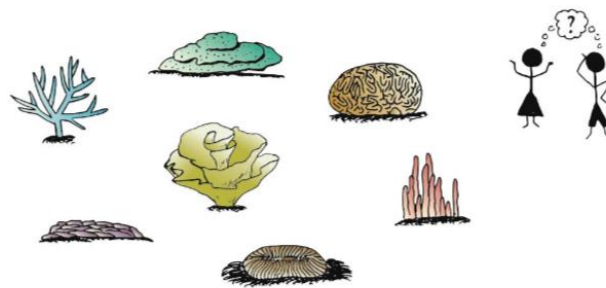


Arrecifes de coral y sus microbios

Señor: Escuché que los corales son seres vivos, pero a mí solo me parecen rocas rugosas.



Katarina Damjanovic ¹ y Nicole Webster ^{1,2}

¹Instituto Australiano de Ciencia Marina, Townsville Australia

²Centro Australiano para Ergonomia, Universidad de Queensland, Brisbane, QLD, Australia

Arrecifes de Coral

Historia

Los arrecifes de coral son estructuras vivas inmensamente bellas y complejas, con una enorme importancia ecológica y social. Al proporcionar hábitat y alimento a una infinidad de especies marinas, los arrecifes de coral sustentan una biodiversidad inmensa y, por ello, a menudo se les conoce como las “selvas tropicales del mar”. Millones de personas en todo el mundo dependen de los arrecifes de coral para su alimentación (pesquerías), protección costera y medios de vida (turismo). Por lo tanto, los arrecifes de coral desempeñan un papel fundamental en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (por ejemplo, erradicar el hambre, asegurar empleos y conservar los océanos).

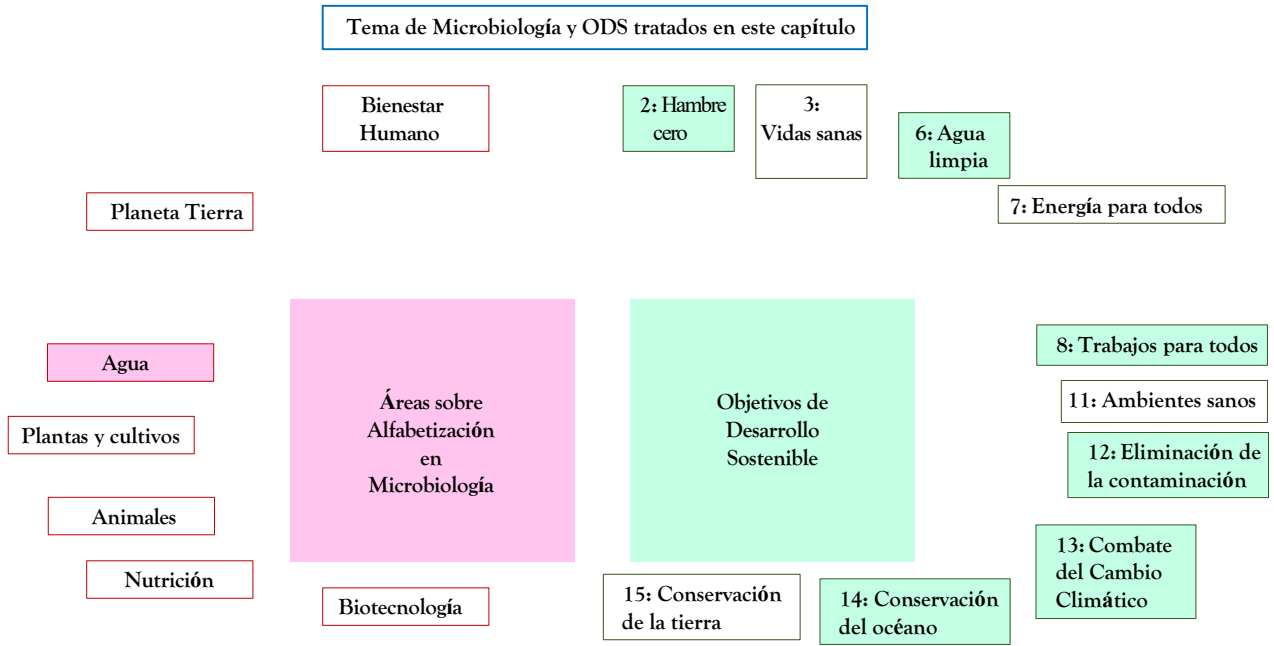
Los corales son invertebrados marinos emparentados con las anémonas de mar, pero secretan un esqueleto duro de carbonato de calcio. Es la acumulación de muchos corales que crecen y depositan lentamente sus esqueletos a lo largo de miles de años lo que, en última instancia, forma las grandes estructuras arrecifales visibles desde el espacio exterior. Sin embargo, el crecimiento, la reproducción y la formación del esqueleto de los corales son procesos que requieren una cantidad considerable de energía. Para sostener esta demanda, el coral no vive solo, sino que forma una relación íntima con diversos microorganismos. Estos microbios incluyen algas unicelulares diminutas que residen dentro de las células del coral, así como comunidades diversas de bacterias y virus. Los microorganismos asociados a los corales se benefician al alimentarse de los productos de desecho del animal y, a cambio, realizan diversas funciones esenciales para su hospedador. Las pequeñas algas utilizan la energía del sol para sintetizar azúcares, los cuales son transferidos al coral como su principal fuente de alimento, mientras que las bacterias le proporcionan nutrientes y vitaminas esenciales. Además, las bacterias beneficiosas pueden proteger a los corales de microbios patógenos al competir por espacio y alimento, y al producir compuestos antimicrobianos.

Los arrecifes de coral en todo el mundo están en crisis, severamente amenazados por el cambio climático global causado por el ser humano y otras perturbaciones locales. La mayor amenaza para los corales es el calentamiento global, ya que los simbiontes microalgales son expulsados del coral cuando la temperatura del agua del mar aumenta solo entre 1 y 2 °C por encima de las condiciones normales durante un periodo prolongado o durante olas de calor intensas. La pérdida de los simbiontes microalgales inevitablemente conduce al hambre y la muerte del coral si no logra recuperar nuevos simbiontes con suficiente rapidez. Además, los factores de estrés causados por actividades humanas (por ejemplo, cambio climático, contaminación, sobrepesca) pueden alterar negativamente las comunidades bacterianas asociadas al coral, lo que puede comprometer su supervivencia. Considerando el papel crucial que desempeñan los microbios en la salud de los corales, las evaluaciones sobre cómo los arrecifes de coral contribuyen a los Objetivos de Desarrollo Sostenible también deben tener en cuenta a los microorganismos de los arrecifes.

El contexto de la microbiología y la sociedad

Microbiología: microorganismos asociados a corales; simbiosis; holobionte; microalgas; zooxantelas; fotosíntesis; blanqueamiento del coral; bacterias; ciclo de nutrientes; protección contra patógenos; cambios en la composición de comunidades bacterianas; enfermedades del coral; manipulación microbiana. Contexto social: servicios proporcionados por los arrecifes de coral; pesquerías; economía; calentamiento global; contaminación; sobrepesca; efectos de los gases de efecto invernadero.

