

**40a UNIVERSITAT  
D'ESTIU I TARDOR  
D'ANDORRA 2024**

# HUMANITAT I EVOLUCIÓ DE LA VIDA



Govern d'Andorra

© Govern d'Andorra  
Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats  
Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra

Dipòsit legal: AND.601-2024  
ISBN:978-99920-82-11-9

Disseny de la coberta i maquetació: A-Tracció-A

**Per citar aquesta publicació / Para citar esta publicación / Pour citer cette publication :**

Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra (40a : 16, 17, 23, 24 set. 2024: Andorra la Vella). *Humanitat i evolució de la vida = Humanidad y evolución de la vida = Humanité et évolution de la vie*. [en línia]. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats. Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, 2024 (978-99920-82-11-9)  
<<http://www.universitatestiutardor.ad/UEA2024>>

SUMARI / SUMARIO / SOMMAIRE / SUMMARY

**Discurs d'obertura** 4

**Claves esenciales de la evolución humana** 6

José María Bermúdez de Castro

**L'humanité face aux limites de la planète** 19

Frédérique Chlous

**Els humans moderns, present i futur** 36

Salvador Macip

**Humanidad y universo: parámetros para la vida y la exploración** 44

Carlos Briones

**Conclusiones • Humanidad y evolución de la vida** 53

José María Bermúdez de Castro

**Discurs de cloenda** 58

# DISCURS D'OBERTURA

*Sessió del 16 de setembre del 2024*

Distingides autoritats,

Senyores i senyors,

Avui tinc l'honor d'inaugurar la quarantena edició de la Universitat d'Estiu i de Tardor d'Andorra, un dels fòrums de debat i reflexió més importants que se celebren al nostre país. El 1982, la historiadora i pedagoga Lídia Armengol, una de les dones que més ens han ensenyat sobre com defensar i consolidar la nostra identitat des de l'estima, la passió i el rigor, va crear aquest fòrum amb la voluntat d'analitzar temes d'actualitat, gràcies a l'expertesa dels participants i des d'una perspectiva pluridisciplinària i transversal. Un fòrum que ha anat incorporant nous formats amb la voluntat d'ampliar les possibilitats de participació i de difusió.

Al llarg d'aquestes quatre dècades d'història, la Universitat d'Estiu i de Tardor ha comptat amb la participació de destacats representants dels àmbits científic, acadèmic i cultural. L'equilibri entre els diferents perfils professionals, sectors i posicions ideològiques, sempre ha afavorit una anàlisi i reflexió d'ampli espectre sobre el tema escollit, aportant un caràcter dinàmic, il·lustratiu i controvertit.

Quan repassem aquesta història també és inevitable tenir un record per José Luís Sampedro, perquè la Universitat d'Estiu i de Tardor sempre estarà lligada a la seva persona. Sampedro va presidir aquest fòrum durant deu anys, a través dels quals va deixar empremta del seu humanisme i del seu inconformisme i ens va permetre aproximar-nos a un escriptor que va fer de la paraula alguna cosa més que la mateixa eina de l'ofici.

Són molts altres els intel·lectuals que han pres part en aquesta Universitat, que formen part de la seva història i que han ajudat, sense cap mena de dubte, a prestigiar-la.

Senyores i senyors,

“Humanitat i evolució de la vida” és la temàtica al voltant de la qual versarà la quarantena edició, amb la participació de José María Bermúdez de Castro, Frédérique Chlous, Salvador Macip i Carlos Briones, quatre reputats investigadors que de ben segur ens aportaran més lucidesa i ens ajudaran a relativitzar una de les qüestions més fonamentals, complexes i que més han preocupat l'ésser humà des de l'inici de la història. Una preocupació que tradicionalment ha estat més promoguda per la filosofia i les religions que no pas per la ciència en si. Sigui com sigui, al llarg d'aquestes jornades tindrem l'ocasió d'aprofundir en el treball d'aquests experts.

L'any 2011 el director de cinema Terrence Malick, amb *L'arbre de la vida*, ens ofería una visió molt personal sobre la creació, els vincles entre els éssers humans, la vida, la mort, el temps o la compassió, i el reflex de la dualitat existent i persistent entre la ciència i la fe. Ho feia a partir dels ulls i els sentiments d'un nen en ple creixement en el si d'una família creient i típicament americana durant l'època d'Eisenhower.

I faig referència a aquest llargmetratge de Malick perquè l'encarregat d'obrir aquesta edició, el senyor José María Bermúdez de Castro, ens recorda la complexitat i la imbricació de la nostra evolució amb llinatges propers en el que s'ha anomenat sovint *l'arbre de la vida*. Ell ho fa des d'una visió antropològica de com els humans i el seu llegat genètic ens donen una nova perspectiva i ens obliga a analitzar la nostra especificitat.

I amb la conferència del paleoantropòleg, excodirector de les excavacions dels jaciments de la serra d'Atapuerca, director del Centre Nacional d'Investigació sobre l'Evolució Humana, covicepresident de la Fundació Atapuerca i membre de la Reial Acadèmia Espanyola, avui donem el tret de sortida a la quarantena edició de la Universitat d'Estiu i de Tardor d'Andorra, que ens exalta el plaer de conèixer i de comprendre, de compartir i de confrontar i de transitar pels senders del saber.

Moltes gràcies!

Xavier Espot Zamora  
Cap de Govern

40a UNIVERSITAT D'ESTIU I TARDOR D'ANDORRA

*Sessió del 16 de setembre del 2024*

## CLAVES ESENCIALES DE LA EVOLUCIÓN HUMANA

José María Bermúdez de Castro

Paleoantropòleg, codirector de les excavacions dels jaciments de la serra d'Atapuerca (1991-2024),  
director del Centre Nacional d'Investigació sobre l'Evolució Humana (2004-2012), actualment membre *ad Honorem*.  
Covicepresident de la Fundació Atapuerca i membre de la Reial Acadèmia Espanyola (silló K).

Paleoantropólogo, codirector de las excavaciones de los yacimientos de la sierra de Atapuerca (1991-2024),  
director del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (2004-2012), actualmente miembro *ad Honorem*.  
Covicepresidente de la Fundación Atapuerca y miembro de la Real Academia Española (sillón K).

Paléanthropologue, codirecteur des fouilles des sites de la Sierra de Atapuerca (1991-2024),  
directeur du Centre national de Recherche sur l'Évolution Humaine (2004-2012), actuellement membre *ad Honorem*.  
Coviceprésident de la Fondation Atapuerca et membre de l'Académie Royale Espagnole (fauteuil K).

Distinguidas autoridades,

Estimadas organizadoras de este evento,

Señoras y señores,

Es un placer estar aquí con ustedes esta tarde y agradezco de corazón a las personas que han organizado este evento su gentileza por invitarme a participar como ponente y moderador.

Mi objetivo en esta ponencia es mostrarles los cambios biológicos experimentados por nuestros ancestros desde hace entre 9 y 6 millones de años, a finales del Mioceno<sup>1</sup>, cuando nuestra genealogía<sup>2</sup> se separó definitivamente de la genealogía de los chimpancés y los bonobos. Los genetistas han realizado la estimación temporal de esta divergencia evolutiva gracias a que ya se conocen relativamente bien tanto el genoma humano como el de los chimpancés, así como la tasa de mutación para nuestra especie, que se ha calculado en aproximadamente de 1 por cada 100 millones de pares de bases por generación. A pesar del tiempo transcurrido desde nuestra divergencia, los chimpancés actuales (*Pan troglodytes*), los bonobos (*Pan paniscus*) y *Homo sapiens* todavía compartimos una proporción muy alta de nuestros genes operativos, cercana al 99 %. En esa diferencia, que en absoluto es despreciable, es donde podemos

---

1 Época de la escala temporal geológica que formalmente comenzó hace 23 millones de años y finalizó hace 5 millones de años.

2 *El Diccionario de la Lengua Española* (DLE) define «genealogía» como el conjunto de los antepasados de una persona o animal. Por extensión, este término y el de «linaje» (ascendencia o descendencia de una familia, especialmente noble), se emplean con frecuencia —tanto en lengua inglesa como en lengua española— para referirnos al conjunto de las especies que han precedido a las especies vivas y que tienen con ellas una relación de parentesco.

encontrar los cambios biológicos esenciales que nos han llevado a ser lo que somos en la actualidad. Sin embargo, cuando a lo largo de estas páginas examinemos las claves de nuestra evolución, no debemos olvidar que somos primates con un gran parecido a los chimpancés y los bonobos, y que compartimos con ellos no solo aspectos anatómicos muy obvios, sino también una parte sustancial del comportamiento: territorialidad, tribalismo, jerarquía...

Tanto los chimpancés y los bonobos como los seres humanos y todos nuestros ancestros somos omnívoros. Se trata de una adaptación trascendental, puesto que somos capaces de digerir tanto los alimentos de origen animal como los de origen vegetal. Esta adaptación nos ha permitido colonizar todos aquellos lugares del planeta en los que las condiciones climáticas lo permitían. La posibilidad de comer de todo ha sido la clave de nuestra distribución cosmopolita, un hecho que se completó hace tan solo unos 20 000 años, cuando nuestra especie se expandió y ocupó la mayor parte de las tierras emergidas.

## Nuestro origen geográfico

No existe ninguna duda de que nuestro origen es africano. Lejos quedan las previsiones del naturalista y filósofo alemán Ernst H.P.A. Haeckel, cuando a finales del siglo XIX postulaba la existencia de un eslabón perdido entre los orangutanes y *Homo sapiens*. El hallazgo en la década de 1920 de un ejemplar inmaduro de la especie *Australopithecus africanus* en la cantera de Taung (Sudáfrica), estudiado por el médico Raymond Dart, aclaró definitivamente que tendríamos que buscar nuestro origen en África. Sin embargo, y a pesar de la insistencia de los paleontólogos, apenas se ha

encontrado un puñado de restos fósiles con dataciones próximas a la divergencia de las dos genealogías. Esos restos sugieren que los primeros representantes de la genealogía humana eran bípedos y caminaban erguidos. Pero las evidencias son escasas y, en ocasiones, controvertidas.

## Bipedismo y postura erguida

En 1994, los investigadores Timothy White, Gen Suwa y Berhane Asfaw definieron y nombraron la especie *Ardipithecus ramidus*, gracias al hallazgo en una región del estado actual de Etiopía de restos fósiles de homínidos<sup>3</sup> datados entre 4,5 y 4,1 millones de años. El nombre de la especie, *ramidus*, procede de la lengua amárica hablada en esa región de Etiopía y significa «raíz». En 2009, se publicó el hallazgo de numerosos restos de esta especie, pertenecientes posiblemente a una hembra a la que apodaron Ardi. Este ejemplar demostraba de manera incontestable que la especie era bípeda y había caminado perfectamente erguida. La morfología de su pelvis es claramente la de un primate bípedo, muy alejada de la forma de las pelvis de los mamíferos cuadrúpedos. A pesar de ello, Ardi presentaba todavía adaptaciones a la vida arborícola, en consonancia con las condiciones ambientales derivadas del estudio del ecosistema en el que vivió la especie *Ardipithecus ramidus*. Ardi habitó en una región que, por aquella época, era muy húmeda y estaba

---

<sup>3</sup> Todos nuestros ancestros y los de los chimpancés y bonobos se incluyen en la actualidad en la tribu de los homínidos (*Hominina*), que se encuadra en la subfamilia *Homininae* (ancestros de gorilas, chimpancés, bonobos y seres humanos) y de la familia Hominidae, que integra también a las diferentes especies de orangutanes.

cubierta de bosques. Las extremidades superiores eran relativamente largas con respecto a las inferiores, y el pulgar de los pies estaba separado de los demás dedos formando con ellos un ángulo recto. Ardi posiblemente no era una buena corredora, ni habría caminado durante largas distancias y seguramente se manejaba mucho mejor entre las ramas de los árboles de su hábitat. Por otro lado, su estatura apenas superaba los 120 centímetros, pesaba unos 50 kilogramos y su cerebro no tenía más de 350 centímetros cúbicos. Además, sus caninos —y los de los machos de la especie— se habían reducido de tamaño y la altura de la corona de estos dientes apenas superaba a la de los incisivos. En 2001, el investigador Yohannes Haile-Sellasie encontró en Etiopía los restos de otra especie de homínido, a la que denominó *Ardipithecus kadabba*, cuya antigüedad se cifraba entre 5,8 y 5,2 millones de años. Los restos hallados fueron escasos pero suficientes para saber que esta especie también era bípeda, caminaba en posición erguida y posiblemente estaba emparentada con *Ardipithecus ramidus*. A pesar de que algunos investigadores han tratado de relacionar las dos especies de *Ardipithecus* con la genealogía de los chimpancés, los autores de los hallazgos han mostrado evidencias muy consistentes de que estos fósiles representan a las especies conocidas más cercanas a nuestro ancestro común con estos simios antropoideos. En definitiva, nuestra primera adaptación diferencial fue la bipedestación. Esta forma de desplazamiento, por consiguiente, nada tiene que ver con nuestra vida en la sabana fuera de la cobertura de los árboles, como se ha venido insistiendo durante años. Ahora sabemos que la bipedestación se forjó probablemente tras la divergencia de las dos genealogías y ocurrió cuando todavía vivíamos en ambientes cerrados. Las razones de esta adaptación, si es que hubo realmente alguna presión selectiva para ello, siguen todavía en el terreno de la especulación.



Hace entre 4 y 3 millones de años, nuestros ancestros apenas experimentaron cambios morfológicos significativos con respecto a las especies del género *Ardipithecus*. El clima global del planeta se estaba enfriando y en África retrocedían los bosques. Las especies de la genealogía humana empezaron a conseguir nuevas adaptaciones en su aparato locomotor. Había que caminar largas distancias para obtener alimento, que en el bosque es mucho más predecible. Las especies del género *Australopithecus*, que vivieron en el sur y en el este de África, nos muestran que el pulgar de los pies ya se había alineado con los demás dedos formando una planta cada vez más similar a la nuestra. Las huellas de pisadas fosilizadas en un lodo de origen volcánico encontradas en el yacimiento de Laetoli, en Tanzania y datadas de 3,7 millones de años, testimonian de manera muy clara la morfología tan «humana» del pie de la especie *Australopithecus afarensis*. Por descontado, los restos de las pelvis conservadas demuestran de manera fehaciente su posición perfectamente erguida y su bipedestación, aunque sus extremidades superiores seguían siendo relativamente largas en relación con la longitud de las extremidades inferiores. Además, el cerebro de las especies del género *Australopithecus* experimentó un incremento moderado, que llegó hasta los 450 centímetros cúbicos, similar al de chimpancés y bonobos.

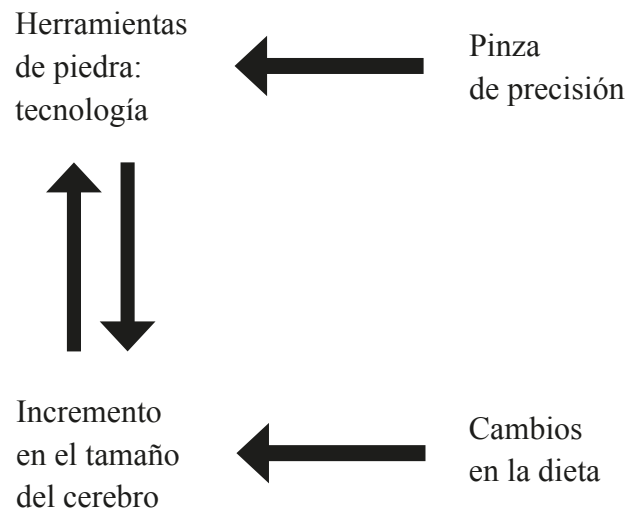
## **Cambios en el clima y nuevas adaptaciones: la cultura**

El clima global del planeta continuó su enfriamiento progresivo. Si hace 5 millones de años la temperatura global de la superficie de la Tierra era de unos 17 grados centígrados, hace 3 millones años se

estima que esa temperatura había descendido hasta los 14 grados y aún retrocedió otro grado más durante el siguiente millón de años. Esos cambios fueron suficientes para que los bosques africanos quedaran relegados a las regiones más occidentales de África, donde prosperaron las respectivas genealogías de gorilas, chimpancés y bonobos, mientras que en el sur y el este de África se extendieron las sabanas. En este nuevo ambiente, nuestros ancestros lograron cambios muy notables con respecto a los homínidos anteriores. La longitud de los dedos de la mano cambió de manera significativa. En particular, el pulgar creció de tamaño y adquirió una musculatura más potente. Esos cambios permitieron que los dedos índice y pulgar fueran perfectamente oponibles y formaran lo que se denomina la «pinza de precisión». En las cuatro extremidades de los simios antropoideos persiste la llamada pinza de presión o de agarre, que faculta a estos primates a trepar con facilidad aferrándose con fuerza a las ramas de los árboles. Nuestros ancestros perdieron esa posibilidad, pero ganaron en la precisión de coger piedras y palos y transformarlos en sus herramientas: había nacido la cultura.

Los yacimientos africanos datados entre 2,7 y 2 millones de años contienen acumulaciones tanto de herramientas de piedra de una configuración arcaica como de restos óseos de vertebrados, que muestran los estigmas del uso de esas herramientas. La carne de los animales podía cortarse con cantos afilados, que dejaban marcas de los cuchillos de piedra, y el tuétano se obtenía tras la rotura a golpes de las diáfisis de los huesos. El menú estaba cambiando, porque el medio ambiente así lo requería. La dieta casi vegetariana de los bosques dejó paso a una dieta más carnívora. Como dije antes, siempre hemos sido omnívoros y ese cambio no supuso ningún problema para nuestra evolución. Se ha discutido hasta la saciedad si nuestros ancestros de hace 2 millones de años fueron carroñeros

o cazadores. El debate surgió por el hecho de que aquellas especies tenían una estatura baja —quizá no superior a 150 centímetros— y ya no disponían de largos caninos para atacar a sus presas o defenderse de sus posibles predadores. Sin embargo, en favor de la caza se puede esgrimir una explicación razonable: los homínidos de entonces mejoramos nuestra sociabilidad y nuestra organización. Aquellas especies de baja estatura pudieron organizarse de manera que podían cazar presas de un tamaño mediano, tal vez empleando herramientas de piedra y madera, así como la mejor «herramienta biológica» posible: su cerebro.



## Y el cerebro empezó a crecer

Hace entre 2,5 y 2 millones de años, el registro fósil de nuestros ancestros nos ofrece evidencias de un incremento aproximado del

tamaño del cerebro del 60 % con respecto a las especies de *Australopithecus*. Estaba surgiendo un nuevo género: *Homo*, al que pertenecemos nosotros. En la especie *Homo habilis*, nombrada en 1964 por Richard Leakey, Phileas Tobias y John Napier en la revista *Science*, el tamaño del cerebro alcanzó 650 centímetros cúbicos y tal vez una mayor complejidad. En mi opinión, la necesidad de una mejor organización y la innovación que suponía la transformación de la materia prima para fabricar herramientas fueron las presiones selectivas que empujaron el tamaño y la complejidad del cerebro, que continuó su expansión exponencial en los dos últimos millones de años hasta valores que en *Homo neanderthalensis* alcanzaron un promedio de hasta 1500 centímetros cúbicos y de unos 1350 centímetros cúbicos en *Homo sapiens*.

