Annu. Rev. Medio ambiente. Resour. 2022. 47:X-X

<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120120-054300>

Publicado por primera vez como Revista anticipada el 2 de septiembre de 2022

Copyright © 2022 por Annual Reviews. Esta obra está sujeta a una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0, que permite su uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. Consulte las líneas de crédito de las imágenes u otro material de terceros en este artículo para obtener información sobre la licencia

Díaz • Malhi

www.annualreviews.org • Biodiversidad

Biodiversidad: Conceptos, patrones, tendencias y perspectivas

Sandra Díaz1,2 y Yadvinder Malhi3

1ConsejoNacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV), Córdoba, Argentina; correo electrónico: sandra.diaz@unc.edu.ar

2Facultadde Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

3EnvironmentalChange Institute, School of Geography and the Environment, and Leverhulme Centre for Nature Recovery, University of Oxford, Oxford, Reino Unido; correo electrónico: yadvinder.malhi@ouce.ox.ac.uk

Palabras clave

naturaleza, diversidad biológica, valores, tasas de extinción, factores de pérdida de biodiversidad

Resumen

La biodiversidad es un término ampliamente utilizado en la ciencia, la política y la sociedad en general. Sintetizamos aspectos de esta literatura, centrándonos en varios conceptos clave, debates, patrones, tendencias e impulsores. Repasamos la historia del término y las múltiples dimensiones y valores de la biodiversidad, y exploramos lo que se sabe y lo que no se sabe sobre los patrones globales de biodiversidad. A continuación repasamos los cambios en la biodiversidad desde los primeros tiempos de la humanidad hasta la era moderna, examinando las tasas de extinción y los impulsores directos del cambio en la biodiversidad y destacando también algunos impulsores menos estudiados. Por último, nos centraremos en los factores indirectos de la pérdida de biodiversidad mundial, sobre todo la creciente huella de consumo global de la humanidad, y exploraremos qué podría ser necesario para invertir el declive en curso del tejido de la vida en la Tierra.

1. INTRODUCCIÓN

La biodiversidad es una megacategoría carismática[(1](#bib1)) de nuestra era que cada vez se emplea más en la ciencia, la política y la sociedad en general, pero que significa cosas distintas para cada persona. No faltan libros de texto y revisiones sobre prácticamente todos los aspectos de la biodiversidad. Además, existe un amplio reconocimiento de la crisis mundial de la biodiversidad y una convención de las Naciones Unidas dedicada a abordarla. Además, en los últimos años se ha producido un número sin precedentes de evaluaciones científicas exhaustivas sobre el estado y las tendencias de la vida en la Tierra. Tres hitos han sido la *Evaluación Mundial de la Biodiversidad*[(2](#bib2)) en 1995, la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio[(3](#bib3)) en 2005 y, más recientemente, la primera evaluación mundial intergubernamental, llevada a cabo por la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES)[(4](#bib4)) en 2019.

**Plataforma intergubernamental científico-normativa sobre diversidad biológica y servicios de los ecosistemas (IPBES):** organismo intergubernamental creado en 2012 para reforzar la interfaz científico-normativa para la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad y el bienestar humano a largo plazo.

En este artículo exploramos diversos aspectos y temas de la prolífica literatura reciente sobre biodiversidad. No ofrecemos un tratamiento enciclopédico de este vasto tema. Más bien resumimos varios aspectos clave, profundizamos en algunas perspectivas generales sobre el concepto y también llamamos la atención sobre puntos conflictivos y temas emergentes que no se han tratado suficientemente en la bibliografía. En concreto, nos centramos en los cinco temas siguientes:*(a*) ¿Cómo se originó el concepto científico y político de biodiversidad y cómo ha evolucionado su uso a lo largo del tiempo?*(b*) ¿Cómo y por qué se valora la biodiversidad, y cuáles son las tensiones y puntos en las distintas perspectivas sobre el valor de la biodiversidad?*(c*) ¿Qué hemos aprendido sobre la naturaleza y las pautas de la biodiversidad en la Tierra y cómo se distribuye?*(d*) ¿Cómo ha cambiado y disminuido la biodiversidad en la era humana, desde la prehistoria hasta los tiempos modernos?*(e*) ¿Cuáles son los factores directos e indirectos de este declive y qué podría ser necesario para detenerlo?

2. EL CONCEPTO DE BIODIVERSIDAD

2.1. El significado de biodiversidad ha cambiado rápidamente con el tiempo

Hoy en día, la biodiversidad es un concepto ampliamente desplegado en las narrativas sociales, con una presencia destacada en la literatura científica, la prensa y los medios sociales. Se enseña en la mayoría de las escuelas primarias y es muy utilizado por la industria publicitaria. Esto no ocurría hace 50 años. El espectacular paso de oscuro concepto técnico a objeto fronterizo transdisciplinar[(5](#bib5)) es una vívida ilustración de cómo las prácticas sociales moldean la evolución de los conceptos científicos.

El concepto de diversidad biológica se encuentra en la comunidad académica desde mediados del siglo XX, y algunos autores lo remontan a una descripción de la historia natural del desierto del suroeste de Norteamérica realizada por J. Arthur Harris en 1916[(6](#bib6)). Con frecuencia se utilizaba en el sentido de número de especies, a veces acompañado de abundancia relativa, en una unidad de estudio determinada, y hasta principios de los años 90 se enseñaba esta definición a la mayoría de los estudiantes de postgrado de biología[(7](#bib7), [8](#bib8)). El uso del término diversidad biológica o su contracción, biodiversidad, para englobar la variabilidad biológica entre, pero también por debajo y más allá, del nivel de las especies se produjo por primera vez en la década de 1980. La primera mención del término diversidad biológica parece haber sido hecha por T.E. Lovejoy en el prólogo de un libro sobre biología de la conservación[(](#bib9)9); cobró importancia en la literatura científica y científico-política en la década de 1980, especialmente a través de los trabajos de W.G. Rosen, E. Norse y E.O. Wilson[(10](#bib10)), en el contexto de las iniciativas científico-políticas para concienciar al público sobre la riqueza de la vida en la Tierra y la necesidad de protegerla[(9](#bib9)). Apareció oficialmente en la interfaz intergubernamental ciencia-política en 1992, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (es decir, la Cumbre de la Tierra de Río), y se consagró formalmente en la política internacional cuando entró en vigor en 1993 el Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica (CDB) . El artículo 2 del CDB define la diversidad biológica como "la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas terrestres y marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte: comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas" (https://www.cbd.int/convention/articles/?a=cbd-02). En particular, esta definición incorpora explícitamente los ecosistemas. Las definiciones académicas hasta ese momento no habían incluido los ecosistemas, probablemente porque los ecosistemas constan de componentes vivos y no vivos (agua, minerales, otros factores físicos), que según las definiciones anteriores no podían formar parte de la biodiversidad taxonómica. Por ello, muchos ecologistasse opusieron (por ejemplo, [11](#bib11)), y aún se oponen, a esta definición más amplia que abarca la variación entre ecosistemas. No obstante, la inclusión de los ecosistemas en la definición del CDB tiene sentido desde el punto de vista de la política, la legislación y la comunicación pública: Las políticas y normativas centradas en especies o comunidades pero que dejan fuera los ecosistemas que las sustentan serían difíciles de llevar a la práctica. La última definición consensuada de biodiversidad en el espacio intergubernamental, basada en gran medida en la del CDB, ha sido establecida por la IPBES. Dice así: "La variabilidad entre los organismos vivos de todas las fuentes, incluidos los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte. Esto incluye la variación de los *atributos genéticos, fenotípicos, filogenéticos y funcionales*, así como los cambios en la abundancia y la distribución a lo largo del tiempo y el espacio dentro de las especies, las comunidades biológicas y los ecosistemas y entre ellos" (https://ipbes.net/glossary/biodiversity; cursiva añadida). La definición de la IPBES hace hincapié en que la atención se centra en los componentes vivos, en un intento de mantener el espíritu de la definición del CDB y, al mismo tiempo, alinearla mejor con la teoría ecológica actual.

**Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB):** tratado creado en 1992 para la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad y el reparto equitativo de los beneficios derivados de ella.

2.2. Biodiversidad, naturaleza y el tejido de la vida en la Tierra

Este aumento del uso, fuertemente enmarcado en la interfaz ciencia-política, explica por qué la definición de biodiversidad ha evolucionado hacia una mayor inclusividad (¡y también longitud!) en lugar de adquirir una mayor nitidez y precisión con el paso del tiempo. Responde a la necesidad no sólo de dar cabida a las nuevas facetas de la vida en la Tierra a medida que su importancia es puesta de relieve por los nuevos conocimientos de las ciencias naturales, sino también de dar espacio a las políticas, evitar los atajos de aplicación y resonar con los múltiples actores sociales que reclaman cada vez más la biodiversidad como parte de sus intereses y derechos. Se trata de una disyuntiva que a menudo experimentan los objetos fronterizos[(12](#bib12)): mayor significado y tracción social frente a mayor precisión y trazabilidad analítica [por ejemplo, se observa una tensión similar en el concepto de Antropoceno[(13](#bib13))]. Está claro qué camino ha tomado el concepto de biodiversidad.

**Antropoceno:** la nueva época geológica propuesta que marca el dominio humano de los procesos clave del sistema terrestre

En el discurso público, y también en los círculos académicos, sobre todo los interdisciplinarios, la palabra *biodiversidad* se utiliza a veces indistintamente con otros dos conceptos: *naturaleza* y *tejido dela vida*, que, aunque carecen de precisión técnica, parecen resonar mejor que biodiversidad entre los no especialistas. *La naturaleza* tiene la ventaja de ser más sencilla e intuitivamente significativa para la mayoría de las personas sin necesidad de más explicaciones. En su contra, conlleva ciertas connotaciones, sobre todo en la tradición occidental reciente, de naturaleza salvaje intacta, un concepto que muchos consideran tanto incoherente con las pruebas empíricas (véase la Sección 5) como socialmente problemático[(14](#bib14), [15](#bib15)). También refuerza la idea de que el mundo natural es "otro", distinto y separado del ser humano, que hunde sus raíces en el dualismo judeocristiano y la posterior Ilustración. Por eso algunos autores prefieren referirse a todas las entidades vivas como el "tejido de lavida ", "tejido por procesos naturales a lo largo de muchos millones de años y en conjunción con las personas durante muchos miles de años"[(5](#bib5), p. 1), es decir, toda la vida que nos rodea y que está dentro de nosotros, con la que las personas están inextricablemente entrelazadas([16](#bib16)). Esto es ciertamente más enrevesado y bastante literario, pero proporciona una vívida metáfora del profundo enredo de todas las entidades vivas que múltiples actores sociales encuentran atractiva e inspiradora.

2.3. La biodiversidad es multidimensional

Sea cual sea la definición de trabajo elegida, existe consenso en la literatura sobre el carácter multidimensional de la biodiversidad, que abarca distintos ángulos desde los que examinar y analizar el tejido de la vida: dentro de las especies (diversidad genética dentro de las poblaciones y entre poblaciones de la misma especie y también de variedades de plantas y animales domesticados); entre especies (diversidad taxonómica o de organismos a nivel de especie y superior) dentro de un área determinada; y a distintas escalas, desde las manchas locales a los paisajes, pasando por los biomas y toda la Tierra. La diversidad a nivel de organismo o comunidad puede verse desde la perspectiva de la taxonomía (por ejemplo, [8](#bib8)), la filogenia (por ejemplo, [17](#bib17)) o los rasgos funcionales (por ejemplo, [18](#bib18)), y dentro de cada una de estas facetas y perspectivas, uno puede centrarse en la riqueza de entidades o componentes presentes, la distribución de la abundancia entre estas entidades (uniformidad o su contrapartida, dominancia, medida como número de individuos, biomasa o productividad), o la identidad de entidades concretas (composición). Existe una vasta bibliografía sobre los fundamentos de estos conceptos y sobre las innumerables métricas diseñadas para captarlos, y no pretendemos abarcarlos aquí. No existe la mejor faceta o métrica simple para transmitir el estado y las tendencias de la biodiversidad; hay un equilibrio entre la simplicidad (y, por tanto, la viabilidad de disponer de registros estándar a largo plazo en todo el mundo) y el significado funcional, y ninguna de estas métricas capta todo el valor de la biodiversidad para las personas.

3. Los diversos valores de la biodiversidad

La biodiversidad no sólo es multidimensional, sino que también engloba valores diversos; es decir, distintas personas le atribuyen significados y niveles de importancia diferentes. Una distinción importante surge de mantener visiones del mundo predominantemente biocéntricas o antropocéntricas. Las visiones biocéntricas del mundo favorecen los valores intrínsecos, que son los de la naturaleza no humana per se, independientemente de cualquier consideración humana. Por el contrario, las cosmovisiones antropocéntricas favorecen los valores centrados en el ser humano. Por ejemplo, la noción de las contribuciones de la naturaleza a las personas -la miríada de efectos positivos y negativos que los distintos componentes de la naturaleza, o la naturaleza en su conjunto, tienen sobre las personas como individuos, sociedades o el conjunto de la humanidad[(19](#bib19))- es antropocéntrica. Los valores antropocéntricos de la naturaleza y sus contribuciones a las personas van desde los fuertemente instrumentales (es decir, el valor de organismos, genes, ecosistemas, paisajes como medio para alcanzar fines humanos específicos) a los fuertemente relacionales (es decir, valores que no emanan directamente de la naturaleza, sino que son derivados de nuestras relaciones con ella y nuestras responsabilidades hacia ella, y que están implicados en las ideas de una vida significativa y plena y de "lo que hay que hacer")[(](#bib20)[20-22](#bib22)). Las entidades de la naturaleza a las que se atribuye un valor instrumental son a menudo sustituibles por otras entidades que sirven igualmente para un determinado fin humano. En cambio, las entidades a las que se atribuye valor relacional suelen ser insustituibles. Por ejemplo, un cerezo en su jardín puede tener un valor intrínseco, asociado al derecho de la especie o de ese árbol en particular a existir, independientemente de su utilidad o importancia para usted o cualquier otra persona. El árbol también puede tener varios valores instrumentales, como proporcionar sombra fresca, frutos comestibles, flores estéticamente agradables, alimento para los polinizadores y estructura para la avifauna urbana, que a su vez son fuente de disfrute e inspiración. Algunos de estos valores pueden expresarse en términos monetarios, como el valor de la madera o las cerezas. Algunos de estos valores son conmensurables, es decir, pueden expresarse con sentido utilizando la misma métrica, como el dinero o la biomasa. Pero incluso si estos valores fueran inconmensurables (es decir, no son comparables en una escala común) en términos de los beneficios que proporciona el árbol, el cerezo es totalmente sustituible por otro cerezo similar en salud, estatura y edad. Y si el árbol también produce perjuicios (por ejemplo, atrae abejas a las que eres alérgico, obstruye la circulación o molesta gravemente a los vecinos), se puede hacer un análisis de compensación de beneficios frente a perjuicios y decidir si merece la pena conservarlo o talarlo. Pero si este cerezo fue plantado para ti por tu madre cuando eras niño, adquiere un valor relacional muy superior a cualquiera de estos beneficios instrumentales, un valor que incluso supera los perjuicios instrumentales que pueda producir. Es "su" cerezo y, por tanto, no puede ser sustituido por otro similar.

Los valores intrínsecos o biocéntricos llevan mucho tiempo siendo destacados por los amantes de la naturaleza y los conservacionistas. Nuestro consenso científico moderno sobre la geobiosfera, que reconoce que la biosfera ha variado y evolucionado durante vastos eones de la historia de la Tierra antes de la muy reciente evolución humana, y en el que no hay inevitabilidad de la aparición humana, también resuena con una cosmovisión profundamente biocéntrica. Los valores instrumentales de la naturaleza han venido recibiendo cada vez más atención desde principios de la década de 2000, por ejemplo a partir de diversas iniciativas centradas en los servicios ecosistémicos[(23](#bib23), [24](#bib24)). La noción de valores relacionales, por el contrario, se ha descuidado en gran medida en la literatura hasta hace poco, a pesar de que estos valores son algunas de las motivaciones más fuertes y comunes en las luchas de las personas para proteger especies, ecosistemas o incluso organismos individuales venerables[(21](#bib21), [25](#bib25)).

En la práctica, distintos tipos de valores se entremezclan con frecuencia a la hora de sustentar las decisiones de las personas sobre la naturaleza, y probablemente tenga poca importancia práctica establecer una distinción tajante entre ellos en casos concretos. Y lo que es más importante, ningún tipo de valor es más importante que otro, ninguna métrica única haría justicia a todo lo que la gente considera importante de la naturaleza, y en las decisiones sobre un aspecto concreto de la naturaleza entran en juego muchos valores diferentes[(22](#bib22)). Y lo que es más importante, la misma entidad puede abarcar valores muy diferentes (en una escala distinta o en la misma) para distintas personas; no hay una única respuesta objetiva para saber cuánto vale una entidad de la naturaleza. Por lo tanto, es crucial que los debates sobre el valor sean pluralistas, tanto en lo que se refiere a las múltiples dimensiones del valor como a los actores sociales implicados. El debate sobre la mejor manera de valorar la naturaleza, hasta hace poco dominado por cuestiones técnicas(por ejemplo, la necesidad de mayor precisión y normalización), se centra ahora cada vez más en cuestiones de equidad, legitimidad e inclusión(por ejemplo, quién decide el valor de la naturaleza, desde qué perspectiva, y a quién beneficia y perjudica la decisión final). En otras palabras, la valoración social para la toma de decisiones se considera cada vez más [como](#bib15) un ámbito de deliberación y negociación social, además de una cuestión técnica ( [15](#bib20) , [20](#bib26) , [26-28](#bib28) ).

4. LOS PATRONES DE LA BIODIVERSIDAD

A continuación repasaremos brevemente cómo se distribuye la biodiversidad, en términos de estructura filogenética y geografía, entre la vida en la Tierra. Exploramos por qué existen estos patrones y qué impulsa los niveles excepcionalmente altos de diversidad en algunos grupos y regiones. Resumimos las estimaciones recientes de la cantidad total de biodiversidad en la Tierra, cómo surgen estas estimaciones y cuáles son las principales incertidumbres. Abordamos las complejidades de la definición y la escala, con especial atención a la diversidad procariota, que es probablemente el componente menos comprendido de la biodiversidad.

4.1. ¿Cuánta biodiversidad hay?

En los niveles superiores de la jerarquía taxonómica, el tapiz de la vida puede dividirse en varios reinos. El número de estos reinos ha aumentado a medida que mejoraba nuestra comprensión de la taxonomía profunda de la vida; el enfoque más reciente, ampliamente adoptado, propone siete reinos de la vida[(29](#bib29), [30](#bib30)), divididos entre un superreino procariota formado por bacterias y arqueas y un superreino eucariota formado por protistas, cromistas, hongos, plantas y animales[(Tabla 1](#tb1)). Los protistas y cromistas se consideran polifiléticos (es decir, formados por muchos clados conectados de forma inconsistente), y todos los demás eucariotas evolucionaron a partir de los protistas.

**<COMP: INSERTE AQUÍ EL CUADRO 1>**

La vida en la Tierra puede cuantificarse de muchas maneras diferentes. Los tres enfoques principales consisten en estimar el número de especies, la cantidad de historia evolutiva o la cantidad de biomasa. El método más utilizado consiste en estimar el número de especies. Existen aproximadamente 2 millones de especies eucariotas en la Tierra (https://www.catalogueoflife.org/), de las cuales aproximadamente la mitad son insectos y aproximadamente una quinta parte son plantas vasculares (en su mayoría plantas con flores). Los eucariotas restantes son una variedad variada de formas de vida, dominada por los hongos (aproximadamente el 7%), y todos los vertebrados representan sólo aproximadamente el 4% del total de especies conocidas[(](#bib32)[32-34](#bib34)). Nótese que estas cifras se refieren a las especies ya descritas; existe una gran incertidumbre sobre cuántas especies hay en total. La evaluación más citada utiliza la relación entre el nivel taxonómico y la diversidad de especies de los grupos taxonómicos mejor comprendidos para inferir el recuento de especies de los grupos menos comprendidos[(35](#bib35))[(Figura 1](#fig1); [Tabla 2](#tb2)). Este enfoque sugiere 8,7 millones de especies eucariotas (±1,3 millones). Aproximadamente 8,1 millones de ellos son plantas y animales, de los cuales unos 5,5 millones son insectos[(35](#bib35), [36](#bib36)). No estamos ni mucho menos cerca de describir todas las especies de la Tierra: Según la misma evaluación[(35](#bib35)), y suponiendo que el esfuerzo y el coste medios para describir una especie animal se mantengan constantes (esto podría cambiar drásticamente con las nuevas tecnologías, por ejemplo), harían falta aproximadamente 1.200 años y el esfuerzo de 303.000 taxónomos para describir todas las especies eucariotas del planeta. Estimaciones recientes[(37](#bib37)) que emplean una delimitación de las especies basada en métodos moleculares (en lugar de la habitual delimitación basada en la morfología) de los límites de las especies de artrópodos sugieren de forma controvertida que la diversidad eucariota puede ser aún mucho mayor (aproximándose a los 1.000 millones de especies en total).

**<COMP: INSERTE AQUÍ LA FIGURA 1>**

Figura 1 Distribución de la biodiversidad mundial en los principales reinos de la vida a través de las métricas de*(a*) diversidad de especies,*(b*) diversidad filogenética y*(c*) biomasa.

**<COMP: INSERTE AQUÍ EL CUADRO 2>**

Los dos reinos procariotas, Bacteria y Archaea, son las manifestaciones más antiguas y extendidas de la vida en la Tierra, se encuentran en todos los ecosistemas e impulsan la mayoría de los ciclos biogeoquímicos globales. Presentan aún más desafíos tanto para definir las especies como para cuantificar su diversidad. La descripción formal de una especie microbiana suele requerir su aislamiento en cultivo puro y su descripción bioquímica y morfológica. Sin embargo, sólo aproximadamente el 1% de las especies procariotas pueden aislarse en cultivo con las técnicas actuales[(38](#bib38)). Además, el concepto de límites entre especies es especialmente difícil de cuantificar en el caso de los procariotas, ya que la generalización de la transferencia lateral de ADN entre linajes complica la definición de especie. La transferencia lateral ha llevado a los investigadores a sugerir que las células procariotas no son más que recipientes de almacenamiento de un único acervo genético de metaespecies procariotas, y que la parte de este acervo que se observa en cualquier grupo (especie) no es más que los genes que son selectivamente útiles en un entorno determinado[(39](#bib39)). Sin embargo, esta no es la opinión predominante y se reconoce que la mayor parte de la transferencia de genes se produce entre procariotas de composición genética similar, donde la transferencia lateral de genes dentro de los grupos es mucho mayor que la transferencia entre grupos, lo que permite preservar la historia filogenética cuando se comparan los genomas. Una definición práctica consiste en considerar las unidades taxonómicas operativas (OTU), en las que se suele compartir el 97% del material genético, utilizando el gen 16S rRNA como punto de comparación[(40](#bib40)). La diversidad procariota total es un tema controvertido, restringido tanto por un muestreo limitado como por cuestiones de escalado apropiado. Algunos autores han sugerido que la diversidad procariota puede alcanzar hasta un billón (1012) de especies[(41](#bib41)) basándose en la extrapolación de leyes de escala empíricas de la diversidad local en comunidades individuales a escalas globales. Este punto de vista implicaría que los procariotas son el componente abrumadoramente dominante de la diversidad terrestre.

El Censo Mundial de Procariotas recopiló datos de secuenciación de 2.800 lugares para estimar la diversidad procariota[(40](#bib40)). Estas muestras se tomaron de los vastos entornos en los que se encuentran los procariotas, incluidas las aguas superficiales y profundas de los océanos, las zonas de oxígeno mínimo, los lagos de agua dulce e hipersalinos, los ríos, las aguas subterráneas, los sedimentos marinos superficiales y profundos del subsuelo, los suelos agrícolas y forestales, las turbas, el permafrost, los desiertos, las tripas y heces de animales, las hojas y rizosferas de plantas, las marismas saladas, los biorreactores, los alimentos procesados, las filtraciones de metano, los desagües de minas, las aguas residuales, los respiraderos hidrotermales y las fuentes termales. El censo identificó aproximadamente 740.000 OTU procariotas, de las que aproximadamente el 90% eran bacterianas[(Tabla 2](#tb2)). A continuación, empleó métodos estadísticos de escalado para estimar la diversidad procariota total, llegando a 0,8-1,7 millones de OTU para las bacterias y 70.000-140.000 OTU para las arqueas[(Tabla 1](#tb1)), cifras elevadas pero en el extremo inferior de algunas de las estimaciones previas descritas anteriormente. Una fuente clave de incertidumbre es el alcance de la variabilidad geográfica y también de la variabilidad específica del taxón hospedador en los microbiomas[(42](#bib42), [43](#bib43)); si la diversidad del microbioma es específica del taxón hospedador, la diversidad procariota total podría ser mucho mayor. Las pruebas disponibles hasta la fecha sugieren que los microbiomas específicos de cada taxón muestran sólo una modesta variación entre taxones hospedadores relacionados y que la variación biogeográfica es incluso menor, encontrándose las mismas especies procariotas en los mismos entornos en todo el mundo. Entre los eucariotas, la diversidad de los protistas se enfrenta a una serie de retos similares a los de la biodiversidad procariota y probablemente también se subestima en gran medida, siendo los suelos un hábitat especialmente rico[(44](#bib44)).

Un segundo enfoque consiste en estimar cuánta historia evolutiva, o cuánto del Árbol de la Vida, está plasmado en un conjunto de taxones. Una de las métricas más utilizadas es la diversidad filogenética[(45](#bib45)), que es la suma de las longitudes de rama que conectan un conjunto de taxones en una filogenia. Aunque proporciona información diferente a la diversidad de especies, la diversidad filogenética está ampliamente correlacionada con el número de especies dentro de taxones específicos, porque las especies adicionales añaden al menos una rama más al árbol, pero también refleja la profundidad taxonómica de los clados. En términos de diversidad filogenética, nuestro planeta parece dominado por la diversidad filogenética bacteriana, que sustenta la diversidad de herramientas metabólicas que la vida ha desarrollado a lo largo de su profunda historia evolutiva[(Figura 1](#fig1); [Tabla 2](#tb2)).

Un tercer enfoque consiste en estimar la biomasa viva total de la Tierra. Esta tarea dista mucho de ser trivial, sobre todo si se tienen en cuenta los ecosistemas del suelo y los sedimentos, en particular la biosfera profunda de bacterias y arqueas que viven en la corteza planetaria. Bar-On y sus colegas[(46](#bib46)) llevaron a cabo una heroica evaluación y síntesis de cientos de estudios[(Figura 1](#fig1); [Tabla 2](#tb2)). Estimaron la biomasa total de vida en 550 Pg C (IC 95%: 323-935 Pg C). Esta estimación se realiza en unidades de carbono, lo que equivale aproximadamente a 1.100 Pg de biomasa seca o a unos 1.800 Pg de biomasa hidratada de forma natural. Las plantas dominan esta estimación con 450 Pg C (375-540 Pg C); sin embargo, la biomasa vegetal global está compuesta en un 70% por tejido leñoso, que es relativamente (pero no totalmente) inerte desde el punto de vista metabólico. Por lo tanto, el componente metabólicamente más activo de la materia vegetal (principalmente hojas, raíces finas, tallos verdes, flores y frutos) suma aproximadamente 135 Pg C, todavía cerca del doble que las bacterias, que ocupan el segundo lugar en esta clasificación de biomasa con 70 Pg C, aunque con una gran incertidumbre (7-700 Pg C). El 90% de la biomasa bacteriana se encuentra en la superficie profunda (principalmente en acuíferos y bajo el lecho marino) y también tiene una actividad metabólica lenta. Por tanto, en términos de actividad metabólica y flujo de energía, las plantas dominan casi con toda seguridad la vida en la Tierra. Aunque los animales dominan las métricas de diversidad de especies, sólo representan 2 (0,4-10) Pg C de biomasa, aproximadamente el 0,4% del total.

**Biosfera profunda:** la parte de la biosfera que reside por debajo de los primeros metros de la superficie terrestre y del fondo marino (la zona de bioturbación animal).

En resumen, según la métrica aplicada, distintos reinos de la vida adquieren protagonismo, dominando las plantas en cuanto a biomasa y actividad metabólica, los animales en cuanto a diversidad de especies conocidas y las bacterias en cuanto a diversidad filogenética y diversidad de innovaciones metabólicas[(Figura 1](#fig1); [Tabla 2](#tb2)).

4.2. Causas de los patrones geográficos de la biodiversidad

Aproximadamente el 90% de la diversidad de especies conocida se encuentra en tierra, principalmente porque los insectos son predominantemente un clado terrestre, pero el predominio de especies terrestres persiste incluso sin contar los artrópodos. Los entornos terrestres tienden a incorporar una gama más amplia de heterogeneidad ambiental (por ejemplo, mayor variedad de microclimas y condiciones microambientales; distintos niveles de restricciones en el suministro de agua; menor facilidad de mezcla lateral que, por ejemplo, a través de las corrientes oceánicas). Sin embargo, como punto de origen de la vida en la Tierra, los océanos contienen un mayor nivel de diversidad taxonómica más profunda, con la presencia de muchos phyla que no han hecho la transición a entornos terrestres (por ejemplo, cnidarios, esponjas, equinodermos).

La biomasa de la vida también es predominantemente terrestre, ya que las plantas son los organismos dominantes que conforman los entornos terrestres y, en el caso de los árboles, han evolucionado formas leñosas de larga vida que permiten crear y mantener una elevada biomasa. Los ecosistemas marinos tienen una productividad primaria global similar a la de los ecosistemas terrestres (90 Pg C año − 1 para los sistemas marinos en comparación con 120 Pg C año − 1 para los terrestres), pero debido a que el fitoplancton es unicelular y de vida corta, la biomasa marina representa una pequeña fracción de la biomasa planetaria y está más concentrada en los niveles tróficos superiores ( [Figura 2](#fig2) ). Mientras tanto, la biosfera del subsuelo profundo, poco descrita, es responsable de las enormes cantidades de biomasa bacteriana y arqueana, aunque su diversidad de especies/OTU sigue siendo poco conocida[(Figura 2](#fig2)).

**<COMP: INSERTE AQUÍ LA FIGURA 2>**

Figura 2 Distribución de la biomasa entre los medios terrestre*(verde)*, marino*(azul)* y subsuperficial profundo*(amarillo)* en los principales reinos de la vida. Derivado de la referencia [46](#bib46). El asterisco corresponde a las plantas terrestres, que representan más del 99,5% de la biomasa vegetal total ( [47](#bib47) – [49](#bib49) ).

Este patrón de dominación de la diversidad global de especies por parte de la biota terrestre parece relativamente reciente, asociado al surgimiento de las plantas angiospermas (en su inmensa mayoría terrestres) hace aproximadamente 100 millones de años y a la diversificación de los artrópodos como mutualistas o depredadores especializados[(50](#bib50)), aunque las cuestiones relativas al sesgo de conservación hacia épocas más recientes arrojan un elemento de incertidumbre en torno a las proyecciones pasadas de las tendencias de la biodiversidad.

En última instancia, en términos de número de especies, el número actual de especies es el producto final de las tasas históricas de especiación y extinción. Un bioma puede facilitar altas tasas de especiación mediante la provisión de nichos microambientales o el aislamiento; mayores presiones bióticas a través de la competencia, la depredación, el parasitismo o los patógenos; mayores sinergias bióticas y mutualismos; mayores tasas de recambio generacional; o mayores tasas de mutación. Los biomas también pueden facilitar altas tasas de extinción a través de la variación ambiental a lo largo del tiempo, los regímenes de perturbación y los fuertes filtros abióticos(por ejemplo, el clima) que limitan el potencial de éxito de las nuevas especies. Los cambios medioambientales del pasado también desempeñan un papel importante en la configuración de la biodiversidad moderna. Por ejemplo, los bosques templados de Europa son mucho menos diversos que los de Asia Oriental porque estos ecosistemas (incluidos los suelos) han pasado de refugios glaciares aislados a entornos postglaciaressólo en los últimos 11.000 años, mientras que Asia Oriental evitó una glaciación extensa[(51](#bib51)). Del mismo modo, los bosques tropicales de África parecen menos diversos en plantas que los de Asia y América, un patrón que puede explicarse por un mayor nivel de extinciones pasadas impulsadas por la variabilidad climática en África y también por elevadas tasas de especiación asociadas a la actividad tectónica en Asia y América[(52](#bib52)).

Por tanto, los biomas ricos en especies pueden ser cunas de biodiversidad (altas tasas de especiación), museos de biodiversidad (bajas tasas de extinción), o ambas cosas. Recientes análisis filogenéticos, geomorfológicos y de modelización están arrojando nueva luz sobre las regiones ricas en especies. Un buen ejemplo es la selva tropical del Amazonas, el bioma más rico en especies de la Tierra. Esta región parece ser a la vez una cuna y un museo. La diversidad de linajes de la biota amazónica es bastante antigua, con muchas familias de plantas que se remontan a (o antes de) la aparición de las selvas tropicales dominadas por angiospermas hace aproximadamente 65 millones de años. Sin embargo, la mayoría de las especies amazónicas son jóvenes, del Pleistoceno (últimos 2,6 millones de años)[(53](#bib53)). La cordillera de los Andes y su compleja topografía y microambientes son únicos en el sentido de que componen una larga cadena montañosa de norte a sur adyacente a una selva tropical. Su compleja topografía, unida a la variabilidad climática, parece haber sido fundamental para proporcionar microambientes que facilitan altos niveles de especiación, refugios que reducen la tasa de extinción y corredores migratorios que facilitan la adaptación de las especies al cambio climático[(54](#bib54)). La interacción entre las funciones de cuna y museo puede ser espacialmente compleja. Por ejemplo, en el caso de las aves del continente americano, parece que los entornos de baja diversidad y estrés ambiental, como las regiones templadas o montañosas, actúan como centros de especiación, mientras que la posterior propagación de las especies hace que las regiones tropicales de tierras bajas y bajo estrés sean museos de biodiversidad[(55](#bib55)).

5. HUMANOS Y TENDENCIAS DE LA BIODIVERSIDAD

5.1. El ser humano y el cambio de la biodiversidad en la época premoderna

Al ser depredadores y competidores omnívoros megafaunales sociales, es probable que las especies del género *Homo* hayan afectado siempre a la biodiversidad de los ecosistemas que han habitado. De hecho, su capacidad para construir una amplia gama de nichos ambientales[(56](#bib56), [57](#bib57)) es un atributo clave *del Homo*. La modelación humana de la biota comenzó en el Pleistoceno a través de la caza, el transporte de otras especies y el uso del fuego ( [56](#bib56) , [58](#bib58) – [60](#bib60) ), y a principios del Holoceno, hace aproximadamente 12.000 años, aproximadamente tres cuartas partes de los ecosistemas terrestres ya estaban habitados por personas ( [61](#bib61) ). Existen pruebas de que en África, hace 1-2 millones de años, pudo producirse cierta extinción de especies asociada a la aparición del *Homo erectus*, con su mayor tamaño cerebral, el cambio asociado a una dieta más basada en la carne y el uso del fuego como estrategia para modificar los ecosistemas y cocinar los alimentos[(62](#bib62)). Las pruebas más llamativas son las extinciones de la megafauna, que se asocian a la expansión del *Homo sapiens* fuera de África y a través de continentes e islas. La megafauna vertebrada (>44 kg de masa) parecía especialmente vulnerable en los continentes debido a sus lentos tiempos de generación y a sus grandes necesidades de área de distribución[(59](#bib59)). El papel de los humanos en las extinciones de megafauna del Pleistoceno sigue siendo objeto de debate, en parte porque en un mismo lugar puede ser difícil separar definitivamente el escaso registro arqueológico de la presencia humana de otros posibles factores ambientales. Sin embargo, cuando se considera el panorama global, es difícil negar que la llegada del hombre está asociada a la pérdida de muchas especies, posiblemente en algunos casos en asociación con variaciones climáticas que ejercieron una presión a corto plazo sobre las poblaciones de megafauna[(](#bib63)[63-65](#bib65)). Este argumento se refuerza si tenemos en cuenta que el clima ha fluctuado de condiciones glaciares a interglaciares a lo largo del Pleistoceno sin provocar una extinción masiva de la megafauna. En total, se cree que 178 mamíferos megafauna se extinguieron en las extinciones del Pleistoceno tardío[(65](#bib65)). Por continentes, se calcula que Eurasia ha perdido 9 de las 28 especies de megafauna; Australia, 14 de 16; Norteamérica, 50 de 60; y Sudamérica, 34 de 47. África fue el continente menos afectado, y es interesante especular por qué[(66](#bib66)). El argumento más frecuente es que las especies de allí (y en menor medida las del sur de Eurasia) coevolucionaron con los homínidos y aprendieron a temer su potencial como depredadores, mientras que las especies de otros continentes eran ecológicamente ingenuas ante la amenaza que representaban estos enclenques primates. Sin embargo, varias especies de megafauna (por ejemplo, los proboscídeos) muestran una gran inteligencia conductual y social, por lo que cabe esperar que aprendan rápidamente en respuesta a nuevas amenazas. Un argumento alternativo o complementario es que África experimentó un largo y prolongado declive de la megafauna bajo sucesivas oleadas de homínidos a lo largo de los 2 millones de años del Pleistoceno. Un estudio reciente realizado en el sur del Levante muestra una disminución constante de la biomasa de grandes mamíferos durante el Pleistoceno, a lo largo de la ocupación por *Homo erectus*, *Homo neanderthalensis* y *Homo sapiens*. Hace 10.500 años, la biomasa media de restos de mamíferos era sólo el 1,5% de la encontrada hace 1,5 millones de años[(67](#bib67)). Es probable que los efectos de estas ampliaciones se extiendan más allá de las propias especies, ya que los grandes animales desempeñan papeles clave en la configuración de la estructura y las funciones de los ecosistemas, como el ciclo de los nutrientes[(68](#bib68), [69](#bib69)).

En el Holoceno, el patrón de pérdida de especies continuó en los sistemas insulares (incluidas grandes islas como Madagascar y Aotearoa/Nueva Zelanda), extendiéndose a través de un rango mucho más amplio de masa corporal. Las faunas endémicas de las islas parecen especialmente vulnerables debido a su entorno depauperado, su ingenuidad ecológica y su falta de resistencia a las especies asociadas al hombre, como las ratas. La expansión polinesia por el Pacífico está asociada a la extinción de unas 1.000 especies de aves endémicas (principalmente rascones no voladores); se trata casi con toda seguridad del mayor acontecimiento de extinción de especies vertebradas del Holoceno hasta la fecha[(70](#bib70)).

Esta historia de extinciones globales desde el Pleistoceno, y las tendencias modernas descritas en la siguiente sección, pueden llevar a la conclusión de que los impactos humanos sobre la biodiversidad son negativos por definición. Aunque el balance global es abrumadoramente negativo, y la megafauna y los endemismos insulares son especialmente sensibles, las actividades humanas también han fomentado deliberada o involuntariamente la biodiversidad a lo largo de la historia, incluso hasta nuestros días. Esto puede ocurrir de varias maneras. Tras la extinción asociada a la llegada de los primeros humanos a ecosistemas exóticos, muchas culturas indígenas desarrollaron sistemas de reciprocidad y administración basados en un profundo conocimiento de los ecosistemas locales. En su forma más simple, las perturbaciones asociadas a las actividades humanas, especialmente a intensidades bajas o medias y a escalas espaciales pequeñas, crean heterogeneidad en el hábitat[(71](#bib71)) e impiden el dominio competitivo, favoreciendo la coexistencia de un mayor número de especies tanto a nivel de manchas locales como de paisajes enteros. En el otro extremo, muchas prácticas e instituciones antiguas y elaboradas de cultivo o administración de los pueblos indígenas y las comunidades locales de todo el mundo han fomentado deliberadamente determinados organismos, conjuntos bióticos o ecosistemas enteros ( [34](#bib34) , [72](#bib72) – [74](#bib74) ). Algunas de las praderas y pastizales con mayor riqueza de plantas vasculares se encuentran en paisajes de Europa gestionados desde hace mucho tiempo, mantenidos gracias a una amplia gestión tradicional por parte de las comunidades locales durante cientos o miles de años, en zonas que, de otro modo, estarían dominadas de forma mucho más homogénea por arbustos o bosques de coníferas o de frondosas[(71](#bib71), [75](#bib75)). En muchas regiones, existen pruebas de la antigua jardinería de plantas silvestres útiles, lo que contribuye a su dominancia. Todavía hoy se mantienen en todo el mundo paisajes culturales complejos que combinan plantas y animales salvajes y domesticados, como las tierras de caza y pastoreo tradicionalmente quemadas en África y Australia; los complejos mosaicos agrícolas de las islas del Pacífico ([76](#bib76)); *las dehesas* (paisajes similares a sabanas) en el sur de Europa; praderas de heno y ovejas en Europa y Asia; jardines forestales en Asia tropical, África y América Latina; *vegas* (praderas húmedas) en los altos Andes; y paisajes*satoyama* (un mosaico de bosques, arrozales, praderas, arroyos e infraestructuras de regadío) en Japón ([34](#bib34)). Aunque estas prácticas suelen centrarse en un pequeño número de especies, estas parcelas ajardinadas suelen favorecer a otros organismos silvestres de todos los niveles tróficos, como abejas y otros insectos, mamíferos y aves frugívoras, y hongos, que son más raros en zonas más intactas o más gestionadas industrialmente.

Los ejemplos anteriores implican en su mayoría favorecer a organismos que ya existen en una región, aunque en menos lugares y/o en densidades más bajas. Otra forma clave en que el ser humano ha fomentado la diversidad en el sentido más amplio es creando, predominantemente por selección deliberada basada en especies inicialmente silvestres[(77](#bib77)), un gran número de fenotipos vegetales, animales y microbianos domesticados (por ejemplo, ganado, aves de corral, animales de trabajo y ornamentales, cultivos para alimentos, fibras y combustibles, plantas ornamentales, levaduras, hongos). Aunque pequeña en comparación con el conjunto de la diversidad genética salvaje de la Tierra, la diversidad domesticada dista mucho de ser insignificante. Se desconoce el número total de fenotipos domesticados (denominados variedades, razas terrestres, razas o cepas según el organismo y el sector; en lo sucesivo, variedades) más allá de determinados grupos. Sin embargo, una estimación aproximada de los animales y plantas terrestres domésticos bien controlados que contribuyen a los principales grupos alimentarios es de unas 300 especies (78). Esta cifra se ve empequeñecida por el número de variedades derivadas: casi 1 millón, dominadas por cereales, tubérculos y leguminosas (78). Un inventario restringido a mamíferos y aves terrestres de granja, excluyendo los que se creían extinguidos, arrojó 8.179 en 2016 (78). Las cifras son seguramente mucho más elevadas si se tienen en cuenta los animales acuáticos, los animales ornamentales y de compañía, las plantas ornamentales y los microorganismos. La importancia social, cultural y económica de la biodiversidad domesticada para la humanidad es inmensa[(34](#bib34), 78, 79, [80](#bib80)).

5.2 El declive moderno de la biodiversidad

El ritmo de declive de la biodiversidad se ha intensificado en los tiempos modernos. Varios rasgos definitorios del modelo de apropiación humana de la naturaleza que domina globalmente en la actualidad ya estaban presentes en la época premoderna. Sin embargo, la escala aumentó drásticamente, coincidiendo con los cambios escalonados en la globalización y el mercantilismo económico[(81](#bib81)): el inicio de la explotación europea de las Américas y otras regiones colonizadas a finales del siglo XVI, la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII y principios del XIX, y la Gran Aceleración[(82](#bib82)) desde la década de 1950. Como consecuencia, han disminuido la extensión y la integridad de los ecosistemas naturales, el carácter distintivo de las comunidades locales, el tamaño y la distribución geográfica de las poblaciones vegetales y animales, el número de especies y la diversidad genética intraespecífica de los organismos salvajes y domesticados[(5](#bib5), [34](#bib34)). Estos descensos han ido acompañados de otros dos procesos globales que han recibido menos atención pública. El primer proceso, denominado homogeneización biótica, consiste en una disminución del carácter distintivo taxonómico, funcional, filogenético y de riqueza de especies de las biotas regionales de todo el mundo debido al transporte deliberado o involuntario de organismos por parte de los seres humanos[(83](#bib83), [84](#bib84)); Harold A. Mooney denominó Nueva Pangea a este grado de remodelación de la biogeografía mundial[(85](#bib85)). Por ejemplo, en los últimos cinco siglos se ha producido una homogeneización generalizada de las comunidades vegetales, pero esto se debe mucho más a la naturalización de especies más allá de sus áreas de distribución nativas que a la extinción de especies autóctonas[(86](#bib86)).

El segundo proceso generalizado es la evolución contemporánea, es decir, los cambios fenotípicos hereditarios en curso o recientes que tienen lugar en las poblaciones silvestres[(87](#bib87), [88](#bib88)) como consecuencia de las presiones de selección direccional ejercidas por los seres humanos, como la caza, la pesca, la urbanización, el uso de biocidas agrícolas o el desarrollo de infraestructuras de transporte o riego. Estas presiones son en su mayoría involuntarias, en el sentido de que los cambios fenotípicos son un efecto colateral más que un objetivo deseado de la actividad, a diferencia, por ejemplo, de la cría selectiva. El número de ejemplos ha aumentado en los últimos años[(34](#bib34), [89](#bib89), [90](#bib90)), probablemente debido a un cambio en la atención más que a una aceleración de la evolución contemporánea per se. La reconfiguración mundial de la vida en la Tierra a todos los niveles, desde los genes hasta los biomas, por parte de los seres humanos ha suscitado ricos debates en los ámbitos ecológico, filosófico y político[(5](#bib5), [15](#bib15), [81](#bib81), [91](#bib91), [92](#bib92)).

A continuación centraremos nuestra atención en las extinciones de especies silvestres y en las tendencias de la composición taxonómica y funcional de las comunidades locales, ya que se trata de ámbitos sobre los que se dispone de abundantes datos en todo el mundo, métodos normalizados y ampliamente adoptados y una bibliografía en rápido crecimiento.

5.2.1. Riesgos y tasas de extinción.

Que nuestro planeta está perdiendo especies rápidamente es algo bien sabido por los científicos y es uno de los aspectos del declive de la naturaleza más conocidos por el gran público. Por ello, un inventario del estado de la biodiversidad a nivel de especie debe incluir no sólo el número de especies y taxones de orden superior, su distribución geográfica y su abundancia, sino también su riesgo de desaparición a escalas de tiempo relevantes para el ser humano. Existen tres tipos de extinciones a nivel de especie. Aunque se producen casos de extinción catastrófica que eliminan repentinamente una especie de la faz de la Tierra, la mayoría de las extinciones se producen de forma más o menos gradual. Comienzan cuando las especies se vuelven cada vez más raras en algunos lugares y, aunque sus poblaciones siguen siendo lo suficientemente altas como para persistir a largo plazo, son demasiado pequeñas para desempeñar plenamente algunas de las funciones ecológicas de la especie; es lo que se denomina extinción funcional[(93](#bib93)). El segundo tipo es la extinción local, que se produce cuando una especie se extingue en parte de su área de distribución pero persiste en otras zonas. Por ejemplo, el león*(Panthera leo*), el guanaco*(Lama guanicoe*) y el bisonte*(Bison bison*) ocupan hoy una pequeña fracción de su antigua área de distribución. Por último, se dice que una especie se ha extinguido globalmente cuando desaparece de la Tierra. Aunque los dos primeros tipos son indudablemente importantes, la mayor parte de los esfuerzos de seguimiento global y, por tanto, la mayor parte de la información publicada se refieren a las extinciones globales, que analizamos en el resto de esta sección. Las dos formas más comunes de referirse a las extinciones globales son el riesgo de extinción y la tasa de extinción. Estas métricas complementarias ofrecen diferentes perspectivas del proceso de extinción.

El riesgo de extinción indica la probabilidad de que una especie se extinga. Se establece para especies claramente identificadas, normalmente antes de que desaparezcan, y tiene en cuenta la biología de la especie y las amenazas externas a las que se enfrenta. El sistema más utilizado para categorizar el riesgo de extinción es el realizado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). La UICN utiliza un conjunto de categorías estandarizadas (las categorías de la Lista Roja de la UICN; https://www.iucnredlist.org/), que van desde la preocupación menor (no necesita esfuerzos específicos de conservación) hasta el peligro crítico (50% de posibilidades de extinguirse en los próximos 10 años), para las especies que aún se encuentran en estado salvaje, además de dos categorías de especies extinguidas (extinguidas y extinguidas en estado salvaje). Las especies amenazadas (vulnerables, en peligro y en peligro crítico) son aquellas que se consideran en alto riesgo de extinción en la actualidad.

Las tasas de extinción, por su parte, indican la velocidad a la que desaparecen los taxones a lo largo de un periodo de tiempo. La estimación de estas tasas suele realizarse a posteriori (cuando las especies ya han desaparecido) y no suele referirse a especies concretas, sino a grandes grupos de especies o biotas enteras. Las tasas suelen expresarse en número de extinciones por millón de especies al año (E/MSY) para estandarizar las comparaciones entre distintos periodos de tiempo y conjuntos de especies. Estas tasas de extinción suelen compararse con la tasa de fondo, es decir, la tasa media de extinción debida a causas no humanasa lo largo de la historia geológica. El consenso actual para la tasa de fondo de la extinción es de aproximadamente 1 E/MSY, aunque ha habido argumentos para tasas sustancialmente más altas[(95](#bib95)) o más bajas[(96](#bib96))[(Figura 3](#fig3)). Para facilitar la comparación con las tasas actuales y futuras, 1 E/MSY equivale a 1 especie extinguida en una muestra total de 10.000 especies durante un periodo de 100 años[(97](#bib97)).

Según la revisión más exhaustiva realizada hasta la fecha, se calcula que el número total de especies animales y vegetales -tanto conocidas como desconocidas para la ciencia- actualmente amenazadas de extinción asciende a un millón[(5](#bib5), [34](#bib34)). Esta estimación del riesgo se basa, por una parte, en el número total estimado de especies vegetales y animales en la Tierra (8,1 millones, de las cuales 5,5 millones son insectos (34, 35); véase más arriba) y, por otra, en la proporción de especies amenazadas en los distintos grandes grupos de organismos según la Lista Roja de la UICN. Esta proporción no es igual de conocida para todos los grupos. Por ejemplo, se han evaluado exhaustivamente las leguminosas, los helechos y aliados, las monocotiledóneas, los mamíferos, las aves y los reptiles, mientras que en otros grupos, como los peces y los invertebrados (incluidos algunos moluscos, insectos, crustáceos y corales), sólo se han evaluado muestras representativas. E incluso entre las evaluadas exhaustivamente, no hay datos suficientes para asignar una categoría de riesgo a muchas especies; el porcentaje de especies con datos insuficientes varía mucho, por ejemplo, del 0,4% en las cícadas al 40% o más en algunos invertebrados. Teniendo en cuenta todas estas incertidumbres, la proporción media de especies amenazadas (todas las categorías, desde vulnerables hasta en peligro crítico) en todos los grupos evaluados de animales, plantas e invertebrados no insectos es de aproximadamente el 25%. Se desconoce en gran medida el riesgo para los insectos en su conjunto. En el caso de las Odonata (libélulas), el único grupo evaluado a escala mundial, aproximadamente el 15% está amenazado, pero el hecho de que los hábitats de agua dulce se enfrenten a muchas amenazas puede significar que otros insectos tengan niveles más bajos de riesgo de extinción. Las evaluaciones de varios grupos de insectos (abejas, mariposas, escarabajos saproxílicos) en Europa han asignado una prevalencia del riesgo cercana al 10%. Sobre esta base, se utilizó un 10% como cifra aproximada conservadora para los insectos; el valor real podría ser superior, pero es poco probable que sea inferior[(34](#bib34)). Si se extrapolan estos riesgos al número total de plantas más animales no insectos y al número total de insectos (25% y 10%, respectivamente), el número total de especies amenazadas viene a ser del orden de 1 millón. Varias fuentes de incertidumbre, como las que giran en torno al número total de especies en la Tierra y a si los riesgos de extinción de grupos bien conocidos son representativos de grupos menos evaluados, en particular el enorme y mal conocido grupo de los insectos[(98](#bib98)), hacen que esta cifra sea sólo una aproximación. Sin embargo, es la estimación global más fiable y transparente disponible hasta la fecha.

Teniendo en cuenta que la extinción, junto con el origen de las especies, es un fenómeno natural que se viene produciendo desde que apareció la vida en la Tierra, ¿hasta qué punto son elevadas estas cifras en comparación con las esperadas por causas no humanasy por los índices del pasado? Aunque las cifras exactas de las tasas de extinción actuales varían según los distintos marcos temporales, grupos taxonómicos y métodos de estimación y, por tanto, son difíciles de comparar entre sí, las opiniones científicas convergen en una tasa global de extinción de especies salvajes que es al menos entre decenas y cientos de veces superior a la tasa de fondo[(34](#bib34), [97](#bib97), [99](#bib99)) y es probable que esté aumentando rápidamente[(101](#bib101))[(Figura 3](#fig3)).

**<COMP: INSERTE AQUÍ LA FIGURA 3>**

Figura 3 Comparación de las tasas de extinción actuales con las del pasado. Las estimaciones de las tasas de extinción realizadas por distintos autores varían mucho en función de los taxones, el periodo de tiempo y los métodos considerados, pero las tasas de extinción modernas superan con creces a las de la época prehumana. Figura adaptada con permiso de la Referencia [103](#bib103). Los datos sobre la tasa general de extinción de fondo proceden de Referencia [34](#bib34) , Basado en referencias [95](#bib95) , [96](#bib96) , [101](#bib101) , [104](#bib104) ; el contexto y el presente Tasas de extinción de plantas, a partir de referencias [96](#bib96) y [99](#bib99) , respectivamente ; el fondo tasa de extinción de invertebrados, de Referencia [103](#bib103) (insectos fósiles) ; el fondo tasa de extinción de mamíferos, de Referencia [97](#bib97) , Basado en referencias [101](#bib101) y [105](#bib105) ; la tasa máxima de extinción para el colapso de la diversidad de la megafaunal del Pleistoceno, de Referencia [101](#bib101) ; el Tasa de extinción de plantas con semillas desde 1900 hasta 2018, de Referencia [99](#bib99) ; el tasa de extinción de invertebrados durante los últimos 50 a 300 años, de vertebrados terrestres desde 1500 hasta 2019, de todas las especies actuales (estimación) y de todas las especies descritas actualmente, de la Referencia [103](#bib103) .

Mientras que un 50% de probabilidades de desaparecer en los próximos 10 años (el riesgo medio para las especies en peligro crítico) parece un riesgo obviamente alto, algunos podrían pensar que el riesgo para las especies vulnerables(10% de probabilidades en 100 años) es bajo. Para poner estas cifras en contexto, si una especie fuera un ser humano de 50 años con una esperanza de vida de 80 años, a un ser humano de la categoría no amenazadale quedarían de media 30 años más de vida, mientras que a un ser humano de la categoría vulnerable le quedaría aproximadamente 1 semana, y a uno en peligro crítico tan sólo 3 horas[(102](#bib102)). Dicho de otro modo, piense en el tiempo que se tardaría en perder la mitad de las especies animales y vegetales que existen actualmente en la Tierra. Sin intervención humana (tasas de extinción de fondo), se tardaría aproximadamente 1 millón de años; si todas las especies estuvieran en la categoría vulnerable, se tardaría 600 años en perderlas, lo que es aproximadamente 1.500 veces más rápido que el riesgo de extinción natural. Si, por el contrario, todas las especies animales y vegetales estuvieran en peligro crítico, la pérdida completa tardaría sólo 10 años, más de 100.000 veces más rápido que el ritmo de extinción de fondo. Por lo tanto, el riesgo global de extinción de las especies amenazadas es del orden de 1.000 a 100.000 veces superior al riesgo de extinción de fondo. El riesgo de extinción de todas las especies, amenazadas y no amenazadas, es por supuesto mucho menor[(102](#bib102)).

5.2.2. ¿Una sexta extinción masiva?

Los medios de comunicación se han hecho eco ampliamente de una sexta extinción masiva en curso (es decir, si la magnitud y el ritmo de extinción actuales son similares a los estimados para los cinco grandes episodios de extinción a lo largo de la historia de la Tierra). Una extinción masiva se define técnicamente como la pérdida de al menos el 75% de las especies en un periodo relativamente corto de tiempo geológico. El problema es que "corto" no es fácil de definir; los intervalos de tiempo de los sucesos de extinción van desde años para el impacto de un asteroide hasta millones de años para episodios de vulcanismo intensificado. Así pues, aunque es fácil concluir que la magnitud de la extinción observada está aún lejos del umbral de un evento de extinción masiva, la tasa es más difícil de comparar. Barnosky y sus colegas[(101](#bib101)) calcularon cuánto tardarían las tasas de extinción actuales en producir una pérdida de especies de mamíferos, aves y anfibios equivalente a las de las cinco extinciones masivas. Según se asuma un escenario pesimista (todas las especies actualmente amenazadas se extinguen en 100 años) u optimista (sólo las especies en peligro crítico se extinguen en los próximos 500 años), las tasas de extinción estarían alcanzando magnitudes de extinción masiva en dos o tres siglos o en 10.000 años o más. Aunque técnicamente lo que estamos viendo hoy no equivale a una sexta extinción masiva, que estemos al borde de una depende de si pensamos en escalas de tiempo humanas o geológicas y también de nuestro éxito a la hora de mejorar el estado de conservación de las especies. Pero estas cuestiones técnicas, discrepancias e incertidumbres no deben ocultar los hechos de que*(a*) las tasas de extinción actuales son superiores a la media de cualquier momento de la historia de la humanidad;*(b*) no pueden descartarse magnitudes de extinción masiva de especies en los próximos siglos; y*(c*) la extinción masiva dista mucho de ser un proceso inexorable: las acciones humanas pueden marcar una diferencia drástica en cuanto a que se alcancen siquiera esas tasas de extinción.

5.2.3. Tendencias en la diversidad taxonómica de las comunidades locales.

¿Cómo está cambiando la naturaleza a escalas mucho más finas, desde las parcelas hasta los paisajes? Esto es relevante porque las acciones de conservación y gestión tienden a aplicarse, y la mayoría de las funciones de la biodiversidad y los beneficios sociales derivados, a escalas local a regional. El amplio consenso científico sobre las tendencias decrecientes de los indicadores de biodiversidad a escala mundial no se extiende a los conjuntos locales. ¿Hasta qué punto aumenta la biodiversidad taxonómica y funcional de los ecosistemas locales como consecuencia de los desplazamientos globales de especies, incluso cuando disminuyen tanto las especies autóctonas como las métricas de biodiversidad global? No hay acuerdo en la comunidad científica sobre si el número de especies en las comunidades locales muestra una tendencia global coherente. Este desacuerdo se debe a varios factores, como las diferencias en el diseño espaciotemporal, las limitaciones en los métodos de análisis y los conjuntos de datos subyacentes[(](#bib106)[106-109](#bib109)) y las causas ecológicas. Entre los últimos factores, un número total de especies constante o casi constante enmascara en muchos casos un equilibrio entre las pérdidas locales y las nuevas llegadas de especies no autóctonas o autóctonas. Las débiles tendencias globales pueden estar ocultando tendencias crecientes en algunas regiones (por ejemplo, en las regiones templadas y boreales como resultado del calentamiento climático) y tendencias decrecientes en otras regiones (por ejemplo, en las regiones tropicales como resultado del cambio en el uso del suelo). Algunas de las tendencias observadas entre sólo dos puntos en el tiempo pueden representar oscilaciones más que tendencias direccionales coherentes. Esta discrepancia en los resultados queda ilustrada por dos de los mayores análisis globales realizados hasta la fecha. Un análisis, basado en series temporales (muestreos repetidos de los mismos lugares en distintos momentos) desde aproximadamente 1850, pero con un fuerte énfasis en las últimas décadas, y que comprende una mayoría de organismos marinos, así como algunos terrestres y de agua dulce[(110](#bib110)), no muestra pruebas de una disminución consistente y generalizada de la riqueza de especies en los ensamblajes locales a lo largo del tiempo. El otro análisis, basado en un enfoque de sustitución espacio-temporal (una comparación de lugares cercanos que difieren en el uso del suelo pero que se supone que son similares en otros aspectos) utilizando datos sobre ensamblajes terrestres a partir del siglo XVI[(111](#bib111)), muestra un declive medio de aproximadamente el 13%. Se necesitan más pruebas y una mejor integración de los métodos antes de sacar conclusiones más definitivas. Menos controvertida es la constatación de que, tras estas tendencias (o la ausencia de ellas), la rotación en la composición de las especies locales y su abundancia relativa parece estar aumentando como resultado de una aceleración tanto de la colonización local como de la extinción[(110](#bib110), [112](#bib112)).

Aunque relativamente fácil de controlar y útil como aproximación, la riqueza de especies no informa sobre los cambios en la abundancia de las poblaciones o la composición de las comunidades. Por ello, se utilizan otros índices para supervisar el estado de la biodiversidad a estos niveles. Los más utilizados en todo el mundo muestran claras tendencias a la baja. Por ejemplo, el Índice Planeta Vivo muestra que el cambio medio en la abundancia de más de 20.000 poblaciones monitorizadas de más de 4.000 especies de anfibios, aves, peces, mamíferos y reptiles ha disminuido un 68% desde 1970, con grandes diferencias entre regiones: 94% en América Latina y 24% en Europa[(113](#bib113)). Esta conclusión se ha difundido erróneamente, afirmando que la abundancia de todos los animales salvajes ha disminuido en un 68% (114). El Índice de Intactidad de la Biodiversidad[(IIB) (115](#bib115)), que calcula la similitud entre las comunidades ecológicas terrestres de una zona (en términos de qué especies están presentes y su abundancia) y las comunidades que habría si no hubiera habido impactos humanos, ha descendido a una media mundial del 79%[(34](#bib34), [116](#bib116)); este cambio medio del 21% en las comunidades ecológicas es mayor que la pérdida media de especies (13%, arriba) porque también refleja los cambios en la abundancia de especies. El BII detecta cambios en la abundancia (tanto de especies individuales como de todo el conjunto) y excluye aumentos en el número de especies o en la abundancia debidos a especies no autóctonas. Sin embargo, dado que no incorpora información sobre rasgos funcionales, al menos en su formulación clásica, el IIB no diferencia entre la sustitución de una especie por un análogo funcional (que probablemente no provoque cambios en la función del ecosistema) y la sustitución de una especie por otra cuya ecología sea diferente (que sí puede provocar cambios en la función del ecosistema). El rápido crecimiento de las bases de datos de rasgos funcionales podría permitir pronto realizar estimaciones más directas de los cambios en la diversidad funcional.

5.2.4. Cambios en la composición funcional de las comunidades locales: diversidad funcional y homogeneización.

Los índices analizados anteriormente no informan sobre otra forma importante en la que está cambiando la vida en la Tierra: Las tendencias a la disminución no están afectando a los distintos organismos de forma homogénea o aleatoria. Más bien, ciertos organismos se ven mucho más afectados que otros. Esto se debe a que los rasgos funcionales (por ejemplo, duración de la vida, estrategia reproductiva, morfología, fisiología, estilo de vida) de algunos organismos los hacen especialmente vulnerables a los impactos humanos, mientras que otros organismos, con características opuestas, prosperan como resultado de nuestras actividades. Este proceso puede darse de dos formas no excluyentes entre sí: En primer lugar, los seres humanos crean involuntariamente condiciones de hábitat que son claramente favorables para algunos organismos, pero no para otros. Por ejemplo, los suelos frecuentemente alterados y enriquecidos en nutrientes de los entornos agrícolas y periurbanos son ideales para que las plantas ruderales prosperen y se extiendan por todo el mundo. En segundo lugar, las personas se dirigen deliberadamente a determinados organismos, ya sea extrayéndolos (por ejemplo, caza, pesca, recolección selectiva) o criándolos y transportándolos deliberadamente a grandes distancias (por ejemplo, plantas de jardín, animales de trabajo, mascotas). Aunque todavía no se dispone de un inventario global exhaustivo de los cambios funcionales en la composición de los conjuntos biológicos utilizando una metodología estándar, se están acumulando pruebas de cambios funcionales, en particular para los vertebrados[(](#bib117)[117-122](#bib122)) y, en menor medida, para las plantas vasculares[(99](#bib99), [121](#bib121)). Como generalización amplia, dentro de cada nivel trófico, los organismos que alcanzan un gran tamaño individual, crecen lentamente, producen poca descendencia a lo largo de su vida y tienden a tolerar más la escasez de recursos que las perturbaciones físicas son seleccionados en contra, mientras que los organismos de pequeño tamaño y estilo de vida acelerado y cuya aptitud se ve más afectada por la falta de recursos que por las grandes perturbaciones y la presencia humana directa tienden a prosperar alrededor de las personas y son transportados por todo el mundo[(123](#bib123)). La disminución constante de organismos grandes y de crecimiento lento (la megabiota), como árboles y animales grandes, es motivo de especial preocupación, porque pueden tener una influencia desproporcionada en aspectos clave de la dinámica de la comunidad y la función del ecosistema, desde el ciclo de nutrientes hasta la creación de hábitat y la dispersión de semillas a larga distancia ( [69](#bib69) , [124](#bib124) – [126](#bib126) ).

6. CAUSAS DEL DECLIVE DE LA BIODIVERSIDAD

¿Qué factores están detrás del declive generalizado de la naturaleza? Se distingue entre los generadores directos, que tienen un impacto físico directo en la naturaleza, y los indirectos, que actúan de forma difusa afectando al nivel, la dirección, el ritmo y/o la intensidad de los generadores directos[(127](#bib127)). Los impulsores directos pueden ser naturales (por ejemplo, erupciones volcánicas, terremotos, fenómenos meteorológicos), de origen humano (por ejemplo, deforestación, caza, contaminación, cambio climático antropogénico), o una mezcla de ambos (como los fenómenos de El Niño-Oscilación del Sur o las enfermedades zoonóticas amplificadas por el cambio climático antropogénico). Todos los impulsores indirectos son de origen humano, de naturaleza social, económica, demográfica, cultural, institucional y política y, en última instancia, se sustentan en valores y narrativas sociales. Incluyen patrones de oferta y producción de bienes y servicios; patrones de consumo y adopción de tecnología; preferencias dietéticas; dinámica demográfica; opciones de estilo de vida y tendencias de la moda; e instituciones en el sentido amplio de normas socialmente compartidas, desde normas locales consuetudinarias de herencia hasta acuerdos internacionales como el CDB y la Organización Mundial del Comercio. La distinción entre impulsores directos e indirectos es crucial desde el punto de vista conceptual y práctico, porque aunque los impulsores directos pueden mejorarse o incluso detenerse temporalmente, es poco probable que estos esfuerzos tengan éxito a largo plazo si no se abordan los impulsores indirectos, las causas profundas del actual declive de la biodiversidad.

6.1. Tendencias recientes de los factores directos del declive de la biodiversidad

La revisión sistemática mundial más completa realizada hasta la fecha[(34](#bib34), [128](#bib128)) muestra que las causas directas más prevalentes del deterioro de la naturaleza en todo el mundo son el cambio en el uso de la tierra y el mar (por ejemplo, la deforestación, la expansión de las fronteras agrícolas, el desarrollo costero) y la explotación directa (por ejemplo, la caza, la pesca, la tala selectiva), con el cambio climático (por ejemplo, los cambios en la temperatura media, las precipitaciones y la frecuencia y gravedad de los fenómenos climáticos extremos), la contaminación (incluida la contaminación orgánica y química puntual, la acidificación del agua de mar por el aumento de los nivelesde CO2 en la atmósfera y la contaminación lumínica y acústica) y las especies invasoras (introducidas voluntaria o involuntariamente por el hombre o, mucho más raramente, que llegan solas) tienen menos importancia. Esta clasificación general de la importancia de los impulsores directos cambia según los ámbitos y las regiones[(Figura 4](#fig4)). Por ejemplo, la explotación directa (principalmente la pesca) es el motor más importante del declive de la biodiversidad en los mares. Numerosos estudios más detallados y restringidos geográficamente demuestran que las especies invasoras son un factor mucho más importante en las islas oceánicas que en los continentes y que el cambio climático es más importante en las zonas de clima ártico y mediterráneo. El cambio climático no ha sido hasta ahora el motor más destacado de los cambios en la naturaleza a escala global, pero sus repercusiones son cada vez mayores y es probable que sigan creciendo durante el resto del siglo XXI[(](#bib129)[129-133](#bib133)). Dos estudios globales recientes, centrados de forma más estrecha y nítida en las áreas de distribución de un amplio conjunto de organismos marinos[(134](#bib134)) y anfibios, aves y mamíferos terrestres[(135](#bib135)), coinciden en líneas generales con estas conclusiones.

**<COMP: INSERTE AQUÍ LA FIGURA 4>**

Figura 4 Impacto relativo de los impulsores directos de los cambios en la naturaleza desde la década de 1970, basado en una revisión sistemática global. Adaptado con permiso de la Referencia [34](#bib34).

Y lo que es más importante, estos motores tienden a actuar de forma sinérgica. Por ejemplo, los corales formadores de arrecifes pueden hacer frente hasta cierto punto a la acidificación del agua de mar, el calentamiento, la contaminación de origen local y remoto y las perturbaciones físicas por separado, pero el impacto combinado de estos factores tiene efectos catastróficos[(131](#bib131)). Como ejemplo terrestre, en la selva amazónica la sinergia entre el cambio climático global (que provocó un aumento de los episodios de sequía extrema además de una tendencia al calentamiento a largo plazo), la pérdida y fragmentación de los bosques debido a la expansión agropastoral y el aumento del uso del fuego para gestionar los pastos y talar los bosques está provocando incendios a gran escala y la pérdida de biodiversidad asociada[(136](#bib136), [137](#bib137)).

6.2. Cuatro nuevos factores directos del declive de la biodiversidad

Los factores directos más comunes de la pérdida de diversidad se han tratado ampliamente en la literatura, pero varios factores emergentes sólo han atraído la atención de la comunidad científica recientemente. Aunque algunos de los factores directos del cambio de la biodiversidad son tan antiguos como la humanidad(por ejemplo, las quemas, la jardinería en busca de plantas silvestres deseables, la caza de especies vulnerables) o se remontan a miles (agricultura) o cientos (contaminación química) de años, otros han surgido o han aumentado drásticamente en las últimas décadas. Algunos ejemplos destacados son la contaminación por plásticos, la contaminación acústica y lumínica, y la exploración y explotación de los fondos marinos (un caso especial dentro de la amplia categoría de cambios en el uso de la tierra y el mar). Aunque de naturaleza física muy diferente, estos factores emergentes comparten algunas características clave: Son relativamente nuevos y, por tanto, los organismos han tenido poco tiempo para adaptarse a ellos, su magnitud es ya extremadamente alta o está aumentando de forma pronunciada, y afectan a sistemas teleconectados (véase más adelante). Examinaremos estos nuevos motores directos en las siguientes subsecciones.

6.2.1. Contaminación por plásticos.

Desde la década de 1950, se han desechado aproximadamente 8.300 millones de toneladas de plástico (polímeros orgánicos sintéticos), de las cuales casi el 80% ha acabado en vertederos o en el medio natural. Dado que resisten la degradación mediante procesos químicos o biológicos y tienden a acumularse en sedimentos y organismos, los plásticos son una forma de contaminación persistente y generalizada. La producción anual [367 Tg año − 1 en 2020 ( [138](#bib138) )] se aproxima al peso total de la población humana ( [139](#bib139) ). De mantenerse esta tendencia, en 2050 habrá aproximadamente 12.000 Tg de residuos plásticos en vertederos o en el medio natural[(140](#bib140)). Si se repartiera uniformemente, esta cifra representaría aproximadamente 24 toneladas de residuos plásticos por kilómetro cuadrado de superficie terrestre y marina, un nivel de contaminación de cualquier tipo sin precedentes en la historia de la humanidad[(131](#bib131)). La contaminación por plásticos tiene numerosos efectos ecológicos. Las imágenes de mamíferos marinos, aves y tortugas enredados o asfixiados con grandes trozos de plástico han captado la atención del público. De hecho, las pruebas más sólidas de los efectos nocivos de los plásticos en la biota están asociadas a los macroplásticos, con más de 900 especies de vertebrados e invertebrados marinos afectados actualmente por ingestión o enredo[(141](#bib141)).

Sin embargo, una forma mucho más generalizada de contaminación por plásticos, cuyos efectos son mucho menos conocidos y difíciles de controlar, es la procedente de los microplásticos y nanoplásticos (partículas de menos de 5 mm de longitud; en lo sucesivo, microplásticos). Los microplásticos se crean por la erosión y descomposición de objetos de plástico, neumáticos de coches, textiles, revestimientos y aditivos de diversos productos, y ahora se encuentran en todas partes del planeta, incluidos el agua, el aire, los suelos y los cuerpos de muchos organismos[(131](#bib131), [139](#bib139), [142](#bib142)). Su nocividad sigue siendo poco conocida debido a las dificultades técnicas para cuantificar la exposición y el daño, a la incertidumbre sobre lo comunes que son en la naturaleza las dosis que se han considerado nocivas en experimentos controlados, y a las dificultades para rastrear las numerosas vías a través de las cuales pueden causar daño (por ejemplo, bloqueo físico, toxicidad, inflamación, efectos indirectos a través de sus aditivos o adsorción de sustancias tóxicas, sustitución de señales alimentarias o químicas implicadas en la alimentación o el comportamiento de apareamiento, bioacumulación a través de cadenas tróficas). Se acumulan las pruebas empíricas de efectos negativos sobre el comportamiento, la supervivencia y la aptitud de diversos organismos[(139](#bib139), [143](#bib143), [144](#bib144)), pero las revisiones también muestran que la ausencia de efecto detectable es una respuesta al menos tan común como el efecto perjudicial[(](#bib144)[144-147](#bib147)). Las concentraciones encontradas en el medio ambiente se consideran hasta ahora por debajo del nivel umbral conocido para causar daños en muchos lugares, pero si las tendencias actuales continúan[(140](#bib140)), y sin ninguna forma realista de disminuir esos niveles una vez alcanzados mediante el uso de la tecnología actual, se prevé que la exposición global aumente drásticamente, con muchos lugares superando estos umbrales[(146](#bib146)).

6.2.2. Contaminación acústica y lumínica.

La contaminación acústica y lumínica son otros dos contaminantes emergentes. Actúan sobre los organismos alterando las señales ambientales, por lo que a veces se incluyen en la categoría especial de contaminantes sensoriales[(148](#bib148)). Los seres humanos llevan siglos o incluso milenios aumentando los niveles de ruido y luz nocturna, pero los enormes incrementos de magnitud y ritmo de las últimas décadas pueden desbordar la capacidad de adaptación de muchos organismos. Aunque la influencia del ruido y la luz artificial puede ir mucho más allá de la fuente puntual, a diferencia de los plásticos, se espera que sus peores efectos disminuyan bruscamente una vez eliminadas las fuentes[(149](#bib149)).

La contaminación acústica procede de las viviendas urbanas, las carreteras, la industria y los aviones y, en los océanos, de los buques, los sonares, las infraestructuras energéticas y de construcción y los estudios sísmicos[(149](#bib149), [150](#bib150)). Dado que la contaminación acústica suele ir asociada a otras actividades humanas que producen otros efectos potencialmente perturbadores, como la contaminación lumínica y química o la alteración del hábitat, la comprobación de sus efectos ha exigido planteamientos inventivos. Por ejemplo, en un estudio observacional en el que se utilizó el festival de carnaval de Salvador (Brasil) como sustituto de un tratamiento con mucho ruido, se observó una disminución de la alimentación y de la actividad de huida de los depredadores en los peces de arrecife[(151](#bib151)). En un estudio experimental se reprodujo una carretera acústica fantasma para comparar el uso del hábitat por las aves migratorias, manteniendo constantes todos los demás factores ([152](#bib152)). La contaminación acústica afecta a los niveles genético y celular, al comportamiento individual, a la comunicación y la aptitud física, y a la estructura de muchas comunidades de organismos terrestres y acuáticos, como insectos parásitos, peces y ballenas ( [149](#bib149) , [153](#bib153) – [156](#bib156) ). Sin embargo, los estudios sobre el impacto de la contaminación acústica en la supervivencia son mucho menos numerosos que los realizados sobre el comportamiento y la fisiología[(149](#bib149)), y no todos estos efectos se asocian a un claro resultado negativo neto. Además, diferentes grupos taxonómicos pueden ser similares en sus respuestas, lo que sugiere que la mayoría de las especies responden al ruido en cierto grado en lugar de que unas pocas especies sean particularmente sensibles al ruido [(154](#bib154)).

La contaminación lumínica, descrita de forma convincente por Gaston y sus colegas[(157](#bib157), p. 1132) como "erosión de la oscuridad natural", se debe a la iluminación artificial nocturna asociada a la prolongación de la actividad humana (trabajo, ocio, viajes, operaciones industriales no tripuladas) hasta las horas nocturnas. Además del efecto directo de las infraestructuras de alumbrado, el skyglow -el brillo del cielo por la luz artificial emitida y reflejada hacia arriba y dispersada en la atmósfera[(158](#bib158))- afecta al cielo nocturno a veces a cientos de kilómetros de la fuente luminosa. La contaminación lumínica se extiende por el 80% del planeta, es desproporcionada en el hemisferio norte[(158](#bib158)) y aumenta rápidamente en extensión espacial, temporal y espectral[(159](#bib159)). Zonas que estuvieron iluminadas durante mucho tiempo, como las ciudades, lo están ahora con mucha más luz y durante periodos mucho más largos; zonas terrestres y oceánicas que hasta hace poco estaban en una profunda oscuridad nocturna ahora se iluminan. Además, la calidad espectral de la luz artificial está cambiando rápidamente: Otras fuentes de luz están siendo sustituidas por la tecnología de estado sólido light-emitting diode (LED), que emite en un espectro de luz visible más amplio, concretamente en las longitudes de onda azules, que son percibidas por una gran variedad de organismos[(159](#bib159)).

Los impactos de la contaminación lumínica se han detectado en microorganismos, hongos, invertebrados, vertebrados y plantas vasculares. La contaminación lumínica afecta, por ejemplo, a la fenología, la fisiología, el comportamiento y, en algunos casos, a los parámetros poblacionales de reptiles, aves, mamíferos[(160](#bib160), [161](#bib161)) e insectos (159, 160). Los efectos están especialmente bien documentados en el caso de las aves migratorias que vuelan de noche[(161](#bib161), [164](#bib164), [165](#bib165)) y se espera que sean particularmente prominentes en organismos acostumbrados a vivir bajo bajos niveles de luz durante largos periodos, como los que están cerca de los polos[(166](#bib166)) o los que viven en la zona afótica del océano (a más de 200 m de profundidad) ([167](#bib167)). La dirección y la intensidad de los impactos varían ampliamente y tienden a ser más fuertes (o mejor documentados) a nivel de la fisiología y la actividad individual y más débiles hacia los niveles de población y comunidad ([168](#bib168)).

El aumento de la extensión, intensidad y alcance de la contaminación acústica y lumínica está bien documentado y sus efectos a nivel de organismos individuales parecen generalizados, pero la bibliografía sobre sus efectos a nivel poblacional y, especialmente, sobre las consecuencias en cascada a nivel comunitario sobre el terreno es mucho más escasa. Ejemplos intrigantes como la alteración de la dispersión de las plantas debido a la alteración del comportamiento de las aves por el ruido[(169](#bib169)) y los efectos indirectos de la luz y el ruido sobre los parásitos que pican a las ranas[(150](#bib150)) sugieren que las cascadas ecológicas causadas por estos contaminantes sensoriales merecen atención.

6.2.3. Exploración y explotación de los fondos marinos.

La explotación de los recursos del fondo marino incluye la extracción de nódulos polimetálicos (sobre todo de manganeso, pero también de níquel, cobre, cobalto molibdeno y metales de tierras raras) de las llanuras abisales, sulfuros masivos del fondo marino alrededor de las fuentes hidrotermales que se forman a lo largo de las dorsales oceánicas (sobre todo sulfuros, pero también cobre, oro, zinc, plomo, bario y plata), las costras de ferromanganeso (que contienen manganeso, hierro y trazas de metales como cobalto, cobre, níquel y platino)[(170](#bib170)) de los flancos de los montes submarinos, y el metano de los hidratos de gas de los taludes y elevaciones continentales[(171](#bib171)). Esta actividad es incipiente: A principios de 2021, la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (https://www.isa.org.jm/) sólo había suscrito unos 30 contratos de exploración, ninguno de ellos en la zona del océano situada fuera de la jurisdicción nacional; la explotación comercial oficial aún no había comenzado[(171](#bib171), [173](#bib173)); y gran parte de la actividad propuesta se desarrolla en el fondo del océano abierto. Esto y el hecho de que las profundidades marinas son una zona vasta y en gran medida inexplorada, que representa aproximadamente el 50% de la superficie de la Tierra y el 95% del volumen habitable de la biosfera[(171](#bib171)), podría llevar a argumentar que esta actividad no es muy preocupante. Sin embargo, la exploración y explotación de los fondos marinos está cobrando un claro protagonismo en la agenda de muchos sectores, tanto privados como públicos, entre otras cosas porque los minerales extraídos desempeñan un papel importante en las industrias aeronáutica y de baterías, y su extracción se ha presentado como un mal menor y como una aportación fundamental en la transición hacia unaeconomía con bajas emisiones de carbono[(173](#bib173)). Resulta especialmente preocupante que las zonas relativamente pequeñas de los fondos marinos con alta concentración de minerales también alberguen una biodiversidad única, frágil y poco conocida[(174](#bib174)). La densidad de corales, anémonas, esponjas y equinodermos en las zonas ricas en nódulos era más de dos veces superior a la de las zonas sin nódulos, y algunos de los corales sólo se encontraban en las zonas ricas en nódulos[(175](#bib175)). Los montes submarinos también son puntos críticos (u oasis) de biodiversidad marina y productividad primaria y son utilizados por peces pelágicos, tortugas y mamíferos para alimentarse y descansar ( [176](#bib176) – [178](#bib178) ).

Las fuentes hidrotermales profundas plantean mayores retos tecnológicos para su explotación, pero no están exentas de riesgos y albergan organismos con un extraordinario grado de endemicidad, estimado en un 85%[(174](#bib174)). También presentan adaptaciones metabólicas únicas; muchos moluscos, gusanos tubícolas y crustáceos que viven alrededor de respiraderos hidrotermales se alimentan de bacterias simbióticas quimiosintéticas que prosperan con las emisiones del respiradero. Dos ejemplos descubiertos recientemente ilustran elocuentemente lo inusuales que pueden ser las formas de vida en los respiraderos: Los cangrejos yeti*(Kiwa* *hirsuta* y *K. puravida*) se alimentan de bacterias quimiosintéticas cultivadas en sus pinzas[(179](#bib179)), y el caracol de patas escamosas*(Chrysomallon squamiferum*) alberga bacterias simbióticas en una glándula esofágica de gran tamaño que contribuyen a su nutrición[(180](#bib180)). Los respiraderos marinos profundos también se proponen como la zona de origen más probable de toda la vida en la Tierra y, por tanto, tienen un valor intrínseco en términos de patrimonio profundo de la biosfera terrestre (180a). Los organismos de las profundidades marinas suelen tener una larga vida acompañada de tasas de crecimiento extremadamente bajas. Por ejemplo, los corales negros*(Leiopathes* sp.) que viven en los montes submarinos cercanos a las islas Azores muestran una tasa de crecimiento radial de 5 a 30 μm año-1 y se calcula que viven entre 265 y 2.300 años[(181](#bib181)). Aunque estos rasgos confieren ventajas selectivas evidentes para la supervivencia en condiciones extremas y bajos niveles de recursos, hacen que las especies sean muy vulnerables a las perturbaciones. De hecho, los pocos estudios realizados hasta la fecha han revelado que los hábitats del fondo marino tardan décadas en recuperarse tras una perturbación de bajo nivel[(175](#bib175); https://www.eu-midas.net/).

Las tecnologías actuales de explotación minera del fondo marino incluyen la perturbación física masiva y la liberación de elementos tóxicos in situ, así como penachos de sedimentos de gran alcance y contaminación lumínica y acústica[(149](#bib149), [171](#bib171); https://www.eu-midas.net/). Los investigadores han estado trabajando en posibles formas de minimizar estos impactos, mientras que otros cuestionan la necesidad de empezar inmediatamente y proponen una moratoria, aprovechando el hecho de que este nuevo tipo de perturbación a gran escala, a diferencia del ruido, la luz y el plástico, aún no está en pleno despliegue, lo que da la oportunidad de prevenir los daños en lugar de intentar remediarlos a posteriori[(173](#bib173), [183](#bib183)).

6.3. Tendencias recientes de los impulsores indirectos

No es posible una clasificación cuantitativa a gran escala de los impulsores indirectos similar a la de los impulsores directos representada en [la Figura 4](#fig4) porque los impulsores indirectos tienden a ser difusos e interactúan entre sí de forma compleja. Sin embargo, su impacto ha aumentado considerablemente desde mediados del siglo XX, tanto en magnitud como en extensión geográfica. La población humana mundial, que casi se ha duplicado desde 1970, desempeña sin duda un papel, pero otros factores que afectan indirectamente a la biodiversidad han cambiado aún más deprisa: El gasto mundial per cápita se ha multiplicado por 13 ([184](#bib184)), y el comercio mundial ha aumentado un 900% ([185](#bib185)). Las dietas han cambiado considerablemente: El consumo per cápita de carne terrestre se ha duplicado aproximadamente desde los años sesenta ([186](#bib186)) y el de pescado y marisco ha aumentado más de un 23% desde 1998 ([187](#bib187)). Las opciones de consumo no alimentarias, como la moda, los teléfonos móviles, el ocio y las mascotas exóticas, también están cambiando rápidamente. El turismo mundial, por ejemplo, ha crecido a un ritmo del 3-5% anual ([188](#bib188)).

Las crecientes asimetrías en la distribución de la riqueza se han asociado con consecuencias negativas para la biodiversidad ( [189](#bib189) – [191](#bib191) ). La desigualdad de ingresos a escala mundial y entre países ha disminuido, pero esto ha sido impulsado por el fuerte crecimiento económico de unos pocos países con grandes poblaciones (especialmente China), enmascarando las desigualdades persistentes en muchos otros países ([192](#bib192)). Además, la contribución de la desigualdad dentro de los países a la desigualdad global general ha aumentado ([191](#bib191), [192](#bib192)): Hasta el 38% de toda la riqueza adicional acumulada desde mediados de la década de 1990 ha sido captada por el 1% más rico, mientras que el 50% más pobre sólo ha captado el 2% de la riqueza adicional ([191](#bib191)). La parte de la riqueza en manos del sector privado ha aumentado a expensas de la que comparten los gobiernos ([191](#bib191)).

Aunque se conocen bien los efectos aislados de estos factores socioeconómicos sobre la contaminación, el cambio de uso del suelo, el cambio climático y la explotación de organismos, se afectan mutuamente y a menudo anulan o sinergizan sus efectos sobre los impulsores directos. Varios avances tecnológicos han reducido la huella por gramo del consumo de materiales sobre la biodiversidad; mientras tanto, la obsolescencia programada, la rápida rotación y los modelos de eliminación han dominado cada vez más las cadenas de suministro de bienes de consumo, a menudo superando dichos avances. Algunos ejemplos a escalas cada vez más amplias ilustran este punto: en la China rural, mientras que el turismo basado en la naturaleza y la migración laboral deberían tener cada uno un efecto positivo en la recuperación de los bosques locales, anulan parcialmente el impacto del otro, dando lugar a un efecto neto que sigue siendo positivo pero menor que sus efectos por separado[(193](#bib193)). Las prácticas respetuosas con la naturaleza y el clima asociadas al turismo de naturaleza, cada vez más extendidas en todo el mundo, se ven contrarrestadas por el aumento del número de vuelos internacionales cargados de emisiones[(188](#bib188)). En términos más generales, se calcula que la financiación pública y privada mundial para fomentar la biodiversidad es del orden de 80.000-90.000 millones de dólares al año; al mismo tiempo, el apoyo público a actividades potencialmente perjudiciales para la biodiversidad es de aproximadamente 500.000 millones de dólares al año[(194](#bib194)).

Además, debido al espectacular aumento del comercio internacional y la globalización, los efectos sobre la naturaleza en un lugar suelen estar condicionados por decisiones, demandas e instituciones de lugares distantes. Por el contrario, los consumidores no suelen sufrir, o a menudo ni siquiera son conscientes, de las consecuencias ecológicas o sociales de sus elecciones. Aunque los telecouplings -interacciones medioambientales y socioeconómicas a distancia[(195](#bib195))- forman parte de la dinámica natural de la Tierra y han sido acelerados por el ser humano durante milenios[(81](#bib81)), se han exacerbado desde la década de 1970[(82](#bib82), [189](#bib189), [195](#bib195)). Para bien o para mal, esta creciente conectividad de materiales, energía, información, riqueza, residuos, personas y otros organismos en todo el planeta es un rasgo distintivo de los últimos tiempos. Por ejemplo, la deposición de polvo procedente de África sobre el Amazonas y el Caribe se viene produciendo a ritmos variables desde hace millones de años. Sin embargo, en las últimas décadas se han propuesto como factores con efectos negativos para las comunidades marinas los cambios en su cantidad, composición y carga de contaminantes y patógenos debidos al uso del suelo y a las prácticas de eliminación de residuos, así como a factores climáticos[(196](#bib196)). Un tercio de las amenazas para los animales[(197](#bib197)) y aproximadamente el 40% de la extracción de recursos naturales[(198](#bib198)) en todo el mundo están relacionados con el comercio internacional. La deforestación de los bosques tropicales y la pesca ilegal, no declarada y no reglamentada en todo el mundo están relacionadas con el uso internacional de paraísos fiscales por parte de las empresas[(199](#bib199)).

Estos complejos enredos entre lugares, opciones y agentes sociales pueden parecer abrumadores. Sin embargo, más que un motivo de parálisis, apuntan a la necesidad de atajar no sólo las causas locales directas del declive de la naturaleza, sino también los factores socioeconómicos que las alimentan. Ilustran por qué es necesario un cambio transformador -una reorganización fundamental de todo el sistema que abarque factores tecnológicos, económicos y sociales, incluidos paradigmas, objetivos y valores[(5](#bib5))- en lugar de soluciones parciales a nivel de síntomas. Además, subrayan la necesidad de examinar con precisión cómo se integran los distintos factores socioeconómicos, incentivos, instituciones y organismos en la cadena de suministro de bienes y servicios para idear soluciones duraderas a problemas concretos de biodiversidad.

7. CONCLUSIÓN

Este artículo ha hecho un recorrido algo selectivo por lo que consideramos algunas cuestiones clave o emergentes en el ámbito de la biodiversidad. Nunca ha habido mayor conciencia del declive mundial de la biodiversidad y de su importancia para el funcionamiento de la Tierra y el bienestar de la humanidad. Sin embargo, la biodiversidad sigue siendo un término desafiante, un objeto fronterizo que abarca toda una gama de significados y valores, pero que capta algo esencial que hay que comprender y cuidar cuando contemplamos cómo navegar hacia un futuro sostenible enredados en la biosfera de la que brotamos.

PUNTOS RESUMIDOS

1. Desde su origen en la década de 1980, el concepto y el uso del término biodiversidad han evolucionado rápidamente y ahora tienen múltiples dimensiones.
2. La biodiversidad tiene múltiples valores que abarcan valores intrínsecos, instrumentales y relacionales, que difieren mucho entre los agentes sociales. Cuál de estos valores predomine o siquiera se tenga en cuenta influye mucho en las decisiones prácticas sobre la biodiversidad.
3. En la actualidad se describen aproximadamente 2 millones de especies de organismos vivos; el número total de especies en la Tierra se estima, con mucha incertidumbre, en 10 millones. La diversidad a nivel de especie está dominada por los animales terrestres (especialmente los artrópodos), pero los sistemas marinos y microbianos contienen una diversidad filogenética especialmente rica.
4. Los seres humanos han afectado a la biodiversidad mundial desde la prehistoria tanto de forma negativa (por ejemplo, extinción de megafauna e islas) como positiva (por ejemplo, gestión de organismos y ecosistemas, creación de nuevos ecosistemas).
5. La reconfiguración de la vida en la Tierra a todos los niveles, desde los genes hasta los biomas, por parte de los seres humanos es ahora evidente. El ritmo de declive de la biodiversidad se ha intensificado en los tiempos modernos. Las tasas de extinción actuales son muy superiores a las prehumanas. Han disminuido la extensión y la integridad de los ecosistemas naturales; el carácter distintivo funcional, filogenético y de riqueza de especies de las biotas locales de todo el mundo; el tamaño de las poblaciones de plantas y animales salvajes; y la diversidad genética intraespecífica de los organismos salvajes y domesticados.
6. Los principales factores directos del declive de la biodiversidad moderna son los cambios en el uso de la tierra, el agua dulce y los océanos; el aumento de la recolección de organismos silvestres; el cambio climático; diversas formas de contaminación; y las especies invasoras. Hasta la fecha, el cambio climático es una causa relativamente menor del declive de la biodiversidad, pero es probable que su impacto aumente mucho a lo largo de este siglo. Estos factores interactúan de forma compleja, a veces mejorando y a menudo reforzando sus efectos mutuos.
7. Los factores indirectos del declive de la biodiversidad van en aumento. Entre ellas destacan las huellas de consumo globalmente telecontroladas, concentradas en determinados países y grupos sociales. Los impulsores indirectos afectan al ritmo y la magnitud de los impulsores directos preexistentes y dan lugar a otros nuevos, como la contaminación plástica, la contaminación acústica y lumínica y la exploración y explotación de los fondos marinos.
8. Para hacer frente a estos factores subyacentes es necesario un replanteamiento y una reorganización audaces de todo el sistema para situar la biodiversidad en el centro de los valores, la planificación y los objetivos de la sociedad.

CUESTIONES DE FUTURO

1. Varios factores emergentes o desatendidos del declive de la biodiversidad merecen especial atención y estudio. Entre ellas figuran la contaminación por plásticos, la contaminación acústica y lumínica y la exploración y explotación de los fondos marinos.
2. Necesitamos comprender mejor la biodiversidad de los nuevos ecosistemas que se están creando por la homogeneización biótica y el cambio climático y contextualizar mejor las compensaciones y tensiones entre los valores de biodiversidad basados en el lugar (por ejemplo, las especies autóctonas) y los valores funcionales (por ejemplo, la resiliencia de ecosistemas enteros por encima de los niveles de diversidad de especies).
3. Los múltiples valores de la biodiversidad y sus múltiples valedores, incluidas las comunidades locales tradicionales e indígenas, deben incorporarse mejor a los marcos globales de la biodiversidad.
4. Muchas fronteras de la biodiversidad, como las copas de los bosques tropicales, los mutualistas o parásitos específicos de cada especie, los microbiomas intestinales, el fondo marino y los sedimentos del suelo, así como las comunidades microbianas de la biosfera profunda, están aún poco exploradas.
5. Necesitamos una comprensión más precisa de cómo los distintos componentes del tejido de la vida interactúan con la función planetaria, como el mantenimiento de la resiliencia frente a fenómenos extremos y el cambio climático, además de sustentar las contribuciones a escala más fina de distintas personas en todo el mundo.
6. Necesitamos comprender mejor cómo integrar plenamente la biodiversidad en los valores sociales, la planificación política y la toma de decisiones para hacer posible el cambio sistémico necesario para invertir el declive en curso.

Declaración de divulgación

Los autores no tienen conocimiento de ninguna afiliación, membresía, financiación o participación financiera que pudiera considerarse que afecta a la objetividad de esta revisión.

AGRADECIMIENTOS

Damos las gracias a James Rosindell y OneZoom por los cálculos de la diversidad filogenética; a Carlos M. Duarte por las estimaciones actualizadas de la biomasa de plantas marinas; y a Pedro Jaureguiberry, Colin Khoury, Zsolt Molnar, Andy Purvis y Nicolas Titeaux por sus sugerencias sobre varias secciones de este artículo. Durante la preparación de este artículo S.D. recibió apoyo parcial del FONCyT (PICT 2017-2084), del Fondo Newton (NERC-Reino Unido y CONICET-Argentina), y del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) SGP-HW 090. Y.M. cuenta con el apoyo de la Jackson Foundation y el Leverhulme Trust.

**<COMP: Se han añadido/eliminado referencias de la bibliografía citada. Por favor, cambie la numeración de las referencias en todos los elementos del manuscrito (por ejemplo, bibliografía citada, texto, pies de figuras, tablas y referencias cruzadas "Ver Ref.").**

RECURSOS RELACIONADOS

Informe de evaluación global de la IPBES sobre biodiversidad y servicios de los ecosistemas: <https://ipbes.net/global-assessment>

Catálogo de la vida: [https://www.catalogueoflife.org/.](https://www.catalogueoflife.org/) Base de datos en línea que ofrece un índice de las especies conocidas de los siete reinos de la vida.

OneZoom: [https://www.onezoom.org/.](https://www.onezoom.org/) Una rica exploración visual del árbol de la vida.

CDB (Convenio sobre la Diversidad Biológica): https://www.cbd.int/

Nuestro mundo en datos: https://ourworldindata.org/biodiversity. Un rico conjunto de recursos fiables en torno a los datos sobre biodiversidad y su interpretación.

Tabla 1 Número total estimado de especies en la Tierra en los siete reinos de la vida[(29](#bib29), [30](#bib30))

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| (Super)Reino | Cuando evolucionó | Estructura | Número de especies (total) | Número de especies (marinas) | Número de especies (terrestres) |
| **Superreino Procariota** | | | | | |
| Bacterias | 3-4 Gyr | Unicelular | 1.250.000 (0,8-1,7 millones) | NA | NA |
| Archaea | 3-4 Gyr | Unicelular | 105,000 (70,000–140,000) | NA | NA |
| **Superreino Eucariota** | | | | | |
| Protozoos | 1,5 Gyr | Unicelular | 36,400 | 36,400 | 0 |
| Cromista | 1,2 Gyr | Unicelular | 27,500 | 7,400 | 20,100 |
| Hongos | 1 Gyr | Unicelular o pluricelular | 611,000 | 5,320 | 605,680 |
| Animalia | 700 Myr | Multicelular | 7,770,000 | 2,150,000 | 5,620,000 |
| Plantae | 500 Myr | Multicelular | 298,000 | 16,000 | 281,400 |
| **Total de especies** | | | 10,100,000 | 2,210,000 | 6,540,000 |

Las estimaciones para las especies eucariotas proceden de la Referencia [35](#bib35); las estimaciones para las especies procariotas (unidades taxonómicas de operación) se basan en el Censo Mundial de Procariotas[(40](#bib40)). Las estimaciones totales de especies marinas y terrestres se refieren únicamente a los eucariotas[(35](#bib35)). Es muy probable que el número de especies de protozoos esté muy subestimado.

Abreviatura: NA, no aplicable.

Cuadro 2 Cuantificación de la vida en la Tierra a través de diferentes métricas

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Taxón | Biomasa (Pg C) | Nº de especies/OTU | Diversidad filogenética estimada (miles de millones de años) |
| Plantae | 450 (1.2×) | 419,300 | 15,384 |
| Bacterias | 70 (10×) | 690,474 | 205,419 |
| Hongos | 12 (3×) | 261,800 | 28,330 |
| Archaea | 7 (13×) | 49,406 | 15,531 |
| Animalia | 2 (5×) | 1,429,766 | 80,703 |
| Artrópodos | 1 | 1,152,722 | 43,028 |
| Pescado | 0.7 | 35,810 | 1,512 |
| Moluscos | 0.2 | 89,359 | 4,233 |
| Cnidarios | 0.1 | 14,566 | 896 |
| Nematodos | 0.02 | 18,509 | 1,023 |
| Mamíferos | 0.007 | 5,045 | 66 |
| Pájaros | 0.002 | 9,993 | 81 |
| Humanos | 0.06 | 1 | 0.01 |

Los números de especies eucariotas se refieren a las especies catalogadas en el Open Tree of Life (https://opentreeoflife.github.io/), consultado en diciembre de 2021; los números de especies procariotas (OTU) proceden del Global Prokaryotic Census[(40](#bib40)). Los números se refieren a especies descritas (eucariotas) u OTU cuantificadas (procariotas). La historia evolutiva fue estimada como PD de Faith[(45](#bib45)) por James Rosindell (comunicación personal); se trata de estimaciones aproximadas con decimales redondeados y, en algunos casos, se extrapolaron únicamente a partir de la riqueza de especies y la edad de los clados asumiendo un crecimiento log-lineal de los linajes a lo largo del tiempo, basándose en el Open Tree of Life y Reference [200](#bib200). Las cifras de biomasa proceden de la Referencia [46](#bib46), con los números entre paréntesis indicando el rango multiplicativo de incertidumbre.

Abreviaturas: UTO, unidad taxonómica operativa; DP, diversidad filogenética.