Un marco educativo centrado en microbiología

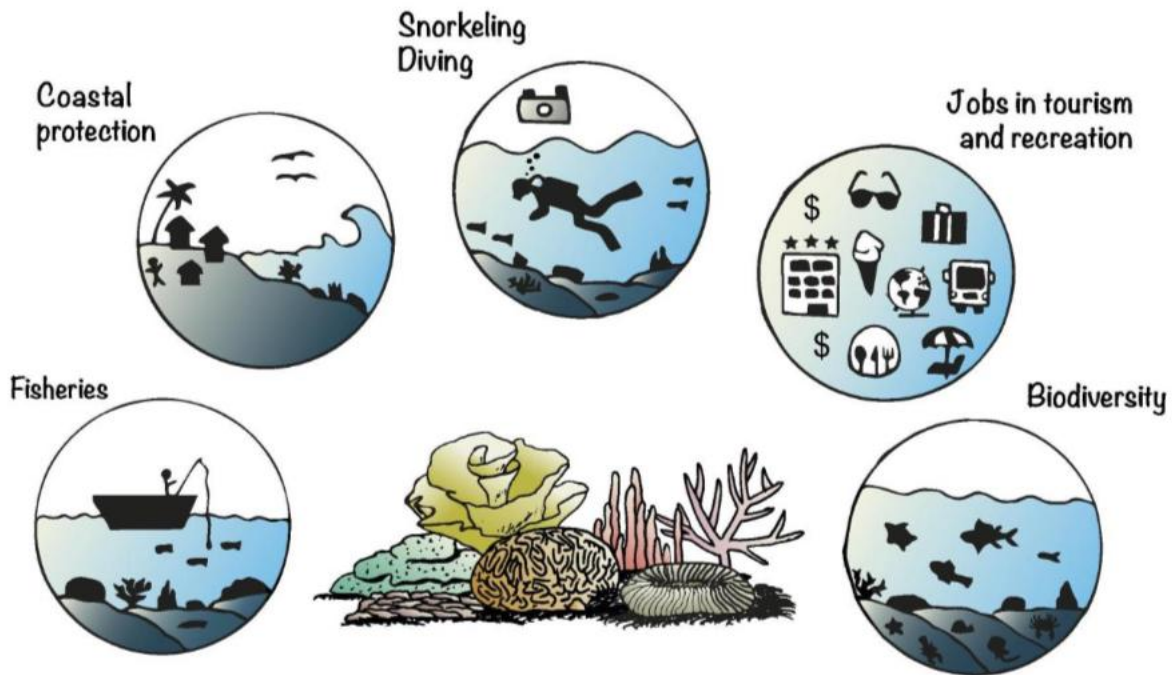


Arrecifes de Coral: la microbiología

1. **Impotancia general e los Arrecifes de Coral.** Los arrecifes de coral tropicales se encuentran en 79 países y cubren un área de aproximadamente 275,000 km². En comparación, esta superficie es ligeramente mayor que la del Reino Unido y representa menos del 0.1% del área total de los océanos. Sin embargo, su importancia ecológica, social y económica es inmensa. El valor estimado de todos los bienes, servicios y medios de vida derivados de los arrecifes de coral (incluyendo turismo, pesca y protección costera) supera los 30 mil millones de dólares estadounidenses. Las pesquerías asociadas a los arrecifes son particularmente importantes, ya que constituyen una fuente primaria de alimento para aproximadamente 275 millones de personas en todo el mundo. Además, estos ecosistemas poseen un profundo valor cultural y forman parte importante de la identidad nacional de muchos países. El turismo relacionado con los arrecifes contribuye con alrededor de 11.5 mil millones de dólares al año a la economía mundial. Por ejemplo, los arrecifes frente al sureste de Florida generan casi 28 millones de días-persona en actividades recreativas de buceo, pesca y observación, lo que se traduce en 4.4 mil millones de dólares en ventas locales, casi 2 mil millones de dólares en ingresos locales y más de 70,000 empleos. Otro ejemplo es la Gran Barrera de Coral (GBR, por sus siglas en inglés), que es la estructura viviente más grande del mundo y una de las siete maravillas naturales del planeta (las otras son: el Monte Everest, la Bahía de Río de Janeiro, las Cataratas Victoria, el Volcán Parícutín, el Gran Cañón y las Auroras Boreales). La Gran Barrera de Coral aporta más de 6 mil millones de dólares al año a la economía australiana y sostiene alrededor de 64,000 empleos. Además, los arrecifes de coral brindan protección costera para los recursos terrestres y la infraestructura humana, lo cual es especialmente importante durante tormentas, ciclones y tsunamis. Esta protección costera proporcionada por los arrecifes tiene un valor estimado de casi 11 mil millones de dólares, lo que puede considerarse una alternativa natural al alto costo de construir muros de contención a lo largo de las costas. Así mismo, los arrecifes de coral producen grandes cantidades de arena y roca aprovechables (derivadas de los esqueletos de corales muertos), que son de enorme valor para muchas comunidades costeras, especialmente aquellas que viven en islas coralinas sin otras fuentes de estos materiales. Finalmente, los arrecifes de coral son los mayores reservorios de biodiversidad del planeta, albergando aproximadamente una tercera parte de toda la biodiversidad marina. Aunque los arrecifes tropicales suelen ser el principal foco de investigación marina, los científicos también han descubierto recientemente una sorprendente abundancia de arrecifes de coral

Un marco educativo centrado en microbiología

fríos y de aguas profundas, ampliamente distribuidos por los océanos del mundo. Estos arrecifes ofrecen hábitat a cientos de especies de peces e invertebrados, incluyendo camarones, cangrejos y otros animales de gran importancia comercial para los seres humanos.



2. **El animal coralino.** A pesar de estar permanentemente fijos al fondo marino y de su engañoso parecido con las rocas o las plantas, los corales son en realidad animales vivos con características fascinantes. Los corales duros (también conocidos como corales constructores de arrecifes o **corales escleractinios**) forman la estructura tridimensional del arrecife al depositar esqueletos de carbonato de calcio. Sus formas varían desde bloques simples y uniformes hasta estructuras más intrincadas, con columnas, capas planas tipo mesa o ramas complejas. Los corales duros han prosperado en el planeta durante más de 200 millones de años y se han diversificado en más de 1,600 especies reconocidas actualmente (Figura 1A).

Aunque están estrechamente relacionados con las medusas y las anémonas de mar, la mayoría de los corales son **organismos coloniales**, compuestos por múltiples individuos clonales que están físicamente conectados entre sí. Estos individuos se denominan **pólipos**, y su tamaño puede variar desde unos pocos milímetros hasta varios centímetros de diámetro, dependiendo de la especie (Figura 1B). Los esqueletos protegen a los pólipos de los depredadores y sirven como sustrato sobre el cual crecer. Los pólipos de coral están compuestos por diferentes tipos de tejidos y poseen sistemas nervioso, muscular y reproductivo separados.

Los pólipos de coral utilizan sus tentáculos para capturar pequeños animales que nadan en la columna de agua y que sirven como fuente nutritiva. La presa se captura mediante células urticantes especializadas (llamadas **cnidocitos**) que se encuentran en la superficie externa de los tentáculos. Las medusas y las anémonas poseen el mismo tipo de célula urticante, que puede causar dolor en los humanos que las tocan accidentalmente. Una vez que la presa es capturada, se lleva a la boca del pólipo y se digiere en el estómago. Luego, los desechos se expulsan a través de la misma abertura que la boca.

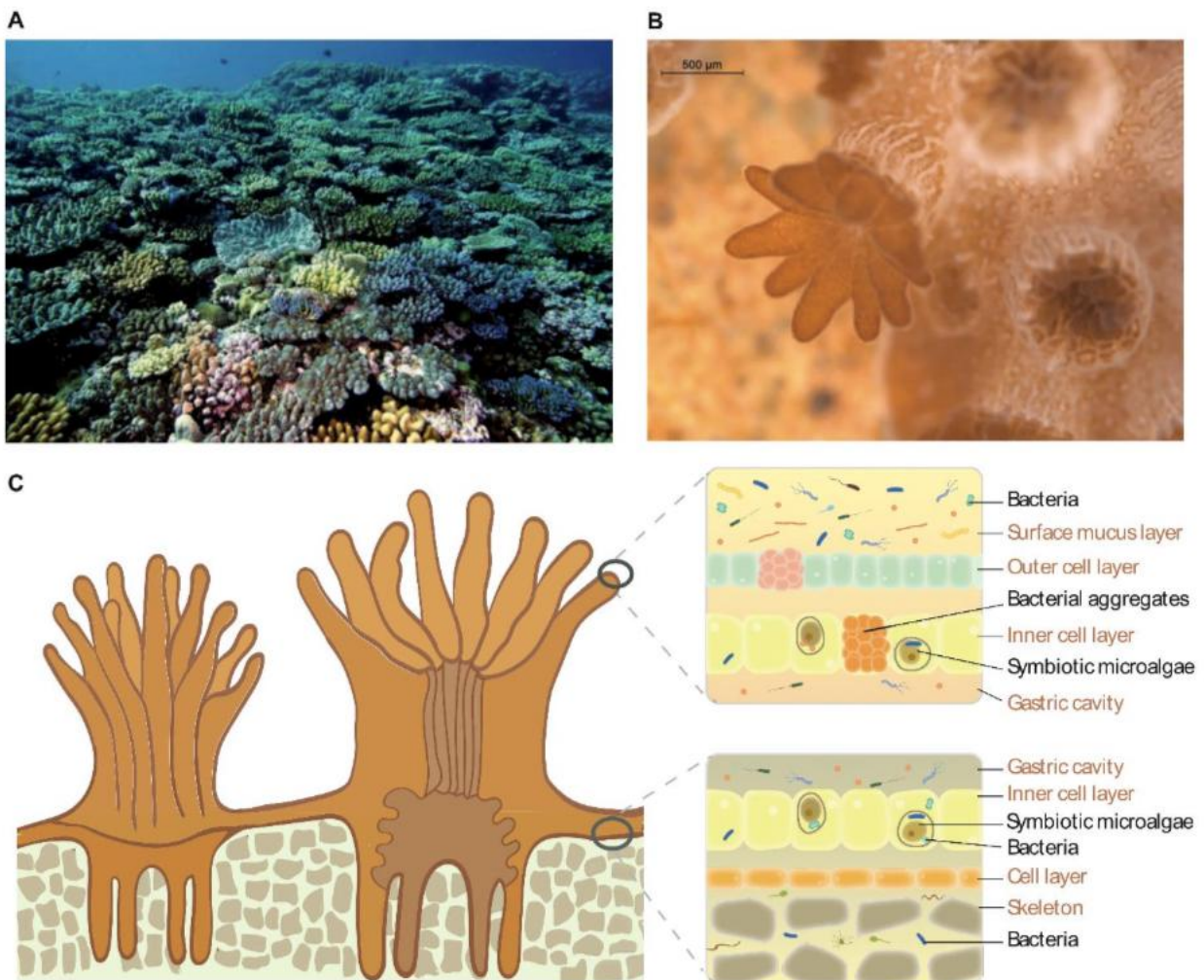
Aunque los corales poseen un sofisticado sistema para capturar presas, generalmente viven en aguas muy pobres en nutrientes. En consecuencia, la energía que obtienen al alimentarse de otros organismos (es decir, **nutrición heterótrofa**) es insuficiente para cubrir sus necesidades. Dado que crecer, reproducirse y secretar un esqueleto requiere grandes cantidades de energía, los corales duros

Un marco educativo centrado en microbiología

han desarrollado formas adicionales de obtener alimento y energía, lo que les ha permitido prosperar durante millones de años en entornos difíciles.

3. **Los Corales son Diversos Holobiontes.** Para obtener alimento y energía, la mayoría de los corales forman una relación muy íntima con algas unicelulares llamadas **zooxantelas**. Estas microalgas viven dentro de las células del coral y le dan su coloración marrón (Figura 1B, 1C). Esta simbiosis es crucial para la supervivencia del coral hospedador, ya que las zooxantelas (al igual que otras algas y plantas) son capaces de absorber la energía del sol y utilizarla para producir nutrientes como los azúcares (mediante el proceso de **fotosíntesis**). Los nutrientes generados por las microalgas simbióticas se transfieren al coral hospedador, suministrándole hasta un 90% de sus necesidades energéticas. A su vez, las zooxantelas se benefician de vivir dentro de las células del coral, ya que obtienen un refugio seguro y estable, además de una fuente confiable de alimento al metabolizar algunos de los productos de desecho secretados por el coral. Dado que tanto el animal coralino como las microalgas se benefician mutuamente de su asociación, esta simbiosis se considera **mutualista**.

Aunque la relación entre los corales y las zooxantelas es la forma más conocida de simbiosis coralina, los corales también forman asociaciones con **bacterias**, **arqueas**, hongos y virus, los cuales se cree que cumplen funciones esenciales para el animal coralino. Dado que los corales y sus socios microbianos dependen fuertemente unos de otros para sobrevivir y funcionar, deben considerarse como un todo y no como entidades separadas. Por ello, se utiliza el término **holobionte** para describir al gran organismo formado por el animal coralino, sus zooxantelas simbióticas y el conjunto completo de microorganismos que interactúan con ellos.

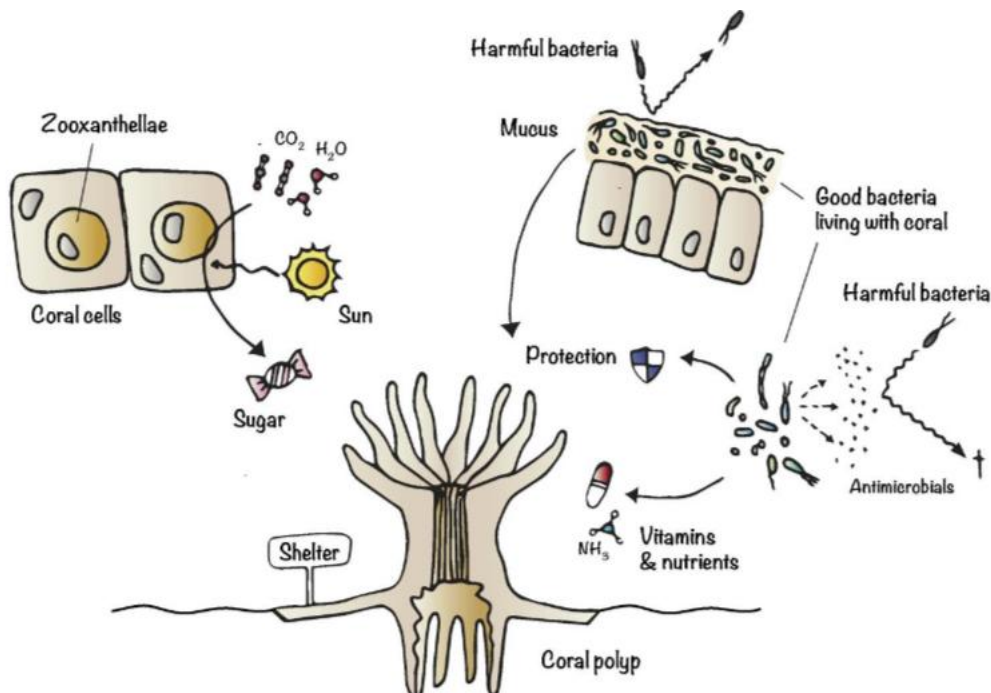


Un marco educativo centrado en microbiología

Figura 1. A. Fotografía de un arrecife saludable que muestra múltiples colonias de coral de diferentes especies y formas de crecimiento. Los colores vibrantes que se observan en algunos corales se deben a proteínas fluorescentes producidas por los propios pólipos. Imagen cortesía del Instituto Australiano de Ciencias Marinas, Australia. B. Fotografía de un coral de 3 meses de edad (especie *Acropora tenuis*) que muestra varios pólipos interconectados por una capa de tejido y que han comenzado a construir un esqueleto. Las zooxantelas (microalgas simbióticas) habitan los tejidos internos y son visibles como pigmentos marrones. El pólipo del extremo izquierdo ha extendido sus doce tentáculos para alimentarse, con su boca ubicada en el centro. C. Esquema del holobionte coralino que representa dos pólipos a la izquierda, con ampliaciones de sus diferentes compartimentos a la derecha (identificados con leyendas marrones). Los microorganismos (indicados con leyendas negras) están presentes en todos los compartimentos: las bacterias habitan la capa externa de moco, la cavidad gástrica, el esqueleto, y también están presentes dentro de las células del coral. Las microalgas simbióticas se localizan dentro de las capas celulares internas. Figura cortesía de Inka Vanwonterghem, adaptada de Vanwonterghem y Webster (2020).

4. La Importancia de las Bacterias Asociadas a los Arrecifes de Coral. Después de comprender la composición y función de las bacterias asociadas a los corales ha sido el foco de una importante cantidad de investigaciones en los últimos años. Se estima que los corales albergan miles de diferentes “especies” bacterianas distribuidas en múltiples compartimentos de su cuerpo (Figura 1C). Las bacterias son especialmente abundantes en la delgada capa de moco que es secretada por las células del coral y cubre la superficie externa de los pólipos. También se han observado bacterias dentro de las células del coral (tanto en la capa externa del tejido como en la capa interna, donde residen las zooxantelas), en la cavidad gástrica y en el esqueleto (Figura 1C). De manera similar a los humanos, que poseen diferentes comunidades bacterianas en su intestino, piel y boca, las bacterias asociadas a los corales son generalmente específicas de cada compartimento del hospedador, donde desempeñan funciones especializadas acordes con su nicho físico.

Por ejemplo, las bacterias presentes en la capa superficial de moco del coral secretan compuestos antimicrobianos (por ejemplo, antibióticos) que pueden actuar contra patógenos invasores y, por lo tanto, proteger a los corales de enfermedades infecciosas. Además, dado que las bacterias residentes están muy densamente pobladas en el moco, pueden impedir que los patógenos alcancen al coral al competir con ellos por el espacio y el alimento. Asimismo, se cree que algunos virus también contribuyen a la prevención de enfermedades, ya sea infectando bacterias dañinas o regulando la cantidad de bacterias residentes.



Un marco educativo centrado en microbiología

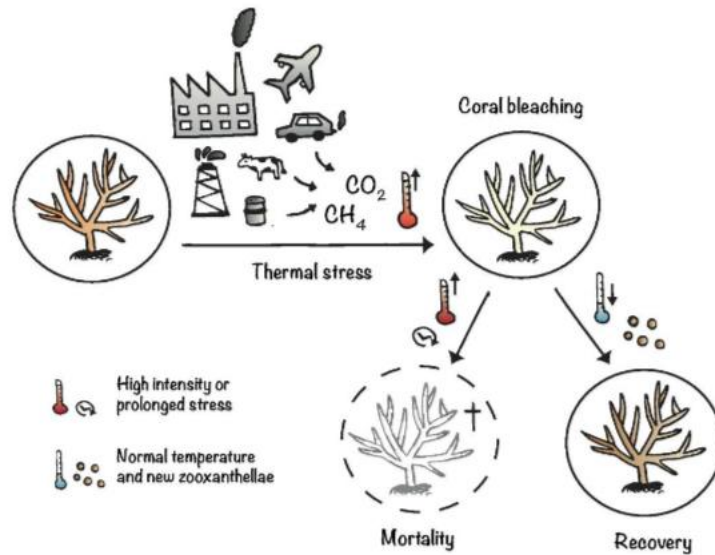
Las bacterias asociadas a los corales también pueden proporcionar nutrientes a su hospedador y a sus zooxantelas. En particular, las bacterias pueden metabolizar compuestos que no pueden ser utilizados por organismos superiores, convirtiéndolos en formas que el hospedador puede asimilar fácilmente. Por ello, se cree que las bacterias aportan a los corales valiosas fuentes de carbono, nitrógeno, azufre y fósforo, además de suministrar minerales y vitaminas esenciales. Estos productos pueden ser utilizados tanto por los corales como por las zooxantelas para formar tejidos, obtener energía y mantener funciones fisiológicas críticas. La importancia funcional de las bacterias asociadas a los corales de aguas frías podría ser aún mayor, ya que estos corales suelen habitar profundidades donde la luz solar no puede penetrar y, por lo tanto, no poseen zooxantelas. Sin los simbioses microalgales, se cree que los corales de aguas frías (así como otros invertebrados arrecifales) dependen principalmente de las bacterias para obtener ciertos nutrientes y sobrevivir en este entorno desafiante.

Las comunidades bacterianas asociadas a los corales suelen ser dinámicas: su composición y actividad pueden variar con el tiempo, la ubicación y las condiciones ambientales. Por ejemplo, si el agua de mar que rodea al coral cambia en temperatura, acidez o contenido de nutrientes, las comunidades bacterianas pueden ajustarse rápidamente para adaptarse mejor a las nuevas condiciones. Algunos de estos cambios microbianos pueden tener consecuencias negativas para el hospedador coralino, mientras que otros pueden ser beneficiosos, lo que respalda la adaptación y supervivencia del coral ante los cambios ambientales.

5. Efectos del Impacto Global Humano en los Corales y sus Síntomas. La. Al igual que otros organismos, el holobionte coralino puede tolerar fluctuaciones naturales en las condiciones ambientales (como las que ocurren con los ciclos estacionales) y resistir o recuperarse de perturbaciones climáticas temporales (por ejemplo, ciclones, inundaciones y olas de calor). Sin embargo, si estas anomalías son extremas o se prolongan durante mucho tiempo, los corales entran en estado de estrés y pueden morir. La mayor amenaza para los corales son las temperaturas elevadas del agua del mar, causadas por el exceso de emisiones de gases de efecto invernadero y el calentamiento global.

Los corales pueden comenzar a sufrir estrés cuando la temperatura del agua de mar supera en solo 1°C la temperatura máxima promedio del verano. Si las temperaturas elevadas persisten durante semanas, puede ocurrir un fenómeno conocido como blanqueamiento del coral, un proceso mediante el cual el coral pierde sus microalgas simbióticas (principalmente por expulsión). Debido a que las zooxantelas pigmentadas ya no están presentes en los tejidos del coral, estos se vuelven transparentes y el esqueleto blanco se hace visible debajo (de ahí el término “blanqueamiento del coral”, Figura 2). Un coral blanqueado puede sobrevivir por un tiempo limitado, pero tiene niveles muy bajos de energía porque carece de su principal fuente de alimento, es decir, los nutrientes proporcionados por las zooxantelas a través de la fotosíntesis. Si las temperaturas más frías regresan rápidamente, los corales pueden capturar nuevas células de zooxantelas del ambiente, restablecer la simbiosis vital y recuperarse. Sin embargo, si el estrés se mantiene (ya sea por temperaturas muy altas durante varios días consecutivos o por temperaturas ligeramente más cálidas durante varias semanas), muchos corales morirán (Figura 2). Además de provocar el calentamiento global, las cantidades excesivas de dióxido de carbono presentes en la atmósfera son absorbidas por el agua del mar, lo que aumenta su acidez. Esta mayor acidez del agua dificulta que los corales formen nuevos esqueletos, comprometiendo aún más su supervivencia.

Un marco educativo centrado en microbiología



Cuando los corales se exponen a altos niveles de estrés, la comunidad bacteriana beneficiosa asociada al coral puede cambiar hacia una comunidad dominada por microbios oportunistas, incluidos patógenos. Este cambio microbiano puede desencadenar enfermedades en el coral, que ya se encuentra debilitado.

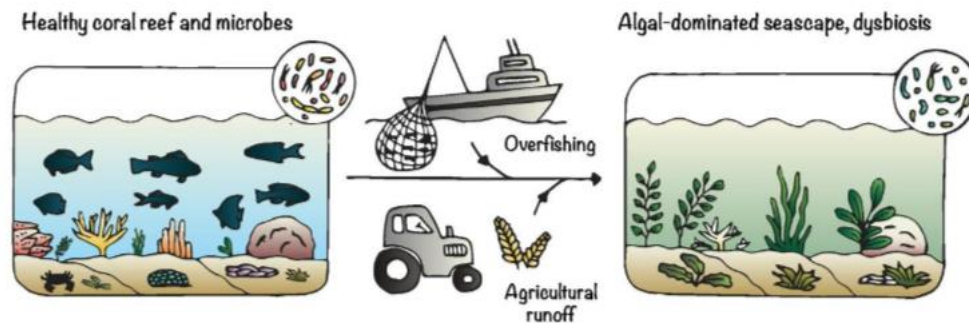


Figura 2. Fotografías de un arrecife saludable (izquierda), el mismo arrecife durante un evento de blanqueamiento (centro) y tras la muerte de los corales, los cuales fueron posteriormente cubiertos por algas (derecha). Imagen cortesía de The Ocean Agency (<https://theoceanagency.org>), que ofrece impresionantes imágenes y videos de libre acceso en apoyo a los esfuerzos de conservación de los océanos.

6. Efectos del Impacto Humano en los Corales y sus Simbiontes. Las perturbaciones provocadas por el ser humano a nivel local, como la contaminación o la sobrepesca, pueden agravar los efectos del cambio climático global sobre el holobionte coralino. El plástico es el tipo de residuo más abundante en los océanos y representa una amenaza significativa para toda la vida marina. Los científicos han reportado recientemente que los corales interactúan con los microplásticos (pequeños fragmentos de plástico de menos de 5 mm de longitud) mediante ingestión o adhesión a su superficie, lo cual puede provocar blanqueamiento del coral y muerte del tejido. La sobrepesca elimina grandes

Un marco educativo centrado en microbiología

cantidades de peces que se alimentan de algas similares a las marinas. Estas algas prosperan en aguas más cálidas, y cuando se reduce la presión de pastoreo, pueden crecer en exceso y competir con los corales por el espacio. Este fenómeno se agrava con la contaminación (normalmente proveniente del escurrimiento agrícola), ya que los fertilizantes químicos y naturales arrastrados al mar pueden estimular el crecimiento de las algas. El aumento de la abundancia de algas también incrementa los niveles de materia orgánica presentes en el agua de mar, lo que puede favorecer el crecimiento de microbios oportunistas y potencialmente patógenos. Por lo tanto, la sobreexplotación pesquera y la contaminación pueden amenazar el futuro de los arrecifes de coral, al menos en parte, por su efecto sobre la composición de las comunidades bacterianas del agua de mar.

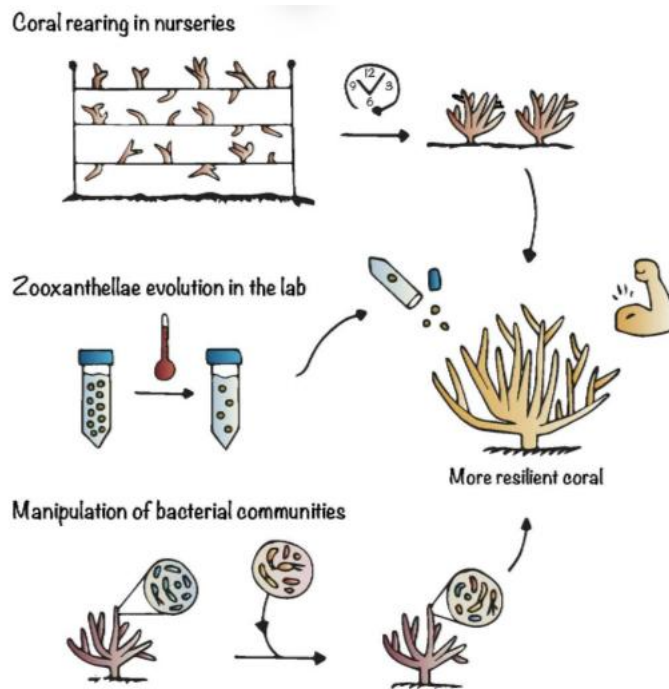


7. Urgente necesidad de mitigar las perturbaciones causadas por el ser humano y proteger los ecosistemas de los arrecifes de coral Los científicos han predicho que los impactos acumulativos del cambio climático y otros factores de estrés locales causados por actividades humanas alterarán y degradarán significativamente los arrecifes de coral en todo el mundo antes de que finalice el siglo. La ocurrencia de eventos de blanqueamiento masivo ha aumentado de manera alarmante en los últimos años. Los dos eventos consecutivos de blanqueamiento ocurridos en 2016 y 2017 afectaron a la mitad de los corales de la Gran Barrera de Coral (GBR). De gran preocupación es que la GBR experimentó un tercer evento de blanqueamiento masivo, sin precedentes por su magnitud, en marzo de 2020. Estos eventos de perturbación, cada vez más frecuentes, no permiten a los corales el tiempo suficiente para recuperarse antes de enfrentarse a su siguiente desafío, ni para repoblar el arrecife con nuevas generaciones que aseguren su futuro. A menos que se implementen medidas urgentes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, los arrecifes de coral, tal como los conocemos, no sobrevivirán en el futuro. La pérdida de los arrecifes de coral implica no solo la desaparición de una diversidad espectacular de corales, que han persistido durante millones de años y evolucionado hasta convertirse en organismos notablemente complejos, sino también el colapso de ecosistemas marinos completos (compuestos por peces, tortugas, erizos de mar, cangrejos, estrellas de mar, esponjas, pulpos, gusanos, entre otros) que dependen de los arrecifes. Asimismo, millones de personas que dependen de los arrecifes para su alimentación, protección costera y sustento económico también se verán afectadas. Por lo tanto, es de suma importancia preservar el delicado equilibrio formado por el animal coralino y sus microorganismos asociados: su tamaño individual puede ser diminuto, pero son pilares fundamentales de la vida.

8. Acciones actuales y direcciones de investigación para conservar y proteger los corales Se están estableciendo programas de restauración de corales en respuesta a la pérdida sin precedentes de arrecifes de coral en todo el mundo. Estos proyectos de restauración tienen como objetivo propagar fragmentos de coral o reclutas derivados sexualmente en “ambientes de vivero”, hasta que estén suficientemente desarrollados para permitir su trasplante de regreso a los arrecifes degradados. Los investigadores también están explorando la posibilidad de exponer estos corales “cultivados” a factores de estrés subletales, que podrían favorecer su rápida aclimatación a temperaturas más altas del agua de mar. Si esta estrategia tiene éxito, permitiría trasplantar corales más resistentes al arrecife. Sin embargo, actualmente se sabe poco sobre los posibles efectos secundarios o

Un marco educativo centrado en microbiología

compensaciones de potenciar rasgos como la tolerancia térmica. La aclimatación podría ocurrir mediante cambios en la fisiología del coral hospedador, pero también podría darse a través de modificaciones en la composición y función de las comunidades microbianas asociadas, que mejoran la adaptación y el bienestar del hospedador.



Los científicos están investigando si la tolerancia al estrés de los corales podría aumentarse mediante la manipulación directa de sus simbiontes microbianos. Por ejemplo, se están realizando experimentos de laboratorio en los que las zooxantelas cultivadas en matraces son expuestas progresivamente a temperaturas más altas con el tiempo. Algunas zooxantelas no pueden soportar estas temperaturas elevadas y mueren. Sin embargo, después de muchas generaciones de división celular (reproducción de las zooxantelas), algunas logran adaptarse a la temperatura más alta. En teoría, estas zooxantelas tolerantes al calor podrían incorporarse a corales bebés en el momento en que establecen por primera vez su relación simbiótica, lo que permitiría que el coral en desarrollo resistiera mejor el estrés térmico. Alternativamente, también podrían manipularse las comunidades bacterianas asociadas al coral para mejorar el rendimiento del holobionte coralino.

En el campo de la salud humana, este tipo de enfoques ya está bien establecido. Por ejemplo, los pacientes con enfermedades inflamatorias intestinales (es decir, inflamación excesiva en el tracto intestinal) suelen beneficiarse al recibir un **inóculo** que contiene comunidades bacterianas obtenidas del intestino de personas sanas. Además, algunas bacterias vivas seleccionadas por sus propiedades beneficiosas pueden ser consumidas por humanos u otros animales para otorgarles ventajas en su salud; a estas bacterias se les denomina "**probióticos**". Si los microbios beneficiosos administrados a los corales logran establecer una asociación simbiótica, esto podría mejorar la tolerancia ambiental del holobionte coralino.

Relevancia para los objetivos de desarrollo sostenible y los grandes desafíos

Sin sus socios microbianos, los corales no podrían sobrevivir y las extensas estructuras arrecifales de las que depende la humanidad no existirían. Por lo tanto, las contribuciones que los arrecifes de coral aportan a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) deben considerarse en el contexto del holobionte coralino y atribuirse tanto al animal coralino como a las zooxantelas, bacterias y otros microorganismos asociados.

La dimensión microbiana de la caída de ballenas se relaciona con varios ODS (*aspectos de microbiología en itálicamicrobial*), incluyen:

- **Objetivo 2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible** (*acabar el hambre y la malnutrición, incrementar la productividad agrícola*). Los arrecifes de coral tropicales y de aguas frías son grandes reservorios de biodiversidad marina, que sirven como hábitat para cientos de especies. Esto incluye invertebrados y peces que son directamente recolectados por los humanos como alimento (erizos de mar, ostras, cangrejos, camarones, pulpos, mero coralino, pargos, etc.) o que son presas de peces pelágicos (como caballa o atún), los cuales también son consumidos por humanos. Dado que el pescado es considerado un superalimento y una parte esencial de la dieta Mediterránea, y que los productos marinos son altamente nutritivos, mantener la salud de los arrecifes de coral es fundamental para cumplir el ODS 2.

- **Objetivo 3. Garantizar vidas sanas y promover el bienestar para todas las edades** (*mejorar la salud, reducir enfermedades prevenibles y muertos prematuras*). El El holobionte coralino y los diferentes animales (especialmente invertebrados) que habitan los arrecifes de coral son una fuente importante de nuevos fármacos. Especies arrecifales como esponjas, corales y ascidias producen metabolitos secundarios que podrían utilizarse para tratar una amplia gama de enfermedades para las cuales los medicamentos actuales no son eficaces. Los científicos han estado aislando compuestos derivados de arrecifes y desarrollando fármacos para tratar afecciones como enfermedades cardiovasculares, infecciones bacterianas, inflamaciones y diversos tipos de cáncer, con resultados prometedores. Por lo tanto, los arrecifes de coral podrían representar una fuente de compuestos con valiosas aplicaciones terapéuticas para los seres humanos, contribuyendo directamente al ODS 3.

- **Objetivo 8. Promueve un crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, empleo total y productivo y un trabajo decente para todos** (*promueve el crecimiento económico, productividad e innovación, así como el emprendedurismo y creación de empleo*). Cuando A través de las pesquerías, el turismo y la recreación, los arrecifes de coral contribuyen de forma sustancial al cumplimiento del ODS 8. Ya sea que las personas visiten zonas costeras para bucear, hacer esnórquel, realizar excursiones de pesca, o simplemente para disfrutar de las hermosas playas protegidas por los arrecifes, los turistas generan ingresos para hoteles, restaurantes, operadores turísticos y otros negocios locales, los cuales a su vez proveen empleo a las comunidades. Cada año, los arrecifes de coral aportan miles de millones de dólares en empleos e ingresos a las economías locales.

- **Objetivo 13. Tome medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos** (*reduce las emisiones de gas invernadero, mitiga las consecuencias del calentamiento global, desarrolla sistemas tempranos de prevención de consecuencias del calentamiento global, promueve la educación sobre la producción de gases de efecto invernadero y del calentamiento global*). Cuando Las emisiones de gases de efecto invernadero representan una amenaza significativa para la supervivencia de los arrecifes de coral, ya que provocan temperaturas elevadas del agua que interrumpen la relación beneficiosa entre el coral y sus microorganismos asociados. Para evitar el colapso de los ecosistemas coralinos completos, es imperativo reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Comunicar la belleza, importancia y valor ecológico de los arrecifes puede motivar a la población a tomar acciones contra el cambio climático para preservar estos ecosistemas frágiles.

- **Objetivo 14. Conserve y use de manera sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible** (*reduce la contaminación de los sistemas marinos por químicos tóxicos/nutrientes agrícolas/residuos como plásticos, desarrolla la mitigación medidas de la acidificación, mejora la sostenibilidad de los océanos y sus recursos*). La Los residuos vertidos en el ambiente marino (contaminantes químicos, microplásticos, objetos no degradables) pueden ser tóxicos para la vida animal y vegetal, o bien matar inadvertidamente a animales que los ingieren o quedan atrapados en ellos. La contaminación por nutrientes y la sobrepesca también amenazan a los corales al favorecer el crecimiento de algas, desestabilizar el microbioma coralino y hacer que los corales sean más sensibles a patógenos oportunistas. Imágenes impactantes de arrecifes degradados por desechos plásticos han sido utilizadas recientemente en campañas exitosas contra los plásticos de un solo uso, como las pajillas plásticas, contribuyendo así a los esfuerzos globales de conservación marina.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. *Individual*

- a. Evitar los plásticos de un solo uso para reducir la contaminación en el ambiente marino.
- b. Reciclar adecuadamente todos los artículos que sean reciclables.
- c. Reciclar adecuadamente todos los artículos que sean reciclables.
- d. Comprar cantidades razonables de bienes para evitar el desperdicio de materiales y alimentos, que podrían terminar en los océanos y afectar a los corales y sus microorganismos asociados.
- e. Animar a otras personas a seguir prácticas de consumo sostenible.
- f. Reducir los viajes en avión y priorizar el transporte público sobre el uso de vehículos personales.
- g. Reducir el consumo de carne, ya que el ganado produce cantidades considerables de metano, un potente gas de efecto invernadero.
- h. Al consumir productos marinos, elegir aquellos certificados como sostenibles.
- i. Respetar las áreas marinas protegidas siguiendo sus lineamientos.
- j. Evitar tocar o recolectar animales marinos al hacer esnórquel o bucear.

2. *Políticas comunitarias*

- a. Instalar numerosos contenedores de basura y reciclaje en los pueblos para asegurar una correcta disposición de los residuos.
- b. Promover la pesca local en lugar de la captura masiva.
- c. Educar a la población sobre la importancia de los ecosistemas de arrecifes de coral (por ejemplo, instalando paneles informativos a lo largo de los senderos).
- d. Brindar apoyo financiero a los negocios de comida para llevar que ofrezcan precios reducidos a los consumidores que lleven sus propios vasos y envases.
- e. Organizar limpiezas de arrecifes y playas locales.

3. *Políticas nacionales*

- a. Realizar campañas educativas sobre el valor de los arrecifes de coral y la necesidad de protegerlos.
- b. Promover fuentes de energía renovable (como la hidráulica o la solar) en lugar de los combustibles fósiles, y proporcionar la infraestructura necesaria (por ejemplo, redes solares).
- c. Imponer un impuesto al carbono, especialmente para las grandes industrias.
- d. Aplicar un impuesto ambiental al consumo de productos marinos que no sigan lineamientos sostenibles (por ejemplo, los provenientes de la pesca industrial).
- e. Limitar el dragado y la navegación tanto como sea posible (para evitar la destrucción física de los arrecifes y los derrames de petróleo en el ambiente marino).
- f. Utilizar redes de áreas marinas protegidas para garantizar el uso sostenible del ambiente marino.

Participación de la pupila

1. *Discusión en clase de los temas asociados con la caída de ballenas.*

- a. Generar conciencia sobre la importancia de los arrecifes de coral hablando sobre los servicios que brindan a los seres humanos y al ecosistema marino.
- b. Explicar los papeles importantes que desempeñan los microbios dentro del holobionte coralino.
- c. Analizar cómo se verían los paisajes marinos con arrecifes degradados y cómo afectaría esto a las cadenas alimentarias completas de los animales marinos.

2. *Conciencia de las partes interesadas del alumno.*

- a. En un escenario donde la mayoría de los arrecifes de coral desaparezcan, ¿cómo cambiaría la vida de los millones de personas que dependen directamente de ellos? ¿Cómo podría afectar tu vida diaria?
- b. Reflexiona sobre cómo tus actividades cotidianas pueden modificarse para mantener los arrecifes saludables. ¿Cómo podemos, como individuos y como comunidad, reducir las emisiones de dióxido de carbono, practicar un consumo sostenible, promover el reciclaje y limitar la cantidad de contaminación?

Actividades

Ver videos o documentales sobre arrecifes de coral y ecosistemas marinos proporciona ilustraciones útiles e ideas poderosas sobre su funcionamiento. El documental Chasing Coral es de gran relevancia (disponible en Netflix: <https://www.netflix.com/au/title/80168188>).

El cortometraje documental de National Geographic Coral Reefs 101 ofrece un resumen breve pero informativo: <https://video.nationalgeographic.com/video/101-videos/0000015f-9331-d8e7-a7ff-f77d2dfb0000>

Organizar una excursión de clase a un museo local de Historia Natural para observar su colección de corales. Prestar atención a las diferentes formas de los corales y a la complejidad de sus esqueletos, e intentar identificar los coralitas (pequeñas cavidades esqueléticas) donde crecían los pólipos individuales. Los esqueletos reales pueden compararse con imágenes de corales para enfatizar que no son rocas, sino animales fascinantes.

Ejercicios (podrían hacerse en cualquier nivel, pero estos son probablemente el nivel de educación secundaria)

- a. Presentar a los estudiantes varias imágenes de arrecifes saludables, parcialmente blanqueados, completamente blanqueados y arrecifes muertos. Observar cómo los arrecifes muertos se cubren de algas, comienzan a degradarse y ya no pueden mantener una vida marina rica y diversa.
- b. Relacionar estas fotos con la tabla de colores de Coral Watch (<https://coralwatch.org/index.php/monitoring/using-the-chart/>) para evaluar el grado de blanqueamiento e intentar asociarlo con el nivel de impacto humano.

La base de evidencia, lectura adicional y ayudas para enseñar

1. Blackall LL, Wilson B, van Oppen MJ (2015). Coral: El ecosistema simbiótico más diverso del mundo. *Molecular Ecology*, 24:5330–5347.
2. Bourne DG, Morrow KM, Webster NS (2016). Perspectivas sobre el microbioma coralino: sustento de la salud y resiliencia de los ecosistemas arrecifales. *Annual Review of Microbiology*, 70:317–40.
3. Coral Reef Alliance (2020). Ecología de los arrecifes de coral, consultado en <https://coral.org/coral-reefs-101/coral-reef-ecology/> en abril 2020.
4. Dubinsky Z, Stambler N (2011). *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Springer.
5. Great Barrier Reef Marine Park Authority (2018). The Reef, consultado en <http://www.gbrmpa.gov.au/home> en abril 2020.
6. Haas AF, Fairouz FM, Kelly LW, Nelson CE, Dinsdale EA, Edwards RA, Giles S, Hatay M, Hisakawa N, Knowles B, Lim YW, Maughan H, Pantos O, Roach TNF, Sanchez SE, Silveira CB, Sandin S, Smith JE, Rohwer F (2016). Microbialización global de los arrecifes de coral. *Nature Microbiology*, 1–7.
7. Hoeksema BW, Cairns S (2020). Lista mundial de Scleractinia, consultado en <http://www.marinespecies.org/scleractinia/> en abril 2020.
8. National Oceanic and Atmospheric Administration (2020). Corales, consultado en https://oceanservice.noaa.gov/education/kits/corals/coral01_intro.html en abril 2020.
9. National Oceanic and Atmospheric Administration (2020). Explorar: Corales y arrecifes de coral, consultado en <https://floridakeys.noaa.gov/corals/> en abril 2020.
10. National Oceanic and Atmospheric Administration (2020). Tutorial Coral Reef Watch, consultado en https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/education/tutorial/crw24_dhw_product.php en abril 2020.
11. National Oceanic and Atmospheric Administration (2020). ¿Qué son los microplásticos?, consultado en <https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html> en julio 2020.
12. Peixoto RS, Rosado P, Leite D, Rosado AS, Bourne D (2017). Microorganismos beneficiosos para los corales (BMC): mecanismos propuestos para la salud y resiliencia del coral. *Frontiers in Microbiology*, 8:341.
13. Readfearn G, Morton A (2020). La Gran Barrera de Coral sufre el tercer evento de blanqueamiento masivo en cinco años. *The Guardian*.
14. Reichert J, Schellenberg J, Schubert P, Wilke T (2018). Respuestas de los corales constructores de arrecifes a la exposición a microplásticos. *Environmental Pollution*, 237:955–960.
15. Röthig T, Yum LK, Kremb SG, Roik A, Voolstra CR (2017). La composición microbiana de corales de aguas profundas en el Mar Rojo aporta información sobre la adaptación funcional a un entorno único. *Scientific Reports*, 7:44714.
16. Smithsonian Ocean (2018). Arrecifes de coral y corales, consultado en <http://ocean.si.edu/ocean-life/invertebrates/corals-and-coral-reefs> en abril 2020.
17. Smithsonian Ocean (2018). Corales de aguas profundas, consultado en <http://ocean.si.edu/ecosystems/coral-reefs/deep-sea-corals> en junio 2020.
18. The University of Queensland (2020). CoralWatch – Ciencia ciudadana en el arrecife, consultado en <https://coralwatch.org/> en abril 2020.
19. van Oppen MJH, Blackall LL (2019). Dinámica, funciones y diseño del microbioma coralino en un mundo cambiante. *Nature Reviews Microbiology*, 17:557–567.
20. van Oppen MJH, Oliver JK, Putnam HM, Gates RD (2015). Construyendo resiliencia en los arrecifes de coral mediante evolución asistida. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112:2307–2313.
21. Vanwonderghem I, Webster NS (2020). Microorganismos de los arrecifes de coral en un clima cambiante. *iScience*, 23:100972.
22. Veron JEN (2000). *Corals of the World*. Australian Institute of Marine Science.
23. Webster NS, Reusch T (2017). Contribuciones microbianas a la persistencia de los arrecifes de coral. *The ISME Journal*, 1–8.

Un marco de educación microbiana enfocado en niños

24. Zaneveld JR, Burkepille DE, Shantz AA, Pritchard CE, McMinds R, Payet JP, Welsh R, Correa AMS, Lemoine NP, Rosales S, Fuchs C, Maynard JA, Thurber RV (2016). La sobrepesca y la contaminación por nutrientes interactúan con la temperatura para alterar los arrecifes de coral hasta la escala microbiana. *Nature Communications*, 7:11833.

Glosario

Adaptación: proceso mediante el cual los organismos cambian con el tiempo para estar mejor adaptados a su entorno. La adaptación ocurre a lo largo de múltiples generaciones y se relaciona con rasgos biológicos que pueden heredarse.

Aclimatación: proceso por el cual un organismo individual se ajusta a los cambios en su ambiente; la aclimatación ocurre dentro del periodo de vida de un solo organismo.

Arqueas: microorganismos unicelulares que a menudo se parecen a las bacterias en forma y tamaño, pero poseen características moleculares distintas. Algunas arqueas viven en ambientes extremos (por ejemplo, temperaturas, salinidades o niveles de acidez muy altos).

Bacterias: microorganismos unicelulares que viven en una gran diversidad de ambientes. Pueden existir de manera libre o asociadas a organismos superiores. Aunque algunas causan enfermedades, la mayoría cumple funciones beneficiosas para otras formas de vida.

Cnidocitos: tipo especializado de célula presente en los corales (y en otros invertebrados marinos como las anémonas y medusas) que puede emitir una picadura para defensa o para capturar presas.

Organismo colonial: organismo formado por muchos individuos que son clones entre sí y están físicamente interconectados.

Blanqueamiento del coral: proceso mediante el cual los corales expulsan las microalgas simbióticas que viven en sus tejidos en respuesta al estrés. Esto hace que los corales se vuelvan blancos, ya que su esqueleto queda visible bajo sus tejidos transparentes.

Disbiosis: desequilibrio en la comunidad microbiana natural de un organismo. Este desequilibrio altera la relación simbiótica entre el hospedador y sus microorganismos, y con frecuencia conduce a enfermedad.

Gases de efecto invernadero: gases en la atmósfera (como el dióxido de carbono – CO₂, y el metano – CH₄) que atrapan el calor de manera similar al techo de vidrio de un invernadero. El aumento de las emisiones humanas de estos gases está causando el calentamiento global.

Nutrición heterótrofa: modo de nutrición en el cual los organismos no pueden producir su propio alimento y dependen de otros organismos para sobrevivir.

Holobionte: entidad biológica compuesta por un hospedador y todos sus microorganismos asociados.

Inóculo: sustancia introducida en el cuerpo de un organismo para aumentar su resistencia.

Mutualista: una simbiosis (relación entre dos organismos) es mutualista cuando beneficia a ambos participantes.

Patógeno: microorganismo (como una bacteria o un virus) que puede causar una enfermedad.

Un marco de educación microbiana enfocado en niños

Pólipo: un pólipo coralino es un organismo de cuerpo blando emparentado con las anémonas y las medusas. Generalmente, los clones de un mismo pólipo están conectados entre sí y forman una colonia coralina.

Probióticos: microorganismos vivos que, cuando se administran a un hospedador, le proporcionan un beneficio para la salud.

Coral escleractinio: corales que secretan un esqueleto y contribuyen a formar arrecifes (también conocidos como “corales duros”).

Simbiosis: relación entre dos organismos diferentes que viven en estrecha asociación física.

Zooxantelas: algas unicelulares de color amarillo-marrón que pueden vivir en simbiosis con diferentes invertebrados marinos. Viven dentro de las células del hospedador y le proporcionan nutrientes esenciales.