La tasa de crecimiento del cerebro de nuestra especie es muy superior a la de *Pan paniscus* y *Pan troglodytes*. Por ejemplo, en la semana 32 de gestación el cerebro de los chimpancés crece aproximadamente 4 centímetros cúbicos por semana, mientras que el cerebro de un feto humano crece a una tasa de 25 centímetros cúbicos por semana. Tras el parto, la velocidad de crecimiento del cerebro de los chimpancés desciende poco a poco durante los dos primeros años de vida. Hacia los seis años, su cerebro alcanza casi el tamaño final del adulto. En nuestra especie, el cerebro sigue creciendo a gran velocidad durante los tres primeros meses de vida, para iniciar luego un descenso progresivo hasta que se logra el tamaño final de este órgano. Como sucede en los chimpancés, el cerebro humano también alcanza su tamaño definitivo hacia los seis o siete años, así que nuestras diferencias con los chimpancés consisten en crecer más deprisa durante el mismo tiempo. No parece necesario invocar el concurso de muchos genes para lograr ese objetivo de nuestra biología. El aumento en la velocidad de crecimiento del cerebro

comenzó en nuestra genealogía hace algo más de 2,5 millones de años y experimentó una aceleración durante el último millón de años, que interesó a varias especies del género *Homo*, como los propios neandertales.

## Un cerebro que demora su pleno desarrollo

A pesar del gran tamaño del cerebro de *Homo sapiens*, todos sabemos que el cerebro de un neonato humano no está preparado para coordinar movimientos complejos, para distinguir con claridad los objetos o para realizar cualquiera de las habilidades cognitivas que iremos adquiriendo con el transcurso de los años. En 1969, Adolf Portman acuñó el término «altricialidad secundaria» para definir el estado de indefensión de los seres humanos al nacer. Los recién nacidos de otras especies de mamíferos también nacen muy desvalidos, pero no tardan en cuidarse por sí mismos de muchos de los peligros que les acechan. Hacia el tercer mes de vida, los pequeños chimpancés ya corren, gritan y juegan con otros especímenes de su misma edad, aunque no se alejen de sus madres. Su altricialidad se considera «primaria» frente a la precocidad de los neonatos de otros vertebrados. Los seres humanos nacemos con cien mil millones de neuronas ( $10^{11}$ ), cada una de ellas con unas 2500 conexiones o sinapsis, cifras difíciles de manejar sin el entrenamiento de la mente de los matemáticos. Las conexiones seguirán produciéndose a una velocidad vertiginosa, especialmente durante los primeros años de vida. También existen etapas de nuestro desarrollo en las que se produce lo que se denomina «poda sináptica», consistente en eliminar aquellas conexiones que ya han cumplido su misión y son innecesarias. Por supuesto, todo este proceso está

regulado genéticamente. Al nacer y en los primeros meses y años de vida, los pequeños chimpancés tienen suficientes conexiones para realizar funciones, que nosotros iremos consiguiendo con el paso del tiempo y que claramente iremos mejorando. Obviamente, este proceso evolutivo se desconoce en las especies fósiles porque no disponemos de sus cerebros, pero es evidente que las especies más recientes, como *Homo erectus*, *Homo heidelbergensis*, *Homo antecessor*, etc., tuvieron un desarrollo sináptico diferente al de los ardipteos o los australopiteos y más próximo al nuestro.

Por otro lado, las fibras largas de las neuronas se cubren a lo largo del desarrollo por una vaina de mielina. Se trata de una sustancia lipoproteica que producen ciertas células especializadas: los oligodendrocitos y las células de Schwann. Aunque no vamos a entrar en la compleja composición química de la mielina, quizá convenga recordar que su color blanquecino ha dado lugar a la coloquial expresión de «sustancia blanca» del cerebro. Además, la mielina tiene un papel importantísimo en la protección y el aislamiento de las fibras largas de las neuronas, así como en la velocidad de conducción de los impulsos nerviosos. Cuando las fibras largas de las neuronas completan su proceso de mielinización, la velocidad en la conducción del impulso nervioso se multiplica por cien. En los chimpancés y los bonobos el proceso de mielinización comienza antes del parto y se prolonga hasta incluso después de la madurez sexual, el momento en el que el cerebro de estos primates alcanza su mayor potencial. Una de las características de nuestra especie es la ralentización del proceso de formación de mielina, que empieza a formarse después del nacimiento. Los últimos datos publicados por especialistas mediante análisis histológicos e imágenes obtenidas por resonancia magnética indican que el proceso de formación de mielina no termina hasta el final de la tercera década de la vida, la edad aproximada en la que nuestro cerebro alcanza todo

su potencial. Además, se sabe que el proceso de mielinización y la conectividad (sinaptogénesis) son procesos relacionados y con toda seguridad regulados genéticamente.

El desarrollo del cerebro humano es cuando menos paradójico. Nuestro gran retraso en la madurez de este órgano nos deja a merced de los retos que surgen a lo largo de la vida. Sin embargo, un cerebro que madura con lentitud es capaz de recibir y almacenar mayor cantidad de información. Cada estímulo producido por los factores ambientales implica riqueza informativa para el funcionamiento del cerebro y de la mente, aun en edades avanzadas. Nuestro cerebro ha evolucionado precisamente para enriquecerse de datos y responder de manera óptima a los estímulos del medio. Esos estímulos provocan millones de conexiones entre todas las neuronas e incrementan las posibilidades de nuestras habilidades cognitivas individuales. El retraso en la protección de los axones puede provocar ciertas enfermedades mentales en los adolescentes, como la esquizofrenia. Pero ese retraso tiene un efecto muy positivo en la mayor parte de la población. Daniel J. Miller (Universidad George Washington) y sus colaboradores llegaron hace poco menos de tres años a estas conclusiones, que se publicaron en la revista de la Academia de Ciencias de Estados Unidos<sup>4</sup>.

También es interesante destacar que el proceso de mielinización progresa desde la parte ventral del cerebro, donde se ubican regiones del sistema límbico, hasta la parte dorsal (neocórtex cerebral), y desde la parte posterior del neocórtex hasta su parte anterior. La región occipital del neocórtex, relacionado con aspectos de la visión,

madura con gran rapidez. Lo mismo sucede con las regiones relacionadas con las habilidades motoras. La formación de mielina en estas regiones es rápida y se adelanta de manera significativa con respecto a la región prefrontal (también llamada frontopolar), donde residen funciones tan importantes como la capacidad de atención, la toma de decisiones, la planificación, la inhibición de la impulsividad y el autocontrol, la memoria de trabajo o una mejor perspectiva para afrontar determinadas situaciones, incluidas por supuesto las que nos genera el entorno social. En definitiva, tamaño y complejidad son dos aspectos de nuestro cerebro que no progresan a la par. El tamaño final precede en nada menos que 25 años a la máxima complejidad del cerebro.

El cerebro humano no podría crecer en tiempos venideros sin comprometer aún más el futuro de nuestra especie. Cuanto mayor sea este órgano, mayores serán sus necesidades energéticas —lo veremos enseguida—, y no estamos para derrochar los recursos con los que contamos en el planeta. Además, se sabe que existe una relación directa y proporcional entre el tamaño del cerebro del recién nacido y el tamaño del cerebro del adulto. Un cerebro mayor en los adultos implicaría un cerebro más grande de los neonatos, con lo que el nacimiento de los fetos a término estaría seriamente comprometido. El canal del parto de la pelvis humana ha visto reducida su forma y su luz debido a la bipedestación. En consecuencia, tenemos un canal del parto que ya es insuficiente para el paso de la cabeza y los hombros de los recién nacidos. Mediante una distensión dolorosa de los ligamentos de los huesos púbicos y la atención que reciben las madres, el parto llega a feliz término en las sociedades que cuentan con los medios adecuados. No siempre es así en las sociedades que carecen de adelantos médicos y el parto es completamente natural. En definitiva, nuestro cerebro podrá adquirir mayor complejidad, pero difícilmente aumentará su tamaño en el futuro.

---

<sup>4</sup> Miller, D.J. et al. 2012. «Prolonged myelination in human neocortical evolution», en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109: 16480-16485.

## Cambios en el desarrollo somático

Chimpancés y humanos diferimos también en el tiempo de duración de nuestro desarrollo somático, que en aquellos finaliza hacia los once o doce años, mientras que nosotros terminamos de crecer hacia los dieciocho años. Además, nuestro desarrollo tiene dos etapas nuevas: niñez y adolescencia, que deben ser explicadas a la luz de la evolución. Pero primero debemos comenzar hablando de un proceso importantísimo: la lactancia, una fase de la vida que en los chimpancés, bonobos y gorilas dura entre cuatro o cinco años. El período de lactancia aún es más prolongado en los orangutanes, que toman leche materna hasta que cumplen ocho o nueve años. En teoría, la lactancia humana en condiciones naturales debería ser también muy prolongada, porque nuestro cerebro necesita una gran cantidad de energía para crecer. Sin embargo, hacia los dos años podemos empezar a destetarnos sin ningún problema y de forma natural. Nuestro crecimiento cerebral podría exigir una mayor duración de la lactancia, pero no sucede así. Veamos, pues, las razones evolutivas. La lactancia intensiva y a demanda sucede gracias a la secreción de prolactina, una hormona que se produce en la parte anterior de la hipófisis y que estimula la producción de leche en las glándulas mamarias. La prolactina tiene también un efecto inhibitorio de la ovulación, anulando así la posibilidad de nuevos embarazos. Debido a su lactancia tan prolongada, el intervalo promedio de nacimientos en los chimpancés se estima en unos cinco años, mientras que las madres orangutanes tienen un hijo cada nueve años. Pensemos ahora en el número de descendientes que puede tener una hembra de estas especies, cuyo período de fertilidad es muy similar al de las mujeres. En teoría, una madre chimpancé podría llegar a tener hasta seis crías, mientras que una madre orangután apenas podría dar a luz a tres. Si consideramos

la elevada mortalidad infantil en estas especies, caeremos en la cuenta de que su supervivencia está muy comprometida. Si añadimos la presión que ejercemos los seres humanos sobre ellas, la extinción de estas especies puede presumirse muy próxima.

¿Cómo evitar el peligro de extinción ante condiciones tan adversas? La respuesta evolutiva de la genealogía humana fue decisiva: reducir el tiempo de lactancia obligada hasta un cierto límite. En *Homo sapiens*, el período comprendido entre el momento del nacimiento y la edad de siete años puede dividirse en dos segmentos. La infancia dura aproximadamente hasta los dos años de vida y coincide a grandes rasgos con la lactancia. Los siguientes cinco años presentan características biológicas diferentes, y podemos hablar de una nueva etapa, única en nuestro desarrollo: la niñez. Cuando se produce el destete, la prolactina deja de actuar y las madres pueden quedarse preñadas de nuevo. Es por ello que el intervalo promedio de nacimientos en *Homo sapiens* se ha reducido de manera considerable. De ese modo, la vida fértil de una madre puede aprovecharse para tener un número mucho mayor de descendientes que en los simios antropoideos. Aunque la mortalidad infantil fuera también elevada en los grupos de cazadores y recolectores del Pleistoceno<sup>5</sup>, la población podría mantener su estabilidad e incluso experimentar un cierto crecimiento demográfico. Solo así se entiende que hace 2 millones de años una o más especies humanas fueran capaces de extenderse por Eurasia ocupando un territorio mucho más amplio. Finalmente, hace algo más de 120 000 años *Homo sapiens* se expandió fuera de África y colonizó poco a poco todas las tierras emergidas. En la actualidad, ya somos más de 8000 millones de seres humanos ocupando

---

5 Época de la escala temporal geológica que de manera formal se estima que comenzó hace unos 2,6 millones de años y finalizó hace poco menos de 12 000 años.

la mayoría de los territorios del planeta. *Homo sapiens* consiguió así moderar el límite superior de la llamada estrategia reproductora «K». Aclaremos que el término estrategia «K» fue introducido en 1967 por MacArthur y Wilson<sup>6</sup> para diferenciar a las especies que tienen muchos descendientes a los que dedican poco (o ningún) tiempo y gasto energético de crianza (estrategia r) de aquellas especies con muy pocos descendientes a los que dedican mucho tiempo y energía en su crianza. Ya hemos visto que los orangutanes presentan un caso extremo de estrategia K, que a la postre podría ser letal para la supervivencia de estos simios.

La niñez nos ha permitido escapar de una estrategia K extrema, pero ahora tenemos más descendientes y el gasto energético es muy elevado. ¿Cómo hacer frente a este problema si, además, añadimos el consumo de energía de un cerebro grande y complejo? Recordemos que el cerebro es el órgano más caro de nuestro organismo desde el punto de vista de las calorías que necesita para ser funcional. Cuando alcanzamos el estado adulto, el consumo del cerebro en reposo se estima en un 20 % de la energía que precisamos para estar vivos. Pero esa cifra es mucho más elevada mientras estamos creciendo. Durante el desarrollo embrionario, el porcentaje del gasto energético del cerebro se incrementa a medida que este órgano crece de tamaño. Por descontado, ese gasto lo asume la madre embarazada. Aproximadamente a las 38 semanas de gestación, hemos de nacer de manera obligatoria, puesto que el canal del parto tiene unas dimensiones limitadas y el proceso no se puede demorar sin riesgos tanto para la madre como para su hijo. Además, el gasto energético que asume la madre en las semanas finales de la gestación es ya

difícil de soportar. Pero no todo termina con el parto. El cerebro de un recién nacido consume aproximadamente el 50 % de su metabolismo basal. Ese gasto tan extraordinario también lo tiene que asumir la madre con la lactancia. La clave para que nuestros ancestros salieran adelante en estas condiciones fue la fuerte implicación de los dos progenitores y de todo el grupo en el coste de la crianza.

Por otro lado, todos sabemos que los niños y las niñas crecen mucho más despacio de lo que algunos padres impacientes desearían. El gasto energético de los pequeños se dedica sobre todo al crecimiento del tamaño del cerebro en detrimento del incremento de la estatura. Aun después de los siete años, cuando el cerebro prácticamente ha alcanzado el 99 % de su tamaño final, la estatura sigue sin aumentar de manera significativa. El período de tiempo que falta hasta llegar a la temida adolescencia es equivalente al que experimentan otras especies de mamíferos desde que concluye la lactancia. Ese período juvenil se prolonga más en esas otras especies, incluidos los simios antropoideos, hasta que los individuos maduran lo suficiente para empezar a procrear. En nuestra especie, el crecimiento y desarrollo no terminan con el período juvenil, sino que se prolongan durante más de seis años con una etapa nueva: la adolescencia. Esta es una característica exclusiva del desarrollo de *Homo sapiens*, cuyo valor adaptativo precisa una explicación.

Durante la adolescencia, ocurren cambios en nuestro aspecto que todos conocemos muy bien. Poco a poco se manifiestan las características sexuales propias del estado adulto. La reproducción ya es posible, aunque la fertilidad de las chicas no alcanza su máximo hasta cumplidos los 19 o 20 años. Durante la adolescencia, la estatura aumenta de manera muy notable mediante el llamado «estirón puberal». La aceleración del crecimiento compensa todo lo que no se ha crecido durante la infancia, la niñez y el período juvenil.

---

<sup>6</sup> MacArthur, R.H. & E.O. Wilson. 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton, N.J., Princeton University Press.

Todos podemos percibir ese proceso con facilidad, porque sucede con cierta rapidez, pero lo que no vemos a simple vista está sucediendo en el cerebro. Por supuesto, notamos cambios sustanciales en el comportamiento de nuestros hijos, que poco a poco se irán despegando de nuestro cuidadoso celo para adquirir su propia personalidad. Esos cambios tienen su origen en la reestructuración cerebral. Durante la adolescencia se produce una importante poda sináptica, que supone la desaparición de cientos de miles de conexiones entre las fibras cortas de las neuronas. Estas conexiones, ya innecesarias, implican un considerable gasto energético para el cerebro, así que aquellas que hemos empleado durante los primeros años de nuestra vida desaparecen y son sustituidas por otras que vamos a utilizar en el estado adulto. Este «recableado» neuronal —valga la expresión— provoca muchos desajustes en el comportamiento durante los primeros años de la adolescencia, y supone no pocos peligros en la toma de decisiones equivocadas. El cuerpo calloso que une los dos hemisferios cerebrales se engruesa y alcanza hasta un cuarto de millón de axones o fibras largas de las neuronas. El cerebro está adquiriendo con ello más potencia y mayor conectividad. También aparecen miles de conexiones entre diferentes regiones del cerebro, como las áreas prefrontales y frontales, donde residen aspectos tan importantes como la planificación a largo plazo o la toma de decisiones. Y con el retraso del proceso de mielinización, que se comentó más arriba, tardaremos en ser «adultos cerebrales» completos nada menos que tres décadas después del nacimiento. En definitiva, la adolescencia supone un riesgo que nuestra especie debe asumir, pero que culmina en adultos mucho mejor preparados para afrontar el resto de sus vidas y, en particular, la maternidad y la paternidad. Este cambio tan extraordinario podría ser exclusivo de nuestra especie, una hipótesis que no podemos contrastar, puesto que

no es posible estudiar los cerebros de las especies que nos han precedido o que han coexistido con la nuestra (*Homo erectus*, *Homo neanderthalensis*, *Homo floresiensis*...).

## El lenguaje

Uno de los rasgos más debatidos por los especialistas es el lenguaje, una adaptación que podemos considerar esencial en nuestra evolución. Los expertos nunca se han puesto de acuerdo sobre el momento en el que los miembros de nuestra genealogía comenzamos a comunicarnos mediante un lenguaje articulado, que podía expresar todo cuanto veíamos a nuestro alrededor, así como conceptos relativamente abstractos, además de la enseñanza de las técnicas que permitían la fabricación de herramientas, la caza o la elección correcta de las plantas comestibles. Las partes blandas de nuestro tracto vocal (cavidad oral, cavidad nasal, faringe y laringe), así como muchos de los órganos articulatorios activos y pasivos (cuerdas vocales, lengua, velo del paladar, labios...) que posibilitan la articulación del lenguaje no se conservan en el registro fósil. Es por ello que todas las hipótesis propuestas hasta el momento se basan en suposiciones que no pueden ser contrastadas debidamente. Nuestro colega del proyecto Atapuerca, el Dr. Ignacio Martínez Mendizábal, propuso estudiar el órgano receptor del sonido empleando los huesecillos del oído medio. Estos pequeños elementos óseos: martillo, yunque y estribo, se conservan en algunos fósiles, y su forma y tamaño se pueden estudiar mediante microtomografías computarizadas. Empleando los algoritmos correspondientes que manejan los ingenieros acústicos, se pueden obtener modelos que simulan los audiogramas de las especies fósiles. Las curvas de audición se

construyen sobre la base del nivel de la potencia acústica, expresado en decibelios (dB) y la frecuencia del sonido o número de vibraciones o ciclos en una onda sonora por segundo, medido en hercios (Hz). Con estos dos parámetros se observa que los audiogramas de los primeros representantes de los neandertales, que vivieron en Europa hace entre 300 000 y 400 000 años, eran muy similares a los nuestros. El ancho de banda que presentan estos audiogramas permitiría a estos homínidos distinguir perfectamente las vocales, las consonantes y sus múltiples combinaciones. Estas investigaciones no pueden concluir si los tractos bucales de aquellos humanos pronunciaban palabras como las que empleamos nosotros, pero no tiene ningún sentido biológico disponer de un órgano receptor tan sofisticado como el nuestro si no es para comprender la diversidad de sonidos de un lenguaje complejo. Es posible que los primeros fabricantes de la cultura fueran capaces de emitir sonidos asimilables a un lenguaje muy simple y que los inicios de esta capacidad comenzaran hace un par de millones de años. Esta hipótesis se podrá contrastar quizá en pocos decenios, cuando se puedan estudiar los huesecillos del oído medio de aquellas primeras especies del género *Homo*.

## **El Neolítico: un cambio en el estilo de vida**

En otro orden de cosas, la dinámica de las poblaciones de homínidos fue muy intensa en Próximo Oriente, la región que conecta África con Eurasia durante el último millón de años. Aquel hervidero —punto caliente de la biodiversidad— se convirtió en origen de grupos humanos que se movieron en todas direcciones. Finalmente, una de las poblaciones que se había establecido en África dio lugar a

los primeros humanos que podemos incluir en nuestra propia especie: *Homo sapiens*. Hace 200 000 años, aquellos humanos ya eran prácticamente idénticos a nosotros, excepto por su robustez, propia de los cazadores y recolectores. Sin embargo, su cerebro ya había alcanzado el tamaño adecuado y tan solo podía faltar algún ajuste genético para progresar en la complejidad de la que he hablado en páginas anteriores. Ese punto no se puede verificar, por la imposibilidad de encontrar evidencias en el registro fósil. Lo único que podemos afirmar es que los primeros miembros de nuestra especie cazaban animales de gran talla, recolectaban, se comunicaban mediante un lenguaje complejo, dominaban el uso del fuego, se ocupaban de sus parientes fallecidos y fabricaban herramientas de piedra y madera de cierta sofisticación. Su desarrollo cultural era similar al de los neandertales, con quienes compartimos un ancestro común que vivió hace unos 800 000 años. Sorprende que nuestros primeros representantes fueran tan parecidos a nosotros —que hemos llegado a niveles tan avanzados de complejidad científica y tecnológica— y tuvieran un estilo de vida propio de lo que popularmente se conoce como la «edad de piedra».

Como dije antes, hace unos 120 000 años aquellas primigenias poblaciones de *Homo sapiens* aprovecharon uno de los muchos episodios de reverdecimiento del Sahara para moverse hacia el norte y acercarse de nuevo al Oriente Próximo. También atravesaron el estrecho de Bab el-Mandeb, en el Cuerno de África, y se expandieron por el sur de Asia. En el Corredor Levantino contactaron con los neandertales e hibridaron con ellos. El hecho de que ellos y los antiguos miembros de nuestra especie tuvieran un ancestro común tan reciente favoreció el intercambio genético de las dos poblaciones. Hace unos 50 000 años, *Homo sapiens* se había expandido por la mayor parte de Eurasia y ya no faltaba mucho tiempo para colonizar



el continente americano a través de la masa de hielo que cubría entonces la región de Beringia, entre el extremo más noroccidental de Eurasia y el más nororiental de América. Estamos hablando de una época ya muy cercana a la nuestra, pero seguíamos siendo cazadores y recolectores. Faltaban aún 40 000 años para que en distintos puntos del planeta surgiera la habilidad para «domesticar» la naturaleza. Efectivamente, todas las evidencias y las dataciones correspondientes sugieren que de manera independiente surgió una nueva forma de vida en Próximo Oriente, el este de Asia, América del Norte, América del Sur, América Central, varias regiones del África subsahariana y Nueva Guinea. Hace unos 10 000 años, y ya sin la compañía en el planeta de otras especies humanas, surgió el Neolítico. Comenzamos a practicar la agricultura y a domesticar diferentes especies animales, que nos proporcionaban un alimento más predecible sin necesidad de buscarlo cada día. Nos asentamos en regiones donde la agricultura era favorable y comenzó un estilo de vida del que nosotros somos herederos.

## **El progreso imparable de la ciencia y la tecnología**

Con anterioridad al Neolítico, las habilidades tecnológicas eran exclusivas de cada grupo humano en particular, que tenían pocas posibilidades para difundir las innovaciones. Quizá podíamos tener un cerebro similar, sino idéntico, al que poseemos en la actualidad; pero antes del Neolítico el registro arqueológico nos muestra una evolución extremadamente lenta de la tecnología. Hace algo menos de 50 000 años, empezamos a mostrar un interés por la expresión artística sofisticada en diferentes puntos del planeta. Este progreso

tan pausado de la cultura solo se puede explicar por el escaso contacto que mantenían los grupos de cazadores y recolectores, tan dependientes de sus cotos exclusivos para conseguir el alimento, y la rivalidad que tendrían entre ellos para mantenerlos y asegurar su supervivencia. El desarrollo de la agricultura y la ganadería lo cambió todo. Las buenas cosechas y los alimentos predecibles que proporcionaban los animales domesticados favorecieron el contacto entre los grupos. Surgieron los primeros asentamientos, que con el tiempo se transformarían en las urbes que nos muestran las excavaciones arqueológicas. Los grupos humanos crecieron en número y el conocimiento se movió con ellos. El intercambio de ideas dio lugar a las innovaciones, que se desplazaban con rapidez creciente. Estaba comenzando lo que podemos denominar la «socialización del conocimiento», cuya expresión más actual está representada por ciertos aparatos de difusión y las redes de comunicación interconectadas: la televisión, la radio, la telefonía, la web (*World Wide Web: WWW*), el correo electrónico, el almacenamiento de datos en la nube, la transmisión casi instantánea de archivos, las redes sociales, etc.

Es muy posible que el genoma de nuestra especie haya experimentado algunas mutaciones con selección positiva para mejorar nuestras capacidades cognitivas. Sin embargo, nuestra presencia en el planeta como especie apenas cuenta con 300 000 años, un tiempo insignificante en términos evolutivos. Así que los grandes logros científicos de la humanidad pueden explicarse fundamentalmente gracias al intercambio de información y a ese «cerebro colectivo» que formamos cuando trabajamos en pequeños o grandes equipos de personas que buscamos un interés común.

Nuestro éxito como especie es indudable porque nos hemos apoyado en la cultura, una adaptación excepcional. La cultura permite

proyectar las ideas de nuestra mente para transformar la naturaleza, para favorecer e incrementar así las limitaciones de nuestra biología. Nuestra fortaleza física y nuestras manos desnudas nos habrían permitido sobrevivir durante un tiempo limitado en el Pleistoceno, pero a la postre todas las especies de nuestra genealogía se habrían extinguido. El surgimiento de la cultura fue un paso evolutivo esencial para romper con esa dinámica de la vida y llegar hasta el punto en el que nos encontramos ahora, con posibilidades reales de que la ciencia y la tecnología sigan avanzando de manera exponencial. Sin embargo, esta adaptación tan extraordinaria también nos ha situado en una encrucijada.

## Un futuro incierto

El crecimiento de la población ya supera los 8000 millones de seres humanos en el planeta y continúa aumentando. Esa cifra está muy por encima de la que tendría una especie con individuos de nuestro mismo tamaño en condiciones de equilibrio con el medio. Necesitamos por ello una enorme cantidad de energía para sobrevivir, que dejarán de percibir muchas otras especies, rompiendo así el equilibrio de todos los ecosistemas. Como consecuencia, el consumo de alimentos y de otros bienes es desmesurado, por lo que esquilamos todo lo que se nos pone por delante y no dudamos en cogerlo. Y de lo que tomamos, una parte sobra o no se utiliza y se desperdicia. Son los desechos, algunos de los cuales ya se reciclan, pero la mayoría han de esperar cientos de años para regresar a la naturaleza. Desde hace relativamente pocos años, una parte de la sociedad ha tomado conciencia de cómo estamos influyendo los seres humanos en las condiciones naturales de la Tierra. Nuestro

planeta ha cambiado esas condiciones de manera natural desde su formación, hace 4550 millones de años, pero nunca lo había hecho a una velocidad de vértigo. Es por ello que los seres vivos que la habitan no tienen tiempo de adaptarse debidamente a esos cambios. Las consecuencias ya se perciben en el clima de año en año, y las medidas que tomamos son demasiado lentas e insuficientes. Nuestro estilo de vida, que tiende hacia el consumo desproporcionado, no se puede cambiar de la noche a la mañana y no nos permite responder a la velocidad que sería necesaria. Finalmente, la tecnología tan sofisticada creada por un número reducido de individuos podría ser manejada de manera torpe o torticera por otras personas malintencionadas o sin los conocimientos adecuados. De todo ello y de las posibilidades de futuro para la humanidad, nos hablarán en las siguientes charlas.

Muchas gracias por su atención.

### Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article

BERMÚDEZ DE CASTRO, José María, «Claves esenciales de la evolución humana» [en línea], a: Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra (40a : 16, 17, 23, 24 set. 2024: Andorra la Vella). *Humanitat i evolució de la vida = Humanidad y evolución de la vida = Humanité et évolution de la vie*. [en línea]. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats. Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, 2024 (978-99920-82-11-9) <<http://www.universitatestiutardor.ad/UEA2024>>

40a UNIVERSITAT D'ESTIU I TARDOR D'ANDORRA

*Sessió del 17 de setembre del 2024*

# L'HUMANITÉ FACE AUX LIMITES DE LA PLANÈTE

Frédérique Chlous

Professora d'antropologia i directora general delegada de recerca, expertesa, valorització i ensenyament  
al Museu Nacional d'Història Natural de París.

Presidenta del Comitè Científic de l'Agència Francesa de la Biodiversitat (OFB).

Profesora de antropología y directora general delegada de investigación, evaluación, valorización y enseñanza  
en el Museo Nacional de Historia Natural de París.

Presidenta del Comité Científico de la Agencia Francesa de la Biodiversidad (OFB).

Professeure d'anthropologie. Directrice Générale Déléguée à la Recherche, l'Expertise, la Valorisation, l'Enseignement  
au Muséum national d'Histoire naturelle de Paris

et présidente du conseil scientifique de l'Office français de la biodiversité (OFB).

Bonjour à toutes et à tous,

Merci pour votre invitation et pour votre accueil si chaleureux, je suis vraiment ravie d'être ici.

J'aimerais aujourd'hui vous parler de l'humanité face aux limites de la planète et je discuterai dans cette conférence de quatre points :

- 1- l'état de la biodiversité ;
- 2- les pressions anthropiques (c'est-à-dire les menaces qui pèsent sur cette biodiversité) ;
- 3- le système complexe formé par l'ensemble des entités et organisations humaines, non humaines. Cela permettra de mieux comprendre les anthropo-écosystèmes et de réfléchir à des solutions ;
- 4- comment agir : les changements transformateurs, abordés au sein de l'IPBES.

## 1- L'état de la biodiversité

Tout d'abord, il faut indiquer que la biodiversité se joue sur trois niveaux (Fig.1) :

- une diversité au sein d'une même espèce. En tant qu'espèce, les humains (*Homo Sapiens*) présentent aussi une diversité génétique importante. Au cours de la conférence de M. Bermúdez de Castro, nous avons pu voir les autres espèces humaines que les paléanthropologues ont enregistrées au cours du temps ;
- une diversité entre espèces ;

- une diversité entre les communautés d'espèces. Ceci correspond à un assemblage d'espèces qui sont en interrelation dans un cadre donné (la prairie, la forêt ou les océans).

## Que connaît-on de la biodiversité ?

Au total, l'on estime qu'il existe entre 8 et 12 millions d'espèces dans le monde et nous en connaissons 2 008 950 (Fig. 2). Dans un pays, comme la France (métropolitaine et d'outre-mer), l'on compte aujourd'hui 194 480 espèces dont 84 % sont dans les départements d'Outremer. Dans cet ensemble, 11 % des espèces françaises sont endémiques. Ceci implique qu'elles sont uniques au monde et qu'il faut particulièrement les protéger.

Dans le domaine de la biodiversité, il existe aussi des questions d'échelles à prendre en compte. En France métropolitaine, l'on compte environ 100 000 espèces ; dans 1 gramme de sol, l'on dénombre entre 10 et 100 millions de microorganismes et environ 10 milliards de microbes intestinaux dans le corps humain.

Il en est de même dans des lieux comme les caniveaux de Paris, où se développe un écosystème particulier avec 4753 espèces, notamment des diatomées.

## L'évolvabilité des espèces

Pour protéger les espèces, il est essentiel de garantir leur évolvabilité, c'est-à-dire leur capacité d'évolution (Fig. 3). Toutes les espèces proviennent d'un ancêtre commun, qui après des évolutions successives, a abouti aux échinodermes, aux araignées ou aux humains.

Dans les conditions d'un changement climatique rapide, les espèces doivent s'adapter. Or, les rythmes d'adaptation varient en fonction des espèces : certaines s'adaptent très vite (les drosophiles), mais d'autres ont des temps de génération beaucoup plus longs et ont donc plus de difficultés à s'adapter ; ce phénomène augmente avec la taille.

### **Comment étudie-t-on la biodiversité ?**

Il existe plusieurs possibilités. L'observation peut être menée par des spécialistes qui étudient un taxon ou une espèce en particulier, ou bien par la population, dans le cadre de projets de science participative. Parmi les outils utilisés, l'on trouve les pièges photographiques, les vidéos, mais aussi l'écoacoustique — l'identification des chants d'oiseaux, notamment grâce à l'intelligence artificielle — ou bien l'ADN environnemental — qui permet d'identifier, encore imparfaitement, les espèces se trouvant, par exemple, dans un cours d'eau.

Ces données sont essentielles pour conserver la biodiversité des espèces, car elles permettent de connaître le nombre d'individus, leur répartition, leur écologie et les interactions qui se produisent au sein des anthropo-écosystèmes. Elles contribuent également à réaliser un suivi de l'abondance de l'espèce à long terme et de connaître les pressions auxquelles cette espèce est soumise.

### **Les menaces**

Il y a aujourd'hui un million d'espèces en danger d'extinction, notamment 40 % des amphibiens et 35 % des mammifères.

Par ailleurs, l'on enregistre une diminution des abondances (c'est-à-dire du nombre d'espèces) des oiseaux agricoles de -39 % : les espèces ne disparaissent pas, mais le nombre d'individus diminue.

Ainsi, les études montrent qu'en 2070, l'on prévoit la disparition des mammifères et des oiseaux de plus de 10 kg à l'état sauvage en zone tropicale.

En Allemagne, depuis 1992, l'on a enregistré une diminution de 87 % de la biomasse des insectes.

Au cours du temps, plusieurs extinctions globales ont eu lieu, mais nous sommes à une période très préoccupante, car l'extinction des espèces n'a jamais été aussi rapide ni aussi intense auparavant. Les phénomènes se produisent mille fois plus vite et les espèces n'arrivent pas à s'adapter. C'est pour cette raison que nous pouvons considérer que nous sommes face à une sixième extinction.

En effet, des limites à l'échelle de la planète peuvent être identifiées. Les études du Stockholm Resilience Center indiquent que six de ces limites sont désormais dépassées (nouvelles pollutions chimiques, intégrité de la biosphère, perturbations des cycles biogéochimiques, changement climatique, changement d'usage des sols et du cycle de l'eau douce). Depuis 2009 et 2015, où seulement 3 et 4 de ces limites étaient dépassées, l'on perçoit bien l'accélération de cette tendance (Fig. 4).

Or, ces évolutions ne sont pas récentes. Depuis les années 1960, les scientifiques alertent sur l'érosion de la biodiversité. En 1962, la chercheuse Rachel Carlson, qui a écrit *Le printemps silencieux* [*Silent Spring*], a montré les effets des pesticides sur les populations d'oiseaux (Fig. 5).

En 1965, le professeur Jean Dorst, du Muséum, a de même écrit *Avant que nature meure*.

En 1972, est paru le rapport Meadows *Les Limites à la croissance (dans un monde fini)*, qui alertait déjà sur les changements globaux en relation avec des modes de production et de consommations intenable.

Des rapports périodiques sont émis par le GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) et l'IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques), qui est le pendant du GIEC et est vouée à la biodiversité.

Les travaux de ces deux groupes montrent bien, d'une part, des scénarios d'augmentation de la température et, d'autre part, l'érosion de la biodiversité qui affecte aussi, bien entendu, les populations humaines.

Si les scientifiques ont alerté depuis très longtemps sur cette question d'érosion de la biodiversité, aujourd'hui, d'autres acteurs s'interrogent : les assureurs face aux catastrophes naturelles, les financiers, en relation avec les crises économiques qui peuvent s'en suivre, et les responsables de la santé humaine, qui font le lien entre santé des écosystèmes et santé humaine.

Il s'agit là non seulement de sauver les autres espèces, mais de nous sauver nous-mêmes.

## 2- Les pressions

Pourquoi, y-a-t-il une telle érosion de la biodiversité ?

L'IPBES a montré qu'il existait cinq menaces (Fig. 6) :

- les changements d'usage des terres et des mers, c'est-à-dire l'artificialisation des sols ;
- la surexploitation de certains organismes ;
- le changement climatique ;
- les pollutions ;
- les espèces exotiques envahissantes.

Revenons rapidement sur ces cinq pressions toutes d'origine anthropique.

L'artificialisation des sols et des milieux marins entraîne de nombreuses conséquences (Fig. 7) :

- écologiques (il y a moins d'espaces où la biodiversité peut se développer, ruissellement des eaux etc.) ;
- socio-économiques (augmentation du temps de déplacement, de la facture énergétique des ménages, création d'îlots de chaleur en ville, diminution des surfaces et du potentiel agricole, etc.) (Fig. 8).

La surexploitation s'est très accentuée, en particulier, dans le domaine de la pêche. Pour 2020, la FAO indique que 34 % des populations marines mondiales sont exploitées à un niveau biologiquement non durable, ceci implique l'effondrement des stocks (Fig. 9). Les pêcheurs sont, en effet, obligés d'aller de plus en plus loin et d'utiliser des techniques plus sophistiquées pour des prises dont la taille diminue. À ceci, il faut rajouter le braconnage des grands mammifères.

Le changement climatique oblige les espèces à migrer pour s'adapter aux nouvelles conditions environnementales (Fig. 10). Ceci est certainement visible ici, en montagne, où

les espèces montent en altitude à cause du réchauffement pour retrouver des conditions qui leur conviennent. Par ailleurs, les cycles entre les pollinisateurs et la floraison se désynchronisent et la pollinisation se réduit.

Le changement climatique augmente aussi les événements extrêmes — par exemple, les mégafeux — qui, à leur tour, détruisent la biodiversité et contribuent à changer la physiologie des espèces.

Pour ce qui est des pollutions, c'est un sujet dont on découvre chaque jour davantage les effets, notamment sur la santé humaine, mais aussi sur les écosystèmes (particules fines, gaz à effet de serre, métaux lourds, substances chimiques et plastiques, mais aussi pollutions sonores — notamment dans les milieux marins — et pollutions lumineuses) (Fig. 11).

Pourtant, la consommation des produits traités par les pesticides augmente d'environ 25 % le risque de cancers. La santé humaine est donc en jeu. Et ce, d'autant plus que les pollutions sont très résistantes dans le temps : le cas du chlordécone est significatif. En France, dans les bananeraies d'Outre-mer, dans les Caraïbes, il faudra environ 400 à 500 ans pour éliminer ce produit des rivières, des sols et du milieu marin où la pêche est désormais impossible.

Par ailleurs, il faut rappeler que les océans reçoivent deux millions de tonnes de plastique.

Les espèces exotiques envahissantes sont nombreuses et peuvent modifier les milieux, elles peuvent affecter de même la santé (Fig. 12). L'on connaît, en effet, les cas de dengue qui apparaissent suite à la présence du moustique tigre en France.

En ce sens, l'on s'attend à des pandémies assez importantes à l'avenir.

Or, ceci a aussi un coût économique. En Europe continentale, les coûts générés par la gestion et la réparation des dommages causés par les invasions biologiques ont été estimés à plus de 12,5 milliards d'euros par an.

### 3- Un système complexe

Par rapport au climat qui est régulé par des lois physiques, la biodiversité apparaît comme un système bien plus compliqué parce que l'on est face à un socio-écosystème ou anthropo-écosystème, c'est-à-dire que les sociétés ont des effets sur les écosystèmes et vice versa.

D'après Elinor Ostrom, qui a reçu le prix Nobel en 2009, les socio-écosystèmes sont composés d'un système écologique, d'un système économique, d'un système politique et d'un système socio-anthropologique que l'on peut appeler système culturel. Les différentes entités sont en interaction, et il faut prendre en compte les aspects géographiques et temporels.

Les éléments qui modifient ces interactions sont : les propriétés adaptatives des humains et des non-humains, les pressions continues (augmentation de la température) ainsi que les événements extrêmes (mégafeux ou éruptions volcaniques).

Face à cette complexité, les scientifiques travaillent en interdisciplinarité pour essayer de comprendre ces anthropo-écosystèmes, de telle façon que les domaines de la biologie et de

la physique s'articulent avec les sciences humaines et sociales (Fig. 13). De mon côté, je travaille à la fois sur les modèles de gouvernance — comment construire les politiques publiques — et sur les questions de valeurs.

Le schéma (*Donut*) produit par Kate Raworth compile tous les aspects à prendre en compte pour assurer le bien-être des humains — l'eau, les revenus, l'éducation, les emplois, l'équité, la santé, la nourriture, etc. — en respectant les différentes limites de la planète (Fig. 14).

C'est donc en faisant attention à ces deux aspects, c'est-à-dire un système social de qualité et la préservation des différentes fonctions biogéophysiques, que nous pourrions avoir un espace sûr et juste pour l'humanité.

Cet enchevêtrement peut se voir dans le concept de *one health* (une seule santé). Celle-ci dépend d'un ensemble de facteurs : la qualité de l'air et de l'eau, le bon fonctionnement des océans, la préservation des sols pour avoir une agriculture de qualité, les infections, notamment les espèces invasives, etc. Par ailleurs, l'accès à une nature non dégradée apparaît comme un élément essentiel pour le bien-être humain et pour la santé mentale.

Les humains sont donc en relation étroite avec les écosystèmes, où interviennent les modes de vie, les aspects culturels, les connaissances médicales, la biodiversité, la qualité de l'air et de l'eau.

La biodiversité est donc bel et bien un système complexe où se produisent des interactions et des rétroactions entre l'ensemble des éléments, sur lesquels joue aussi un facteur multiéchelle — action locale, régionale, étatique et internationale.

Aujourd'hui, la difficulté est de pouvoir agir sur les différents niveaux pour trouver des solutions ; les gouvernants se doivent à la fois d'agir localement, mais aussi d'aller dans les grandes instances internationales pour tenter de convaincre d'autres pays de suivre des voies durables.

Il existe par ailleurs un effet probabiliste, c'est-à-dire que chacun sera touché, mais à des temporalités et à des intensités différentes, ce qui amènera à un effet mosaïque sur les territoires. À ceci, il faut ajouter l'incertitude et les « effets cocktails » — c'est-à-dire les combinaisons des effets du changement climatique, de la pollution, des espèces invasives, etc.

Tout ceci pose de graves problèmes, non seulement pour la biodiversité, mais aussi pour les humains habitant les territoires : certains ne trouvent plus les ressources nécessaires à leur survie, ce qui entraîne des changements de pratiques ou des migrations.

Aujourd'hui, nous ne connaissons pas encore suffisamment les points de bascule à partir desquels un écosystème ne peut plus être restauré. Cependant, un écosystème peut être restauré lorsque des mesures sont prises et qu'elles sont observables à l'échelle d'une vie. Mais, parfois, lorsque l'on n'agit pas ou que l'on agit trop tardivement, les écosystèmes peuvent radicalement se transformer et avoir des conséquences d'ordre socioéconomique et sur la biodiversité.

La dégradation des écosystèmes est d'autant plus pernicieuse qu'il existe un phénomène d'amnésie environnementale. La dégradation du milieu n'est pas identifiée parce que les individus, les générations oublient les situations antérieures. Les jeunes générations peuvent penser comme normale une situation largement dégradée par rapport à celle de la génération antérieure.



Un aspect fondamental, qui m'intéresse particulièrement, concerne les relations au monde. Dans notre monde occidental et européen, nous nous trouvons dans un système d'expansion et d'accumulation des biens. La question est de savoir jusqu'à quand ce modèle peut perdurer, car il menace l'habitabilité de la terre pour les humains et les autres vivants.

Certains prônent « l'illimitisme » (« *Only the sky is the limit* »), nommé ainsi par François Hartog, c'est-à-dire penser qu'il n'y a pas de limites. Dans ce cas, il est le plus souvent envisagé de trouver des solutions techniques (technosolutionnisme) pour, par exemple, ensemercer les nuages face au changement climatique ou lancer des microdrones pour polliniser les plantes face à la perte de biodiversité. Ce ne sont pas de vraies solutions, cela correspond à une manière de penser le monde qui, pour moi, n'a pas de sens, car elle pousse à l'extrême la pensée que les humains sont maîtres et dominateurs de la nature.

Un autre des aspects étudiés par François Hartog concerne le « présentisme ». Dans son œuvre, il analyse à quel point nous sommes incapables de nous projeter et de penser le futur et le passé. Notre rapport au temps fait que nous ne sommes que sur l'instant présent, sans pouvoir le dépasser.

Un autre élément à prendre en compte est celui que l'anthropologue Philippe Descola a théorisé et qui est les relations entre les sociétés humaines et leurs environnements. Il définit notre société comme étant « naturaliste » : elle se considère au-dessus du vivant, l'homme est au sommet et le reste des êtres vivants est à son service. Or, dans le monde, il existe d'autres modèles (totémique, animique, analogique). Sans devenir animistes, comme les Indiens d'Amazonie, nous pourrions accorder une place aux autres êtres vivants.

## 4- Comment agir ? Les changements transformateurs

Ce n'est pas simple, mais il est possible d'agir et il faut agir. Pour cela, il est possible d'analyser le schéma produit par l'IPBES — la plateforme pour la biodiversité — au sein de laquelle beaucoup de scientifiques réfléchissent et font des propositions, en identifiant des leviers qui permettraient de diminuer les 5 menaces sur la biodiversité (changement d'utilisation des terres/mers, exploitation directe, changements climatiques, pollution et espèces envahissantes) (Fig. 15).

Pour cela, il existe un certain nombre de mesures politiques liées à la gouvernance à différents niveaux avec le renforcement de la capacité et de la participation de la population :

- coopération intersectorielle : où travaillent ensemble l'agriculture, l'éducation, la biodiversité etc., au lieu de travailler de façon compartimentée ;
- renforcer le droit de l'environnement et son application.

Puis, il existe des points d'appui essentiels qui concernent les différents acteurs :

- les politiques aux différentes échelles ;
- les entreprises ;
- la société civile organisée ;
- les scientifiques ;
- les citoyens ;
- les médias, etc.

De fait, nous sommes tous acteurs, et, face à cela, le plus important des appuis est l'éducation et le partage des connaissances. Dans le domaine de l'éducation, le but est de donner les clés pour comprendre le monde dans lequel nous vivons et y être sensible. La sensibilité à la beauté par le biais de l'éducation artistique et des activités de plein air est fondamentale.

Pour ce qui est du partage des connaissances, auquel je suis particulièrement sensible en tant qu'anthropologue, je veux parler non seulement des recherches scientifiques, mais aussi des savoirs locaux voire autochtones, qui doivent être aussi partagés. Je suis sûre que si je fais une enquête de terrain chez vous, je découvrirai des choses absolument incroyables, des trésors de savoir, un patrimoine immatériel que possèdent les personnes qui vivent en montagne et qui la connaissent parfaitement. Tout ceci est très important.

Nous avons ensuite la réduction de la consommation totale et de la production des déchets, c'est-à-dire la sobriété ou le fait de consommer autrement. Pour cela, il existe des solutions fondées sur la nature et non pas technosolutionnistes.

Penser la justice et l'inclusion dans l'atténuation et l'adaptation aux changements globaux est aussi un élément essentiel. Dans ce domaine, j'ai eu la chance de pouvoir diriger un petit ouvrage, un manifeste du Muséum qui aborde la question.

Les inégalités environnementales sont liées à un ensemble de paramètres – revenus, genre, âge, territoire, appartenances culturelles – le plus souvent intersectionnelles. Ces inégalités sont perceptibles dans le partage des responsabilités et des impacts subis : ce sont ceux qui produisent le moins d'effets de serre qui souffrent le plus de leurs conséquences. Or, le plus

inquiétant est que la dégradation de l'environnement contribue ensuite à creuser les inégalités : les plus pauvres seront les plus touchés et s'appauvriront d'autant plus.

Ensuite, il faut tenir compte du fait que les remédiations aux changements environnementaux peuvent aussi aggraver les inégalités. C'est le cas, par exemple, de la taxe carbone en France, qui n'a pas été suffisamment bien pensée pour prendre en compte les effets sur les personnes qui étaient obligées de se déplacer et les inégalités que cela pouvait entraîner.

Pour finir, dans le cadre de la justice environnementale, il faut aussi faire une place aux autres êtres vivants.

Pour réduire ces inégalités, il existe des outils :

- la redistribution financière, qui est importante, mais qui n'est pas le seul outil ;
- la reconnaissance des savoirs et des savoir-faire : c'est-à-dire reconnaître les personnes dans leurs diversités ;
- la participation à la construction des décisions. Au niveau local, l'on a appris à impliquer les populations dans la gestion d'une aire protégée. À l'échelle internationale, la question est de savoir comment faire participer les États et les différents groupes sociaux au sein de ces États sur la question de l'environnement. Cette question sera notamment débattue à la COP 16 qui concerne la diversité et qui se tient ce mois d'octobre en Colombie.

Pour ce qui est du partage de la planète avec les autres êtres vivants, il est fondamental de faire prendre conscience de l'appartenance au vivant, de la fragilité et de la finitude des humains. En ce sens, il faut travailler sur les valeurs de la biodiversité. 3 valeurs ont été identifiées :

- la valeur instrumentale, c'est-à-dire l'utilité de la biodiversité pour les humains, pour se nourrir de végétaux, d'animaux, pour construire des maisons (bois), etc. ;
- la valeur relationnelle. Cet aspect est très important et j'ai essayé de le développer dans les recherches que j'ai menées pour montrer que la nature est complètement intégrée à notre culture et à notre sensibilité. Je suppose qu'en Andorre, vous avez des écrivains, des peintres qui ont célébré vos montagnes, et que vous avez des mots particuliers pour désigner cette forêt et cet environnement. Or, quand nous perdons de la biodiversité, la qualité de notre milieu diminue et nous perdons aussi une partie du patrimoine culturel. Lors d'un travail réalisé dans le cadre de la liste verte de l'UICN, les gestionnaires du Parc naturel de la Côte bleue en Méditerranée ont, par exemple, ressorti l'ensemble des écrits des grands écrivains de cette région qui célébraient les pêcheurs, la mer et ses autres êtres vivants, et ceci est extrêmement important ;
- la valeur intrinsèque. Celle-ci correspond à la valeur de la nature pour elle-même, puisqu'elle a le droit d'exister et qu'il n'y a pas de raison pour que tout soit centré sur nous, les humains.

Pour terminer, pour faire le lien avec les paléanthropologues, les préhistoriens et les archéologues qui sont dans la salle, j'illustre la colonisation de l'ensemble de la planète avec un carte qui montre l'ensemble des vagues de migration (Fig. 16). Elle montre comment nous sommes partis de notre berceau africain, avec des allers-retours, et comment nous avons colonisé l'ensemble de la planète grâce à notre

inventivité technique, évidemment, mais aussi grâce à nos organisations sociales.

Il faut utiliser maintenant ces mêmes compétences intellectuelles et sociales pour considérer les limites de la planète et pour repenser notre rapport au vivant.

Je vous remercie.

**Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article**

CHLOUS, Frédérique, «L'humanité face aux limites de la planète» [en línia], a: Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra (40a : 16, 17, 23, 24 set. 2024: Andorra la Vella). *Humanitat i evolució de la vida = Humanidad y evolución de la vida = Humanité et évolution de la vie*. [en línia]. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats. Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, 2024 (978-99920-82-11-9) <<http://www.universitatestiutardor.ad/UEA2024>>

# La biodiversité c'est... 3 niveaux



<https://www.science-et-vie.com/article-magazine/la-diversite-eclairée-par-la-genetique>

## Au sein d'une même espèce

Diversité génétique



<https://www.aquaportal.com/dictionnaire/definition/3097/diversite-specifique>

## Entre espèces

Diversité spécifique.



<https://patrimoinenaturel.com/munauteparisbasique.fr/fr/decouvrir/les-milieux-naturels/prairies-landes-et-pelouses>

## Entre les communautés d'espèces

Figure 1

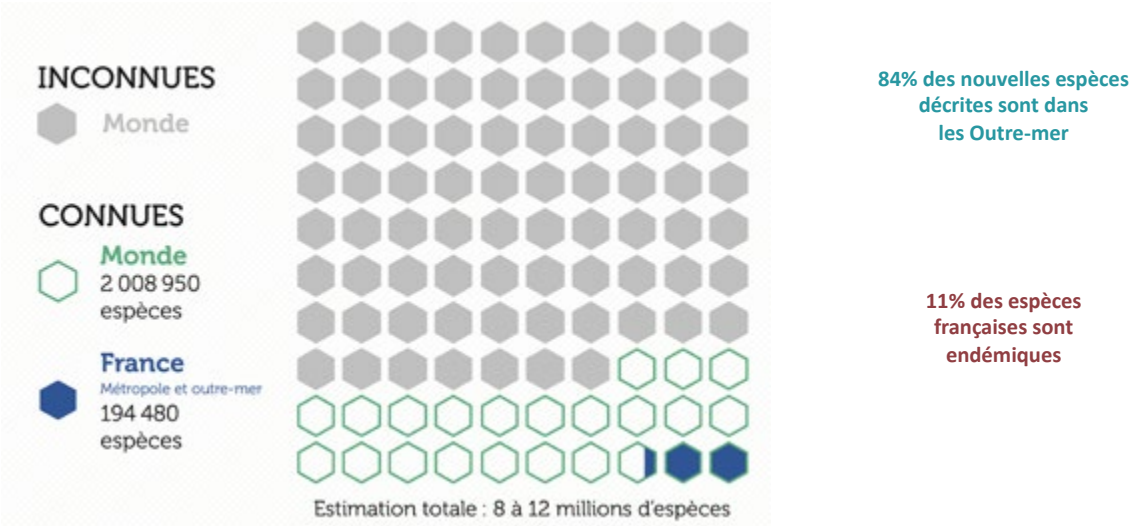
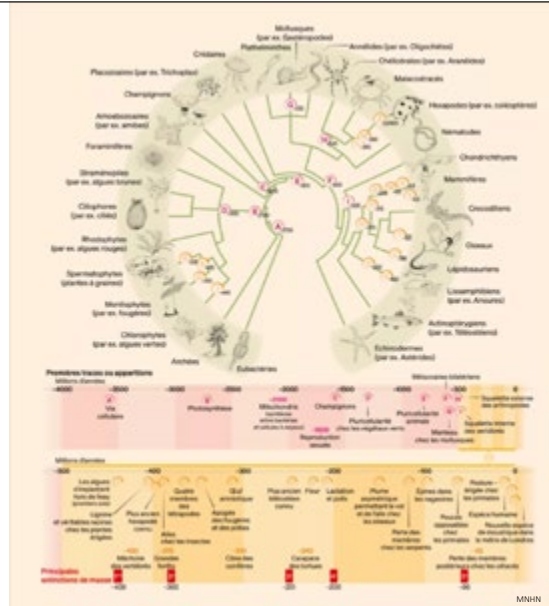


Figure 2



# Evolvabilité

Concept majeur qui est défini par la capacité des espèces de répondre à des modifications de l'environnement .

Il faut donc préserver l'évolvabilité du vivant, c'est-à-dire la variabilité des espèces

Pour s'adapter il faut plusieurs générations !

Figure 3



Figure 4

Planetary Boundaries, Stockholm Resilience Center, J. Rockström et al. 2009

## Un peu de recul



1962

1965

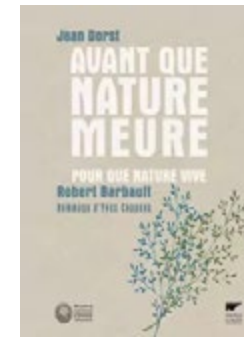


Figure 5

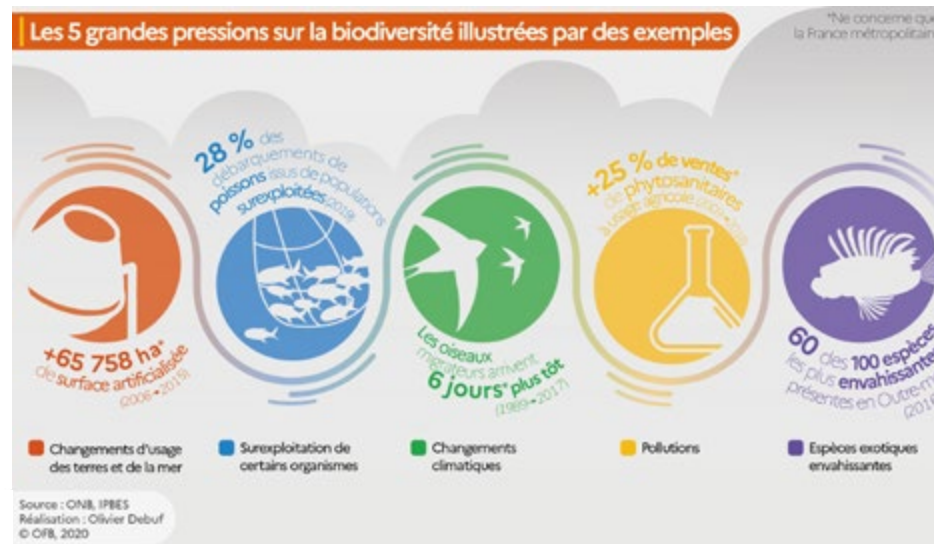


Figure 6



## Changement d'usage des terres et des mers (1)

Sur la décennie précédente, 24 000 hectares d'espaces naturels, agricoles et forestiers ont été consommés chaque année en moyenne en France, soit près de 5 terrains de football par heure.

Les conséquences sont écologiques (érosion de la biodiversité, aggravation du risque de ruissellement, limitation du stockage carbone)...

... mais aussi socioéconomiques (coûts des équipements publics, augmentation des temps de déplacement et de la facture énergétique des ménages, dévitalisation des territoires en déprise, diminution du potentiel de production agricole etc.).

<https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/artificialisation-sol>

Figure 7



Diminution des surfaces agricoles disponibles.



Perte de biodiversité, Fragmentation des habitats naturels



Perturbation du cycle de l'eau (infiltration, rétention, ruissellement, etc.)



Création d'îlots de chaleur en ville



Entre 2006 et 2014 l'artificialisation s'est faite pour les **2/3** sur des **espaces agricoles**



La superficie des **zones humides** a été réduite de **50%** en France entre 1960 et 1990.



**Les prairies**, représentent **47%** des surfaces naturelles artificialisées entre 1990 et 2018

Figure 8



[https://www.lemonde.fr/biodiversite/article/2018/02/22/la-peche-industrielle-exploite-plus-de-la-moitie-de-la-superficie-des-oceans\\_5261145\\_1652692.html](https://www.lemonde.fr/biodiversite/article/2018/02/22/la-peche-industrielle-exploite-plus-de-la-moitie-de-la-superficie-des-oceans_5261145_1652692.html)

## Surexploitation (2)

34% des populations marines mondiales sont exploités à un niveau biologiquement non durable (surexploitées) (FAO, 2020).

Braconnage des grands mammifères : Les populations d'éléphants de forêt du Bassin du Congo se sont effondrées de 62% de 2002 à 2011

Figure 9



## Le changement climatique (3)

- Affecte les espèces en les obligeant à migrer
- Désynchronise les cycles dans le cadre d'interactions (pollinisation, prédation...)
- Augmente les événements extrêmes (ex des mégafeux)
- Change la physiologie des espèces

Figure 10



Figure 11



FAB

## Pollutions (4)

Particules fines, gaz à effet de serre, métaux lourds, substances chimiques, matériaux non dégradables comme les plastiques, pollutions sonores et lumineuses

Consommation de produits traités par les pesticides augmente d'environ 25 % le risque de cancers chez l'homme et la femme

Chlordécone présent dans les sols plusieurs centaines d'années

1,15 à 2,41 millions de tonnes de plastique arrivent vers les océans chaque année

Figure 12



## Espèces exotiques envahissantes (5)

Peuvent capter les ressources, modifier les milieux naturels, être prédatrices d'espèces indigènes.

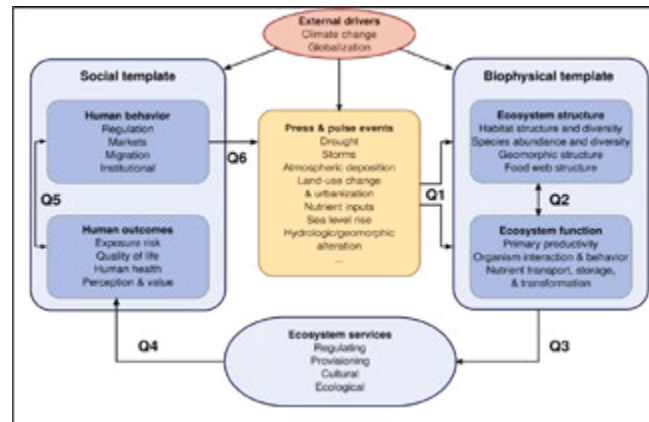
Affectent la santé : exemple moustique tigre, ambrosie

Affecte l'agriculture : émergence de parasites ou insectes ravageurs

En Europe continentale, les coûts générés par la gestion et la réparation des dommages causés par les invasions biologiques ont été estimés à plus de **12,5 milliards d'euros par an**.

### Schéma conceptuel des SES

(Collins et al., 2011)



Approche avec les services écosystémiques en plus  
(MA 2005 – Daly et al., 2009)

Figure 13



Kate Raworth

Figure 14

### Changements transformateurs (IPBES)

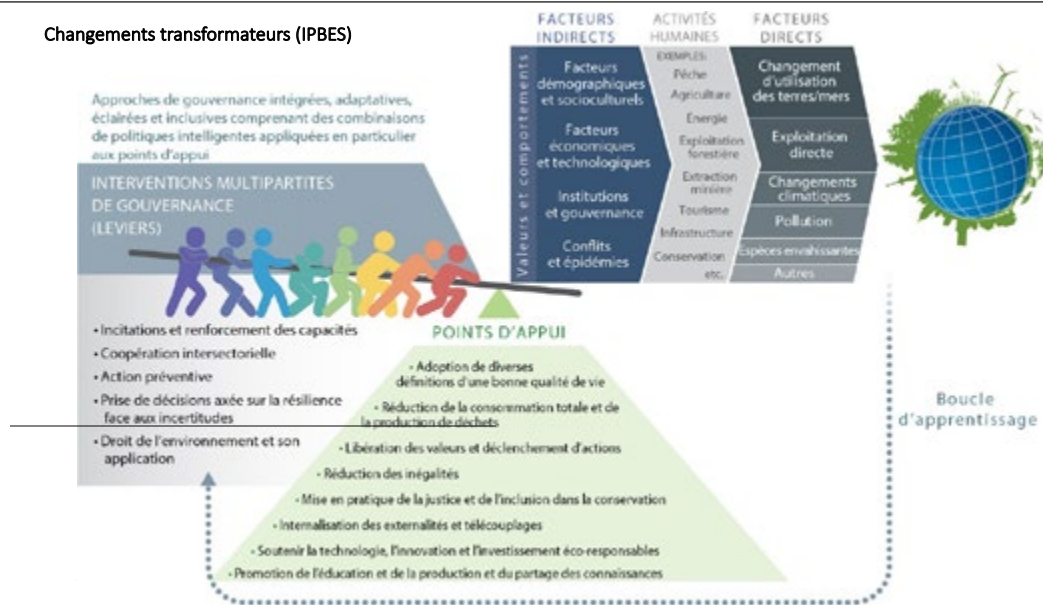


Figure 15

*Notre inventivité technique et les organisations sociales ont permis à l'espèce humaine d'habiter la terre*

*Ces mêmes compétences intellectuelles et sociales doivent nous permettre de considérer nos limites et de repenser notre rapport au vivant.*



Figure 16

40a UNIVERSITAT D'ESTIU I TARDOR D'ANDORRA

*Sessió del 23 de setembre del 2024*

# **ELS HUMANS MODERNS, PRESENT I FUTUR**

Salvador Macip

Catedràtic de medicina molecular al Departament de Biologia Molecular i Cel·lular de la Universitat de Leicester  
i director dels Estudis de Ciències de la Salut de la Universitat Oberta de Catalunya.

Catedrático de medicina molecular en el Departamento de Biología Molecular y Celular de la Universidad de Leicester  
y director de los Estudios de Ciencias de la Salud de la Universidad Abierta de Cataluña.

Professeur de médecine moléculaire au Département de Biologie moléculaire et cellulaire de l'Université de Leicester  
et directeur des Études des Sciences de la Santé de l'Université Ouverte de Catalogne.

## Una imatge borrosa

Si demanem a un programa d'intel·ligència artificial generativa que faci una il·lustració sobre el tema d'aquest article, com seran els homes i les dones del futur, el resultat és una imatge de dues persones musculades, sense un gram de greix, la dona amb els pits grossos, l'home amb uns braços gruixuts, vestits amb una roba tecnològica, amb una sèrie d'afegits mecànics, potser també alguna pròtesi o alguna eina que els ajuda a veure millor o a integrar el poder dels ordinadors als seus cossos. Si som menys precisos i li demanem que imagini, no l'home i la dona, sinó l'humà del futur, el que surt és una barreja que no té sexe, que encara es pot reconèixer com un humà però que comença a acostar-se més cap al que seria un androide. Segurament encara té parts biològiques, però és molt més mecànic.

L'exercici és interessant perquè aquests algoritmes realment no creen res nou. El que fan és agafar informació que hi ha a Internet i barrejar-la per produir un concepte nou, però que no és més que la suma de coses que ja existeixen. Per tant, quan demanes a la intel·ligència artificial que et presenti la imatge dels humans del futur, el que fa realment és dir-nos com nosaltres mateixos ens els imaginem, com la intel·ligència col·lectiva de l'espècie creu que evolucionarem. La imatge que surt és una mica borrosa, perquè no tenim la resposta encara, però si més no sembla que la por és que acabem perdent la identitat, els trets que, fins ara, ens han definit.

Parlar dels humans moderns és un exercici de ciència i ficció. No de ciència-ficció, sinó d'estirar la ciència per veure fins on pot arribar, fins on ens pot portar. En les properes planes parlarem d'on som actualment, de quin aspecte té l'humà modern i cap a on va, on anirà a parar a curt termini, fent incidència sobretot en les perspectives

que ens obre la ciència, el camí que ens presenta i cap a quin futur es dirigeix. Serà un exercici que ens permetrà reflexionar sobre els límits que ens planteja la medicina moderna.

## L'era de la biomedicina

La medicina és una ciència que bàsicament ha estat pensada per curar (i, més tard, prevenir) malalties. Avui en dia, ens està dirigint cap a un horitzó una mica més avançat, sobretot gràcies al lligam que té amb les altres ciències. És el que podríem anomenar *biomedicina*, que barrejaria biologia, bioquímica, farmacèutica, bioestadística, enginyeria, etc., amb l'objectiu de millorar la qualitat de vida de les persones.

Aquest canvi comença quan ens adonem que tots els éssers vius, des de les plantes als animals i les persones, estem regits pel mateix codi: per la informació que tenim al nostre ADN. A partir del moment que entenem que tots estem fets de cèl·lules i que aquestes cèl·lules tenen una informació que ens guia al llarg del nostre desenvolupament i la nostra existència, comencem a descobrir el secret de la vida. El punt d'inflexió és el 1953, l'any que Watson i Crick defineixen l'estructura de l'ADN. Abans sabíem que existia la informació genètica, però no on es guardava. A partir d'aquest moment se sap on és el disc dur de la cèl·lula, on s'emmagatzema aquesta informació.

Això va ser una revolució a la segona meitat del segle xx, però ara hem arribat encara més lluny. A partir de finals del segle passat, ja no estem tan sols capacitats per llegir la informació de l'ADN, sinó també per començar a reescriure-la. És a dir, a més de saber

què diuen els nostres gens, hem trobat maneres de modificar-los. Aquestes portes que ens està obrint la ciència poden redefinir com seran els humans del futur.

La genètica ens pot ajudar a desenvolupar la medicina regenerativa, per exemple, que estudia la capacitat de regenerar els teixits. Alguns éssers vius, com les sargantanes, poden fer-ho, però molts altres no. Ara estem començant a entendre per què i estem intentant activar una sèrie de gens per tenir cèl·lules mare que puguin regenerar els teixits quan s'espantllen. Hi ha també el tema de la biologia sintètica, que vol dir fabricar éssers vius de zero. Ja s'ha produït el primer microbi amb un ADN totalment sintètic, enganxant totes les peces una per una. És a dir, hem creat un ésser que no existia. Amb aquesta eina podem arribar a redefinir la vida.

La genètica també ens ajuda a entendre per què envellim i què podem fer per tenir un envelliment saludable. O a poder clonar éssers vius, potser fins i tot humans, si algun dia trobem que això pot tenir alguna utilitat. Parlant de temes més pràctics, els coneixements de genètica ja s'apliquen al que s'anomena *medicina de precisió* o *medicina personalitzada*, que bàsicament vol dir llegir la informació genètica del pacient per poder aplicar-li el millor tractament. Això, per exemple, ja es fa amb el càncer. Si anem als extrems, també tenim els coneixements per modificar els gens dels embrions, una manipulació genètica que també es pot fer en adults, amb el que s'anomena *teràpia gènica*. I gràcies a aquests nous avenços, tota aquesta informació genètica que generem s'està acumulant en bases de dades i estem produint un gran coneixement dels gens de la nostra espècie a tot el planeta.

Totes aquestes tècniques són bones, en teoria, i ens haurien d'ajudar a millorar la salut. Però també se'n pot abusar, ens poden portar a situacions èticament dubtoses o simplement il·legals. La ciència ens

obre una sèrie de possibilitats i a la vegada ens planteja una sèrie de reptes, una sèrie de problemes, una sèrie de dubtes que haurem de solucionar considerant l'impacte social que tot això pot tenir.

## Viure més... i millor

La biomedicina, en general, el que busca sempre és ajudar-nos a viure més, però sobretot a viure millor. L'humà del futur serà un ésser que viurà segurament cada cop més temps. De fet, ja és així, des de fa dècades. Hem estat augmentat l'esperança de vida progressivament des de principis del segle xx. Cada cop vivim més, és cert, però no augmenten en paral·lel els anys que passem amb bona salut. És a dir, afegim anys dolents a la vida. Estem allargant la vida per la cua.

El que busca la ciència de l'envelliment saludable és la manera d'estendre els anys de bona salut. Als països desenvolupats hi trobem una població cada cop més envellida i això en principi és positiu. Però si viure més anys vol dir acabar en una situació en la qual no pots valer-te per tu mateix o no pots fer gran cosa, no té gaire sentit. Què determina que una persona envelleixi més ràpid, més malament? I per què altres passen dels cent anys amb, relativament, bona salut? Estudiant els seus gens potser ens acostarem a una resposta. La idea no és necessàriament allargar l'esperança de vida (el que en anglès s'anomena *lifespan*), sinó la qualitat d'aquesta vida (o *healthspan*, els anys que vivim en salut plena, segons la definició de l'OMS).

Una de les revolucions mèdiques que probablement veurem els propers anys serà aquesta, la de l'envelliment saludable. I això serà

possible perquè hem començat a entendre la biologia de l'envelliment. L'envelliment no és un procés immutable que sempre avança al mateix ritme. La decadència del nostre organisme no és inevitable, com s'ha demostrat en animals de laboratori. Hem aconseguit modificar-ho. Hem aconseguit primer entendre-ho en el pla biològic i després alterar-ne la progressió. Res fa pensar que hagi de ser diferent en humans. Això no vol dir que necessàriament es pugui frenar del tot, però sí que s'ha de poder viure millor.

Si mirem els òrgans d'una persona gran i d'una de jove veurem que són diferents, d'aspecte i de funció. És a dir, l'envelliment es veu des de fora, però també es veu des de dins. I si mirem encara més endins, aquesta diferència la veurem també a escala cel·lular. A partir del moment que entenem que l'envelliment del cos ve determinat per l'envelliment de les cèl·lules, ja sabem quina és la diana que hem d'atacar. Si sabem on són, podem intentar eliminar-les, perquè els teixits s'acabin semblant als dels joves.

Així, podem pensar que els humans del futur potser no hauran d'estar totalment subjectes a aquest factor aleatori de l'envelliment, que no podem controlar. La ciència segurament trobarà una manera d'alentir-lo. Si portem això a l'extrem, hi ha experts que pensen que potser també podrem revertir-lo, cosa que seria aconseguir la joventut eterna. Podem arribar a ser immortals? Encara que soni a fantasia, la immortalitat ja existeix. Ja hi ha éssers vius en aquest planeta que són immortals, com algunes meduses, per exemple, o la hidra. No envelleixen perquè les cèl·lules sempre són joves.

Ara bé, una cosa és que una medusa sigui immortal, i una altra cosa que també ho pugui ser un humà. La medusa és un animal simple que no té ni cervell. Però també hi ha animals més complexos que tenen un envelliment molt lent. Per exemple, les balenes. No sabem

realment quan podria arribar a viure una balena que no tingués depredadors, que no tingués infeccions, que estigués en un entorn com el nostre que evita totes aquestes morts prematures. El mateix passa amb els tardígrads, uns animals microscòpics molt resistents, que fins i tot poden sobreviure a l'espai. També tenen un envelliment molt lent.

Analitzant l'envelliment biològic veiem que no és universal, que alguns éssers vius sembla que n'hagin escapat. Podrà fer-ho també l'humà del futur? Ens podem plantejar seriosament la cerca de la immortalitat? Tot això sí que és ciència-ficció en aquest moment, però si realment arribem a entendre tots els processos biològics que determinen l'envelliment, qui sap on serà el límit? Potser els humans del futur tindran un cert control sobre l'envelliment. Potser no arribaran a poder rejuvenir, però potser sí que envelliran millor i més lentament que ara.

Fins i tot sense aconseguir allargar més l'esperança de vida, ja sembla que estiguem arribant al límit de la sostenibilitat del planeta. Si, de cop i volta, comencem a viure més de cent anys, quin impacte tindrà això en la superpoblació? Ja estem veient un envelliment als països desenvolupats, on les piràmides de població canvien de forma: comencen a semblar columnes. Sempre hi ha hagut més individus a les franges d'edat baixes, però ara això canvia. Cada cop hi ha menys naixements i cada cop hi ha més gent que arriba a edats avançades. La previsió és que les piràmides s'acabin invertint, amb més gent a les franges altes que joves.

Si seguim així, l'humà del futur serà viurà molts anys i les poblacions cada cop tindran menys individus. Aquest augment de l'esperança de vida ja l'estem veient a bona part del planeta. Àfrica, Sud-amèrica i parts d'Àsia ja comencen a atrapar els països desenvolupats que

anaven per davant. Anem cap a un futur en el qual l'esperança de vida global superarà els 80 anys mentre la natalitat continua baixant. Quin impacte social tindrà? Si perseguim un envelliment saludable per viure més anys, fins a quin punt forcem també l'envelliment de tot el planeta? Quins canvis portarà en la nostra estructura social?

## Millorar en lloc de curar

L'any 2013, la revista *Science* va incloure en el *top ten* dels descobriments més importants de l'any una tècnica de manipulació genètica, poc coneguda en aquell moment, anomenada CRISPR. Ni tan sols era el primer de la llista, sinó el segon. Però en aquests anys, el CRISPR ha passat a ser un dels avenços científics més importants.

Bàsicament és una tècnica que permet modificar els gens dels organismes d'una manera molt més fàcil, molt més ràpida i molt més econòmica del que es podia fer fins ara. És el que s'ha anomenat *democratització de l'edició genètica*. Això ha obert una sèrie de possibilitats impressionants. Ara podem, bàsicament, canviar una informació genètica per una altra amb molta precisió.

Això amenaça de canviar el concepte de la medicina. D'aquesta idea clàssica de curar o prevenir malalties estem passant a un concepte totalment nou, que és l'optimització o millora. Ara la medicina es pot començar a plantejar agafar una persona totalment sana i fer-la *millor*.

El primer problema és definir què vol dir *millor*. Això no és tan fàcil, perquè és un concepte subjectiu; però, de totes maneres, canvia radicalment el concepte de fer servir la ciència per evitar o solucionar

problemes. Podent canviar els gens ens avancem als problemes i podem fins i tot crear superhumans.

Cap a on ens porta això? Amb el CRISPR podríem editar el genoma de qualsevol persona. Des que la tècnica es va popularitzar van sortir veus que demanaven precaució i, sobretot, que no es permetés manipular les línies germinals, és a dir, els gens que passem a la descendència. O els dels embrions, perquè el que estariem fent és bàsicament redefinir l'aspecte dels nostres fills. Podríem modificar-los els gens per generar humans totalment diferents.

Aquest debat va començar cap al 2015, i enfrontava els que defensaven que sí que havíem de poder canviar els gens dels nens, perquè això ens permetria, per exemple, eliminar malalties. En aquests moments podríem tenir les eines, per exemple, per crear una generació de nens que no tingués càncer. Sabem, per exemple, que els elefants tenen menys càncer que nosaltres perquè tenen més còpies d'un gen que es diu p53. Amb el CRISPR podríem posar més còpies d'aquest gen i podríem eliminar el càncer en una generació. Per tant, això podria ser molt bo. Però també obre la porta a escenaris més distòpics.

Això va portar els mateixos científics a demanar una moratòria en tots els mètodes d'edició del genoma per considerar les conseqüències del que s'estava fent. Però abans que es pogués arribar a una conclusió, el 2018, el científic xinès He Jiankui va anunciar que ja havia alterat els gens de tres nenes. Ja havien nascut i, en teoria, eren normals. El que havia fet era introduir un gen que feia aquestes nenes més resistents al virus de la sida. Això es va criticar immediatament. Tothom va llançar-se sobre ell, perquè l'experiment s'havia fet saltant-se totes les normes ètiques. S'havia aplicat a humans una tècnica que encara no controlem bé, que encara no entenem del tot.



A més, era una intervenció que no feia cap falta, perquè hi ha moltes maneres d'evitar la infecció de la sida sense que calgui modificar gens.

No sabem quins efectes secundaris pot haver tingut l'experiment. He Jiankui va acabar a la presó, però ja torna a estar al carrer i es proposa continuar els seus treballs, encara que d'una manera més regulada. Si més no, des llavors hi ha hagut una alerta mundial sobre el fet que ja podem modificar els gens dels nostres fills. Això ens porta a pensar que podríem, si volguéssim, començar a escollir les característiques dels humans del futur.

Moltes de les característiques físiques ja sabem quins gens les determinen, d'altres no. Fins a cert punt, es podria escollir una mica a la carta com han de ser els nostres fills. Quin problema pot generar això? Podríem acabar tenint una població humana tota igual si tothom escull el mateix model. Part de la gràcia dels humans és la nostra diversitat. Si la ciència ens porta cap a un punt que comencem a modificar i a convertir-nos en còpies els uns dels altres, estariem perdent tot això.

Aquest és l'exemple d'una tecnologia que podria, per exemple, erradicar el càncer i, a la vegada, podria portar-nos a un escenari perillós. Podríem tenir una generació tallada pel mateix patró o, fins i tot, portar-ho encara més lluny i manipular els embrions per tenir el soldat perfecte: més fort, més resistent, més obedient... Sembla tret d'una pel·lícula de ciència-ficció com abans, i és cert que encara no ho podem fer, però ja no estem tan lluny d'aquest punt.

Seguint aquest raonament, els humans del futur podrien ser encara més radicalment diferents, per exemple barreges d'humans i animals. Un cop coneixem els gens dels animals que ens interessin, podríem inserir-los en embrions humans per, posem el cas, per tenir la vista de les àligues o l'olfacte dels gossos.

Aquestes possibilitats estan actualment aturades perquè a pràcticament tots els països és il·legal la manipulació genètica d'embrions. Però això no vol dir que en el futur no pugui canviar o que algú en algun lloc trobi la manera de saltar-se les normes. Res garanteix que una persona amb prou diners i amb prou ganes pugui estar finançant algun tipus d'investigació en aquest sentit.

Com serà la humanitat del futur, doncs, dependrà una mica de quina d'aquestes tecnologies serem capaços d'adoptar d'una manera segura i amb consens que és una cosa que val la pena fer. Aconseguir que nasquessin nens resistents al càncer potser sí que ens ho hauríem de plantejar, però quan permetes una cosa, també estàs permetent totes les altres. Per tant, hem d'anar amb molt de compte a l'hora de decidir si volem fer-ho o no.

La genètica no és l'única manera d'aconseguir millorar l'ésser humà. Estem també avançant en aquesta optimització en el camp de la química. Ja tenim fàrmacs que permeten als atletes rendir més, per exemple, tot i que estan prohibits en competicions. Existeix també el dopatge mental. El cafè mateix és un dopatge. És una manera d'estimular les nostres capacitats. Altres drogues encara no estan acceptades, però en el futur potser alguns dels fàrmacs actuals seran vistos amb normalitat i ens prendrem un còctel de pastilles pel matí per rendir més. Aquests fàrmacs no servarien per curar malalties, recordem-ho, sinó per trobar maneres per fer que els humans siguem *millors*. En aquest cas, *millor* voldria dir treure més bona nota en un examen o poder treballar dotze hores seguides cada dia.

Les substàncies químiques també poden canviar l'aspecte físic del cos. Tenim hormones que ens fan ser més musculats, per exemple. Alguns poden plantejar-se si tenir més múscul o ser més guapo és realment una millora, realment ens porta a algun lloc, però si la

possibilitat de fer-ho d'una forma legal i segura estigués a l'abast de tothom, molts no s'ho pensarien dues vegades. Podríem anar cap a un escenari en què no modificar-se, químicament o genèticament, seria un desavantatge per dur una vida normal, si una part important de la població decideix fer-ho.

Una tercera possibilitat és una millora mecànica, unir humans i màquines. De fet, els ciborgs ja existeixen. Ja hi ha persones que tenen una pròtesi que els permet suplir una extremitat. Però això encara és substituir, curar o solucionar un problema. Què passarà quan aquestes pròtesis siguin millors que les extremitats originals? Potser llavors algú decidiria que val la pena tallar-se el braç per posar-se una pròtesi més efectiva. Per exemple, un tennista es podria implantar un braç més fort i guanyar tots els partits. En el futur podríem veure barreges d'humans i màquines no per curar res, sinó simplement per aconseguir coses que abans no podíem fer.

Cap a on ens porta tot això? En el futur potser podrem escollir a la carta diferents parts del cos per canviar les originals. Un ull que hi vegi més, unes cames que puguin córrer més, etcètera. Al final potser podrem tenir un cost totalment mecànic, com prediu la ciència-ficció. Això encara està a molts anys de distància, segurament, però sens dubte planteja nous límits que caldrà considerar bé.

## Una nova espècie?

Veient totes aquestes opcions que tenim davant, com seran els humans del futur? Potser seran tots tallats per aquest patró del “superhome” ideal que tenim en la nostra ment col·lectiva: més forts, més alts, més guapos, més intel·ligents, més de tot el que ara

creiem que és positiu. Potser serem immortals. Potser serem una barreja entre humans i màquines. O potser serem totalment diferents, potser tindrem un aspecte que ni tan sols podem predir en aquest moment.

El problema d'això és que, com sempre ha passat a la història de la ciència, aquestes possibles millores no s'implementaran d'una manera homogènia. Ho veurem, segurament, en fases. Això vol dir que, primer, a aquests avenços només hi tindran accés les persones riques i els països rics. Al final, segurament arribaran a tot el món, però hi haurà un període de temps llarg en el qual tots aquests canvis només seran assequibles a uns pocs. Això genera la possibilitat que acabem tenint una separació radical en dos espècies diferents: els humans de tota la vida i els posthumans millorats.

L'home del futur potser serà un posthumà. La introducció, a través del transhumanisme, d'aquest concepte d'una espècie diferent no és nou, però cada cop s'acosta més. El transhumanisme bàsicament va començar com un moviment filosòfic i científic que defensava la idea que hem de millorar, si podem fer-ho, per tots els mitjans possibles. O sigui que hem d'utilitzar la tecnologia per millorar la condició humana, sigui amb enginyeria genètica, intel·ligència artificial, nanotecnologia, mecànica, robòtica, etcètera. Un cop més, topem amb la definició de *millorar*. Qui decideix que és millor?

El transhumanisme planteja una sèrie de dubtes ètics i morals que s'hauran de solucionar. La ciència ens dona les eines, però nosaltres, com a societat, hem de ser prou madurs per decidir si les volem usar o no, o com les volem usar. Com es defineix aquest humà del futur depèn de nosaltres. Però si hi pensem, el transhumanisme no és tan radical en la seva proposta com podria semblar. Potser ja ho hem fet, això de crear una nova espècie. A partir del moment que

ens inventem la ciència i la medicina ja comencem a caminar cap a aquest futur. La diferència entre els primers *Homo sapiens* i els d'ara ja és molt substancial. Els humans primitius eren més baixos, menys llestos i vivíem menys, malgrat que, en teoria, som encara la mateixa espècie. La ciència ens ha permès passar d'aquests 30 o 40 anys d'esperança de vida mitjana que ha tingut la humanitat des del principi als més de 80 que veiem actualment a molts països. El transhumanisme proposa anar encara més enllà, portar-ho a un extrem que no sabem quin és, però bàsicament es tractaria de seguir el mateix camí que ja estem recurrent.

És difícil predir com serà aquest posthumà que potser ens espera en un futur no gaire llunyà. Comencem a tenir peces de recanvi mecàniques, la capacitat de fer modificacions genètiques, substàncies que ens poden fer rendir més... Potser quan ho perfeccionem tot, el proper pas serà aquesta espècie diferent que ara ni tan sols ens podem imaginar. Podem acabar sent com deus o podem acabar destruint-nos pel camí. Estirar la corda de la ciència ens pot portar a horitzons impensables en aquests moments. En els propers anys tindrem les respostes.

La humanitat del futur serà el que nosaltres vulguem que sigui. La ciència ens dona les eines, però el que hem de decidir entre tots és com les farem servir. Els avenços científics són essencials, però sols ens portaran a l'abisme. Ens calen també avenços socials i ètics considerables per poder escollir el millor camí. És el moment de començar a pensar on hem de posar límits i quin ha de ser el nostre horitzó.

**Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article**

MACIP, Salvador, «Els humans moderns, present i futur» [en línia], a: Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra (40a : 16, 17, 23, 24 set. 2024: Andorra la Vella). *Humanitat i evolució de la vida = Humanidad y evolución de la vida = Humanité et évolution de la vie*. [en línia]. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats. Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, 2024 (978-99920-82-11-9) <<http://www.universitatestiutardor.ad/UEA2024>>

40a UNIVERSITAT D'ESTIU I TARDOR D'ANDORRA

*Sessió del 24 de setembre del 2024*

# **HUMANIDAD Y UNIVERSO: PARÁMETROS PARA LA VIDA Y LA EXPLORACIÓN**

Carlos Briones

Investigador del Consell Superior d'Investigacions Científiques al Centre d'Astrobiologia (CSIC-INTA)  
i divulgador científic.

Investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)  
y divulgador científico.

Chercheur du Conseil supérieur de la recherche scientifique au Centre d'Astrobiologie (CSIC-INTA)  
et vulgarisateur scientifique.

La astrobiología es una disciplina joven e interdisciplinar que combina los avances de distintos campos de la física, la química, la geología, la biología y la ingeniería, sin perder de vista la filosofía. En ese contexto, estudiamos cómo comenzó la vida en nuestro planeta a partir de las condiciones existentes hace unos 3800 millones de años, considerando también las moléculas que pudieron llegarnos desde el exterior a bordo de meteoritos o cometas. En paralelo, investigamos si la transición entre la química y la biología pudo darse en otros entornos que consideramos «habitables» dentro del sistema solar. Entre ellos, se buscan biomarcadores en Marte, en las nubes de Venus y en los satélites de Júpiter y Saturno, que poseen océanos de agua líquida bajo su superficie, como Europa, Encélado o Titán. Fuera de nuestro vecindario cósmico, la búsqueda de señales de vida llega a los planetas extrasolares, de los que ya se conocen más de 6000. Así, entre el azar y la necesidad, actualmente nos preguntamos si es más probable que estemos solos o que el universo se encuentre lleno de seres vivos.

## Hacia el origen de la vida

Las dos principales preguntas científicas que tenemos planteadas en astrobiología son cómo comenzó la vida y si pueden existir seres vivos fuera de nuestro planeta. Las primeras reflexiones científicas sobre este tema se las debemos a Charles R. Darwin, tanto en el último párrafo de su libro *El origen de las especies* (publicado en 1859) como en algunas de las cartas que posteriormente intercambió con sus amigos y colegas. Pero la obra pionera que trató específicamente sobre la transición entre la química y la biología es el ensayo *El origen de la vida*, publicado por el bioquímico ruso

Alexandr Ivánovich Oparin en 1924, hace exactamente un siglo [Oparin, 1924]. El segundo autor clave en los inicios de este campo de investigación fue el biólogo evolutivo y genetista inglés John B. S. Haldane, quien (sin haber conocido previamente la obra de Oparin, pues no se tradujo a inglés hasta 1938) publicó en 1929 un artículo titulado también *El origen de la vida*.



Representación esquemática del campo de estudio de la astrobiología, siguiendo una línea «en S» desde el origen y la evolución temprana del universo (esquina superior izquierda) hasta la biodiversidad actual (esquina inferior derecha). En la zona inferior izquierda se sitúa el ámbito de trabajo del origen de la vida. Crédito: Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA).

Tres décadas más tarde comenzó la «química prebiótica» como una disciplina experimental, gracias al trabajo de otros dos científicos pioneros. El primero fue el químico norteamericano Stanley L. Miller, cuyo famoso experimento de 1953 demostró cómo los gases que entonces se pensaba que habían formado la atmósfera terrestre

primitiva (vapor de agua, metano, amoníaco e hidrógeno:  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$  y  $H_2$ ), al ser sometidos a descargas eléctricas, producían gran número de moléculas orgánicas, entre ellas, varios aminoácidos de los que constituyen las proteínas. El segundo fue el bioquímico y astrobiólogo español Joan Oró, quien en 1960 sintetizó la base nitrogenada adenina (presente en los nucleótidos del ARN y del ADN) a partir de cinco moléculas de ácido cianhídrico (HCN) en disolución.

Desde entonces, se han ido sucediendo numerosos avances teóricos y experimentales sobre el origen de la vida. Así, diferentes líneas de investigación han propuesto cómo desde hace unos 4400 millones de años (Ma), ya con agua líquida disponible en la superficie de nuestro planeta, pudo formarse un buen número de moléculas de interés prebiótico. Estas, junto a las aportadas desde el espacio por meteoritos y núcleos de cometas, irían formando una «sopa prebiótica» (metáfora que también debemos a Oparin) cada vez más rica y variada.

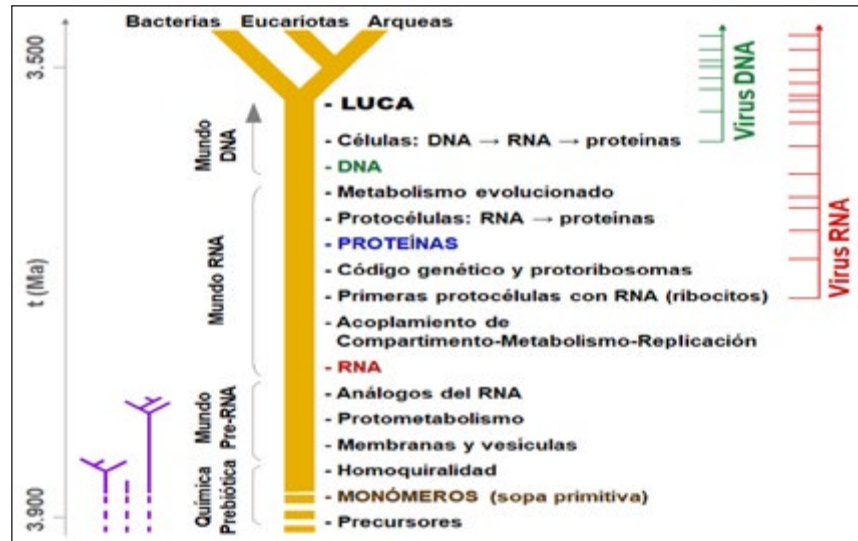
Durante los últimos años estamos promoviendo experimentos en diferentes tipos de medios heterogéneos y en condiciones geoquímicas prebióticamente plausibles (un campo que denominamos «química de sistemas prebiótica»), con los cuales es posible sintetizar un número creciente de monómeros y polímeros biológicos [Ruiz-Mirazo et al., 2014]. Entre estos últimos destaca el ácido ribonucleico (ARN), que en el origen de la vida pudo funcionar como genotipo (molécula con información genética heredable) y fenotipo (gracias a su plasticidad estructural y versatilidad funcional). Por tanto, actualizando lo que hace cuatro décadas planteaba la hipótesis del *Mundo ARN*, quizá los primeros seres vivos (que podemos definir como sistemas químicos complejos capaces de autorreproducirse y evolucionar por selección natural) fueron «ribocitos»: protocélulas con membranas muy simples y genoma de ARN, cuyo

metabolismo sería realizado por enzimas de ARN (llamadas «ribozimas») ayudadas por catalizadores inorgánicos y por péptidos cortos formados abióticamente.

A partir de ese *Mundo ARN/péptidos* pudieron originarse ribozimas con actividad peptidil-transferasa y posteriormente ribosomas cada vez más eficientes, con los que comenzaría la traducción de proteínas codificadas por el propio ARN. Parte de ellas mostraron ser mejores catalizadores que las ribozimas, con lo que esas enzimas proteicas irían desempeñando mayor cantidad y variedad de funciones metabólicas. De esta forma se produciría el desacoplamiento entre genotipo (mantenido en el ARN) y fenotipo (que mayoritariamente recaía ya en las proteínas) [Joyce and Szostak, 2018]. Posteriormente, es posible que algunas enzimas proteicas con capacidad ARN polimerasa ARN-dependiente pudieran comenzar a utilizar desoxirribonucleótidos en vez de ribonucleótidos como monómeros, dando así lugar al ADN. Debido a sus características estructurales y al hecho de poder replicarse con menores tasas de mutación, este ácido nucleico demostró ser más estable que el ARN como archivo de información genética. Todo ello permitiría que se fueran construyendo genomas de ADN cada vez más largos y complejos.

Así, hace unos 3900 Ma quizá ya funcionaban células «modernas», con el flujo de información genética en el sentido  $ADN \rightarrow ARN \rightarrow$  proteínas. En paralelo, las distintas fases de la expresión génica se irían regulando de forma cada vez más precisa. Además, los virus con genoma de ARN (que probablemente habrían surgido a la vez que los ribocitos, como fragmentos genéticos derivados de los genomas que se replicaban) y los virus de ADN (derivados de la nueva organización celular) irían coevolucionando junto a las células, promoviendo un proceso que siguen realizando hasta la actualidad: la transferencia génica horizontal (HGT) entre distintos linajes celulares.

Así, aunque en realidad los virus no pueden considerarse seres vivos como tales, ya que carecen de metabolismo y han de robárselo a las células que parasitan, su función biológica resulta esencial, ya que son los auténticos «tramoyistas de la evolución».



Esquema de los principales procesos que —según los datos disponibles actualmente— pudieron sucederse a lo largo del tronco común del árbol de la vida. Los árboles pequeños de color morado indican la posibilidad de que se produjeran distintos orígenes de la vida en paralelo, en diferentes entornos del planeta, aunque solo prevaleció el que condujo a LUCA. Crédito: adaptado de [Briones, 2020].

Como producto de la evolución de algunas de esas células ancestrales, se originaría una especie (o tal vez una comunidad de ellas) que conocemos como LUCA (acrónimo de *Last Universal Common Ancestor* o último ancestro común universal), de la que deriva todo el árbol de la vida. Inicialmente se bifurcó en los dominios filogenéticos de las bacterias y arqueas, con organización celular procariótica (es decir, sin núcleo y relativamente simples), que fueron explorando diferentes tipos de metabolismos y adaptándose a

distintos medios. Hace unos 2000 Ma, por fusión y endosimbiosis de algunos de sus linajes, se originaron los eucariotas (células con núcleo definido, distintos tipos de orgánulos y una compleja arquitectura interior).

Muy recientemente, hace solo unos 300 000 años, en una de las múltiples ramas de los eucariotas pluricelulares, de los animales y de los primates, surgió *Homo sapiens*: una especie más de los cientos de millones que forman la biodiversidad actual, pero la única cuyo desarrollo cerebral le ha permitido construir tecnología e iniciar una evolución cultural que avanza en paralelo (y mucho más rápidamente) que la evolución biológica. Gracias a ello, desde que comenzamos a mirar al cielo estrellado, nos estamos preguntando de dónde venimos, quiénes somos... y si estamos solos en el universo.

## Siguiendo a los extremófilos

Durante la vuelta al mundo que realizó a bordo del *Beagle*, Charles R. Darwin se sintió impresionado por los salares que pudo visitar en Argentina en agosto de 1833. Tras observar al microscopio algunas muestras que había tomado en ellos, anotó en su diario: «¡Sí, sin duda, puede afirmarse que todas las partes del mundo son habitables! Lagos de agua salobre, lagos subterráneos ocultos en las laderas de las montañas volcánicas, fuentes minerales de agua caliente, profundidades del océano, regiones superiores de la atmósfera, hasta la superficie de las nieves perpetuas: ¡en todas partes hay seres organizados!». Con ello, el siempre premonitorio y perspicaz Darwin adelantaba muchos de los entornos donde posteriormente se descubriría la existencia de seres vivos «extremófilos» (etimológicamente, ‘amantes de los extremos’), incluyendo las nubes o el

subsuelo. Por tanto, este gran naturalista inglés no solo es el padre de la evolución por selección natural (una evidencia en la que trabajó paralelamente Alfred R. Wallace), sino que también fue quien inspiró dos campos científicos adicionales: el del origen de la vida y el de los extremófilos.

Un siglo más tarde, desde la década de 1940, se fueron caracterizando otros microorganismos que se desarrollaban en aguas ácidas, a los que se denominó «acidófilos». En 1965, el microbiólogo Thomas D. Brock descubrió en el Parque de Yellowstone de Estados Unidos la primera bacteria termófila, cuya temperatura óptima de crecimiento es de 70 °C. Acuñó para ella el nombre de *Thermus aquaticus*, y, posteriormente, otros autores utilizarían una de sus enzimas (su polimerasa de ADN, llamada Taq) para poner a punto la «reacción en cadena de la polimerasa» o PCR, una tecnología de amplificación de ácidos nucleicos muy utilizada en la actualidad (y que fue clave como sistema de diagnóstico durante la pandemia de COVID-19). Siete años después, el propio Brock caracterizó, en una zona diferente de esa misma caldera volcánica, el primer microorganismo poliextremófilo, que crece en aguas muy ácidas y a una temperatura de 80 °C: la arquea *Sulfolobus acidocaldarius*. Los microorganismos poliextremófilos nos ofrecen ejemplos del tipo de vida que podría encontrarse en numerosos entornos extraterrestres que combinan varias características fisicoquímicas alejadas de la centralidad, algunos de los cuales visitaremos en el siguiente apartado de este artículo.

Tras varias décadas más de investigación, se han caracterizado bacterias y arqueas (aunque también eucariotas) adaptadas a vivir en diferentes ambientes extremos en cuanto a sus características físicas: con temperaturas superiores al punto de ebullición del agua o inferiores al de congelación, bajo presiones de cientos de atmósferas en

los fondos marinos, en entornos sometidos a grandes dosis de radiación o en las profundidades rocosas del subsuelo. Desde el punto de vista de las condiciones químicas, también conocemos organismos extremófilos que se desarrollan en aguas muy ácidas (a pH incluso menor de 1) o muy básicas (hasta pH 12), en salinas o salmueras, o en presencia de elevadas concentraciones de metales.

Los niveles elevados de radiación son especialmente interesantes para la investigación en astrobiología, dado que producen daños en el ADN y se requiere la acción de mecanismos celulares de reparación muy activos. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), el gray (Gy) es una unidad derivada de la dosis de radiación ionizante, que se define como la absorción de un julio de energía de radiación por kilogramo de masa. En general, dosis mayores de 10 Gy son letales para los humanos y casi todos los animales, con excepciones como algunos insectos que resisten hasta 1800 Gy... y, por supuesto, los tardígrados, fascinantes invertebrados poliextremófilos que se mantienen en un estado de vitalidad suspendida, pero reversible en un sorprendente rango de condiciones extremas: temperaturas de entre -250 °C y +150 °C, presiones de hasta 6000 atmósferas, períodos de congelación de 30 años, deshidratación casi total durante 10 años, y exposiciones temporales a 5000 Gy. Lógicamente, existen ejemplos de microorganismos aún más radiotolerantes, como la bacteria poliextremófila *Deinococcus radiodurans*, que puede vivir en ambientes muy diversos, incluyendo el agua de refrigeración de los reactores nucleares, y soporta hasta 15 000 Gy, o la arquea hipertermófila *Thermococcus gammatolerans*, que crece en surgencias hidrotermales y resiste hasta 30 000 Gy de radiación gamma.

En la actualidad, los científicos han encontrado seres vivos (mesófilos o extremófilos) en prácticamente todos los entornos de la Tierra donde se han buscado, detectando también múltiples virus



que infectan a las bacterias, arqueas y eucariotas que forman la biodiversidad celular de dichos ambientes. Una mención especial merece la caracterización de la diversidad y ecología microbiana que existe en el subsuelo de nuestro planeta (lo que ya se conoce como «la biosfera oculta» o, más coloquialmente, «la vida en el lado oscuro»), tal como hemos podido demostrar mediante perforaciones de hasta 620 m de profundidad realizadas cerca del nacimiento del río Tinto, en la provincia de Huelva [Amils *et al.*, 2023].



Principales planetas, satélites y cuerpos menores a los que han llegado misiones de exploración espacial o que están siendo estudiados por la astrobiología. Crédito: NASA/JPL-Caltech.

Además del descubrimiento y la caracterización de un número creciente de organismos extremófilos, otros dos datos derivados de décadas de investigación permiten plantear que la vida también podría

haber surgido en otros planetas o satélites: la constatación de que la Tierra no es un lugar especial en cuanto a sus características geológicas y químicas, y la detección de diferentes entornos extraterrestres potencialmente habitables por algún tipo de vida microbiana. Por ello, actualmente se buscan en distintos lugares del cosmos moléculas biomarcadoras o biofirmas de vida extraterrestre: compuestos que solo se producen por el metabolismo de los seres vivos y que las reacciones químicas abióticas no podrían sintetizar [Briones, 2020].

## En busca de vida en Marte y Venus

Marte es el planeta que más fascinación ha producido en la cultura popular y en la ciencia ficción, porque hasta las primeras décadas del siglo xx se pensaba que podría estar habitado por otros seres inteligentes y tecnológicos, que incluso tendrían capacidad de venir a visitarnos (e incluso aniquilarnos). Una vez que la exploración espacial demostró que eso no era cierto, los científicos comenzaron a interesarse por la posibilidad de que el planeta rojo pudiera albergar algún tipo de vida microbiana.

Así, actualmente la astrobiología considera que en Marte pudo surgir la vida en la misma época que en la Tierra, porque hace aproximadamente 4000 Ma tenía un campo magnético protector y sus características geológicas y químicas eran similares a las de nuestro planeta. Además, se encontraba en la zona de habitabilidad del Sol: dentro del rango de distancias a la estrella en que el agua líquida se podía mantener en su superficie. De hecho, un gran océano de agua salada cubría gran parte de su hemisferio norte, en su superficie había lagos y por sus cañones y valles circulaban los ríos. Sin embargo, debido a diversos factores (asociados al menor tamaño de

Marte en comparación con la Tierra), su superficie dejó de presentar condiciones de habitabilidad hace unos 3000 Ma: si en ella existían microorganismos, debieron refugiarse en el subsuelo para protegerse de la radiación, la desecación y el frío extremo.

La investigación sobre la posible existencia de vida (pasada o presente) en el planeta rojo se ha realizado desde la década de 1970 mediante el envío de misiones espaciales que han alcanzado su órbita o su superficie (52 hasta la fecha, de las que aproximadamente la mitad han sido exitosas), y también analizando algunos fragmentos de rocas marcianas que nos han llegado en forma de meteoritos (como uno muy famoso llamado ALH84001, encontrado en la Antártida en 1984). Uno de los entornos donde se ha propuesto que los seres vivos podrían seguir desarrollándose en la actualidad son las salmueras subterráneas, que desde 2012 se han ido detectando a una profundidad de aproximadamente 1,5 km [Dzurilla and Teece, 2024].

En 2024, además de varias sondas de diferentes agencias espaciales que orbitan el planeta rojo, operan en su superficie dos rovers de la NASA (llamados *Curiosity* y *Perseverance*), y uno de la agencia espacial china CNSA (*Zhurong*). Está actualmente en revisión, dado su elevado coste económico, el plan preparado por la NASA para traer a la Tierra las muestras de roca y regolito (el suelo desestructurado típico de Marte o la Luna) que está recogiendo y almacenando *Perseverance*. Mientras tanto, continúan los preparativos para que (antes de que termine esta década, si no se producen más retrasos) la Agencia Espacial Europea (ESA) pueda enviar a Marte la misión *ExoMars* con el robot *Rosalind Franklin*, que será capaz de extraer y analizar muestras del subsuelo hasta 2 m de profundidad.

En una etapa posterior, probablemente a lo largo de la década de 2040, llegarán las misiones tripuladas a Marte. Y ante ello se plantea una pregunta que ya tenemos sobre la mesa en el caso de la

Luna, con un gran calado científico, sociológico y geoestratégico: ¿llegarán antes los investigadores, los mineros o los turistas? De ello depende que se puedan preservar las necesarias condiciones de limpieza y esterilidad en las misiones (lo que se agrupa en el ámbito llamado «protección planetaria») para que la microbiología terrestre no llegue a contaminar la vida endógena marciana, en caso de que exista.

Dando un salto al planeta Venus, sabemos que desde hace cientos de millones de años la vida no puede existir en su abrasadora superficie (que se encuentra a unos 460 °C). Pero tal vez podría estar desarrollándose en su densa atmósfera, concretamente, en su capa media de nubes, entre unos 50 y 60 km de altura y a temperaturas comprendidas entre los 40 °C y -30 °C, respectivamente. Dado que los aerosoles que forman esa capa de nubes contienen ácido sulfúrico, se ha asumido que si allí existieran microorganismos en suspensión, deberían ser acidófilos, quizá similares a algunos de los que viven en las aguas del río Tinto. La atmósfera de este planeta será explorada durante los próximos años por misiones de la NASA que ya están en fase de construcción.

## Más allá de nuestros planetas vecinos

Otros lugares donde los seres vivos podrían haberse desarrollado son algunas de las lunas de Júpiter y Saturno, que se conocen genéricamente como «mundos oceánicos», dado que poseen gran cantidad de agua líquida bajo sus superficies heladas [Theiling *et al.*, 2022]. Entre los que orbitan Júpiter, la atención está puesta principalmente en el satélite Europa (uno de los cuatro descubiertos por Galileo Galilei en 1610), cuya corteza de hielo de hasta 20 km de espesor

esconde un gigantesco océano de agua salada, de entre 80 y 100 km de profundidad. Su lecho es el manto del planeta, con actividad geológica, por lo que existen volcanes submarinos que inyectan energía y un buen número de moléculas en el agua. Por tanto, ese oscuro océano de Europa reúne las características para contener alguna forma de vida en la actualidad. Dado el interés de esta luna para la astrobiología, su exploración va a continuar a partir de 2031 mediante las misiones *JUICE* de la ESA (enviada en 2023) y *Europa Clipper* de la NASA (lanzada en 2024), que realizarán sobrevuelos de su superficie para poder analizarla y estimar la composición del océano.

Entre los satélites de Saturno, los que más interés concitan son Encélado y Titán. El primero también posee una superficie de hielo bajo la que se extiende un océano de agua líquida y alcalina, y en varias ocasiones se han podido detectar eyecciones o géiseres de vapor de agua que se proyectan hasta el exterior de esta luna. Algunos de ellos pudieron ser analizados por la sonda *Cassini* de la NASA a partir de 2005, y esa investigación continuará en misiones futuras.

En cuanto a Titán, se trata del único cuerpo del sistema solar que posee masas líquidas superficiales, pero sus lagos y mares no son de agua, sino de metano. El resto de su superficie es de hielo de agua, recubierto por materia orgánica compleja (de origen meramente químico y no biológico) que se acumula formando grandes dunas en torno al ecuador del satélite. Bajo su corteza, también existe un océano de agua líquida rica en sales y tal vez con amoníaco. Otra particularidad de esta luna es que posee una atmósfera densa y opaca, formada mayoritariamente por nitrógeno molecular ( $N_2$ ). En conjunto, se considera que Titán podría estar funcionando como un gran reactor de química prebiótica que tal vez pueda dar lugar a la aparición de la vida en los próximos cientos de millones de años. Para continuar la investigación de su superficie que realizó la sonda

de la ESA *Huygens*, liberada por Cassini en 2005, está previsto que en 2027 se lance la misión *Dragonfly* de la NASA, que llegará a las dunas de Titán en 2034 y funcionará como un gran laboratorio móvil embarcado en un helicóptero con ocho rotores.

Por último, la astrobiología también busca señales de vida en los planetas extrasolares. Desde el descubrimiento en 1995 del primer exoplaneta que orbita una estrella similar al Sol, ya son más de 6000 los que se han podido detectar en nuestro vecindario cósmico, desde telescopios terrestres o espaciales (entre estos últimos, Hubble, Spitzer, Kepler y James Webb) y empleando diferentes técnicas. La mayoría de ellos forman parte de sistemas planetarios más o menos complejos, y en torno al 4 % del total son rocosos y similares a la Tierra en tamaño. En la actualidad se investigan con especial atención los que están en la banda de habitabilidad de sus estrellas y que, por tanto, podrían tener agua líquida superficial, como se ha indicado previamente. Aún más relevantes son los que poseen atmósfera, dado que sería posible detectar biomarcadores moleculares en ellas [Schwieterman *et al.*, 2018].

En cualquier caso, aún no se ha descubierto ninguna señal de vida extraterrestre. Pero el número de planetas extrasolares en el universo observable se estima en unos  $10^{23}$ , por lo que las opciones para otras biología son —nunca mejor dicho— astronómicamente grandes. Los satélites que los orbiten serán 10 o 100 veces más. Recordando al astrónomo y divulgador científico Carl Sagan: «Si estamos solos en el universo, sin duda sería un terrible desperdicio de espacio».

Ante todo ello, merece la pena terminar con una famosa frase de Arthur C. Clarke: «A veces creo que hay vida en otros planetas y a veces pienso que no. En cualquiera de los dos casos, la conclusión es asombrosa».

Muchas gracias por su atención.

## Referencias

- AMILS, R.; ESCUDERO, C.; OGGERIN, M., et al. (2023): «Coupled C, H, N, S and Fe biogeochemical cycles operating in the continental deep subsurface of the Iberian Pyrite Belt», en *Environ. Microbiol.* 25: 428-453.
- BRIONES, C. (2020): ¿ESTAMOS SOLOS? EN BUSCA DE OTRAS VIDAS EN EL COSMOS. Ed. Crítica, Barcelona.
- DZURILLA, K.A.; TEECE, B.L. (2024): «Discriminating between extinct and extant life detection: implications for future Mars missions», en *Front. Astron. Space Sci.* 11: 1452362.
- JOYCE, G.F.; SZOSTAK, J.W. (2018): «Protocells and RNA self-replication», en *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* 10: a034801.
- OPARIN, A. (1924): *Proiskhozhdenie zhizny*. Moscow: Izd. Moskovhii RabochiI. [Primera traducció al anglès: Oparin, A. (1938). *The origin of life*. Macmillan, New York.].
- RUIZ-MIRAZO, K.; BRIONES, C.; DE LA ESCOSURA, A. (2014): «Prebiotic systems chemistry: New perspectives for the origins of life», en *Chemical Reviews* 114: 285-366.
- SCHWIETERMAN, E.W.; KIANG, N.Y.; PARENTEAU, M.N., et al. (2018): «Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life», en *Astrobiology* 18: 663-708.
- THEILING, B.P.; CHOU L.; DA POIAN, V., et al. (2022): «Science autonomy for ocean worlds Astrobiology: A perspective», en *Astrobiology* 22: 901-913.

### Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article

BRIONES, Carlos, «Humanidad y universo: parámetros para la vida y la exploración» [en línia], a: Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra (40a : 16, 17, 23, 24 set. 2024: Andorra la Vella). *Humanitat i evolució de la vida = Humanidad y evolución de la vida = Humanité et évolution de la vie*. [en línia]. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats. Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, 2024 (978-99920-82-11-9) <<http://www.universitatestiutardor.ad/UEA2024>>

40a UNIVERSITAT D'ESTIU I TARDOR D'ANDORRA

*Sessió del 24 de setembre del 2024*

# CONCLUSIONES

## HUMANIDAD Y EVOLUCIÓN DE LA VIDA

José María Bermúdez de Castro

Paleoantropòleg, codirector de les excavacions dels jaciments de la serra d'Atapuerca (1991-2024),  
director del Centre Nacional d'Investigació sobre l'Evolució Humana (2004-2012), actualment membre *ad Honorem*.  
Covicepresident de la Fundació Atapuerca i membre de la Reial Acadèmia Espanyola (silló K).

Paleoantropólogo, codirector de las excavaciones de los yacimientos de la sierra de Atapuerca (1991-2024),  
director del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (2004-2012), actualmente miembro *ad Honorem*.  
Covicepresidente de la Fundación Atapuerca y miembro de la Real Academia Española (sillón K).

Paléanthropologue, codirecteur des fouilles des sites de la Sierra de Atapuerca (1991-2024),  
directeur du Centre national de Recherche sur l'Évolution Humaine (2004-2012), actuellement membre *ad Honorem*.  
Coviceprésident de la Fondation Atapuerca et membre de l'Académie Royale Espagnole (fauteuil K).

Durante las charlas que han tenido lugar durante las dos últimas semanas de septiembre de 2024 en el foro de reflexión y debate de la *Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra*, hemos escuchado aspectos de enorme interés relacionados con la evolución de la vida y de los seres humanos. También se ha reflexionado sobre nuestro complicado presente en un medio ambiente que se degrada con rapidez, y del futuro que podemos plantear, tanto para el medio en el que vivimos como para nuestra propia especie, y seguir así formando parte del devenir del universo.

Hemos hablado de las principales adaptaciones que experimentaron nuestros ancestros a lo largo de los últimos 7 millones de años de evolución, desde la separación de la genealogía humana de la genealogía de los chimpancés: la postura erguida y la locomoción bípeda, los cambios en la anatomía de la mano para conseguir la pinza de precisión, el incremento exponencial del tamaño del cerebro y su avance hacia una complejidad creciente, sin olvidarnos de que el mayor logro adaptativo ha sido la cultura, entendida de una manera holística como la transformación de la materia prima para conseguir todas las innovaciones que no forman parte de nuestra anatomía, pero que nos han permitido mejorar nuestra supervivencia. Hemos aprendido que la evolución de nuestro cerebro ha experimentado cambios aparentemente independientes, que han resultado en un tamaño tres veces superior al de nuestros ancestros más lejanos en el tiempo y en una demora en el logro de las capacidades plenas de este órgano. Esta última adaptación ha posibilitado una habilidad extraordinaria para conseguir la información necesaria del medio durante más tiempo y mejorar nuestra probabilidad para la supervivencia individual y colectiva. Nuestro desarrollo somático se ha prolongado y ha experimentado cambios sustanciales con la aparición de dos etapas nuevas: la niñez y la adolescencia. La niñez presenta algunos

rasgos diferenciales con respecto a la infancia, que tiene una menor duración que en las especies de simios antropoideos. La niñez, una etapa en la que ya no es necesaria la lactancia obligada, ha posibilitado un crecimiento demográfico que en estos momentos se nos antoja imparable. Los cambios en el cerebro durante la adolescencia pueden resultar perjudiciales en muchos casos, pero la mayoría de los individuos culminan este período con una mejora extraordinaria en las habilidades para una reproducción responsable.

Si bien nuestra especie, *Homo sapiens*, surgió en África hace unos 300 000 años, hemos mostrado el sorprendente y paradójico retraso en la consecución de la enorme cantidad de conocimientos que hoy en día atesora la humanidad. Nuestro estilo de vida de cazadores y recolectores fue un obstáculo insalvable para el progreso del conocimiento. La llegada del Neolítico, con una novedosa forma de conseguir los recursos y un estilo de vida totalmente diferente, ha tenido un impacto extraordinario en el devenir de la humanidad. Aprendimos que la mayoría de las innovaciones científicas y tecnológicas, y en particular las que han surgido en los últimos siglos, han sido consecuencia de la estrecha colaboración entre los seres humanos trabajando como un verdadero cerebro colectivo. Aunque la cultura se puede considerar como la adaptación clave de la humanidad, también hemos reflexionado sobre los problemas que el abuso y el mal uso de ese logro evolutivo puede suponer para nuestra continuidad como especie.

Enlazando con esta última consideración, la Dra. Frédérique Chlous nos habló de las diferentes formas de la biodiversidad del planeta y de la capacidad de las especies para evolucionar en un medio cambiante. Ante la celeridad de esos cambios en los últimos decenios, sabemos que esa capacidad es insuficiente. No hay tiempo material

para que las especies se adapten, por lo que estamos asistiendo en tiempo real a una rápida disminución de la biodiversidad. Lo podemos notar en las aves o en los insectos, por poner un par de ejemplos que todos podemos percibir. El empobrecimiento de la biodiversidad representa una amenaza real para nuestra especie, puesto que ciertos insectos como las abejas son absolutamente indispensables para el proceso de polinización de las plantas. No podemos prescindir de los nutrientes que proporcionan los vegetales a una humanidad cuyo crecimiento demográfico ha sido extraordinario en los dos últimos siglos.

Además, el incremento de la temperatura global del planeta resulta una amenaza directa, por su influencia en la multiplicación de fenómenos atmosféricos extremos que afectan a la vida de las personas, pero también a la economía. Como nos explicó la Dra. Chlous, se estima que el aumento de las temperaturas podría ser en poco tiempo la causa de la peor crisis financiera a escala mundial. Por supuesto, nuestra salud también se está resintiendo por este problema, como demuestra la elevación de la tasa de mortalidad durante las repetidas olas de calor que experimentamos cada verano.

Además, la sobreexplotación de los mares, la creciente polución o las especies invasoras en ecosistemas que se empobrecen de manera creciente representan una amenaza real para la biodiversidad. Los organismos competentes en estas materias tratan de encontrar soluciones, detectando los problemas e intentando aplicar políticas inteligentes para que los problemas puedan aminorarse. Todo parece muy complejo, puesto que el modelo social de los estados más desarrollados no se puede cambiar en unos pocos años.

A modo de conclusión, la Dra. Chlous explicó que *Homo sapiens* ha conseguido habitar todo el planeta gracias a la cultura y a nuestra

singular organización social. Los seres humanos deberíamos considerar nuestros límites y repensar nuestra relación con los demás seres vivos.

Por otro lado, desde hace tiempo hemos experimentado con plantas y animales mediante cruzamiento y selección, pero sin conocer las bases genéticas del proceso. En su charla, el Dr. Salvador Macip nos explicó cómo hemos empezado a comprender ese proceso gracias al descubrimiento hace siete décadas de la estructura de la doble hélice del ADN y el ARN. Sabemos ahora que estas macromoléculas pueden ser modificadas con diferentes técnicas y objetivos diversos, como la medicina regenerativa y las terapias antienvjecimiento. En los países desarrollados vivimos muchos más años que hace un siglo; nuestra esperanza de vida al nacimiento ha experimentado un incremento considerable en las últimas décadas. Pero la pregunta que nos plantea el Dr. Macip —y que todos nos hacemos— es: ¿Por qué vivir más años de los que nos corresponde como individuos reproductores? Se trata de años adicionales, que representan una carga física y emocional para nosotros mismos y para el resto de la sociedad. Es por ello que los esfuerzos deberían centrarse no tanto en incrementar la duración de la vida, sino en mejorar la salud durante más tiempo o, mejor dicho, alargar la SALUD PLENA, como nos propone la Organización Mundial de la Salud. Retrasar el envejecimiento celular debería ser, por tanto, el objetivo esencial de las investigaciones.

El Dr. Macip también nos explicó en qué consiste la tecnología CRISPR (acrónimo de repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente espaciadas), que representa uno de los avances científicos más importantes de la pasada década. El CRISPR es una región del ADN de ciertas bacterias que actúa como un sistema inmunitario frente a los virus que las atacaron en el pasado y que guardan la

memoria de ese evento en su genoma. Estas regiones fueron estudiadas por primera vez en la década de 1990 por el español Francisco Juan Martínez Mojica. Años más tarde, varios equipos de investigación han conseguido aplicar estas secuencias mediante una proteína (Cas-9), y la CRISPR-Cas-9 se ha convertido en una herramienta extraordinaria de edición del ADN. Sería algo así como unas tijeras moleculares que permitirían la eliminación de una región concreta de información genética no deseable y su sustitución por otra. Por desdado, y como nos ha explicado el Dr. Macip, la edición genética ha generado polémicas científicas sobre su pertinencia ética. Todos recordamos el caso del científico chino He Jiankui, que se conoció en 2018. Ese fue el año del nacimiento de dos niñas gemelas: LULU y NANA, cuyos embriones fueron editados por este científico para eliminar el potencial riesgo de padecer VIH/SIDA.

Por otro lado, el Dr. Macip nos habló sobre la realidad actual del empleo de la tecnología en nuestros cuerpos, que nos permite vivir y desarrollar aptitudes perdidas por accidentes, malformaciones genéticas, etc. Las posibilidades que nos ofrece la tecnología para sumarse a nuestra biología tienen un futuro extraordinario, que ha sido postulado por el transhumanismo (H+), un movimiento científico y filosófico que hunde sus raíces nada menos que en la década de 1920 con las ideas planteadas por el genetista británico J.B.S. Haldane. El objetivo del transhumanismo es transformar y mejorar la condición humana en el ámbito físico e intelectual mediante el desarrollo de tecnologías ya disponibles como la ingeniería genética, la inteligencia artificial y la nanotecnología. Las ideas esenciales del transhumanismo no son el producto de la ciencia ficción, sino que se basan en la eliminación de ciertas causas que provocan la mortalidad prematura (tabaquismo, alcoholismo, enfermedades), así como en la investigación que nos llevaría a conocer las causas del envejecimiento y poner freno a este

proceso. Además, el Dr. Macip explicó cómo la tecnología podrá sustituir en muchos casos funciones biológicas deterioradas, mejorando así la esperanza de vida al nacimiento de las sociedades que desarrollen estas capacidades tecnológicas.

Finalmente, el Dr. Carlos Briones nos habló de la astrobiología, una ciencia muy joven de clara vocación multi- y pluridisciplinar, en la que se combinan la física, la química, las matemáticas, la biología, la geología, la ingeniería y la filosofía. El Dr. Briones, especialista en el origen de la VIDA, nos explicó cómo pudo aparecer la vida en nuestro planeta. La transición entre la química y la biología habría dado lugar a algo tan extraordinario en entornos y condiciones ambientales singulares. La necesidad de agua, compuestos orgánicos y fuentes de energía fueron esenciales para la aparición de la vida. Entre otros aspectos, la astrobiología trata de imaginar cómo puede ser la vida en otros sitios fuera de nuestro planeta, investigando lugares en los que habitan organismos en condiciones extremas, como el parque de Yellowstone, en Estados Unidos, la Antártida o las ácidas aguas del río Tinto, en Huelva.

¿Sería posible encontrar ambientes similares en otros planetas que orbitan alrededor de los miles de millones de estrellas ( $10^{25}$ ) que existen en el universo? El Dr. Briones nos ha explicado cómo estos elementos pueden encontrarse incluso en planetas y satélites de nuestro propio sistema solar, sin dejar de buscar en los planetas de otros sistemas de la Vía Láctea, de los que ya se conocen unos 6000. Si consideramos la infinidad del universo, las probabilidades aumentan de manera exponencial. Además, teniendo en cuenta que la vida se ha formado gracias a cuatro elementos esenciales y universales: carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON), no podemos descartar que estos elementos estén interaccionando entre sí en millones de lugares del universo. Esto lleva a la pregunta de si



la vida es consecuencia del azar o de la necesidad, como nos explicó el biólogo Jacques Monod en su ensayo de 1970. Si la vida hubiera sido consecuencia de muchas casualidades, lo que sucedió en la Tierra podría ser una singularidad muy improbable y estaríamos solos en el universo. Pero si hubiera sido la consecuencia de un aumento necesario de la complejidad química, es muy posible que múltiples lugares del universo alberguen otras formas de vida.

En lo que concierne a nuestro planeta, que se formó hace unos 4500 millones de años, se ha planteado la existencia de una etapa que se denomina «química prebiótica», en la que pudieron formarse biomoléculas sencillas. A esta primera fase habría seguido la formación de polímeros más complejos: ácidos nucleicos o péptidos. El modelo denominado «Mundo ARN» propone que esta molécula habría sido la primera que almacenó información codificada para la formación de las proteínas a partir de los péptidos. Si añadimos membranas sencillas que encierren esas macromoléculas, ya tendríamos los primeros seres vivos unicelulares capaces de autorreplificarse. Todo esto pudo ocurrir hace unos 3700 millones de años, y unos cien millones de años después podría haber existido el último antepasado común de todos los seres vivos, conocido como LUCA, por sus siglas en inglés (*last universal common ancestor*). LUCA habría sido el antepasado común más reciente de todos los organismos vivos y muy posiblemente de todos los que ya se han extinguido. Los restos fósiles más antiguos conocidos en nuestro planeta son bacterias filamentosas y los llamados «estromatolitos» (capas mineralizadas de comunidades bacterianas), cuya antigüedad se estima en 3450 millones de años.

El Dr. Carlos Briones nos recordó que no tenemos un planeta B similar al nuestro al que desplazarnos cuando la Tierra agonice por

el efecto devastador que estamos infligiendo a todos los ecosistemas. La eventualidad de que nuestra especie acabe por buscar otros lugares en el universo para vivir no está tan cercana como podría parecer por los relatos de ciencia ficción y por las ideas vertidas en ciertos medios de comunicación. Es más, la posibilidad de vivir en el espacio está tropezando con los problemas de salud que genera la ingravidez y las condiciones particulares de los vuelos espaciales. Un escenario más plausible sería encontrar una solución a estos problemas biológicos, tal vez aplicando los postulados del transhumanismo, antes de buscar opciones reales para la búsqueda de nuevos hogares con la tecnología adecuada. Si este escenario fuera posible, nuestra especie podría terminar subdividiéndose en varias especies, por la separación de dos o más poblaciones distanciadas genéticamente en ambientes distintos.

Por último, el Dr. Briones nos dejó en el aire para la reflexión las inquietantes preguntas que todos nos hacemos: si la vida ha surgido en otros lugares del universo, ¿podrían haberse desarrollado organismos inteligentes?, ¿tendrían esos organismos interés en comunicarse con nosotros?, ¿podrían haber llegado los mensajes que ya hemos enviado nosotros a esas posibles «civilizaciones»?

**Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article**

BERMÚDEZ DE CASTRO, José María, «Conclusiones - Humanidad y evolución de la vida» [en línea], a: Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra (40a : 16, 17, 23, 24 set. 2024: Andorra la Vella). *Humanitat i evolució de la vida = Humanidad y evolución de la vida = Humanité et évolution de la vie*. [en línea]. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats. Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, 2024 (978-99920-82-11-9) <<http://www.universitatestiutardor.ad/UEA2024>>

# DISCURS DE CLOENDA

*Sessió del 24 de setembre del 2024*

Digníssimes autoritats,

Senyores i senyors,

Any rere any des del 1981, es materialitza a les acaballes de l'estiu, i ara també a principis de tardor, la Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, que ha arribat a la quarantena edició.

Enguany, el tema sobre el qual hem debatut ha estat el de la humanitat i l'evolució de la vida.

Aquests dies hem conversat animosament i hem intentat obrir finestres a quatre preguntes fascinants que la ciència té plantejades:

D'on venim els humans i quin lloc ocupem en l'evolució de les espècies?

Com ens comportem amb el nostre entorn i la biodiversitat a escala planetària?

Com seran els humans del futur?

Quines són les condicions de vida en l'univers i quina perspectiva de futur tenim amb relació a l'univers?

Ho hem fet acompanyats per un paleoantropòleg, una antropòloga, un metge i un cosmòleg.

Gràcies als ponents d'aquesta Universitat per haver aconseguit amb escreix apropar-nos-hi.

La recerca sobre aquestes preguntes no només assoleix les fronteres del coneixement científic sinó que també les transcendeix i involucra altres camps de la cultura i el pensament.

Són preguntes que tenen la resposta en l'àmbit de la ciència: la biologia, la genètica, l'etologia, la paleontologia, la paleoantropologia, l'estudi de la prehistòria, de la història, la física i l'astronomia, entre altres disciplines.

El tema escollit enllaça amb el treball que es va dur a terme el curs escolar passat, en el marc de la Jornada de les ciències, en què els alumnes de primer de batxillerat dels tres sistemes educatius, acompanyats pels seus professors, van treballar sobre l'evolució humana.

Van dialogar sobre l'evolució dels humans, la vida, la mort i els mecanismes que ens fan sentir i sobretot funcionar: la consciència.

Els preocupava l'extinció de l'*Homo sapiens*. Afirmaven que, imbuïts d'hedonisme, seguim provocant guerres, crisis alimentàries i pobresa, i malmetem la naturalesa, però que alhora som capaços d'avançar, per exemple, en medicina i salvar vides cada dia.

Aquest cicle de conferències ha plantejat renovar la nostra aposta per la ciència i el coneixement, conscients que l'evolució segueix en marxa.

La reconstrucció del nostre passat és com un mosaic i saber-lo entendre és una tasca complexa i apassionant en què cada disciplina aporta una tessella i cal un esforç col·lectiu de la comunitat científica per fer-les encaixar.

L'evolució és un procés fonamental que descriu els canvis en els trets heretables de les poblacions al llarg de generacions successives. Aquest és el mecanisme pel qual la vida a la Terra s'ha diversificat i adaptat a diversos ambients al llarg de milions d'anys.

El concepte d'*evolució* s'associa principalment amb el treball pioner de Charles Darwin, *L'origen de les espècies* (1859), que va establir les bases perquè entenguéssim com evolucionen les espècies per mitjà del procés de selecció natural.

Gràcies a l'obra de Darwin, disposem de les eines per reconstruir la nostra evolució com a espècie, al llarg del temps, fins a arribar als homínids més propers. Des de Darwin, també sabem que el motor principal de l'evolució és la selecció.

Des de les acaballes del segle xx hi ha hagut un ampli consens entre disciplines sobre l'origen africà de la nostra espècie. Les dades paleoantropològiques, arqueològiques i genètiques confirmen l'origen dels humans a l'Àfrica fa uns 200.000 anys. És important remarcar-ho.

Les primeres evidències genètiques de l'origen africà de la humanitat provenen de l'anàlisi de l'ADN i mostren que els genomes mitocondrials més diferenciats i basals de les poblacions actuals són els que es troben en poblacions africanes. La resta de genomes són una petita fracció de la diversitat trobada a l'Àfrica.

La ponència inaugural, *Claus essencials de l'evolució humana*, ha anat a càrrec de José María Bermúdez de Castro, destacat paleoantropòleg, codirector de les excavacions dels jaciments de la serra d'Atapuerca (patrimoni de la humanitat des de l'any 2000) amb Juan Luis Arsuaga, que ens va visitar el mes de maig, i Eudald Carbonell. El Sr. Bermúdez de Castro també és membre de la Reial Acadèmia Espanyola (silló K), on, segons m'han informat, té la tasca ingent de revisar més de 4.000 entrades del diccionari en l'àmbit científic.

Fa només tres dècades no ens podíem imaginar que una espècie humana trobada a la península Ibèrica formés part de la història evolutiva.

La nostra espècie, l'*Homo sapiens*, ha conviscut i s'ha entrecruat amb d'altres com els neandertals o els denissovans. Som una forma de vida molt particular, amb una gran fragilitat i amb una enorme intel·ligència impulsada pels canvis genòmics i la selecció natural, que ens ha permès expandir-nos i sotmetre als nostres designis ecosistemes i espècies.

La comunicació *La humanitat davant els límits del planeta* va ser a càrrec de la Sra. Frédérique Chlous, professora d'antropologia, presidenta del Comitè Científic de l'Agència Francesa de la Biodiversitat i directora general delegada de recerca, expertesa, valoració i ensenyament al Museu Nacional d'Història Natural de París, amb el qual el Ministeri d'Educació d'Andorra treballa en projectes d'exposició.

Des del seu coneixement de la biodiversitat, la Sra. Chlous ens explica les nostres maneres d'interaccionar amb la biosfera i els reptes que es plantegen davant el canvi climàtic. La seva recerca se centra en les poblacions que viuen a la costa, on la gestió dels oceans és clau per assegurar la nostra pròpia supervivència.

Voldria dir, si m'ho permeteu, que com a individus i com a societat anem adquirint el que podríem anomenar *una consciència ecològica* que ens fa interrogar i reflexionar sobre la finitud de l'espècie humana.

Ahir, dilluns, el Dr. Salvador Macip, catedràtic de medicina molecular al Departament de Biologia Molecular i Cel·lular de la Universitat de Leicester i director dels Estudis de Ciències de la Salut de la Universitat Oberta de Catalunya, va parlar sobre *Els humans moderns, present i futur*.

El seu coneixement del corrent de pensament transhumanista ens aporta elements de reflexió sobre els humans del futur amb una anàlisi del que proposa aquest corrent: utilitzar totes les eines que la ciència posa a l'abast per modificar els humans, i millorar d'alguna manera l'espècie humana.

Davant el ventall de possibilitats d'intervenció sobre el cos humà i l'impacte de la tecnologia en la nostra vida, és imprescindible pensar les conseqüències dels darrers avenços tecnològics en l'àmbit de la genòmica i la intel·ligència artificial.

La conferència d'aquest vespre, *Humanitat i univers: paràmetres per a la vida i l'exploració*, ha anat a càrrec del Carlos Briones, investigador del Consell Superior d'Investigacions Científiques al Centre d'Astrobiologia i divulgador científic.

Ha exposat les possibilitats de formes de vida en altres punts del sistema solar o en planetes extrasolars. Això ens fa prendre consciència de les condicions excepcionals que ofereix la Terra per a la vida i de la necessitat de ser respectuosos en l'exploració de l'espai.

Ara la biodiversitat està a les nostres mans i plegats hem de procurar que el món sigui més just, més fraternal i sobretot més respectuós amb totes les espècies.

Gràcies als ponents que s'han esforçat per compartir els seus coneixements amb tots nosaltres, desconexors en la matèria. Ho han fet en les seves ponències, i espero que continuaran fent-ho també, a través dels seus llibres fascinants, que honoren la ciència i la literatura, i demostren que també pot ser patrimoni dels científics.

Voldria expressar el meu agraïment al públic que al llarg dels quaranta anys s'ha mantingut fidel a aquesta cita i a les persones que ens han acompanyat en aquesta edició.

Vull fer-lo extensiu a la Sra. M. Àngels Vilana, persona clau en aquest esdeveniment, i a les Srs. Cristina Martí i M. Àngels Ruf, que en la darrera etapa i sobretot en les darreres edicions han organitzat unes edicions brillants i esplendoroses.

Aquest reconeixement era necessari i té una rellevància especial en aquesta quarantena edició.

Vull acabar citant el professor Bermúdez de Castro, una persona dedicada a aclarir els nostres orígens. En el discurs titulat *Naturaleza, cultura y evolución*, que va llegir el dia 9 d'octubre del 2022, en la seva recepció pública a la Reial Acadèmia Espanyola, deia:

“El ser humano es producto de la íntima interacción entre biología y cultura. La cultura ha sido y es la adaptación fundamental de las especies del género Homo [...]. Sin embargo, algo se nos está escapando de las manos. La tecnología, como parte sustancial de la cultura, ha progresado mucho más deprisa de lo que somos capaces de asumir la mayoría de los mortales [...]. El resultado final podría ser una trampa, de la que no podríamos escapar. Somos una especie de primates muy inteligente, pero con posibilidades limitadas por nuestra propia esencia, incapaces de asimilar y controlar todo cuanto la cultura nos ha proporcionado [...]. Si cerramos los ojos a esa realidad, nos veremos superados por las circunstancias.”

Amb aquestes paraules us convidem a retrobar-nos el mes de setembre de l'any vinent al voltant d'una altra temàtica d'interès general.

Queda clausurada la 40a Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra.

Moltes gràcies.

Ladislau Baró Solà

Ministre de Relacions Institucionals, Educació i Universitats