transportan a sus cavidades, el equipo perforó agujeros en 60 troncos de árboles cerca de otros troncos con cavidades mantenidas naturalmente por los pájaros carpinteros. Treinta de estas cavidades estaban cubiertas con malla de acero con aberturas demasiado pequeñas para que pasen los pájaros carpinteros. Después de 26 meses, solo los agujeros que eran accesibles para las aves tenían comunidades fúngicas que vivían allí, y estos eran similares a los que se encuentran en las otras excavaciones naturales. Llegaron a la conclusión de que es posible que los pájaros carpinteros estén dispersando los hongos en las cavidades para facilitar el trabajo y, además, esto demuestra una simbiosis compleja entre los dos organismos, lo que puede tener implicaciones ecológicas.



También se ha observado que los pájaros carpinteros y otras especies de aves usan sus propias plumas para alinear sus nidos y matar microbios patógenos. Las plumas actúan como

defensas contra los microbios patógenos, gracias a las moléculas antimicrobianas producidas por microbios beneficiosos que crecen naturalmente en ellas. Los microbios que crecen en las plumas de las aves se llaman bacterias queratinolíticas, es decir, son capaces de degradar la queratina, el componente principal de las plumas. Las bacterias queratinolíticas son microbios que, además de producir queratinasas, son conocidos por su capacidad para secretar moléculas antimicrobianas de amplio espectro. Los pájaros carpinteros y otras aves aprovechan esta capacidad y las usan en sus nidos para reducir la carga del parásito y prevenir la enfermedad.

4. ***Hay microbios asociados con aves que determinan el color de su plumaje.*** Las plumas son las características más obvias de las aves y proporcionan diversas funciones, como proporcionar un alto nivel de aislamiento, mantener una gran flexibilidad y un peso mínimo en el vuelo, protección contra radiación solar e impermeabilización. Pero, también importante, el plumaje proporciona a las aves con colores exóticos y llamativos. Estos son clave para la comunicación entre los individuos, el camuflaje, la atracción de los compañeros, la defensa del territorio se esconde de los depredadores y protegen el plumaje de la radiación solar y la abrasión ambiental. Por ejemplo, las especies de aves que viven en el desierto, donde la arena produce una abrasión significativa en las plumas, tienden a ser negras. La melanina sirve para absorber la radiación ultravioleta, lo que puede explicar por qué las aves que viven en áreas abiertas también son de color más oscuro.

Las bacterias queratinolíticas generalmente crecen en el plumaje de las aves y los estudios han demostrado que estas bacterias pueden alterar la coloración de las plumas, lo que afecta directamente las características sexuales secundarias en las aves, como la coloración del plumaje y la condición corporal, las cuales son características importantes en la búsqueda de compañeros. Un estudio sobre *Sialis sialis*, comúnmente llamado Bluebird, mostró que las aves hembras tenían un color más opaco en sus plumas a medida que aumentaba el número de bacterias que queratinolíticas y, por el contrario, los machos tendían a ser brillantes cuando estas bacterias aumentaron. Del mismo modo, la condición corporal de las aves macho se vio afectada positivamente y tenían una mejor aptitud biológica, es decir, un mejor efecto sobre el comportamiento, el éxito reproductivo y la supervivencia. Por lo tanto, los microbios en las aves pueden ser importantes para cumplir con diferentes roles en el ecosistema, con el crecimiento de microbios inofensivos en el plumaje que promueve el éxito en la atracción y la reproducción de la pareja.

5. ***Los olores emitidos por los microbios de las aves son esenciales para la comunicación y la búsqueda de una pareja.*** El olor es un sentido básico vital para la supervivencia de humanos y animales. El olor puede advertir el peligro, usarse para encontrar y disfrutar de la comida, e incluso ayudar a comunicarse con otras personas y encontrar una pareja. Durante mucho tiempo, se creía que las aves no tenían el sentido del olfato. Sin embargo, estudios recientes han determinado que las aves no solo pueden oler, sino incluso identificarse entre sí cuando huelen el aroma único creado por sus microbios asociados con el aceite producido por sus glándulas Pren (ubicadas en la base de las plumas de la cola).

Al igual que los humanos que usan desodorante o perfume, las aves se preparan o se vuelven más atractivas cuando se frotan el pico sobre las glándulas Pren y luego frotan el aceite que se produce en sus plumas y cuerpo. Siempre se ha dicho que la función principal del aceite producido en las glándulas Pren es mantener limpias las plumas de las aves. Sin embargo, más recientemente se ha demostrado que este aceite contiene microbios que emiten olores únicos, y

Un marco educativo de microbiología centrado en la niñez

que estos olores mejoran la comunicación entre las aves y la búsqueda de una pareja. Por ejemplo, se ha observado que algunas especies de aves muestran una preferencia por ciertos olores aceitosos, y algunas aves femeninas incluso han abandonado al padre de su descendencia a favor de otras aves con un olor "mejor".

Se ha encontrado que los microbios que viven en el aceite de aves producen diferentes moléculas olfativas. Las diferentes combinaciones de moléculas emitidas por diferentes aves constituyen aromas personalizados para cada ave. Este fenómeno es muy similar a la situación en humanos: todos tenemos microbios en nuestro cuerpo que generan olores, por ejemplo, el olor a las axilas es generado por microbios que producen un olor único para cada persona. Los olores únicos producidos por los microbios asociados con las aves y proporcionan información crucial sobre la etapa del proceso reproductivo, la calidad o el estado hormonal de una pareja potencial, que afecta directamente el éxito del apareamiento en las aves. Una alteración de su microbiota puede hacer que los compañeros potenciales entre las aves sean menos atractivos. Esto puede suceder si el medio ambiente cambia, un pájaro sufre una infección o se producen cambios hormonales.

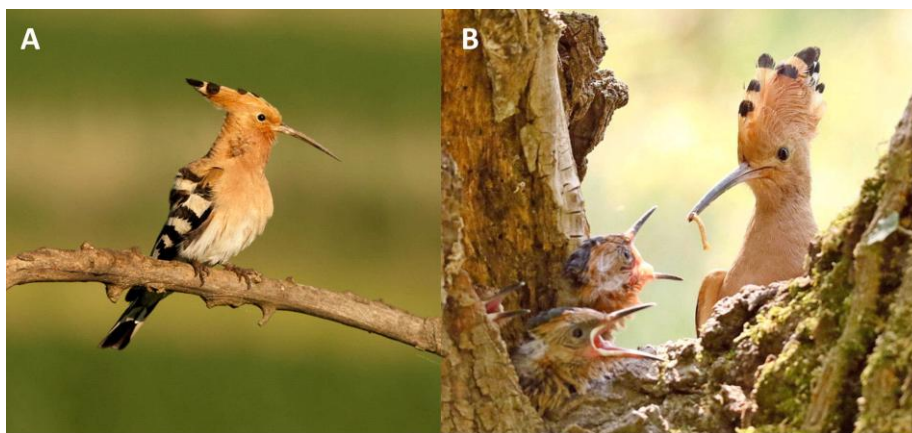
R: Los juncos son los "pájaros de nieve" de las latitudes medias. Durante la mayor parte del este de los Estados Unidos, aparecen cuando se establece el invierno, y luego se retiran hacia el norte cada primavera; B: Las bacterias del pájaro del "pájaro de Junco de ojos negros" son clave para la comunicación y el apareamiento en estas aves.

Las bacterias del "pájaro de Junco de ojos negros" son clave para la comunicación y el apareamiento en estas aves. Estudios anteriores han demostrado que las aves usan el olor para identificar a otras aves y encontrar compañeros. Recientemente, los científicos de la Universidad Estatal de Michigan descubrieron que los aromas emitidos por el pájaro de Junco de ojos negros (*Junco hyemalis*) son producidos por bacterias o microbios que crecen en el aceite de aseó de las glándulas Preen. Además, una alteración de estas bacterias productoras de olor podría afectar la capacidad de estas aves para comunicarse entre sí o encontrar una pareja. Los científicos hicieron dos pruebas experimentales: primero inyectaron antibióticos directamente en las glándulas preen de las aves en estudio. Observaron que cuando hicieron esto, las comunidades bacterianas cambiaron y lo más impresionante fue que también el olor característico del pájaro de Junco cambió por completo. Luego aislaron las bacterias directamente del aceite de aseó y midieron los olores producidos por cada una de las bacterias aisladas. En este segundo experimento, se descubrió que todos los cultivos de bacterias generaron al menos un compuesto volátil (un olor), y que el compuesto volátil era un estándar que ocurrió cuando se midió el aceite de preparación. Los investigadores mencionan que estos datos respaldan experimentalmente la hipótesis de que hay bacterias simbióticas que viven en el aceite de aseó del ave de Junco Ojos Negros y que podrían desempeñar un papel importante en la producción de señales químicas y, por lo tanto, en el comportamiento de estas aves.



