

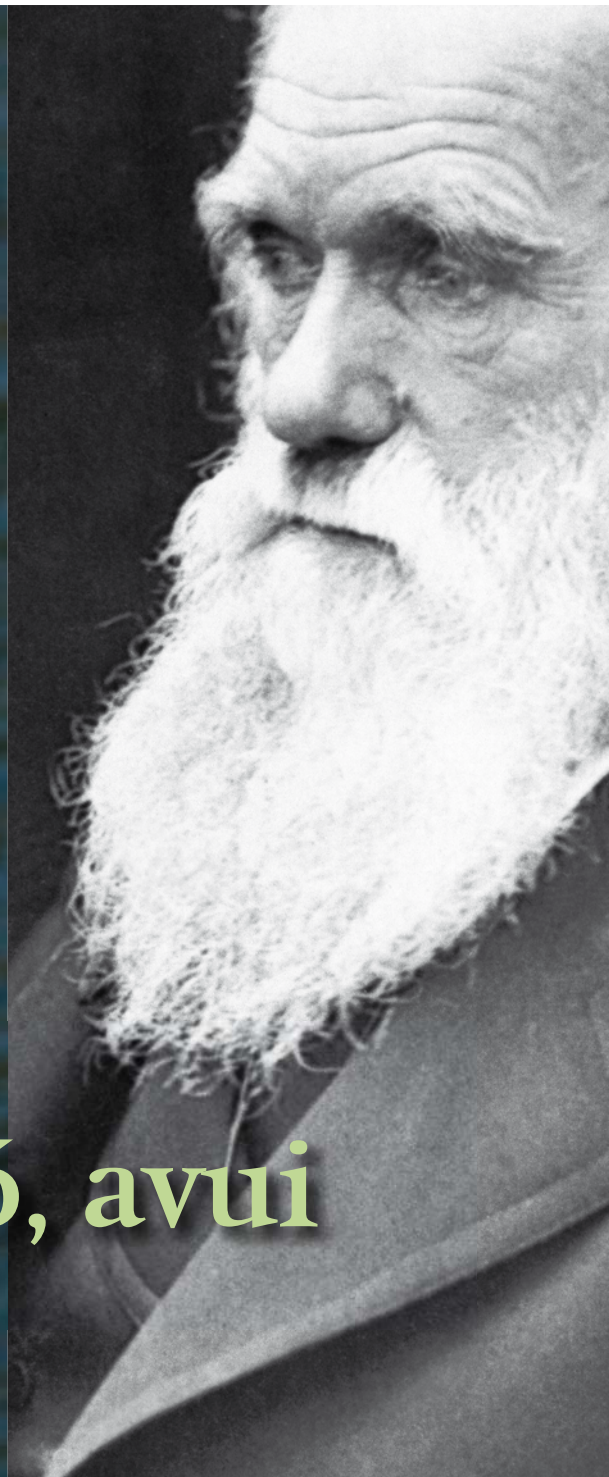


Q

03

Quaderns
del Consell
de Coordinació
Pedagògica

La teoria de l'evolució, avui

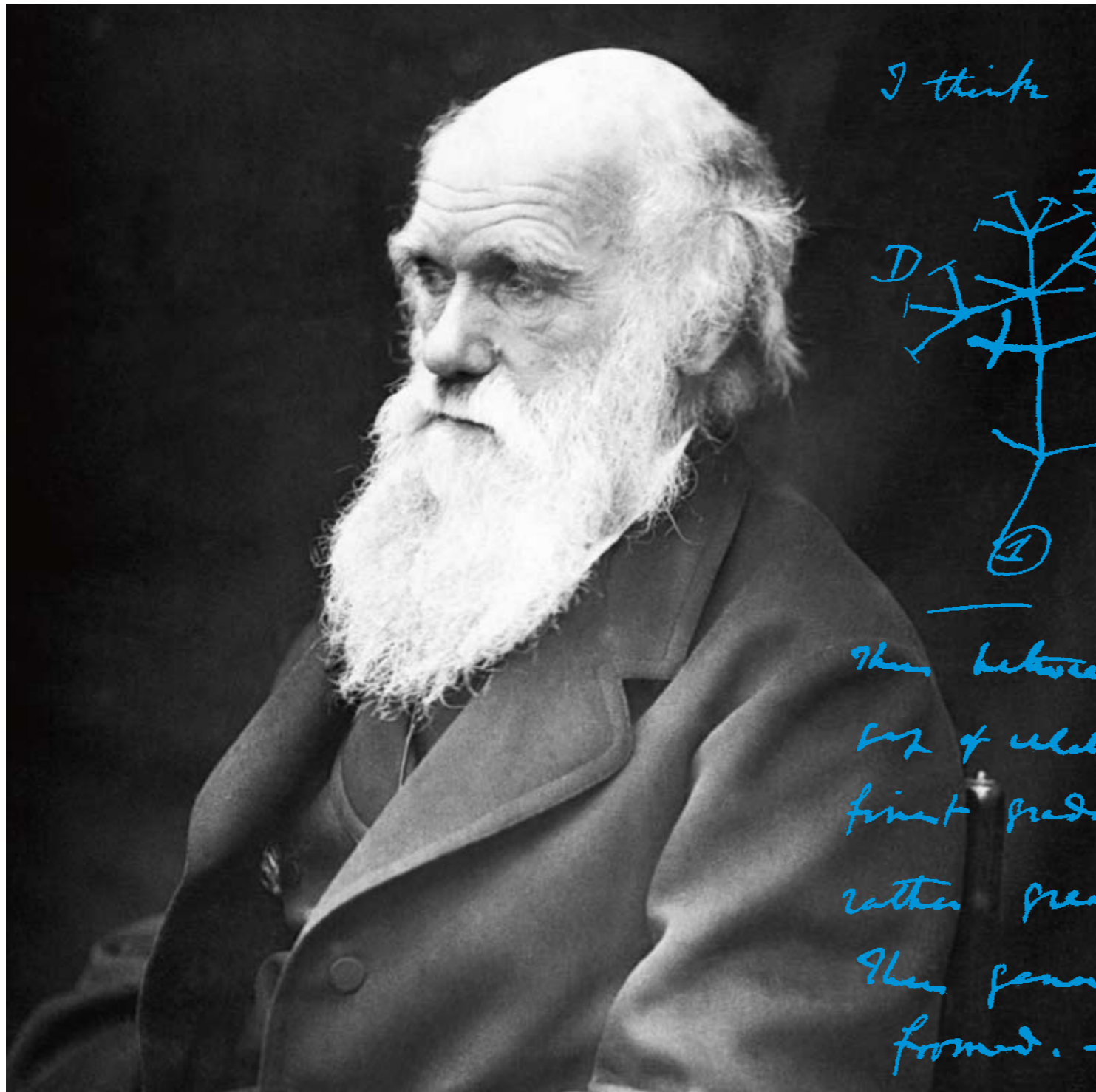




L'any 2009, es va celebrar el 150è aniversari de la publicació de *L'origen de les espècies* de Charles Darwin. El 2010 és l'Any Internacional de la Biodiversitat, en què es pretén donar un toc d'alerta respecte a la pèrdua accelerada d'aquesta, principalment per causes antròpiques. L'Institut d'Educació de l'Ajuntament de Barcelona i el Museu de Ciències Naturals de Barcelona (MCNB), amb la col·laboració del Centre de Documentació i Experimentació en Ciències (CDEC-CESIRE) del Departament d'Educació de la Generalitat de Catalunya, han elaborat aquesta publicació adreçada a docents i a totes les persones interessades a conèixer els mecanismes que generen l'evolució de les espècies, que, entre d'altres, expliquen el creixement de la biodiversitat al llarg de la història de la Terra.

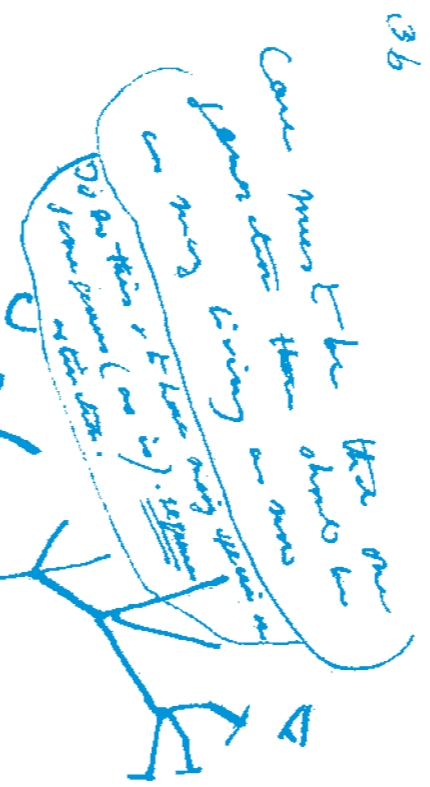
El llibre que teniu a les mans pretén explicar de manera entenedora els diferents aspectes que, a la llum de la ciència actual, configuren la teoria de l'evolució. Així doncs, a més dels mecanismes bàsics de la selecció de les espècies, presenta els nous principis que amb el temps s'han incorporat a la teoria o l'han modificada o matisada, i corregeix molts dels errors, tòpics i malentesos que des del començament l'han acompanyada.

Per a l'elaboració del present llibre, l'autor s'ha basat fonamentalment en la publicació digital *La teoria de l'evolució, 150 anys després*, que es compon de trenta-nou articles redactats al llarg de l'any 2009 per reconeguts científics i que és consultable en línia a <http://www.blogmuseuciencias.org>.



I think

There between A & B. various
 sort of relation. C + B. The
 finest gradation, B & D
 rather greater distinction
 than genera would be
 formed. - binary relation



36

La teoria de l'evolució, avui

L'evolució, ¿un fet o una teoria?

Richard Dawkins comenta en el llibre *The Ancestor's Tale* (2005)^{*} que la biologia, al contrari que la història o la física, disposa ja de la seva gran teoria unificada, acceptada per tots els professionals, encara que en diferents interpretacions. Sabem que la física busca aquesta teoria unificada per aplicar-la al seu àmbit. Pot ser que la història no s'ho plantegi. Però sí que ens consta que la biologia ha madurat i s'ha desenvolupat amb fortalesa i ascendent gràcies a una teoria que explica l'evolució dels organismes vius i que, per la seva capacitat sintètica, ha acabat sent La teoria de l'evolució.

Som davant de dos conceptes fonamentals que sovint es confonen en un de sol. D'una banda, constatem la mutabilitat dels organismes vius. El registre fòssil, les anàlisis moleculars, els experiments sobre cicles biològics i generacions consecutives, entre altres proves, conclouen que l'evolució és un fet, una realitat visible arreu. I, d'altra banda i com a conseqüència, la universalitat del procés de canvi evolutiu ha donat peu a una teoria, de concepció senzilla en la seva essència original, que ha estat suficient per comprendre el motor de canvi. Una visió simple, la idea que els organismes que més obstacles superen poden deixar més descendència amb les seves característiques, ha estat corroborada i ampliada per un complex tram de principis i hipòtesis que evidencien la fertilitat del concepte inicial per donar explicació a les circumstàncies reals més diverses. *Un fet natural incontrovertible i una teoria unificadora per explicar-lo, aquestes són les dues cares del terme "evolució"*.

Es discuteix l'extensió en l'espai i el temps del fenomen evolutiu i s'afinen constantment les prediccions de la biologia de l'evolució. La ciència és inconformista i avança comprovant encerts i rebutjant hipòtesis falses. El coneixement actual dels mecanismes evolutius és molt ric, producte d'un creixement gairebé exponencial de la recerca en aquest àmbit durant les darreres dècades. La teoria de l'evolució ha madurat molt, però encara no ha acabat pas el seu recorregut.

FRANCESC URIBE I PERE VILADOT. Museu de Ciències Naturals de Barcelona

^{*} *Science, Evolution, and Creationism*. National Academy of Sciences (2008), <http://www.nap.edu/catalog/11876.html>.



1. Les espècies evolucionen

¿Han estat sempre com són ara, o bé han evolucionat?

Ja fa més de cent cinquanta anys de la formulació de la teoria científica que va descartar del tot la que deia que les espècies eren immutables. El 1859, el naturalista Charles Darwin, després de més de vint anys d'estudis, va escriure, al seu llibre *L'origen de les espècies*, que aquestes van canviant al llarg del temps i que podem identificar o intuir avantpassats comuns per a espècies que actualment són diferents però que tenen trets similars (¿qui negaria, per exemple, que la ratapinyada és “cosina” llunyana de la rata?). I també va fer una excel·lent descripció del principal motor d'aquests canvis: la selecció natural. Abans de sortir publicat aquest llibre tan important, ja se sabien o s'intuïen moltes coses sobre l'evolució. Només calia interrelacionar-les i acabar de muntar una teoria explicativa. I Darwin ho va fer d'una manera bastant completa. Però la seva explicació estrictament científica va topar amb l'explicació científicofilosòfica, d'un marcat dogmatisme religiós, que estava més en voga en la seva època i que es coneix per “creacionisme” o “fixisme” per la seva defensa de la creació directa de formes invariables.

¿Dissenyador, simple atzar, o bé atzar i selecció natural?

En els temps de Darwin, diversos filòsofs i científics brillants encara defensaven l'antiga teoria de Tomàs d'Aquino, basada en idees de Plató i Aristòtil, sobre l'origen de les espècies: la del fixisme, segons la qual cadascun dels organismes està adaptat al seu medi natural perquè un gran dissenyador, un ésser superior, Déu, l'ha dissenyat perfectament perquè s'hi adapti. El 1802, el filòsof i teòleg William Paley havia publicat un llibre que contenia l'explicació més científica possible d'aquesta teoria. D'una manera molt simple, però molt convincent en aquella època en què es feia difícil destriar ciència, filosofia i dogma religiós, deia que si descartéssim el dissenyador intel·ligent com a creador d'uns organismes tan perfectes, només ens quedaria el simple i capritxós atzar com a possible dissenyador. I conclouia que, com que aleatòriament, a l'atzar, no es poden ajuntar trossos de matèria per formar un organisme tan perfecte com ara una ratapinyada, aquesta bèstia és evident que l'ha d'haver creada directament un dissenyador intel·ligent. Deia que



—de la mateixa manera que si et trobessis un rellotge i el veiessis molt ben fet— quan et trobes un ratpenat i el veus tan ben fet, davant la impossibilitat que les seves parts s'hagin muntat elles soles per casualitat, et sembla del tot “demostrat” que l'organisme en qüestió és producte del disseny intencionat d'un creador superior. Però Darwin per fi va demostrar que això era absolutament fals, que cadascuna de les espècies no l'ha creada pas directament Déu, i tampoc el simple atzar ajuntant òrgans capritxosament, sinó la selecció natural, que no funciona del tot aleatòriament, sinó en gran part per mitjà d'un mecanisme natural lligat a la supervivència de les varietats més adaptades a cada medi en cada moment.

Un exemple ben clar d'adaptació: l'ecolocalització

El ratpenat caça insectes de nit perquè la membrana de les ales la té tan prima que de dia el sol de l'estiu la hi cremaria. I de prop hi veu ben poc. Però té un sistema molt ben adaptat per a “veure-hi”: fa uns sons agudíssims anomenats ultrasons (que tenen una freqüència superior a la màxima audible per l'orella humana, de més de 20.000 vibracions per segon) que topen amb l'objecte en qüestió i li retornen com un eco a l'orella interna, i així localitza l'insecte que es vol menjar o la paret amb la qual no vol xocar. L'ecolocalització aèria del ratpenat, el doï la practica de manera subaquàtica. I tant l'un com l'altre, per a poder gaudir d'aquesta utilíssima adaptació, han hagut de passar per milions d'anys d'evolució. Molt més tard que aquestes espècies tan ben adaptades al seu propi medi, l'*Homo sapiens* ha imitat aquest aprofitament del ressò amb les ecografies i el sonar, un aparell de localització submarina que es basa en l'eco produït per un cos submergit en rebre una ona ultrasònica i que es fa servir per a localitzar submarins, mines, vaixells enfonsats, moles de peix, etc.

2. Les espècies no són pas perfectes

Un “apedaçador” les redissenya: la selecció natural

El 1977, el genetista cel·lular François Jacob va afirmar, a l'article “Evolució i bricolatge” que va publicar a la revista *Science*, que la selecció natural no és pas un “dissenyador perfecte”, sinó un “bricolador traçut”, una mena d'apedaçador que no crea espècies del no res, sinó que recicla formes pre-existents. Per a aquest creador aficionat, “crear és recombinar”, com ho fa el bricolador que, amb molta traça, “d'una roda trencada de bicicleta en fa una ruleta”.¹

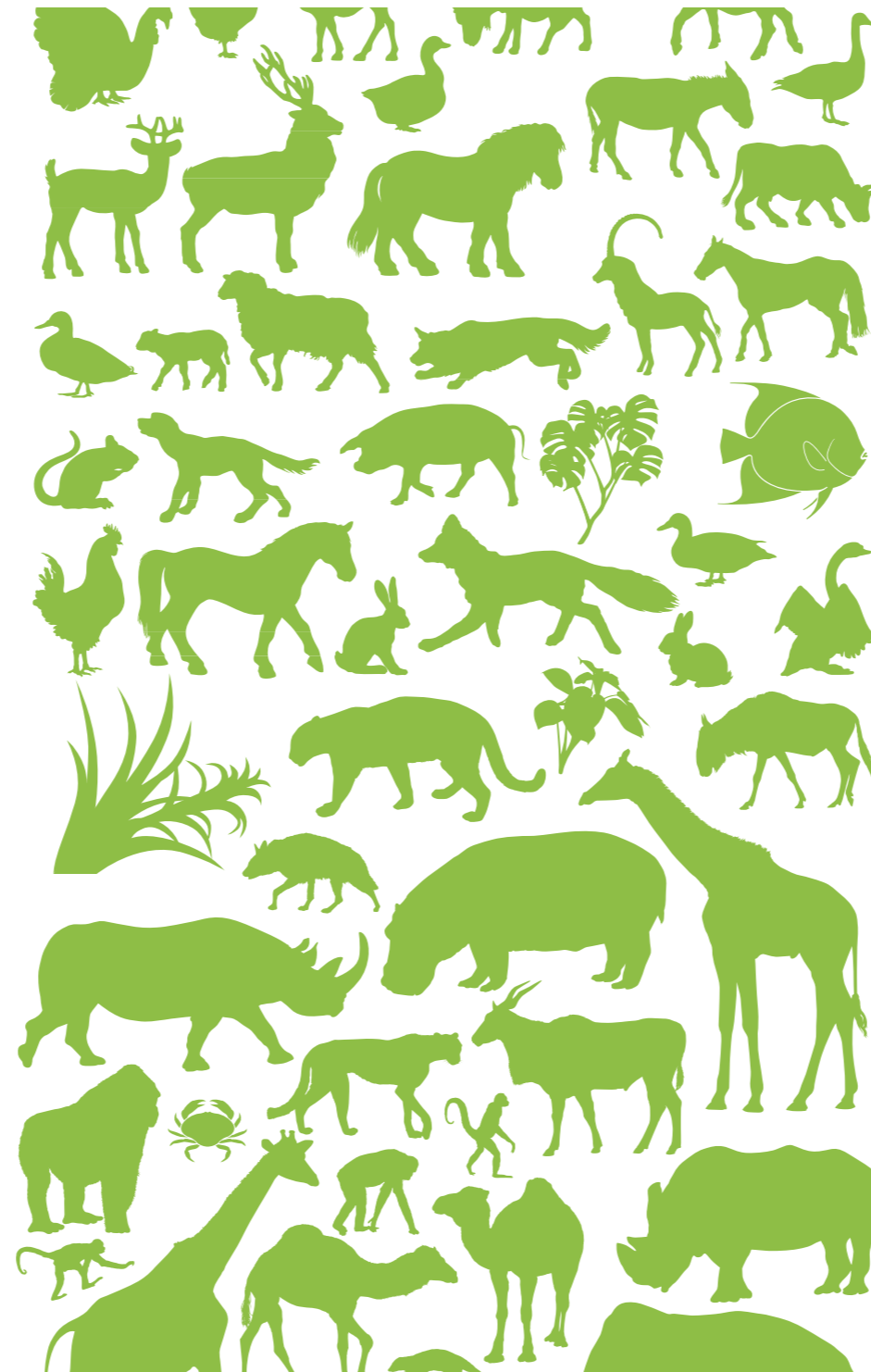
Com diu el filòsof Elliott Sober al seu llibre *Filosofia de la biologia*, si ens fixem en les ales tan diferents que tenen els ocells, les ratapinyades i els insectes, de seguida pensem que si “haguessin estat dissenyades per un enginyer intel·ligent per tal que adaptessin òptimament l'organisme per al vol, seria molt difícil explicar aquestes diferències. Per contra, es fan comprensibles a l'acte si acceptem que cadascun d'aquests grups descendeix d'avantpassats mancats d'ales. L'ala de l'ocell és similar a l'extremitat davantera dels seus avantpassats sense ales; i la de la ratapinyada, a l'extremitat davantera dels seus propis avantpassats sense ales. Les ales no han estat pas dissenyades partint de zero, sinó que constitueixen modificacions d'estructures presents en els avantpassats. Com que la selecció natural és un bricolador traçut, els organismes conserven característiques que revelen els seus orígens”.² Només cal comparar les diverses parts de les potes davanteres d'un ratolí amb les parts equivalents de les ales de la ratapinyada.

Som “reparacions” d'espècies antigues

Gràcies a l'estudi dels fòssils, sabem que fa uns seixanta-cinc milions d'anys, quan encara hi havia dinosaures, va sorgir la ratapinyada com a espècie resultant del lent però hàbil “bricolatge” que la selecció natural va anar fent al llarg del temps, entre d'altres, en les potes davanteres, els ulls i l'orella interna d'un rebesavi molt llunyà del ratolí actual, també rebesavi, és clar, de la ratapinyada actual.

1. JACOB, 1977.

2. SOBER, 2009.



Hi ha animals que tenen òrgans vestigials: vestigis o restes d'òrgans que els seus avantpassats utilitzaven però ells, no. Els embrions de les balenes tenen dents que es reabsorbeixen en la mandíbula abans del naixement. El fetus humà desenvolupa fenedures o obertures branquials que més tard es perden. La nostra esquena no està dissenyada perquè caminem drets (i per això tenim mal d'esquena), sinó sobre quatre potes com els primats.

Stephen Jay Gould, al seu llibre *El polze del panda*, diu que aquest ós que gairebé només menja fulles de bambú té al canell un sisè dit mal fet, un esperó ossi, que l'ajuda a mig subjectar la branca per pelar-la i que és semblant a un os més petit que tenen al mateix lloc els seus cosins carnívors. Doncs bé, un dissenyador intel·ligent no hauria pas reaprofitat un os d'un ós ancestre. Hauria fet un polze “nou de trinca” que agafés la branca de bambú ben agafada.³

Sobre com evolucionen les espècies, els científics d'avui tenen moltíssimes més respostes —encara no pas totes, cal dir-ho— que els de fa cent cinquanta anys. Però va ser Darwin en el mateix instant que va publicar la teoria de l'evolució qui va enterrar el creacionisme —que diu que les espècies han estat creades del no res una per una— com a teoria científica.

3. JAY GOULD, 1983.

3. Una teoria científica: la teoria de l'evolució

L'observació sistemàtica de semblances i diferències

El 1858, el naturalista Alfred R. Wallace va fer arribar des de Malàisia a Charles Darwin una teoria de l'evolució que havia elaborat ell independentment i que era molt similar a la que Darwin estava a punt de publicar. I cal dir que tots dos van tenir molt de mèrit, ja que no disposaven de cap de les eines que tenen avui els biòlegs, com ara l'estudi dels gens i de l'ADN o la datació amb isòtops de carboni. És molt interessant, per tant, saber com va arribar Darwin a formular aquesta gran teoria. Del 1831 al 1836, es va embarcar com a naturalista en la gran expedició que va fer el vaixell *Beagle*. Durant aquest famós viatge, el jove Darwin va recol·lectar exemplars de moltes espècies diferents, va trobar fòssils en cims elevats i va fer altres descobertes que li van servir de base, a ell i altres col·laboradors, per a fer comparacions i deduccions al laboratori al llarg d'anys de minucioses recerques. Concretament a les illes Galápagos, hi va veure moltes espècies endèmiques, és a dir, que només viuen allà: la iguana marina que menja algues, la tortuga gegant, el corb marí no volador, etc. I va formular la hipòtesi següent: aquelles illes van sorgir del mar fa molts mil·lennis (ara es calcula que la majoria fa dos o tres milions d'anys, i la Isabela i la Fernandina, només un milió) com a resultat d'una o més erupcions volcàniques i de mica en mica es van anar omplint de plantes gràcies a les llavors portades per ocells, i també d'animals arribats damunt de vegetació flotant des del continent (que és a uns mil quilòmetres de distància); i, seguint amb la hipòtesi, aquest aïllament va fer que les espècies d'aquelles illes evolucionessin d'una manera diferent de com ho havien fet les espècies "mares" que continuaven vivint al continent.



Pinsans a les Galápagos. Aliments diferents, becs diferents

En aquell arxipèlag, Darwin hi va recol·lectar exemplars de nou espècies de pinsans (ara els científics en reconeixen tretze) i va deduir que totes provenien d'una única espècie pionera, inicial, que al llarg del temps s'ha diversificat en espècies que mengen coses diferents.

Les recerques posteriors han confirmat la seva brillant hipòtesi. S'ha demostrat que l'ADN (l'àcid desoxiribonucleic, que és la molècula que constitueix el suport material de la informació genètica) de les espècies de pinsans de les illes Galápagos és semblant al del pinsà granívor, que menja llavors, de l'illa de Cocos, a Costa Rica. Els comptadíssims pinsans granívors pioners arribats a les illes quan aquestes devien estar ja ben poblades de vegetació, es van atipar de llavors i es van reproduir moltíssim. Però durant els mil·lennis següents va haver-hi períodes d'activitat volcànica que van afegir illes i illots a l'arxipèlag, i també llargs períodes freds i secs. I Darwin va intuir tots aquests fortíssims canvis ambientals antics (que ara s'han estudiat amb més mitjans) només comparant els becs i el règim alimentari de les diverses espècies de pinsans. Les de bec fort mengen llavors i pinyols durs; les de bec feble, fruites i llavors toves; les de bec prim, insectes; una altra espècie menja paparres paràsites de les tortugues; d'altres, fulles o flors; una altra xucla la sang de diversos ocells marins, com ara el mascarell cama-roig; i dues espècies utilitzen branquetes o espines de cactus per a extreure larves d'insectes dels forats dels arbres o dels mateixos cactus.

4. Com va entendre Darwin l'evolució

Com i per què evolucionen les espècies segons Darwin

Segons Ernst Mayr, el model explicatiu de Darwin es basa en cinc fets, dels quals podem extreure tres inferències o conseqüències:

– Fet 1: Tota espècie, si en sobrevisqués cada individu que neix, es multiplicaria exponencialment, sense límits.

– Fet 2: El nombre d'individus en un lloc determinat sol ser bastant estable.

– Fet 3: La quantitat d'aliment disponible no és pas il·limitada.

– Inferència 1: Hi ha una gran competència pels recursos disponibles entre els individus d'una població, i només en poden sobreviure uns quants després d'una intensa competició per l'existència.

Aquests fets que es deriven de l'ecologia de poblacions, combinats amb certs principis de la genètica, es complementen amb dos fets més:

– