



REAL ACADEMIA DE MEDICINA Y CIRUGÍA DE LA REGIÓN DE MURCIA

SESIÓN EXTRAORDINARIA Y SOLEMNE DE RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO CORRESPONDIENTE

DISCURSO DE INGRESO

BIODIVERSIDAD INVISIBLE:
CÓMO PROTEGER Y USAR SOSTENIBLEMENTE
A LA NATURALEZA A TRAVÉS DE LA BIOTECNOLOGÍA

POR

Dr. Don Timothy Thomson Okatsu



DISCURSO DE PRESENTACIÓN

POR EL

Excmo. Sr. Don Manuel Segovia Hernández



22 de abril de 2026

MURCIA



DISCURSOS

LEÍDOS EN LA SESIÓN EXTRAORDINARIA Y SOLEMNE
DE RECEPCIÓN COMO ACADÉMICO CORRESPONDIENTE,
CELEBRADA POR LA

REAL ACADEMIA DE MEDICINA Y CIRUGÍA
DE LA REGIÓN DE MURCIA

el día 22 de abril de 2026

Discurso de ingreso

por

Dr. D. Timothy Thomson Okatsu

**‘Biodiversidad invisible:
Cómo proteger y usar sosteniblemente a la
naturaleza a través de la biotecnología’**

Discurso de presentación

por el

Excmo. Sr. Don Manuel Segovia Hernández

Presidente Real Academia de Medicina y Cirugía
de la Región de Murcia

Edita:



*Real Academia de Medicina y Cirugía
de la Región de Murcia*

Realización y producción:

Nextcolor

Depósito Legal:

MU

Índice

• Discurso de presentación.....	7
• Discurso de ingreso: <i>Biodiversidad invisible: Cómo proteger y usar sosteniblemente a la naturaleza a través de la biotecnología.....</i>	17
I. SALUDO PROTOCOLARIO Y AGRADECIMIENTOS INICIALES	19
II. INTRODUCCIÓN.....	20
III. LAS PERCEPCIONES HUMANAS DEL MUNDO NATURAL.....	24
IV. EL CONCEPTO DE BIODIVERSIDAD.....	26
V. BIODIVERSIDAD Y CIVILIZACIÓN: INTERSECCIONES.....	29
VI. LÍMITES PLANETARIOS.....	31
VII. BIOECONOMÍA.....	34
VIII. BIOTECNOLOGÍAS.....	36
IX. BIODIVERSIDAD Y BIOTECNOLOGÍAS.....	39
X. BIODIVERSIDAD Y BIOECONOMÍA.....	40

XI. BIODIVERSIDAD Y UNA SOLA SALUD (“ONE HEALTH”)..... 41

XII. PROPUESTAS PARA LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD A TRAVÉS DE LAS BIOTECNOLOGÍAS 43

XIII. CONCLUSIONES Y AGRADECIMIENTOS FINALES 45

BIBLIOGRAFÍA..... 48

Discurso de presentación

por el

Excmo. Sr. Don Manuel Segovia Hernández

Presidente. Real Academia de Medicina y Cirugía de la Región de Murcia

Excmo. Sr Presidente de Honor de la Real Academia de Medicina y Cirugía de la Región de Murcia,
Excmos. e Ilmos. Señores Académicos,
Excmas. e Ilmas. Autoridades,
Amigos y compañeros, Señoras y señores.

Es para mí un verdadero honor presentar hoy ante esta Corporación al Doctor Timothy M. Thomson, cuya trayectoria científica, médica y humana representa, con admirable coherencia, el ideal más noble de la medicina académica: unir el conocimiento con el servicio, la investigación con la responsabilidad social y la excelencia científica con una profunda vocación humanista.

Ingresar en una Academia de Medicina no constituye únicamente el reconocimiento a una carrera brillante; supone también incorporarse a una tradición intelectual que entiende la medicina como una forma de pensamiento, como una ética del conocimiento y como un compromiso permanente con la sociedad. En este sentido, la figura del Doctor Thomson encarna plenamente ese espíritu.

El Doctor Thomson nació en Kioto, Japón, fruto del matrimonio entre David Thomson y María Okatsu. Es el mayor de cuatro hermanos: Kent, Michael —a quien todos conocemos como Micky— y Susana. Está casado con Rossanna y es padre de dos hijos.

En 1963 su familia se trasladó a España, estableciéndose en Salamanca, ciudad donde realizó sus estudios de primaria y bachillerato en el Colegio Marista Champagnat.

Al finalizar el bachillerato inició la carrera de Medicina en la Universidad de Salamanca. Aunque ambos habíamos estudiado en el mismo colegio, fue en la Facultad de Medicina donde nació una amistad que ha perdurado hasta hoy.

Mis recuerdos de Timothy en aquellos años universitarios son los de un estudiante serio, responsable y profundamente inconformista. Cuestionaba constantemente aquellos dogmas que algunos profesores presentaban sin suficiente argumentación científica. Era habitual salir de clase y verlo preguntarse —y preguntarnos— el porqué de todo.

Mientras muchos estudiábamos a partir de apuntes o de manuales nacionales de calidad variable, Timothy aparecía con cinco libros distintos para cada asignatura, todos ellos, por supuesto, en inglés.

De aquella época surgió también una sólida amistad con compañeros como Juan Sánchez Conde, Ignacio Sánchez del Campo, Concha Román, Charo Redondo y la doctora Caridad Redondo, quien, al ir un curso por delante, nos advertía de lo que nos esperaba al año siguiente.

Pero la Facultad no solo nos dio formación médica; también nos regaló una pasión compartida: la montaña. En aquellos años setenta todavía hablábamos más de montañismo que de alpinismo. Cada domingo tomábamos el autobús del GUM —los Grupos Universitarios de Montaña— rumbo a Gredos.

De esa afición nació incluso una breve aventura empresarial. En el verano de 1975, tras terminar tercero de carrera, ejercimos durante diez días como guías de montaña para un grupo de ciudadanos estadounidenses del Appalachian Mountain Club.

En una de aquellas ascensiones al Circo de Gredos, al regresar ya de noche, descubrimos que faltaba uno de los montañeros. Hubo que organizar una búsqueda improvisada, avisar a amigos montañeros de Salamanca, alertar a la Guardia Civil —cuando aún no existían los actuales grupos de rescate— y, sobre todo, rezar. Rezar también para que, en plena Guerra Fría, la CIA no sospechara que habíamos hecho desaparecer a un ciudadano americano.

Afortunadamente todo quedó en un susto. Nuestro montañero perdido (hizo bueno el dicho de perdidos al río) descendió siguiendo el curso de un arroyo hasta alcanzar el río Tormes y finalmente la carretera.

Tras aquella experiencia, nuestra sociedad alpina quedó discretamente disuelta. Continuamos amando la montaña, pero decidimos responsabilizarnos únicamente de nosotros mismos. Esa pasión, sin embargo, ha acompañado siempre al Doctor Thomson, quien ha realizado ascensiones en cordilleras míticas como los Andes y el Himalaya.

Al finalizar la carrera, nuestros caminos profesionales, aunque paralelos, tomaron direcciones distintas. Yo me orienté hacia la microbiología, mientras que el Doctor Thomson se incorporó al área de hematología bajo la influencia del profesor Borrasca, maestro también de nuestro ilustre académico el Doctor Vicente Vicente.

Su interés por las células sanguíneas derivó pronto hacia la inmunología. Recuerdo que Timothy solía decir que el profesor Borrasca no se consideraba hematólogo, sino inmunopatólogo. Probablemente ahí comenzó a definirse el eje central de toda su trayectoria científica.

El Dr. Thomson obtuvo su licenciatura en Medicina en la Universidad de Salamanca en 1979, iniciando posteriormente su formación clínica en el Hospital de la Santa Creu i Sant Pau de Barcelona, donde se especializó en Inmunología Clínica.

Ya en esos primeros años se advierte un rasgo constante en su trayectoria: la convicción de que la medicina del futuro debía construirse desde la comprensión profunda de los mecanismos biológicos fundamentales de la enfermedad.

Su temprana decisión de combinar práctica clínica e investigación lo llevó a centros de excelencia internacional, entre ellos el Sloan-Kettering Cancer Institute de Nueva York y la New York University School of Medicine. Aquella etapa coincidió con un momento decisivo para la biomedicina moderna: el nacimiento de la oncología molecular.

Allí comenzó una carrera científica que no solo seguiría la evolución de la biología del cáncer, sino que contribuiría activamente a redefinirla.

En 1988 obtuvo el doctorado por la Universidad de Murcia, consolidando una línea investigadora que desde entonces se ha mantenido extraordinariamente coherente: comprender cómo las células tumorales utilizan los mecanismos normales de la biología celular para sobrevivir, adaptarse y progresar.

Tras su regreso a España, el Dr. Thomson desarrolló gran parte de su carrera como investigador permanente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, liderando durante más de tres décadas grupos de investigación dedicados a la oncología molecular, la inmunología tumoral y la señalización celular.

Su producción científica —más de seis mil quinientas citas y un índice H superior a 40— refleja no solo productividad, sino impacto conceptual.

Entre sus contribuciones más influyentes destaca el descubrimiento de los reguladores ubiquitina UEV-1 y UEV2. Estos hallazgos contribuyeron a modificar un paradigma central de la biología molecular: el sistema ubiquitina-proteasoma dejó de entenderse únicamente como un mecanismo de degradación proteica para reconocerse como un lenguaje molecular esencial en la regulación de la señalización celular.

Cambiar un paradigma científico es algo excepcional. Requiere imaginación, rigor experimental y una capacidad poco frecuente para formular preguntas nuevas. El trabajo del Dr. Thomson abrió así nuevas perspectivas sobre la comunicación intracelular y sus implicaciones en cáncer y enfermedad humana.

A esta contribución se suma la identificación de la proteína adaptadora PTOV1, situada hoy en el centro de redes regulatorias relacionadas con la autorrenovación celular, la progresión tumoral y la resistencia terapéutica. Estos estudios ayudaron a comprender cómo los tumores no solo crecen, sino cómo aprenden a sobrevivir frente a nuestras intervenciones médicas.

Uno de los rasgos distintivos del trabajo del Dr. Thomson ha sido su visión integradora del cáncer.

Lejos de concebirlo como una simple acumulación de mutaciones, su laboratorio ha contribuido a definir el cáncer como un fenómeno dinámico en el que interactúan:

- programas génicos epiteliales y mesenquimales,
- plasticidad celular,
- metabolismo tumoral,
- microambiente inmunológico,
- y adaptación terapéutica.

Sus modelos celulares de progresión en cáncer de próstata, vejiga y mama aportaron nuevas interpretaciones sobre el proceso metastásico, refinando conceptos clásicos y ayudando a comprender cómo las células tumorales adquieren propiedades de autorrenovación y diseminación.

En colaboración con investigadores internacionales, su grupo exploró además la reprogramación metabólica del cáncer, mostrando cómo el metabolismo celular no es una consecuencia pasiva del tumor, sino un motor activo de resistencia terapéutica.

Hoy sabemos que tratar el cáncer implica también tratar su metabolismo y su ecosistema inmunológico. Parte de esta comprensión nace de investigaciones como las desarrolladas por el Dr. Thomson.

Otro elemento notable de su trayectoria es la capacidad de trasladar el conocimiento fundamental hacia aplicaciones clínicas reales.

El Dr. Thomson ha participado en el desarrollo de plataformas de descubrimiento farmacológico de alto contenido y alto rendimiento, integrando biología molecular, análisis computacional y química médica para identificar nuevos compuestos terapéuticos.