R: El pájaro de aros es un pájaro migratorio que viaja desde Europa hasta el sur del Sahara para pasar el invierno; B: Tiene una glándula en la base de su cola de la que secreta una pasta cargada de bacterias que la madre se extenderá sobre sus huevos. Estos microbios ayudan a defender el huevo y el pollito contra la enfermedad y la pasta maloliente incluso puede evitar depredadores.

Las bacterias que habitan las glándulas preen del pájaro "Hoopoe" (UPUPA EPOPS) producen sustancias antimicrobianas contra los patógenos. El "aro" es un pájaro que anida en agujeros y tiene una asociación simbiótica con bacterias que residen en sus glándulas Preen. Varios estudios han demostrado que estas bacterias proporcionan al ave sustancias antimicrobianas como bacteriocinas y metabolitos volátiles que ayudan a proteger las plumas contra las bacterias queratinolíticas y los huevos contra los patógenos. Hay evidencia de que diferentes especies de bacterias habitan las glándulas Preen del pájaro de aros; La comunidad microbiana se origina en diferentes fuentes, como el medio ambiente y la microbiota parental.

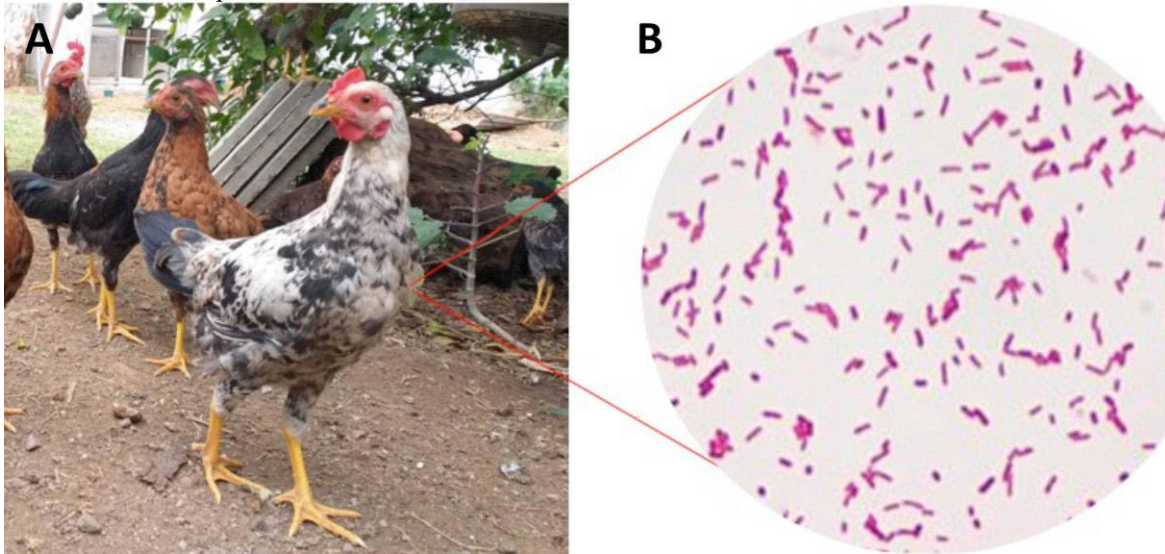


6. Los microbios en el tracto gastrointestinal juegan un papel importante en la salud de las aves. El intestino de las aves es un ecosistema complejo y dinámico compuesto por varios microbios, como bacterias, hongos, levaduras y virus. Este ecosistema se conoce como microbiota y tiene una relación simbiótica con las aves. En aves sanas, la microbiota estimula el sistema inmune, defiende las aves contra las infecciones y proporciona capacidades metabólicas que les permiten digerir y aprovechar los componentes de los alimentos que no serían metabolizados por el sistema digestivo de las aves. Del mismo modo, la microbiota en las aves puede modular la expresión de diferentes genes, principalmente relacionados con el sistema inmune y la fisiología digestiva. En sí mismo, la microbiota tiene una gran capacidad de adaptación y una resiliencia bastante notable, pero puede ser alterado por varios factores y lleva mucho tiempo volver al estado original de equilibrio.

Los estudios sobre la influencia de la microbiota en la salud y la producción de aves de corral han aumentado en los últimos años y los nuevos enfoques para analizar e interpretar el funcionamiento de la microbiota en las aves de corral han permitido seguir la evolución de estos microorganismos en respuesta a los cambios en la dieta, el estrés, el tratamiento con antimicrobianos, probióticos, etc., que abre un nuevo campo de trabajo que contribuye significativamente a la salud y el bienestar de la salud y el producto.

R: las aves de corral domésticas y agrícolas, como los pollos, a menudo sufren infecciones de bacterias múltiples *Salmonella*; B: *Salmonella* son bacterias patógenas que causan diarrea severa en humanos.

¡Alerta! No todas las bacterias relacionadas con las aves son buenas para las aves y nosotros. Aunque algunas bacterias que viven con aves brindan beneficios, también hay algunas que pueden ser peligrosas para ellos y para nosotros. Esto es particularmente cierto para las aves domésticas (avicultura). Por ejemplo, los productos derivados del pollo están fuertemente asociados con la presencia de bacterias patógenas como *Salmonella*. La mejor manera de evitar enfermarse de estas bacterias es desinfectar huevos y otros productos relacionados con el pollo antes de consumirlos.



Relevancia para los objetivos de desarrollo sostenible y los grandes desafíos

- **Objetivo 2. Fin del hambre.** Aunque la mayoría de las asociaciones de aves: microbios tratados aquí involucran vida silvestre, la asociación entre microbios y aves de avicultura es significativa para aumentar la producción de alimentos. Comprender que la microbiota de estas aves impactan directamente su desarrollo ayudará en el desarrollo de nuevas alternativas para la avicultura que generan menos contaminación.
- **Objetivo 3. Asegúrese de vidas saludables y promueva el bienestar.** Al comprender que los microbios son una parte importante del cuerpo de las aves; También entendemos la atención que debe tenerse al interactuar con la vida silvestre que puede albergar microbios que causan enfermedades zoonóticas.
- **Objetivo 6. Agua limpia y saneamiento.** Comprender la interacción de las aves con la microbiota puede ayudarnos a reducir el uso de antibióticos y otros productos químicos en granjas avícolas, lo que conduce a la contaminación de aguas y suelos.
- **Objetivo 7. Energía asequible y limpia: particularmente los pájaros carpinteros están asociados con múltiples hongos celulolíticos.** La celulosa es una fuente abundante de carbono renovable que, una vez degradada, por ejemplo, por hongos celulolíticos, en azúcares simples,

Un marco educativo de microbiología centrado en la niñez

puede usarse para producir otros productos químicos como el biodiesel, que tiene un gran potencial como fuente de energía limpia.

- **Objetivo 8. Jobs para todos.** *La observación de aves es una actividad humana que se ha expandido en todo el mundo y ha ganado importancia económica en algunos países.*

Comprender la importancia funcional de la microbiota de las aves puede ayudar a mejorar las prácticas de conservación que permiten la proliferación de especies en peligro de extinción y al mismo tiempo aumentar la atracción turística de una región.

- **Objetivo 12. Eliminar la contaminación.** Los desechos de avicultura generalmente no están bien manejados y no tienen una forma de tratamiento estandarizada. Por otro lado, los hongos celulolíticos son importantes para reciclar múltiples desechos agrícolas.

- **Objetivo 14. Vida debajo del agua.** El uso de menos productos químicos en cantidades más bajas en la avicultura reducirá la contaminación de ríos, lagos y océanos. Además, comprender la importancia de las aves en sus hábitats ayudará a que las personas sean conscientes de la importancia de reducir el uso de productos químicos contaminantes en su vida diaria.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

a. ¿Qué tan cerca debemos estar con las aves silvestres? Necesitamos entender que las aves llevan su propia microbiota que puede ayudarlos a sobrevivir en su entorno y debemos evitar perturbarlo. Y, por otro lado, existen riesgos asociados para los humanos debido a enfermedades zoonóticas.

b. Fomentar los patrones y estilos de vida de consumo sostenible individuales para reducir las huellas ambientales, por ejemplo, tomando decisiones informadas sobre el uso de productos avícolas basados en principios amigables con el medio ambiente y evitando el uso no clínico de antibióticos que aumentan los problemas de salud y la resistencia antimicrobiana.

2. Políticas comunitarias

a. ¿Cómo proteger las aves? Aumente la conciencia sobre el papel de las aves y su microbiota para promover la creación de políticas comunitarias que protejan las especies de Endemismo Localmente y, por lo tanto, en todo el mundo. La conciencia también crea conciencia con respecto a la caza y la captura de especies exóticas.

b. Aumente la conciencia de que los huevos y otros productos derivados de aves transportan múltiples bacterias que pueden ser patógenas para los humanos para mejorar los hábitos de higiene de la comunidad y reducir la tasa de infección de patógenos derivados de aves, como *Salmonella*

3. Políticas nacionales

a. Comprender la importancia de las aves y su microbiota en entornos naturales ayuda a crear conciencia sobre la caza ilegal y alentar a la generación de nuevas medidas a eliminar esta práctica que afectan múltiples especies en peligro de extinción.

Participación de la pupila

1. Discusión de la clase de los problemas asociados con la microbiota de las aves.

Un marco educativo de microbiología centrado en la niñez

- a. ¿Viven los microbios dentro o sobre las aves? ¿Cómo influyen estos microbios en su salud?
 - b. ¿Discutir cómo interactúan los pájaros carpinteros con los hongos para construir sus hogares? ¿Qué obtienen los hongos a cambio? do. ¿Cómo afectan los microbios la forma en que las aves se comunican entre sí? ¿Dónde obtienen las aves sus microbios?
2. Conciencia de las partes interesantes para el alumno.
- a. ¿Deberíamos tener cuidado cuando consumimos productos asociados a las aves?
 - b. ¿Puedes nombrar algunas bacterias que se encuentran comúnmente en tales productos?
3. Ejercicios
- a. ¿Diría que el pájaro carpintero: la interacción de hongos es una simbiosis o una interacción mutualista? Explique la diferencia.
 - b. Investigue los pájaros carpinteros en la web.
 - c. ¿Cuánto tiempo necesitan para construir sus nidos? ¿Es este tiempo suficiente para que los hongos degraden la madera en el árbol?
 - d. Salir: ¿puedes encontrar algún pájaro? Según lo que ves, ¿puedes intentar adivinar en qué se alimenta este pájaro y cómo este alimento puede influir en la microbiota que albergan?
 - e. Investiga a otro animal cuyo color puede ser determinado por su microbiota. ¿Qué aprendes?

La base de evidencia, lectura adicional y ayudas para enseñar

Vídeo: El escudo apestoso del pájaro hoopoe | microbe minuto /h
<https://www.youtube.com/watch?v9}8gpes5ldbmc>

Vídeo: Expedición 1_microbes en Bird Bath /https://
www.youtube.com/watch?v10}kdwdxbcdmgy

Vídeo: Expedición 52_microbes en Bird Bath S2/h
https://www.youtube.com/watch?v11hhegp8317_g

Referencias

- Archie *et al.* (2011) El comportamiento animal cumple con la ecología microbiana. *Comportamiento animal*. 82 (3): 425-436. 10.1016/j.anbehav.2011.05.029
- Burger *et al.* (2004) secreciones exocrinas aviares. I. Caracterización química de la fracción volátil de la secreción uropygial de la madera verde, *Phoeniculus purpureus*. *Journal of Chemical Ecology*. 30: 1603–1611.
- C arthey *et al.* (2018). El genotipo extendido: comunicación olfativa mediada por microbios.

Un marco educativo de microbiología centrado en la niñez

- Tendencias en ecología y evolución. 33 (11): 885-894. Marke *et al.* (2006) ¿Qué uso es la mitad de un ala en la ecología y la evolución de las aves? *BioScience*. 56 (5): 437–445.
- Elliott *et al.* (2019) Una revisión global de la importancia ecológica de las asociaciones simbióticas entre aves y hongos. *Diversidad fúngica*. 98: 161–194. <https://doi.org/10.1007/S13225-019-00436-3>.
- García-Aamado M *et al.* (2018) Comparación de la molleja y la microbiota intestinal de las aves neotropicales salvajes. *Plos One* 13: E0194857. Garner JP *et al.* (1999) Sobre los orígenes de las aves: la secuencia de adquisición de personajes en la evolución del vuelo aviar. *Proc.*
- R. Soc. Londres B. 266: 1259-1266. Grond K *et al.* (2018) La microbiota intestinal aviar: comunidad, fisiología y función en aves silvestres. *Journal of Avian Biology*. 49 (11): 186-192. <https://doi.org/10.1111/jav.01788>.
- Gunderson *et al.* (2009) evidencia de que las bacterias del plumaje influyen en la coloración de la pluma y la condición corporal de los pájaros azules orientales *Sialia sialis*. *Journal of Avian Biology*. 40 (4): 440-447. <https://doi.org/10.1111/j.1600-048x.2008.04650.x>.
- Han GG *et al.* (2016) Relación entre la microbiota en diferentes secciones del tracto gastrointestinal y el peso corporal de los pollos de engorde. *Springerplus*. 5: 911. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2604-8>.
- Heers *et al.* (2014) Desde pájaros bebés hasta dinosaurios emplumados: alas incipientes y la evolución del vuelo. *Paleobiología*. 40 (3): 459–476 HIRD SM *et al.* (2015) microbiota intestinal comparativa de 59 especies de aves neotropicales. *Fronteras en microbiología*. 6: 501-507. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01403>
- Jackson JA, Jackson BJ (2004) Relaciones ecológicas entre los hongos y los sitios de cavidad de carpintero. *El cóndor*. 106: 37–49. Jankowiak R *et al.* (2019) Diversidad de hongos que habitan la madera en las cavidades de nidos de pájaros carpinteros en el sur de Polonia. *Acta Mycol*. 54 (1): 1126. <https://doi.org/10.5586/am.1126>
- Javůrková, V.G., Kreisinger, J., Procházka, P. *et al.* (2019) Microcosmos de pluma revelado: la microbiota de pluma de las aves pasajeras está estrechamente asociada con la identidad de especies huéspedes y la bacteria productora de bacteriocina. *ISME J*. 13, 2363–2376. <https://doi.org/10.1038/S41396-019-0438-4>
- Johansson Nr *et al.* (2021) Los pájaros carpinteros pueden actuar como vectores de dispersión para hongos, plantas y microorganismos. *Ecología y evolución*. 00: 1–10. <https://doi.org/10.1002/ece3.7648>.
- Jusino MA (2014) Las comunidades fúngicas asociadas con pájaros carpinteros rojos y sus excavaciones: evidencia descriptiva y experimental de simbiosis. Tesis doctoral, tesis doctoral. Instituto Politécnico de Virginia y Universidad Estatal.

Un marco educativo de microbiología centrado en la niñez

- Jusino MA *et al.* (2016) Evidencia experimental de una simbiosis entre los pájaros carpinteros y hongos de cocción roja. *Proc. R. Soc. B.* 283 (1827): 1471-2954.
- Krause *et al.* (2012) Reconocimiento de parientes olfativos en un pájaro cantor. *Cartas de biología.* 8 (3): 327-329. <http://doi.org/10.1098/rsbl.2011.1093>.
- Law- Brown J & Meyers PR (2003) *Enterococcus phoeniculicola* sp. Nov., Un miembro novedoso de los enterococos aislados de la glándula urópica de Woodhoopoe de pico rojo, *Phoeniculus purpureus*. *Revista Internacional de Microbiología Sistemática y Evolutiva.* 53: 683–685.
- Lomb ardo M (2008) Acceso a microbios endosimbióticos mutualistas: un beneficio subestimado de la vida grupal. *Ecología conductual y sociobiología.* 62: 479–497.
- Maraci *et al.* (2018) Comunicación olfativa a través de Microbiota: ¿Qué se sabe en las aves? *Genes.* 9 (8): 387. <https://doi.org/10.3390/genes9080387>.
- Martín-Platero *et al.* (2006) Caracterización de sustancias antimicrobianas producidas por *Enterococcus faecalis* MRR 10-3, aislada de la glándula uropial del H oopOE *Upupa epops*. *Microbiología aplicada y ambiental.* 72: 4245–4249.
- Martín-Vivaldi *et al.* (2010) Los productos químicos antimicrobianos en las secreciones de preen de aros son producidas por bacterias simbióticas. *Proc. R. Soc. B.* 277 (1678): 123–130. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.1377>
- Moran Na (2006) Simbiosis. *Biología actual.* 16: 866–871. Ostrom JH (1976) Algunas etapas anatómicas hipotéticas en la evolución del vuelo aviar. *Contribuciones Smithsonian a la paleobiología.* 27: 1–21.
- Padian K *et al.* (2001) Tasas de crecimiento de dinosaurio y orígenes de aves. *Naturaleza.* 412: 405–408. Rubaiee *et al.* (2020) No tan negro, no tan blanco: diferencias en la carga de microorganismo de plumas contiguas de polluelos de cigüeña blanca, *zoología actual.* 67 (33): 263–270.
- Shawkey *et al.* (2007) Las bacterias como agente para el cambio en el color del plumaje ~~estructural: evidencia correlacional~~ y experimental. *La sociedad estadounidense de naturalistas.* 169: 231-240. <https://doi.org/10.1086/510100>.
- Soler *et al.* (2008) Asociación simbiótica entre Hoopoes y bacterias productoras de antibióticos que viven en su glándula urópica. *Ecología funcional.* 22 (5): 864-871. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01448.x>.
- Soler jj *et al.* (2010) Bacterias productoras de antibióticos como una posible defensa de las aves contra los microorganismos patógenos. *The Open Ornithology Journal.* 3: 93-100.
- Whittaker *et al.* (2019) Evidencia experimental de que las bacterias simbióticas producen señales químicas en un pájaro cantor. *Journal of Experimental Biology.* 222 (20): 237-242. <https://doi.org/10.1242/jeb.202978>.

Glosario

Hongos: microorganismos de formación de esporas eucariotas que se alimentan en materia orgánica, es decir. Relación simbiótica de moldes, levadura y hongos: una relación entre dos organismos de diferentes especies en las que ambos necesitan el otro para sobrevivir.

Mutualismo: una relación entre dos organismos de diferentes especies en las que ambos se benefician de su asociación, pero no se requiere estrictamente para su supervivencia.

Hongos celulolíticos: hongos que degradan la celulosa usando enzimas extracelulares que rompen sus límites de carbono para producir azúcar más simple como la glucosa.

Celulosa: polímero producido por plantas, consiste en una base de polisacárido en la cadena lineal de moléculas de glucosa.

Esporas: un cuerpo reproductivo unicelular que generalmente está latente y presenta una resistencia de aumento a las tensiones ambientales.

Patógeno: agente biológico que causa una enfermedad a su huésped.

Antimicrobiano: compuestos que pueden inhibir el crecimiento del microorganismo debido a su naturaleza química.

Antiviral: un compuesto químico que puede inhibir la replicación del virus.

Ectoparasites: parásitos que infectan la superficie de su huésped, como la piel. Las pulgas y los grillos se clasifican como ectoparásitos.

Bacterias queratinolíticas: la queratina es la proteína principal del cabello y las plumas. Las bacterias queratinolíticas son los microbios que pueden alimentarse de la queratina.

Parásito: un organismo que vive en otra especie y nutrir al afectar negativamente a su huésped.

Camuflaje: la capacidad de esconder o disfrazar un organismo en un entorno determinado.

Glándulas Pren: una glándula en la base de la cola de las aves que producen aceite de preening.

Bacteriocinas: una proteína bacteriana que inhibe el crecimiento de bacterias relacionadas filogenéticamente cerca.

Metabolitos volátiles: compuestos químicos que se caracterizan por su capacidad para vaporizar a bajas temperaturas relativas.

Microscopio de fluorescencia: una técnica de microscopía donde las sustancias fluorescentes se examinan utilizando un microscopio.

Tinte Hoescht: tinte fluorescente que mancha el ADN en bacterias y células eucariotas
Microbiota: el conjunto de todos los microorganismos que habitan un hábitat específico.

Un marco educativo de microbiología centrado en la niñez

Sistema inmunitario: un conjunto de órganos y células que están a cargo de proteger al cuerpo de las infecciones patógenas.

Probióticos: bacterias que benefician el sistema gastrointestinal de su huésped por la secreción de múltiples compuestos