Su carrera incluye múltiples patentes internacionales, reflejo de una ciencia que no se detiene en la publicación académica, sino que aspira a generar herramientas concretas para la medicina del futuro.

Este tránsito entre laboratorio básico y innovación terapéutica representa precisamente uno de los grandes retos contemporáneos: transformar conocimiento en salud.

La pandemia de COVID-19 constituyó un momento de prueba para la comunidad científica mundial. En ese contexto, el Dr. Thomson y su equipo reaccionaron con rapidez y creatividad.

Sus investigaciones abordaron distintos aspectos del SARS-CoV-2:

- la identificación de inhibidores del inflammasoma para reducir la hiperinflamación,
- el descubrimiento de inhibidores de la proteasa viral principal,
- el estudio de alteraciones inmunológicas inducidas por el virus,
- y la exploración de factores fisiológicos asociados a la evolución clínica de la enfermedad.

Este esfuerzo ilustra una cualidad esencial del médico-científico: la capacidad de orientar su conocimiento hacia las necesidades urgentes de la sociedad.

Actualmente, el Dr. Thomson dirige un grupo de investigación en el Instituto INDICASAT de Panamá, desde donde impulsa nuevas líneas dedicadas al estudio de compuestos naturales capaces de modular el microambiente inmunológico tumoral.

Su presencia en América Latina no representa un cambio geográfico, sino una ampliación de su visión científica: promover redes transnacionales, fortalecer la investigación biomédica emergente y construir puentes entre continentes científicos.

En una época en la que la medicina se enfrenta a desafíos globales —cáncer, pandemias, desigualdades sanitarias—, su trayectoria demuestra que el conocimiento científico debe circular sin fronteras.

Pero ninguna carrera académica puede evaluarse únicamente por sus descubrimientos.

El Dr. Thomson ha dirigido numerosos investigadores posdoctorales, doctorandos y estudiantes de distintos niveles formativos. Detrás de cada cifra hay carreras científicas iniciadas, vocaciones consolidadas y comunidades académicas fortalecidas.

La verdadera herencia de un científico no reside solo en sus publicaciones, sino en las personas que ha inspirado.

Quienes han trabajado con él destacan su curiosidad intelectual inagotable, su exigencia científica y, al mismo tiempo, su generosidad como mentor.

Formar científicos es, en última instancia, formar futuro.

La medicina académica exige una virtud difícil: mantener viva la sensibilidad humana mientras se avanza hacia niveles crecientes de abstracción científica.

En la trayectoria del Dr. Thomson encontramos una constante preocupación por comprender la enfermedad no solo como fenómeno molecular, sino como experiencia humana.

Desde la inmunología clínica hasta la oncología molecular, desde la investigación básica hasta la salud global, su carrera revela una misma pregunta subyacente: cómo transformar el conocimiento biológico en esperanza terapéutica.

Esa continuidad entre ciencia y humanidad constituye, quizá, el rasgo más definitorio de su perfil académico.

El ingreso del Dr. Timothy M. Thomson en esta Academia no solo reconoce una trayectoria excepcional; también representa la incorporación de una forma de entender la medicina contemporánea:

- interdisciplinaria,
- internacional,
- basada en la evidencia,
- abierta a la innovación,
- y profundamente comprometida con la sociedad.

Las Academias de Medicina han sido históricamente guardianas del pensamiento médico. Hoy, al recibir a un investigador cuya obra conecta inmunología, oncología, metabolismo, farmacología y salud global, esta institución reafirma su vocación de dialogar con la ciencia del siglo XXI.

Permítanme concluir con una reflexión.

La medicina avanza gracias a tecnologías, descubrimientos y datos. Pero progresa verdaderamente gracias a personas capaces de imaginar lo que aún no existe y trabajar con perseverancia para hacerlo posible.

El Dr. Timothy M. Thomson pertenece a esa categoría poco frecuente de médicos-científicos que no solo siguen el progreso científico, sino que ayudan a definirlo.

Por su contribución al conocimiento biomédico, por su compromiso con la formación de nuevas generaciones, por su liderazgo internacional y por su permanente vocación de servicio a la ciencia y a la humanidad, es para esta Academia un motivo de orgullo darle hoy la bienvenida.

Dr Thomson: la comunidad académica que hoy lo recibe reconoce en usted no solo a un investigador eminente, sino a un verdadero académico de la medicina.

Sea usted, pues, muy bienvenido.

He dicho

Discurso de ingreso

**‘Biodiversidad invisible:
Cómo proteger y usar sosteniblemente a la
naturaleza a través de la biotecnología’**

por

Dr. D. Timothy Thomson Okatsu

I. SALUDO PROTOCOLARIO Y AGRADECIMIENTOS INICIALES

Excelentísimo Señor Presidente de la Real Academia de Medicina y Cirugía de la Región de Murcia, Excelentísimas e Ilustrísimas Señoras y Señores Académicos, Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades, distinguidos colegas, señoras y señores.

Es para mí un enorme placer y un honor, en primer lugar, que se me haya distinguido como Académico Corresponsal, y, en segundo lugar, que se me conceda el privilegio de pronunciar ante ustedes mi discurso de ingreso en esta ilustre institución.

Mi vínculo con esta región y con su comunidad médica data de antes de 1988, año en que obtuve mi grado de Doctor en Medicina y Cirugía bajo la dirección del Doctor Francisco Martín Luengo, ilustre microbiólogo prematuramente fallecido y el Doctor Guzmán Ortuño Pacheco, igualmente ilustre patólogo. Posteriormente, visité Murcia y su Facultad de Medicina en numerosas ocasiones, invitador por el Dr. Manuel Segovia, en las que tuve el placer y el lujo de impartir conferencias y clases ante investigadores y estudiantes.

En aquella época, en la que aún éramos jóvenes, audaces e inocentes, poco sospechábamos que, andando el tiempo, el Dr. Segovia presidiría esta ilustre Real Academia, y que yo sería invitado a formar parte de una institución con tamaño relumbre y recorrido. Humildemente y con gran agradecimiento e ilusión, acepto este honor y espero continuar siendo digno del mismo a partir de este mismo momento.

II. INTRODUCCIÓN

Mi recorrido profesional y científico me ha conducido por un largo camino, que ha ido desde la inmunología tumoral hasta llegar a lo que se ha convertido en una pasión por la biodiversidad, pasando antes por la biología molecular, la bioquímica y el descubrimiento de fármacos. Hoy quisiera participar a todos Ustedes una visión de la biodiversidad, no como un concepto colateral, sino integral a las sociedades humanas, por cuanto también formamos parte de la biodiversidad de este planeta. Por ende, esta visión tiene en cuenta tanto la necesidad de preservar la biodiversidad como la necesidad de sostener a la humanidad, evidentemente dentro de los límites que permita el planeta.

Hace aproximadamente 13.800 millones de años, el universo conocido surgió en un evento de extraordinaria densidad y temperatura —el Big Bang— que inició un proceso de expansión y complejidad creciente (1-3). En el interior de las estrellas se sintetizaron los elementos químicos esenciales para la vida mediante nucleosíntesis estelar. Posteriormente, hace unos 4.500 millones de años, se formó la Tierra (4).

Durante cientos de millones de años, nuestro planeta fue un entorno inhóspito. A pesar de ello, y contra probabilidades aparentemente muy bajas, hace al menos 3.500-3.800 millones de años emergió la vida, en condiciones fisicoquímicas que permitieron la estabilidad del agua líquida y la química del carbono (5-7). Las hipótesis clásicas de Aleksandr Oparin y J. B. S. Haldane, junto con el experimento de Stanley Miller, constituyen hitos en la investigación sobre el origen prebiótico de la vida (8-10).

Los primeros bloques estructurales que precedieron a sistemas autorreplicativos complejos incluyeron aminoácidos, nucleótidos y otras moléculas orgánicas formadas mediante interacciones covalentes y fuerzas físicoquímicas como interacciones electrostáticas, hidrofóbicas y de van der Waals (6,11). El paso desde química prebiótica a sistemas autorreplicativos sigue siendo uno de los grandes problemas abiertos de la biología, con modelos como el “mundo de ARN” que proponen moléculas capaces de almacenar información y catalizar reacciones (11,12).

El establecimiento del flujo de información genética —ADN → ARN → proteína—, conocido como el dogma central de la biología molecular, permitió la

evolución de sistemas biológicos complejos con capacidades de replicación y metabolismo (13). Las proteínas adquirieron funciones estructurales y catalíticas, facilitando la síntesis de lípidos y la formación de membranas celulares, que protegieron los sistemas replicativos frente a degradación química. Estos sistemas dieron lugar a las primeras células, correspondientes a los dominios Bacteria y Archaea (14).

La transición hacia células eucariotas implicó eventos de endosimbiosis, en los cuales distintas células procarióticas establecieron asociaciones estables. La teoría endosimbiótica, ampliamente aceptada, explica el origen de orgánulos como mitocondrias y cloroplastos (15). Este proceso representa un ejemplo paradigmático de cooperación evolutiva.

Posteriormente, la evolución dio lugar a organismos multicelulares mediante procesos de diferenciación celular y cooperación funcional. Estas “metauniones” biológicas permitieron la aparición de los metazoos y la diversificación de formas de vida complejas durante el eón Fanerozoico (16).

La biodiversidad —microbiana, unicelular y multicelular— es el resultado de procesos evolutivos dinámicos de generación y extinción. A lo largo de la historia de la Tierra se han producido varios eventos de extinción masiva global (17,18):

1. Evento del Ediacárico tardío (~550 Ma), a lo largo de 95 millones de años, asociado a cambios en oxigenación oceánica (17).
2. Extinción Ordovícico-Silúrico (~444 Ma), a lo largo de 1 millón de años, vinculada a glaciaciones y cambios en el nivel del mar (17).
3. Extinción del Devónico tardío (~372-359 Ma), a lo largo de 20 millones de años, asociada a anoxia oceánica (17).
4. Extinción Pérmico-Triásico (~252 Ma), a lo largo de 61 mil años, la más severa, con pérdida de hasta el 90-96% de especies marinas, vinculada a vulcanismo masivo y cambio climático (18,19). Este evento de extinción fue seguido por una rápida recuperación biótica.
5. Extinción Triásico-Jurásico (~201 Ma), a lo largo de 1 millón de años, relacionada con vulcanismo y cambios climáticos (17).
6. El abrupto evento de extinción Cretácico-Paleógeno (~66 Ma), causado por el impacto de un asteroide (Chicxulub, Yucatán) y vulcanismo, que

llevó a la desaparición de los dinosaurios no avianos (20). Este evento también fue seguido por una rápida diversificación biótica.

Desde hace aproximadamente cinco siglos, las tasas de extinción han aumentado significativamente, con una fuerte aceleración en el último siglo. La tasa de fondo del Fanerozoico se estima en $\sim 0,1-1$ extinciones por millón de especies-año (E/MSY) (21). Las tasas actuales superan este rango en uno o más órdenes de magnitud (22,23).

Se han documentado más de 900 especies extintas desde 1500, incluyendo numerosos vertebrados, invertebrados y plantas (24-26). Sin embargo, estas cifras son conservadoras debido a limitaciones en el conocimiento taxonómico.

Otros indicadores reflejan una crisis más profunda: las poblaciones de vertebrados han disminuido en torno a un 68–73% desde 1970 (27), y cerca de un millón de especies están actualmente amenazadas de extinción (28). Además, la biodiversidad microbiana e invertebrada está gravemente subestimada, lo que sugiere la existencia de una “extinción oscura” no detectada (29).

Por todo ello, numerosos autores consideran que estamos inmersos en una sexta extinción masiva. No obstante, a diferencia de eventos pasados, la actual tiene un origen principalmente antropogénico y, por tanto, potencialmente mitigable mediante cambios en el uso del territorio, la explotación de recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero (22,28).

Uno de los motores principales de esta crisis es la transformación del territorio. La expansión de la agricultura, la urbanización y la deforestación han fragmentado y destruido hábitats a una velocidad sin precedentes (30-32). Allí donde antes existían ecosistemas complejos —selvas tropicales, humedales, praderas— hoy aparecen paisajes simplificados, incapaces de sostener la diversidad biológica que albergaban (31). La pérdida de hábitat no solo reduce el espacio disponible para las especies, sino que rompe las relaciones ecológicas que las sostienen, alterando redes tróficas y procesos ecosistémicos fundamentales (33).

A este proceso se suma el cambio climático antropogénico, que actúa como un multiplicador de tensiones. El aumento de las temperaturas, la alteración de los patrones de precipitación y la acidificación de los océanos están modificando las condiciones ambientales a un ritmo al que muchas especies no pueden adaptarse (34,35). Algunas migran, otras disminuyen, y muchas desa-

parecen local o globalmente (34). Ecosistemas particularmente sensibles, como los arrecifes de coral o los hábitats polares, están experimentando transformaciones dramáticas, incluyendo eventos de blanqueamiento masivo y pérdida de hielo marino (35,36).

Otro factor decisivo es la sobreexplotación de recursos. La pesca intensiva, la caza y la extracción de recursos biológicos han llevado a numerosas especies al borde del colapso (37). A diferencia de las dinámicas naturales, en las que las poblaciones tienden a autorregularse, la intervención humana rompe estos equilibrios al extraer individuos a una velocidad superior a su capacidad de regeneración (37,38). Este fenómeno ha sido documentado ampliamente en pesquerías globales y sistemas terrestres.

La contaminación añade otra capa de complejidad. Sustancias químicas, plásticos y residuos industriales se dispersan a escala planetaria, desde los océanos profundos hasta la atmósfera (39), afectando directamente a la fisiología de los organismos y alterando procesos ecológicos fundamentales (39,40). Los microplásticos, por ejemplo, pueden actuar como vectores de contaminantes y modificar las cadenas tróficas.

Debe considerarse también el papel de las especies invasoras, facilitadas por la globalización. Al introducir organismos en ecosistemas donde no tienen depredadores naturales, se desencadenan desequilibrios que pueden resultar devastadores para las especies autóctonas (41). En muchos casos, estas invasiones biológicas actúan en sinergia con otros factores —como la degradación del hábitat y el cambio climático— acelerando aún más la pérdida de biodiversidad (41,42).

Las consecuencias de esta pérdida de biodiversidad van mucho más allá de la desaparición de especies individuales. Los ecosistemas funcionan como redes complejas de interacciones; cuando se elimina un elemento clave, pueden producirse efectos en cascada que comprometen la estabilidad de todo el sistema (43). Por ejemplo, la disminución de polinizadores afecta directamente a la producción de alimentos, la pérdida de depredadores altera el control de plagas, y la degradación de ecosistemas reduce su capacidad para regular el clima y los ciclos biogeoquímicos (43,44).

Esta crisis de biodiversidad es, en última instancia, una crisis de la humanidad. La economía, la salud y la seguridad alimentaria dependen de servicios

ecosistémicos cuya estabilidad está directamente ligada a la integridad de los sistemas naturales (31,44). La erosión de la diversidad biológica reduce la resiliencia ecológica y, con ello, la capacidad de adaptación frente a perturbaciones globales (45). Sin embargo, sus causas son bien conocidas y, por tanto, potencialmente gestionables. La conservación de hábitats, la transición hacia modelos energéticos sostenibles, la regulación de la explotación de recursos y la protección activa de la biodiversidad constituyen condiciones necesarias para evitar que este proceso alcance niveles irreversibles (31,45).

III. LAS PERCEPCIONES HUMANAS DEL MUNDO NATURAL

Desde la biología evolutiva, la percepción de la naturaleza está profundamente enraizada en nuestra condición animal. El ser humano comparte con otras especies mecanismos adaptativos para interpretar señales ambientales críticas, lo que evidencia que nuestra relación perceptiva con la Naturaleza tiene un sustrato ecológico común (46).

Más allá de su base biológica, la percepción de la Naturaleza está mediada por factores culturales. Desde la antropología ambiental y la sociología del conocimiento, se ha argumentado que la Naturaleza no es simplemente percibida, sino también construida socialmente mediante sistemas de significado, lenguaje y prácticas culturales (47). En este sentido, la percepción ambiental depende del conocimiento, la experiencia y las relaciones simbólicas que los individuos establecen con otros seres vivos. Las actitudes hacia la biodiversidad varían según el grado de familiaridad, educación y contexto cultural, influyendo en comportamientos de conservación (48). Asimismo, la autocomprensión humana condiciona la interpretación de la naturaleza. La dicotomía entre considerar al ser humano como parte de la naturaleza o como entidad separada ha sido un eje central en la evolución de las actitudes ambientales (49).

En la visión ancestral y animista de las primeras comunidades humanas, los registros gráficos y simbólicos indican que se interpretaba a la Naturaleza como una entidad viva y sagrada, con una íntima vinculación para la supervivencia (caza, recolección). Con el advenimiento de las civilizaciones agrícolas y la domesticación de plantas y animales, se pasó a ver a la Naturaleza como un recurso a gestionar y transformar.

En la filosofía griega, la Naturaleza (*physis*) era concebida como un orden intrínseco, inteligible y dotado de finalidad. Filósofos como Aristóteles desarrollaron una visión teleológica de la Naturaleza, en la que cada entidad tenía un propósito dentro del cosmos (50). Paralelamente, la tradición sofista introdujo perspectivas más relativistas, donde la percepción humana adquiriría un papel central en la interpretación del mundo.

Durante la Edad Media, la Naturaleza fue interpretada principalmente como creación divina. Tomás de Aquino integró la filosofía aristotélica en una cosmovisión teológica en la que la Naturaleza era expresión del orden divino. Posteriormente, en la modernidad temprana, Francis Bacon promovió una ciencia empírica orientada al dominio de la Naturaleza, mientras que René Descartes estableció un dualismo radical entre *res cogitans* y *res extensa*.

Con el Renacimiento y el surgimiento de la ciencia moderna, esta visión evolucionó hacia una concepción mecanicista. Figuras como René Descartes promovieron una separación entre mente y Naturaleza, consolidando un dualismo que influiría profundamente en la ciencia occidental (51).

Con la consolidación de la ciencia moderna, se consolidó una visión antropocéntrica, por la cual la Naturaleza pasó a ser entendida como un sistema externo, cuantificable y manipulable. Este paradigma permitió avances científicos significativos, pero también fomentó una relación instrumental con el entorno. La física de Isaac Newton consolidó la visión de la naturaleza como sistema regido por leyes universales matemáticamente expresables. Desde el romanticismo y la ciencia natural, Alexander von Humboldt propuso una comprensión holística de la naturaleza como red interconectada.

La revolución industrial intensificó esta visión, promoviendo la explotación sistemática de los recursos naturales (52). En los siglos XX y XXI, la creciente evidencia de degradación ambiental ha impulsado una revisión crítica del dualismo naturaleza-cultura, dando nacimiento a una conciencia ambiental contemporánea con una nueva perspectiva de “ética ecológica”. Se reconoce la urgencia de cambiar patrones de consumo por la sostenibilidad, entendiendo que el impacto humano ha superado la capacidad regenerativa del planeta (Antropoceno). Enfoques como la ecología de sistemas, la teoría de la resiliencia y el concepto de socioecosistemas destacan la interdependencia entre humanos y Naturaleza (53).

IV. EL CONCEPTO DE BIODIVERSIDAD

El concepto de biodiversidad tiene raíces profundas en la historia de la biología, particularmente en la teoría evolutiva y la genética de poblaciones desarrolladas en el siglo XX. Investigadores como Ronald A. Fisher, J. B. S. Haldane y Sewall Wright establecieron los fundamentos para comprender la variabilidad genética dentro y entre poblaciones, elemento central del concepto moderno de diversidad biológica (54).

El término “biodiversidad” es reciente. Se originó como una contracción de “biological diversity” en la década de 1980, en el contexto del auge de la biología de la conservación y la creciente preocupación por la extinción de especies (55,56), y se atribuye a Walter G. Rosen durante la organización del “National Forum on BioDiversity” en 1986 (55). El concepto se consolidó rápidamente gracias a la influencia de Edward O. Wilson, quien editó en 1988 la obra *Biodiversity*, contribuyendo decisivamente a su difusión científica y política (55,56). En este contexto, la biodiversidad pasó a entenderse como la “variedad de organismos en todos sus niveles”, desde la diversidad genética hasta la de ecosistemas (56).

Desde un punto de vista científico, la biodiversidad se define como la variabilidad de los organismos vivos a múltiples niveles de organización: diversidad genética (variación dentro de las especies), diversidad de especies y diversidad de ecosistemas (57,58). La biodiversidad no es un mero recuento de especies, sino una propiedad emergente de sistemas biológicos complejos que incorpora interacciones ecológicas y procesos evolutivos (57).

El concepto de biodiversidad adquirió relevancia global con su incorporación en marcos políticos internacionales, especialmente tras la firma del Convenio sobre la Diversidad Biológica (Convention on Biological Diversity, CBD) en la Cumbre de Río de 1992. Este tratado definió la biodiversidad como la “variabilidad de los organismos vivos...incluyendo la diversidad dentro de las especies, entre especies y de los ecosistemas” (59,60). Esta definición institucional consolidó la biodiversidad como un concepto operativo en la gestión ambiental, integrando dimensiones ecológicas, económicas y sociales, estableciendo tres objetivos fundamentales: (1) conservación de la biodiversidad; (2) uso sostenible de sus componentes; y (3) distribución justa de los beneficios

derivados de los recursos genéticos (61). De este modo, la biodiversidad dejó de ser únicamente un concepto científico para convertirse en un eje central de la gobernanza ambiental global.

En ecología, la biodiversidad es fundamental para comprender el funcionamiento de los ecosistemas. Estudios contemporáneos han demostrado que una mayor biodiversidad se asocia con mayor estabilidad, resiliencia y productividad de los sistemas ecológicos. En términos de biología de la conservación, el concepto de biodiversidad canaliza diseños de estrategias que reduzcan la pérdida de especies y la degradación de hábitats (56).

La biodiversidad también se ha integrado en la economía ambiental mediante el concepto de servicios ecosistémicos, que reconoce los beneficios que los ecosistemas proporcionan a la humanidad, como alimentos, regulación climática y recursos medicinales (59). Desde esta perspectiva, la biodiversidad se toma como un “capital natural” que sustenta el bienestar humano y el desarrollo sostenible (62). Por otro lado, el desarrollo de la biotecnología ha revalorizado la biodiversidad como fuente de recursos genéticos con aplicaciones en medicina, agricultura e industria. La diversidad genética constituye la base para la innovación biotecnológica, desde la mejora de cultivos hasta el descubrimiento de nuevos fármacos (56).

Desde una perspectiva de escala o dimensiones, la biodiversidad puede agruparse en biodiversidad macroscópica (organismos visibles, como plantas, animales y hongos macroscópicos) y biodiversidad microscópica (microorganismos: bacterias, arqueas, protistas, virus y hongos microscópicos) (63).

La biodiversidad macroscópica ha sido tradicionalmente el foco de disciplinas como la zoología, la botánica y la ecología de comunidades. Este nivel incluye organismos que estructuran los ecosistemas a través de redes tróficas complejas y funciones como la producción primaria, la herbivoría y la depredación. La diversidad de especies visibles está estrechamente relacionada con la estabilidad y productividad de los ecosistemas, en lo que se conoce como la relación biodiversidad-funcionamiento ecosistémico. Sin embargo, estos procesos no pueden entenderse de manera aislada de los microorganismos que sostienen los ciclos biogeoquímicos subyacentes.

Aunque históricamente la atención científica y social se ha centrado en la biodiversidad visible, la evidencia contemporánea demuestra que la biodiver-

sidad microscópica constituye la base funcional de los ecosistemas (64,65). La biodiversidad microbiana representa la mayor fracción de la diversidad biológica del planeta, tanto en términos de riqueza taxonómica como de diversidad funcional (64). Se estima que la mayoría de las especies en la Tierra son microbianas, muchas de ellas aún no descritas, lo que subraya la magnitud de la denominada “biodiversidad invisible” (65).

Los microorganismos participan en procesos clave como ciclos biogeoquímicos (carbono, nitrógeno, fósforo), descomposición de materia orgánica, producción primaria (por ejemplo, fitoplancton), o regulación del clima global (64,66). Por ejemplo, los microorganismos del suelo son responsables de la mineralización de nutrientes que permiten el crecimiento de plantas, mientras que los microbiomas asociados a organismos multicelulares influyen en su fisiología, inmunidad y desarrollo (67). Además, los océanos albergan una enorme diversidad microbiana que regula el ciclo global del carbono mediante procesos como la fijación fotosintética y la bomba biológica de carbono (66).

La relación entre biodiversidad microscópica y macroscópica es profundamente interdependiente y jerárquica. La biodiversidad invisible sostiene la biodiversidad visible a través de múltiples mecanismos: Los microorganismos fotosintéticos, como el fitoplancton, generan una fracción significativa de la producción primaria global, constituyendo la base de muchas cadenas tróficas acuáticas (66). Las plantas dependen de comunidades microbianas del suelo para la disponibilidad de nutrientes esenciales. Sin estos microorganismos, los ecosistemas terrestres colapsarían debido a la falta de reciclaje de materia orgánica (64).

En resumen, los organismos macroscópicos no son entidades independientes, sino sistemas integrados con microorganismos. El concepto de “holobionte” describe esta asociación funcional entre un organismo y su microbioma (67). Por ejemplo, las plantas dependen de micorrizas para la absorción de nutrientes; o los animales poseen microbiotas intestinales esenciales para la digestión e inmunidad. La biodiversidad microbiana también regula la dinámica de enfermedades. La pérdida de diversidad microbiana puede favorecer la emergencia de patógenos, afectando tanto a humanos como a otras especies (67).

La degradación ambiental afecta tanto a la biodiversidad visible como a la invisible, pero los cambios en la biodiversidad microbiana pueden tener efectos

desproporcionados sobre los ecosistemas. Alteraciones en comunidades microbianas pueden modificar ciclos biogeoquímicos, afectar la productividad primaria y desencadenar retroalimentaciones climáticas (66). Además, la pérdida de biodiversidad microbiana es menos visible y, por tanto, menos considerada en políticas de conservación, a pesar de su papel crítico en la estabilidad ecosistémica (65).

En definitiva, la biodiversidad macroscópica y microscópica no son dimensiones independientes, sino niveles interconectados de organización biológica. Mientras la biodiversidad microscópica constituye la base funcional de los ecosistemas, la biodiversidad macroscópica depende de procesos mediados por microorganismos. En consecuencia, la pérdida de biodiversidad invisible puede comprometer la integridad de sistemas ecológicos visibles.

V. BIODIVERSIDAD Y CIVILIZACIÓN: INTERSECCIONES

La historia de las civilizaciones humanas es inseparable de la historia de la biodiversidad. Desde una perspectiva ecológica y evolutiva, las sociedades humanas pueden entenderse como sistemas socioecológicos que emergen, se desarrollan y transforman en interacción continua con la diversidad biológica del planeta. La biodiversidad no solo constituye el sustrato biofísico sobre el cual se construyen las civilizaciones, sino también un componente activo que condiciona su organización, resiliencia y trayectoria histórica (68,69).

En este sentido, la intersección entre biodiversidad y civilización no debe interpretarse únicamente como una relación de dependencia, sino como un proceso de coevolución, en el que las dinámicas ecológicas y sociales se influyen mutuamente a múltiples escalas temporales y espaciales.

La biodiversidad sustenta los procesos ecológicos fundamentales que hacen posible la existencia de las sociedades humanas. Estos procesos incluyen la producción de alimentos, la regulación del clima, el ciclo del agua y la provisión de materiales y energía, comúnmente conceptualizados como servicios ecosistémicos (69,70). La pérdida de biodiversidad reduce la capacidad de los ecosistemas para mantener estas funciones, afectando directamente al bienestar humano y a la estabilidad de los sistemas socioeconómicos (69). En particular, la biodiversidad desempeña un papel crucial en la agricultura, donde la

diversidad genética y de especies contribuye a la productividad, la resiliencia frente a perturbaciones y la seguridad alimentaria global (71). De este modo, las civilizaciones no solo dependen de la biodiversidad, sino que están estructuralmente acopladas a ella mediante flujos de materia, energía e información.

El registro arqueológico y etnográfico demuestra que las interacciones entre humanos y biodiversidad han variado significativamente a lo largo del tiempo. Lejos de ser únicamente destructivas, muchas sociedades preindustriales mantuvieron relaciones sostenibles con su entorno, generando paisajes biodiversos mediante prácticas como la agricultura tradicional, el manejo del fuego o la domesticación de especies (68). Así, los humanos hemos sido ingenieros ecosistémicos durante milenios, moldeando la biodiversidad de forma activa. En algunos casos, estas interacciones han incrementado la diversidad biológica local, desafiando la visión simplista de que la influencia humana es siempre negativa (72). Con la expansión de la industrialización, el crecimiento demográfico y la globalización, esta relación se ha intensificado y transformado profundamente. La explotación de recursos, la conversión de hábitats y la homogeneización biológica han conducido a una aceleración de las tasas de extinción, configurando lo que se ha denominado la “sexta extinción masiva” (69).

Por otro lado, las culturas humanas están profundamente entrelazadas con la biodiversidad, a través de sistemas de conocimiento tradicional, prácticas simbólicas y formas de gestión del territorio (72). Las comunidades indígenas y locales han desarrollado sistemas de conocimiento ecológico que permiten la gestión sostenible de los recursos biológicos, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad. Estudios recientes destacan que estas culturas no son meros usuarios de la biodiversidad, sino co-creadores de paisajes ecológicos complejos (72). Este reconocimiento ha dado lugar a enfoques contemporáneos que integran diversidad biológica y diversidad cultural bajo el concepto de bioculturalidad, subrayando que la pérdida de biodiversidad suele ir acompañada de la erosión cultural.

La relación entre biodiversidad y civilización se caracteriza por su complejidad y multiescalaridad. Los sistemas socioecológicos integran procesos ecológicos, económicos y sociales que interactúan de forma no lineal. Los cambios en la biodiversidad pueden generar efectos en cascada sobre el funcionamiento de los ecosistemas y, en consecuencia, sobre las sociedades humanas (69). A su

vez, las decisiones humanas —como las políticas agrícolas, el comercio internacional o la urbanización— influyen directamente en la dinámica de la biodiversidad (71). Este acoplamiento bidireccional implica que la sostenibilidad de las civilizaciones depende de la capacidad de mantener la integridad funcional de los ecosistemas.

En la actualidad, la relación entre biodiversidad y civilización se encuentra en un punto crítico. La actividad humana se ha convertido en una fuerza geológica capaz de transformar el sistema Tierra, dando lugar al denominado Antropoceno. Las actividades humanas han provocado una disminución significativa de la biodiversidad a escala global, alterando la composición de las comunidades biológicas y reduciendo la resiliencia de los ecosistemas (69). Este proceso no solo afecta a la naturaleza, sino que compromete directamente la estabilidad de las civilizaciones al erosionar los sistemas que sustentan la vida.

En resumen, la intersección entre biodiversidad y civilización puede entenderse como una relación de dependencia estructural, ya que la biodiversidad sustenta los procesos ecológicos esenciales, coevolución histórica, en la que humanos y ecosistemas se transforman mutuamente, interacción compleja, caracterizada por dinámicas multiescalares y no lineales, y responsabilidad global, en el contexto de la crisis ambiental contemporánea.

VI. LÍMITES PLANETARIOS

El desarrollo de las civilizaciones humanas ha estado históricamente condicionado por la estabilidad del sistema Tierra durante el Holoceno, un periodo caracterizado por condiciones climáticas y ecológicas relativamente constantes. Sin embargo, la intensificación de las actividades humanas desde la Revolución Industrial ha transformado profundamente los procesos biofísicos globales, dando lugar a una nueva era geológica: el Antropoceno.

En este contexto, el concepto de límites planetarios surge como un marco científico destinado a identificar los umbrales críticos de los procesos del sistema Tierra cuya alteración puede comprometer la estabilidad global y la habitabilidad del planeta (73,74). El marco de los límites planetarios fue propuesto en 2009 por un grupo internacional de científicos liderado por Johan

Rockström y Will Steffen (74). Este enfoque introduce la noción de un “espacio operativo seguro para la humanidad”, definido por los rangos dentro de los cuales los procesos del sistema Tierra permanecen estables. La hipótesis central sostiene que la superación de ciertos umbrales puede desencadenar cambios no lineales, abruptos e irreversibles en el sistema Tierra, debido a la presencia de retroalimentaciones positivas y puntos de inflexión (tipping points) (75). El marco fue posteriormente refinado en 2015, integrando avances científicos y destacando la importancia de las interacciones entre diferentes límites (73).

El marco identifica nueve procesos fundamentales que regulan la estabilidad del sistema Tierra (75):

1. Cambio climático.
2. Integridad de la biosfera (pérdida de biodiversidad).
3. Cambio en el uso del suelo.
4. Uso de agua dulce.
5. Ciclos biogeoquímicos (nitrógeno y fósforo).
6. Acidificación de los océanos.
7. Agotamiento de la capa de ozono estratosférico.
8. Carga de aerosoles atmosféricos.
9. Introducción de nuevas entidades (contaminación química, plásticos, etc.).

Estos límites representan procesos interdependientes que operan a escala global y cuya alteración puede afectar la resiliencia del sistema Tierra.

Una aportación fundamental del concepto de límites planetarios es la incorporación de la teoría de sistemas complejos al análisis ambiental global. Los procesos del sistema Tierra no responden de manera lineal a las perturbaciones; en cambio, pueden experimentar transiciones abruptas al superar ciertos umbrales críticos.

Por ejemplo, el cambio climático puede activar retroalimentaciones como la liberación de carbono del permafrost o la pérdida de hielo polar, amplificando el calentamiento global. De manera similar, la pérdida de biodiversidad puede

reducir la resiliencia de los ecosistemas, aumentando su vulnerabilidad a perturbaciones adicionales. La superación de un límite no solo afecta al proceso en cuestión, sino que puede desestabilizar otros límites debido a la fuerte interconexión entre ellos (75). Por ejemplo, el cambio en el uso del suelo afecta la biodiversidad y los ciclos del carbono, la alteración de los ciclos del nitrógeno y fósforo contribuye a la eutrofización y a la pérdida de ecosistemas acuáticos, y la acidificación oceánica está directamente vinculada al aumento de CO₂ atmosférico.

La actualización del marco en 2015 identificó dos límites como centrales para la estabilidad del sistema Tierra: El cambio climático y la integridad de la biosfera (73). Estos límites son considerados fundamentales porque tienen la capacidad de impulsar el sistema Tierra hacia estados alternativos si se superan de manera significativa. En particular, la biodiversidad desempeña un papel clave en la regulación de los ciclos biogeoquímicos y en la resiliencia de los ecosistemas, conectando múltiples límites planetarios.

En el momento presente, varios de estos límites planetarios ya han sido superados. En 2009, se estimó que al menos tres límites habían sido transgredidos: el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la alteración del ciclo del nitrógeno (75). Más recientes evaluaciones indican que el número de límites transgredidos ha aumentado a 7. La superación de estos límites incrementa el riesgo de cambios abruptos que podrían comprometer la estabilidad de los sistemas ecológicos y sociales (73).

El concepto de límites planetarios representa un cambio paradigmático en la comprensión de la relación entre la humanidad y el sistema Tierra, puesto que permite la identificación de procesos biofísicos críticos para la estabilidad planetaria, la definición de un espacio operativo seguro para la humanidad, el reconocimiento de umbrales y dinámicas no lineales en el sistema Tierra, la integración de la biodiversidad como componente central de la resiliencia global, y plantear la necesidad de enfoques sistémicos para la sostenibilidad. Por ello, constituyen un marco esencial para orientar la acción científica, política y social hacia la preservación de las condiciones que han permitido el desarrollo de la civilización humana.

VII. BIOECONOMÍA

La bioeconomía emerge como un paradigma integrador que busca articular el conocimiento biológico con la producción económica, con el objetivo de transitar desde modelos basados en recursos fósiles hacia sistemas sostenibles fundamentados en recursos biológicos renovables. En el contexto del Antropoceno, caracterizado por la presión creciente sobre los límites planetarios, la bioeconomía se presenta como un marco estratégico para reconciliar desarrollo económico, conservación de la biodiversidad y mitigación del cambio climático (76,77). Este concepto se sitúa en la intersección entre biología, tecnología, economía y políticas públicas, y propone una reconfiguración profunda de los sistemas productivos mediante el uso eficiente y sostenible de la biomasa, los procesos biotecnológicos y la innovación científica.

El término bioeconomía tiene antecedentes en la economía ecológica y en las reflexiones de Nicholas Georgescu-Roegen, quien en la década de 1970 subrayó la dependencia de la economía respecto de los sistemas biológicos y las leyes de la termodinámica (78). Su enfoque introdujo la idea de que los procesos económicos están limitados por la disponibilidad de recursos naturales y la capacidad de los ecosistemas para absorber residuos. En las últimas décadas, el concepto ha evolucionado hacia una perspectiva más aplicada, impulsada por avances en biotecnología, ciencias de la vida y políticas internacionales. Organizaciones como la Organisation for Economic Co-operation and Development han promovido la bioeconomía como un motor de innovación y crecimiento sostenible (76).

La bioeconomía puede definirse como el conjunto de actividades económicas que utilizan recursos biológicos renovables y procesos biotecnológicos para producir bienes y servicios (76,77). Este concepto incluye múltiples sectores, como agricultura y silvicultura, pesca y acuicultura, industria alimentaria, biotecnología industrial, o producción de bioenergía. Desde un punto de vista sistémico, la bioeconomía integra tres dimensiones principales:

1. Biológica, relacionada con la base de recursos naturales y la biodiversidad.

2. Tecnológica, vinculada a la innovación en biotecnología y procesos industriales.
3. Económica y social, asociada a la generación de valor, empleo y bienestar.

La biodiversidad constituye el fundamento de la bioeconomía, al proporcionar los recursos genéticos, la diversidad química y los servicios ecosistémicos necesarios para la producción biológica. La diversidad genética y química es esencial para la mejora de cultivos, la resiliencia de los sistemas agrícolas y el desarrollo de nuevos productos biotecnológicos (79). Al mismo tiempo, la bioeconomía puede influir tanto positiva como negativamente sobre la biodiversidad. En su dimensión sostenible, promueve el uso eficiente de recursos, la reducción de residuos y la valorización de la diversidad biológica. Sin embargo, prácticas intensivas o mal gestionadas pueden conducir a la sobreexplotación de recursos y a la pérdida de biodiversidad (77). Por tanto, la bioeconomía debe desarrollarse dentro de los límites ecológicos, integrando principios de sostenibilidad y conservación.

Uno de los pilares de la bioeconomía es la biotecnología, que permite transformar recursos biológicos en productos de alto valor añadido. Aplicaciones clave de la biotecnología incluyen la producción de biocombustibles, el desarrollo de bioplásticos, la ingeniería genética para la mejora de cultivos, la bioprospección para el descubrimiento de nuevos medicamentos y biofármacos y la bioingeniería para producción industrial de compuestos naturales o de inspiración natural.

Estas innovaciones contribuyen a la sustitución de materiales fósiles y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, posicionando a la bioeconomía como una estrategia relevante en la transición hacia economías bajas en carbono (76,80). También permiten una exploración de y producción de recursos y compuestos naturales sin necesidad de recurrir al extractivismo. Por ejemplo, la caracterización profunda de la biodiversidad microbiológica ambiental, incluyendo análisis genómicos, proteómicos y metabolómicos, unido a estudios estructurales y funcionales de moléculas bioactivas, permite transferir componentes genéticos desde microorganismos ambientales a microorga-

nismos con eficiente crecimiento en el laboratorio (transferencia heteróloga de conjuntos de genes biosintéticos), que permiten escalados industriales para la producción de compuestos de origen natural, o inspirados en ellos.

Por otro lado, la bioeconomía contemporánea se articula cada vez más con el concepto de economía circular, que promueve la reutilización, el reciclaje y la valorización de residuos biológicos. Este enfoque busca cerrar los ciclos de materia y energía, minimizando el impacto ambiental de los sistemas productivos (77). La integración de bioeconomía y economía circular permite optimizar el uso de la biomasa, reducir la dependencia de recursos no renovables y mejorar la eficiencia global de los sistemas económicos.

A pesar de su potencial, la bioeconomía se enfrenta a desafíos significativos, como son la competencia por el uso del suelo entre producción de alimentos, bioenergía y conservación, los riesgos de intensificación agrícola y pérdida de biodiversidad, la desigualdades en el acceso a tecnologías y recursos y la necesidad de marcos regulatorios adecuados.

Desde la perspectiva del sistema planetario, la bioeconomía representa una estrategia para reconfigurar la relación entre la humanidad y la biosfera. Su implementación puede contribuir a reducir la presión sobre los recursos fósiles, mitigar el cambio climático, promover el uso sostenible de la biodiversidad, y fortalecer la resiliencia de los sistemas socioecológicos. Su éxito depende de la capacidad de equilibrar innovación tecnológica con conservación ecológica y el uso sostenible de los recursos naturales.

En definitiva, la bioeconomía constituye un paradigma emergente que integra biología, tecnología y economía en el contexto de la sostenibilidad global.

VIII. BIOTECNOLOGÍAS

Las biotecnologías comprenden el conjunto de aplicaciones científicas y tecnológicas que utilizan sistemas biológicos, organismos vivos o sus derivados para la generación de bienes y servicios. Este campo multidisciplinar integra conocimientos de biología molecular, genética, microbiología, bioquímica e ingeniería, y constituye uno de los pilares de la innovación en el siglo XXI (81).

En un sentido amplio, la biotecnología abarca desde prácticas tradicionales, como la fermentación, hasta tecnologías avanzadas, como la edición genética

y la biología sintética. Su relevancia contemporánea radica en su capacidad para transformar sectores clave como la salud, la agricultura, la industria y el medio ambiente.

Un hito fundamental en el devenir de la biotecnología fue la elucidación de la estructura del ADN por James Watson y Francis Crick en 1953, lo que permitió comprender la base molecular de la herencia (82). Posteriormente, el desarrollo de la tecnología de ADN recombinante en la década de 1970, impulsado por investigadores como Paul Berg, marcó el inicio de la ingeniería genética (83). En las últimas décadas, avances como la secuenciación masiva, la genómica funcional y la edición genética mediante CRISPR-Cas9 —desarrollada por Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier— han revolucionado el campo (84).

Las biotecnologías se clasifican comúnmente en función de sus aplicaciones:

- Biotecnología roja: orientada a la salud humana (vacunas, terapias génicas, medicina personalizada).
- Biotecnología verde: aplicada a la agricultura (mejora genética de cultivos, resistencia a plagas).
- Biotecnología blanca: enfocada en procesos industriales (biocatalizadores, bioplásticos).
- Biotecnología azul: relacionada con recursos marinos.
- Biotecnología gris: aplicada a la gestión ambiental (biorremediación, tratamiento de residuos) (81).

El desarrollo de las biotecnologías se basa en la comprensión de los sistemas biológicos a nivel molecular (genes, proteínas, actividades enzimáticas, propiedades estructurales, metabolitos), celular (regulación) y sistémico (redes biológicas). La ingeniería genética permite modificar secuencias de ADN para introducir nuevas funciones en organismos vivos, mientras que la biología de sistemas integra datos a gran escala para modelar el comportamiento de sistemas biológicos complejos (85). La biología sintética representa un enfoque emergente que busca diseñar y construir sistemas biológicos con funciones específicas, ampliando las capacidades de la biotecnología más allá de la modificación de organismos existentes (85).

Las biotecnologías han transformado profundamente la medicina moderna, llevando a múltiples aplicaciones, como la producción de proteínas terapéuticas, el desarrollo de vacunas, las terapias génicas para enfermedades hereditarias, o la medicina personalizada basada en perfiles genómicos. Estas innovaciones han permitido abordar enfermedades previamente intratables y mejorar la eficacia de los tratamientos (84).

En el ámbito agrícola, la biotecnología ha permitido el desarrollo de cultivos genéticamente modificados con características como resistencia a plagas, tolerancia a condiciones ambientales adversas y mayor rendimiento. Estas tecnologías contribuyen a la seguridad alimentaria global, aunque también plantean desafíos relacionados con la biodiversidad, la bioseguridad y la aceptación social (86).

La biotecnología industrial utiliza organismos y enzimas para producir materiales, energía y productos químicos de manera más sostenible, con aplicaciones como la producción de biocombustibles, la síntesis de bioplásticos biodegradables, o el uso de enzimas en procesos industriales para reducir el consumo energético. Estas aplicaciones forman parte de la transición hacia una bioeconomía sostenible, al reducir la dependencia de recursos fósiles y minimizar el impacto ambiental (81).

Las biotecnologías ambientales se centran en la restauración y protección de los ecosistemas. Por ejemplo, la biorremediación utiliza microorganismos para degradar contaminantes, mientras que otras aplicaciones incluyen el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de suelos degradados, tecnologías que se han convertido en esenciales para mitigar los efectos de la contaminación y contribuir a la sostenibilidad ambiental (86).

El desarrollo de las biotecnologías plantea importantes cuestiones éticas y sociales. La manipulación genética, especialmente en humanos, genera debates sobre seguridad, equidad y límites morales. Asimismo, la gobernanza de las biotecnologías requiere marcos regulatorios que garanticen su uso seguro y equitativo, promoviendo al mismo tiempo la innovación científica (84).

Por todo ello, las biotecnologías constituyen un campo estratégico en la interfaz entre ciencia, tecnología y sociedad, al ofrecer potentes herramientas para abordar desafíos globales.

IX. BIODIVERSIDAD Y BIOTECNOLOGÍAS

En un contexto de pérdida de diversidad biológica por causas antropogénicas, las biotecnologías emergen como herramientas clave para la conservación, restauración y uso sostenible de la biodiversidad, al tiempo que generan oportunidades económicas en el marco de la bioeconomía (87,88). La intersección entre biodiversidad y biotecnologías representa un campo estratégico en el que convergen ciencia, innovación y políticas públicas, permitiendo abordar simultáneamente objetivos ecológicos y económicos.

Como se ha resumido más arriba, la biodiversidad proporciona una vasta reserva de recursos genéticos y químicos que constituyen la materia prima de la biotecnología. Desde compuestos bioactivos utilizados en farmacología hasta genes de interés agronómico, la diversidad biológica es un motor fundamental de innovación (88). Así, una proporción significativa de los fármacos modernos tiene origen directo o indirecto en organismos naturales, incluyendo plantas, microorganismos y organismos marinos (89). Asimismo, la diversidad genética es esencial para la mejora de cultivos y la adaptación a condiciones ambientales cambiantes. En este sentido, la biodiversidad no solo tiene valor ecológico, sino también un valor económico potencial asociado a su capacidad de generar nuevos productos y tecnologías.

Las biotecnologías ofrecen herramientas avanzadas para la protección y restauración de la biodiversidad, complementando los enfoques tradicionales de conservación. La aplicación de tecnologías genómicas permite analizar la diversidad genética de poblaciones, identificar unidades evolutivas significativas y diseñar estrategias de conservación más efectivas. La secuenciación de ADN facilita la detección de pérdida de variabilidad genética y la monitorización de especies en peligro (90). Técnicas como la criopreservación de gametos, la fertilización in vitro y la clonación permiten conservar material genético de especies amenazadas y apoyar programas de reproducción asistida (91). Las tecnologías de edición génica, como CRISPR-Cas9, abren nuevas posibilidades para la conservación, incluyendo la corrección de mutaciones perjudiciales o la restauración de características adaptativas perdidas (92). El análisis de ADN ambiental permite detectar especies a partir de muestras de agua, suelo o aire,

facilitando el monitoreo de biodiversidad de manera no invasiva y altamente sensible (90).

Más allá de la conservación, las biotecnologías permiten valorizar la biodiversidad mediante su uso sostenible en diferentes sectores económicos. En este aspecto, la bioprospección constituye un abordaje fundamental. Consiste en la exploración sistemática de la biodiversidad para identificar, mediante técnicas de química analítica, compuestos con aplicaciones industriales o médicas. Este enfoque ha dado lugar al desarrollo de numerosos fármacos y productos biotecnológicos (89).

En otros aspectos, las biotecnologías agrícolas permiten desarrollar cultivos más eficientes y resilientes, reduciendo la presión sobre los ecosistemas naturales y contribuyendo a la conservación indirecta de la biodiversidad (93). Adicionalmente, el uso de microorganismos y enzimas en procesos industriales permite sustituir recursos fósiles, reducir residuos y mejorar la eficiencia energética, integrando la biodiversidad en sistemas productivos sostenibles (87).

A pesar de su potencial, el uso de biotecnologías en relación con la biodiversidad plantea retos significativos, incluyendo riesgos ecológicos asociados a la liberación de organismos modificados, problemas de acceso y reparto de beneficios derivados de recursos genéticos, y la necesidad de marcos regulatorios internacionales, como el Protocolo de Nagoya. Además, es fundamental evitar que la valorización económica de la biodiversidad conduzca a su sobreexplotación, garantizando que los beneficios se distribuyan de manera equitativa (88).

X. BIODIVERSIDAD Y BIOECONOMÍA

Desde una perspectiva ecológica y económica, la biodiversidad puede conceptualizarse como una forma de capital natural, que sustenta procesos productivos y genera flujos de bienes y servicios. Este capital incluye no solo la diversidad de especies, sino también la diversidad genética y funcional que permite la adaptación de los sistemas biológicos a condiciones cambiantes (94).

La interdependencia entre biodiversidad y bioeconomía es estructural: mientras la biodiversidad provee los recursos genéticos, funcionales y ecosistémicos necesarios para la producción biológica, la bioeconomía determina las

formas en que estos recursos son utilizados, gestionados y valorizados. La diversidad genética es particularmente relevante en sectores como la agricultura, donde constituye la base para la mejora de cultivos y la resiliencia frente a perturbaciones ambientales. Asimismo, la biodiversidad es una fuente clave de innovación en biotecnología, proporcionando compuestos bioactivos, enzimas y metabolitos con aplicaciones industriales y médicas (95).

La bioeconomía provee de servicios ecosistémicos a las sociedades humanas, como pueden ser provisión de alimentos, biomasa o recursos genéticos y químicos, servicios de regulación climática, de ciclos biogeoquímicos, o de polinización, o servicios culturales y de soporte (96,97). La pérdida de biodiversidad reduce la capacidad de los ecosistemas para generar estos servicios, afectando directamente a la productividad económica y al bienestar humano (97).

Un enfoque emergente es la bioeconomía basada en la biodiversidad, que promueve el uso sostenible de recursos biológicos diversos en lugar de sistemas productivos intensivos y monocultivistas (98). Este enfoque incluye el uso de especies nativas y sistemas agroecológicos, la valorización de productos forestales no maderables, o la bioprospección y desarrollo de productos derivados de la biodiversidad. La biotecnología desempeña un papel central en este abordaje, al permitir transformar recursos biológicos en productos de alto valor añadido, sin recurrir al extractivismo (95).

Sin embargo, existen riesgos en la expansión de la bioeconomía que pueden generar tensiones con la conservación de la biodiversidad, como son la conversión de ecosistemas naturales para producción de biomasa, la reducción de diversidad genética en sistemas agrícolas, o la sobreexplotación de recursos biológicos.

XI. BIODIVERSIDAD Y UNA SOLA SALUD (“ONE HEALTH”)

El concepto de One Health (Una Sola Salud) se ha consolidado como un marco integrador que reconoce la interdependencia entre la salud humana, animal, vegetal y ambiental. Este enfoque, promovido por organismos internacionales, responde a la creciente evidencia de que los sistemas biológicos y sociales están profundamente interconectados y deben ser abordados de manera integrada (99,100).

En este contexto, la biodiversidad emerge como un componente central de la salud global. Su conservación no solo tiene implicaciones ecológicas, sino también sanitarias, económicas y sociales. La intersección entre biodiversidad y One Health constituye, por tanto, un campo clave para comprender y gestionar los riesgos globales en el Antropoceno.

El enfoque One Health se basa en la premisa de que la salud es una propiedad emergente de sistemas complejos que integran múltiples dominios biológicos. Este paradigma reconoce que la salud humana depende de la salud de los animales y los ecosistemas, que los cambios ambientales influyen en la dinámica de enfermedades, y que las actividades humanas alteran las interacciones entre especies y sus patógenos. Diversos marcos conceptuales, incluyendo One Health, salud planetaria y ecohealth, convergen en la necesidad de integrar disciplinas para abordar problemas complejos de salud global (100).

Uno de los aspectos más relevantes de la relación entre biodiversidad y salud es su papel en la dinámica de enfermedades infecciosas, particularmente las zoonosis. Se estima que una proporción significativa de enfermedades emergentes tiene origen zoonótico, lo que subraya la importancia de las interfaces entre humanos, animales y ecosistemas (101). La biodiversidad puede influir en la transmisión de enfermedades mediante mecanismos tales como el efecto dilución, por el que una mayor diversidad de especies puede reducir la transmisión de patógenos al disminuir la probabilidad de contacto con hospedadores competentes, la regulación ecológica, por la que ecosistemas intactos mantienen equilibrios que limitan la proliferación de vectores y patógenos, y la resiliencia ecosistémica, en que sistemas biodiversos son más resistentes a perturbaciones que favorecen brotes epidémicos (102).

En sentido contrario, la pérdida de biodiversidad puede aumentar el riesgo de enfermedades emergentes al alterar estas dinámicas ecológicas. La degradación de ecosistemas, la deforestación, la urbanización y el cambio climático están modificando las interacciones entre especies, facilitando la emergencia de enfermedades infecciosas. La alteración de hábitats incrementa el riesgo de “spillover” o salto de patógenos desde animales silvestres a humanos (101). Además, el cambio climático está expandiendo la distribución geográfica de vectores como mosquitos, lo que amplía el rango de enfermedades transmitidas (99). Estas dinámicas son particularmente críticas en regiones altamente

biodiversas, como archipiélagos o ecosistemas tropicales, requiriendo enfoques integrados que combinen conservación y salud pública (103).

La vasta biodiversidad microbiana desempeña un papel fundamental en la salud de los sistemas biológicos. Los microbiomas son esenciales para la salud humana (inmunidad, metabolismo), la salud animal y vegetal, y el funcionamiento de los ecosistemas y la regulación climática (104). La integración de la ciencia del microbioma en el enfoque One Health representa una frontera emergente, que amplía la comprensión de la salud como un fenómeno multiescalar que incluye tanto biodiversidad visible como invisible.

En la interacción entre microbiomas ambientales y salud humana juega un papel fundamental el impacto de los sistemas agrícolas. Sabemos que el surgimiento explosivo de patologías infecciosas coincidió con la invención y el desarrollo de la agricultura. Actualmente, las prácticas agrícolas intensivas pueden contribuir a la pérdida de biodiversidad, contaminación ambiental, y la aparición de resistencias antimicrobianas, como efectos colaterales perjudiciales para la salud humana.

Como bien saben Ustedes, la resistencia a los antimicrobianos (AMR) es uno de los principales desafíos globales en salud, y se asocia al abuso de antibióticos en humanos y animales y a alteraciones en las dinámicas microbianas en ecosistemas. El enfoque One Health promueve la transición hacia sistemas agroalimentarios sostenibles, como la agroecología, que integran la conservación de la biodiversidad con la producción de alimentos y la salud pública (100,105).

Por todo ello, es importante integrar la biodiversidad con One Health. Para ello, hay promover políticas intersectoriales que integran salud, medio ambiente y agricultura, contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, reforzar la cooperación internacional, ya que los derrames zoonóticos y las multidrogorresistencias cada vez respetan menos las fronteras humanas.

XII. PROPUESTAS PARA LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD A TRAVÉS DE LAS BIOTECNOLOGÍAS

Todo lo arriba expuesto nos lleva a una reflexión de conjunto. La crisis contemporánea de biodiversidad, enmarcada en la triple crisis planetaria (cambio

climático, pérdida de biodiversidad y contaminación), exige enfoques innovadores que integren conservación, desarrollo económico y salud global. En este contexto, las biotecnologías emergen como herramientas clave para la protección y restauración de la biodiversidad, al tiempo que generan oportunidades dentro de la bioeconomía y fortalecen el enfoque One Health (106). Esta convergencia representa un cambio de paradigma: la biodiversidad deja de ser únicamente objeto de conservación para convertirse en un eje central de innovación tecnológica, resiliencia sanitaria y desarrollo económico sostenible.

Una de las propuestas más consolidadas es el uso de herramientas genómicas para la conservación de especies y ecosistemas. Por ejemplo, la secuenciación masiva de ADN y el análisis de ADN ambiental (environmental DNA, eDNA) permiten detectar especies raras o crípticas, evaluar diversidad genética poblacional y monitorizar cambios en tiempo real en ecosistemas (106). Estos avances mejoran significativamente la precisión y eficiencia de las estrategias de conservación, permitiendo intervenciones más tempranas y basadas en evidencia. Adicionalmente, el uso de inteligencia artificial aplicada a datos ecológicos está emergiendo como una herramienta poderosa para modelar la distribución de especies y predecir dinámicas de biodiversidad bajo escenarios de cambio global, ampliando la capacidad de planificación de la conservación (107).

Otra línea clave para la conservación son las tecnologías reproductivas que permiten la criopreservación de gametos y tejidos, crear y mantener bancos de germoplasma, y técnicas como la fertilización in vitro y clonación, estrategias que permiten preservar la diversidad genética incluso en situaciones críticas de extinción, actuando como “seguros biológicos” frente a la pérdida irreversible de especies (106).

Las tecnologías de edición génica, como CRISPR, abren nuevas posibilidades para la conservación activa, puesto que están permitiendo la restauración de diversidad genética en poblaciones reducidas, la eliminación de variantes genéticas perjudiciales, o el incremento de la resistencia frente a enfermedades o cambios ambientales. Estos abordajes se conocen como de “rescate genético” (109).

En paralelo, la biología sintética permite restaurar funciones ecosistémicas, como la fijación de carbono o la degradación de contaminantes, ofre-

ciendo soluciones como la fijación de carbono, la biorremediación mediante microorganismos capaces de degradar contaminantes, el uso de consorcios microbianos para regenerar suelos, o la restauración de microbiomas en ecosistemas alterados (110).

Las biotecnologías permiten articular conservación y desarrollo económico mediante modelos de bioeconomía sostenible, por ejemplo, mediante la bioprospección y la biomanufactura, aplicando procedimientos para descubrir y producir sosteniblemente compuestos bioactivos, enzimas y metabolitos naturales que pueden ser utilizados en la industria farmacéutica, la biotecnología industrial, la producción de alimentos innovadores, o productos cosméticos (111).

Las biotecnologías aplicadas a la biodiversidad tienen impactos directos en el enfoque One Health, (1) favoreciendo la prevención de enfermedades emergentes mediante la restauración de ecosistemas y la conservación de biodiversidad, reducen el riesgo de zoonosis, (2) la vigilancia epidemiológica avanzada mediante el uso de eDNA y herramientas genómicas permite detectar patógenos en el ambiente, facilitando sistemas de alerta temprana para enfermedades infecciosas, (3) combatiendo la emergencia de resistencias antimicrobianas a través de la gestión sostenible de ecosistemas y microbiomas contribuye a limitar la propagación de genes de resistencia, y (4) favoreciendo la implementación de sistemas agroalimentarios sostenibles, que mejoran la resiliencia y reduce la dependencia de fitoquímicos, contribuyendo simultáneamente a la salud ambiental, animal y humana y (5) favoreciendo la conservación de ecosistemas por resaltar su enorme valor en productos naturales diversos basados en diversidad genética y diversidad química, que las biotecnologías pueden descubrir y aprovechar de modo sostenible (112).

XIII. CONCLUSIONES Y AGRADECIMIENTOS FINALES

Permítanme concluir retomando el hilo conductor de esta intervención: la necesidad de comprender que la biodiversidad no es un elemento periférico del sistema global, sino su fundamento estructural.

A lo largo de este recorrido hemos visto cómo la biodiversidad, en sus dimensiones visible e invisible, constituye el soporte de los procesos ecológicos que sostienen la vida en la Tierra. Hemos constatado que su degradación no

solo implica una pérdida estética o ética, sino una alteración profunda de los sistemas que garantizan la estabilidad climática, la productividad biológica y la salud global.

En este contexto, el concepto de límites planetarios nos recuerda que la humanidad opera dentro de un espacio biofísico finito. La transgresión de estos límites —en particular la integridad de la biosfera— no es una abstracción teórica, sino una realidad empíricamente documentada, con consecuencias potencialmente irreversibles.

Sin embargo, también hemos destacado que nos encontramos en un momento de extraordinaria capacidad científica y tecnológica. Las biotecnologías, en sus diversas formas, nos permiten no solo comprender la biodiversidad con una resolución sin precedentes, sino también intervenir de manera dirigida para su conservación y restauración. Desde la genómica de poblaciones hasta la edición génica, pasando por el análisis de ADN ambiental, la gestión de microbiomas, la bioprospección y la biología sintética, estas herramientas abren nuevas posibilidades para una conservación activa y basada en evidencia.

¿Con qué propósito y bajo qué principios utilizamos estas herramientas?

La respuesta nos conduce al concepto de bioeconomía. Una bioeconomía verdaderamente sostenible no puede limitarse a sustituir recursos fósiles por biológicos; debe basarse en la conservación de la biodiversidad como condición necesaria para su propia viabilidad. En este sentido, la biodiversidad deja de ser únicamente un recurso y pasa a ser un socio estratégico en los sistemas productivos del futuro.

De manera convergente, el enfoque One Health nos obliga a reconocer que la salud humana no puede entenderse de forma aislada. La emergencia de enfermedades infecciosas, la resistencia a los antimicrobianos y los desequilibrios metabólicos están profundamente vinculados a la degradación de los ecosistemas y a la pérdida de biodiversidad. La salud, en su sentido más amplio, es una propiedad emergente de sistemas ecológicos complejos.

Así, biodiversidad, biotecnología, bioeconomía y One Health no son dominios independientes, sino dimensiones interconectadas de un mismo sistema.

La síntesis de estas dimensiones nos sitúa ante un cambio de paradigma. Ya no es posible sostener una visión de la humanidad como entidad separada de la naturaleza. Por el contrario, debemos avanzar hacia una comprensión

relacional, en la que los sistemas humanos y naturales coevolucionan dentro de límites compartidos.

Este cambio implica, necesariamente, una transformación profunda en varios niveles científico, mediante la integración interdisciplinaria y el desarrollo de nuevos marcos conceptuales; tecnológico, mediante el uso responsable y orientado de las biotecnologías; económico, mediante la transición hacia modelos regenerativos; ético, mediante el reconocimiento del valor intrínseco de la biodiversidad; político, mediante la construcción de sistemas de gobernanza global coherentes y eficaces; y cultural, introduciendo una nueva narrativa sobre el lugar de la humanidad en la biosfera.

En última instancia, la pregunta no es si tenemos la capacidad de transformar nuestra relación con la naturaleza. La evidencia sugiere que sí la tenemos. La cuestión es si tenemos la voluntad colectiva de hacerlo en el tiempo disponible.

El futuro de la biodiversidad —y, con ella, el futuro de la humanidad— dependerá de nuestra capacidad para responder a este desafío con conocimiento, responsabilidad y visión de largo plazo.

Finalizo expresando, nuevamente, mi más profundo agradecimiento.

A los miembros de la Real Academia de Medicina de la Región de Murcia, por su amable invitación y por el honor que supone poder compartir estas reflexiones en esta ilustre institución. Su compromiso con el conocimiento, la excelencia y el servicio a la sociedad a través de la Medicina es un ejemplo para muchos.

Agradezco también muy sinceramente a todos los académicos, investigadores, y profesionales presentes, cuya labor cotidiana contribuye de manera decisiva al avance de la ciencia y a la mejora de la salud y el bienestar de nuestras sociedades.

Y, por supuesto, quero expresar mi profundo reconocimiento a los amigos presentes. Sin ellos, y sin mi familia, padres, hermanos e hijos, yo no hubiese llegado a nada de lo poco que soy, y no hubiese llegado a tener la oportunidad de dedicar mis esfuerzos y mi pensamiento a asuntos de interés humano global, en algunas de cuyas soluciones he tenido la suerte de participar activamente.

Muchas gracias a todas y a todos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys.* 2020;641:A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
2. Peebles PJE. *Principles of physical cosmology*. Princeton Univ Press; 1993.
3. Weinberg S. *The first three minutes*. Basic Books; 1993.
4. Dalrymple GB. *The age of the Earth*. Stanford Univ Press; 1991.
5. Dodd MS et al. Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vents. *Nature*. 2017;543:60–64. <https://doi.org/10.1038/nature21377>
6. Sutherland JD. The origin of life—out of the blue. *Angew Chem Int Ed*. 2016;55:104–121. <https://doi.org/10.1002/anie.201506585>
7. Knoll AH. *Life on a young planet*. Princeton Univ Press; 2003.
8. Oparin AI. *The origin of life*. Dover; 1938.
9. Haldane JBS. The origin of life. *Rationalist Annual*. 1929.
10. Miller SL. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*. 1953;117:528–529. <https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528>
11. Gilbert W. The RNA world. *Nature*. 1986;319:618. <https://doi.org/10.1038/319618a0>
12. Robertson MP, Joyce GF. The origins of the RNA world. *Cold Spring Harb Perspect Biol*. 2012;4:a003608. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a003608>
13. Crick F. Central dogma of molecular biology. *Nature*. 1970;227:561–563. <https://doi.org/10.1038/227561a0>
14. Woese CR. On the evolution of cells. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2002;99:8742–8747. <https://doi.org/10.1073/pnas.132266999>
15. Lynn Margulis. *Origin of eukaryotic cells*. Yale Univ Press; 1970.
16. Knoll AH. The multiple origins of complex multicellularity. *Annu Rev Earth Planet Sci*. 2011;39:217–239. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100209>
17. Bambach RK. Phanerozoic biodiversity mass extinctions. *Annu Rev Earth Planet Sci*. 2006;34:127–155. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122654>

18. Erwin DH. Extinction: how life nearly died 250 million years ago. Princeton Univ Press; 2006.
19. Burgess SD et al. High-precision timeline for Earth's most severe extinction. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2014;111:3316–3321. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317692111>
20. Schulte P et al. The Chicxulub asteroid impact. *Science*. 2010;327:1214–1218. <https://doi.org/10.1126/science.1177265>
21. Pimm SL et al. The biodiversity of species and their rates of extinction. *Science*. 2014;344:1246752. <https://doi.org/10.1126/science.1246752>
22. Ceballos G et al. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2017;114:E6089–E6096. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114>
23. Ceballos G et al. Mutilation of the tree of life. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2023;120:e2306987120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2306987120>
24. IUCN. Red List of Threatened Species. 2024.
25. Roser M et al. Our World in Data: Extinctions dataset. 2024.
26. Díaz S et al. IPBES Global Assessment. 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
27. WWF. Living Planet Report. 2022.
28. IPBES. Summary for policymakers. 2019.
29. Régnier C et al. Not knowing, not recording, not listing. *Conserv Biol*. 2009;23:1214–1221. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01245.x>
30. Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, et al. Global consequences of land use. *Science*. 2005;309:570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
31. IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
32. Ellis EC, Ramankutty N. Putting people in the map: anthropogenic biomes. *Front Ecol Environ*. 2008;6:439–447. <https://doi.org/10.1890/070062>
33. Haddad NM, Brudvig LA, Clobert J, Davies KF, Gonzalez A, Holt RD, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on ecosystems. *Sci Adv*. 2015;1:e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
34. Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to climate change.

- Annu Rev Ecol Evol Syst. 2006;37:637–669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
35. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
 36. Hughes TP, Kerry JT, Álvarez-Noriega M, Álvarez-Romero JG, Anderson KD, Baird AH, et al. Global warming and recurrent coral bleaching. *Nature*. 2017;543:373–377. <https://doi.org/10.1038/nature21707>
 37. Worm B, Hilborn R, Baum JK, Branch TA, Collie JS, Costello C, et al. Rebuilding global fisheries. *Science*. 2009;325:578–585. <https://doi.org/10.1126/science.1173146>
 38. Pauly D, Christensen V, Guénette S, Pitcher TJ, Sumaila UR, Walters CJ, et al. Towards sustainability in world fisheries. *Nature*. 2002;418:689–695. <https://doi.org/10.1038/nature01017>
 39. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of plastics. *Sci Adv*. 2017;3:e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
 40. Rochman CM, Browne MA, Halpern BS, Hentschel BT, Hoh E, Karapanagioti HK, et al. Policy: classify plastic waste as hazardous. *Nature*. 2013;494:169–171. <https://doi.org/10.1038/494169a>
 41. Simberloff D, Martin JL, Genovesi P, Maris V, Wardle DA, Aronson J, et al. Impacts of biological invasions. *Trends Ecol Evol*. 2013;28:58–66. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.07.013>
 42. Bellard C, Cassey P, Blackburn TM. Alien species as drivers of extinctions. *Biol Lett*. 2016;12:20150623. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0623>
 43. Estes JA, Terborgh J, Brashares JS, Power ME, Berger J, Bond WJ, et al. Trophic downgrading of planet Earth. *Science*. 2011;333:301–306. <https://doi.org/10.1126/science.1205106>
 44. Díaz S, Settele J, Brondízio ES, Ngo HT, Guèze M, Agard J, et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth. *Science*. 2019;366:eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
 45. Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, et al. Planetary boundaries. *Science*. 2015;347:1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
 46. Shepard GH. Evolutionary approaches to human–environment

- interactions. *Annu Rev Anthropol.* 2004;33:377–402. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.33.070203.144032>
47. Descola P. *Beyond nature and culture.* Chicago: University of Chicago Press; 2013.
 48. Díaz S, Demissew S, Carabias J, Joly C, Lonsdale M, Ash N, et al. The IPBES conceptual framework. *Curr Opin Environ Sustain.* 2015;14:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
 49. Clayton S, Myers G. *Conservation psychology: understanding and promoting human care for nature.* 2nd ed. Wiley-Blackwell; 2015.
 50. Lennox JG. *Aristotle’s philosophy of biology.* Cambridge: Cambridge University Press; 2001.
 51. Merchant C. *The death of nature: women, ecology, and the scientific revolution.* HarperOne; 1980.
 52. Steffen W, Crutzen PJ, McNeill JR. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature? *Ambio.* 2007;36:614–621. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2)
 53. Folke C, Biggs R, Norström AV, Reyers B, Rockström J. Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecol Soc.* 2016;21(3):41. <https://doi.org/10.5751/ES-08748-210341>
 54. Fisher RA. *The genetical theory of natural selection.* Oxford: Clarendon Press; 1930.
 55. Sarkar S. Origin of the term biodiversity. *BioScience.* 2021.
 56. Wilson EO. *Biodiversity.* Washington DC: National Academy Press; 1988.
 57. National Research Council. *Perspectives on biodiversity: valuing its role in an everchanging world.* Washington DC: National Academies Press; 1999.
 58. Faith DP. Biodiversity and conservation planning. *Conserv Biol.* 2021.
 59. *Convention on Biological Diversity.* United Nations; 1992.
 60. Díaz S, Pascual U, Stenseke M, et al. Assessing nature’s contributions to people. *Science.* 2018;359:270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
 61. IPBES. *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services.* 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

62. Dasgupta P. *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. HM Treasury; 2021.
63. Mitchell EAD, et al. The hidden diversity of microbial life: implications for biodiversity assessments. *Nat Rev Microbiol*. 2021;19:564–577. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00542-5>
64. Falkowski PG, Fenchel T, Delong EF. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science*. 2008;320:1034–1039. <https://doi.org/10.1126/science.1153213>
65. Locey KJ, Lennon JT. Scaling laws predict global microbial diversity. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2016;113:5970–5975. <https://doi.org/10.1073/pnas.1521291113>
66. Azam F, Malfatti F. Microbial structuring of marine ecosystems. *Nat Rev Microbiol*. 2007;5:782–791. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1746>
67. Gilbert JA, Jansson JK, Knight R. The Earth Microbiome Project: successes and aspirations. *BMC Biol*. 2014;12:69. <https://doi.org/10.1186/s12915-014-0069-1>
68. Redman CL. Human impact on ancient environments. *Annu Rev Anthropol*. 2005;34:429–447. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.34.081804.120437>
69. IPBES. *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
70. Díaz S, Pascual U, Stenseke M, et al. Assessing nature's contributions to people. *Science*. 2018;359:270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
71. Smith P, Gregory PJ, van Vuuren D, et al. How food security and climate change are linked. *Glob Change Biol*. 2021;27:358–373. <https://doi.org/10.1111/gcb.15433>
72. Gavin MC, McCarter J, Mead A, et al. Defining biocultural approaches to conservation. *Trends Ecol Evol*. 2015;30:140–145. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.12.005>
73. Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*. 2015;347(6223):1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

74. Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin FS III, Lambin EF, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*. 2009;461:472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
75. Rockström J, Steffen W, et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecol Soc*. 2009;14(2):32. <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>
76. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). *The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda*. Paris: OECD Publishing; 2009.
77. European Commission. *A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment*. Brussels: European Commission; 2018.
78. Georgescu-Roegen N. *The entropy law and the economic process*. Cambridge (MA): Harvard University Press; 1971.
79. Della Corte V, Zamparelli G, Micera R. Innovation in the bioeconomy: evidence from biotechnology and agricultural systems. *J Clean Prod*. 2021;321:128984. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128984>
80. Long D, De Meyer A, Miao R, Owsianiak M, Hauschild MZ. Bio-based products and climate change mitigation. *Nat Clim Chang*. 2021;11:860–865. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01131-5>
81. OECD. *The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda*. Paris: OECD Publishing; 2009.
82. Watson JD, Crick FHC. Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*. 1953;171:737–738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>
83. Berg P, Baltimore D, Boyer HW, Cohen SN, Davis RW, Hogness DS, et al. Potential biohazards of recombinant DNA molecules. *Science*. 1974;185(4148):303–309. <https://doi.org/10.1126/science.185.4148.303>
84. Doudna JA, Charpentier E. The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*. 2014;346(6213):1258096. <https://doi.org/10.1126/science.1258096>
85. Kitney R, Freemont P. Synthetic biology—the state of play. *FEBS Lett*. 2022;596(15):1995–2008. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.14444>

86. Qaim M. Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agriculture. *Annu Rev Resour Econ.* 2020;12:317–340. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-094149>
87. Chavarría-Hernández N, Chavarría-Hernández N, Espinoza-Sánchez EA. Industrial biotechnology: opportunities and challenges in a circular bioeconomy. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:870123. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.870123>
88. Harrison RL, Koyama AK, Frick WF, et al. Microbial biodiversity as a source of novel bioactive compounds: prospects and challenges. *Nat Rev Microbiol.* 2023;21:345–360. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00783-2>
89. Newman DJ, Cragg GM. Natural products as sources of new drugs over the nearly four decades from 1981 to 2022. *J Nat Prod.* 2023;86(3):492–523. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.2c00981>
90. Thomsen PF, Willerslev E. Environmental DNA – an emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity. *Biol Conserv.* 2020;248:108651. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108651>
91. Comizzoli P, Holt WV. Breakthroughs and new horizons in wildlife conservation biology: reproductive sciences for preserving species. *Nat Rev Genet.* 2021;22:559–573. <https://doi.org/10.1038/s41576-021-00373-4>
92. Jinek M, Chylinski K, Fonfara I, et al. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science.* 2012;337(6096):816–821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
93. Scheben A, Edwards D. Toward a more sustainable agriculture: improving crop genetic diversity and resilience using genomics. *Trends Plant Sci.* 2022;27(4):346–358. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.10.010>
94. Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson SJ, Kubiszewski I, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Glob Environ Chang.* 2021;70:102387. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102387>
95. Hess MC, Kafle P, Bärlocher F. Biodiversity as a driver of bioeconomy innovation: linking ecosystems and industrial biotechnology. *Trends Biotechnol.* 2022;40(9):1023–1035. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.02.004>

96. IPBES. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. *Sci Policy Biodivers Ecosyst Serv*. 2019;1–39. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
97. Díaz S, Pascual U, Stenseke M, et al. Assessing nature’s contributions to people. *Science*. 2018;359(6373):270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
98. Lehtonen H, Kujala H, Mäkinen H. Biodiversity-based bioeconomy transitions and sustainability trade-offs. *Environ Sci Policy*. 2023;147:42–52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.03.006>
99. Destoumieux-Garzón D, Matheron S, Capone D, et al. The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. *Front Vet Sci*. 2021;8:651766. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.651766>
100. Lebov J, Grieger K, Womack D, Zaccaro D, Whitehead N, Kowalczyk B, et al. A framework for One Health research. *One Health*. 2017;3:44–50. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2017.03.004>
101. Plowright RK, Parrish CR, McCallum H, et al. Pathways to zoonotic spillover. *Nat Rev Microbiol*. 2017;15:502–510. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.45>
102. Keesing F, Belden LK, Daszak P, et al. Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature*. 2010;468:647–652. <https://doi.org/10.1038/nature09575>
103. Allen T, Murray KA, Zambrana-Torrelío C, et al. Global hotspots and correlates of emerging zoonotic diseases. *Nat Commun*. 2017;8:1124. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00923-8>
104. Lloyd-Price J, Abu-Ali G, Huttenhower C. The healthy human microbiome. *Genome Med*. 2016;8:51. <https://doi.org/10.1186/s13073-016-0307-y>
105. Van Boeckel TP, Brower C, Gilbert M, et al. Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2015;112(18):5649–5654. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112>
106. Taberlet P, Bonin A, Zinger L, Coissac E. Environmental DNA: For biodiversity research and monitoring. *Nat Rev Genet*. 2023;24(2):85-101.
107. Christin S, Hervet É, Lecomte N. Applications for deep learning in ecology and evolution. *Methods Ecol Evol*. 2023;14(1):23-38.

108. Critchlow RE, et al. Assisted reproductive technologies and conservation biology: emerging tools for biodiversity preservation. *Trends Ecol Evol.* 2022;37(9):789-802.
109. Hennig BP, et al. CRISPR-based genome editing for conservation applications. *Trends Biotechnol.* 2022;40(11):1250-1264.
110. Pichler M, et al. Synthetic biology for ecosystem restoration and environmental sustainability. *Nat Ecol Evol.* 2023;7:456-468.
111. D'Amato D, Droste N, Allen B, et al. Green, circular, bio economy: a comparative analysis of sustainability frameworks. *Renew Sustain Energy Rev.* 2022;157:112038.
112. Destoumieux-Garzón D, et al. The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. *Nat Commun.* 2023;14:2150.
113. Singer AC, Shaw H, Rhodes V, Hart A. Review of antimicrobial resistance in agricultural systems and One Health implications. *Science.* 2023;381(6653):eabm3233.

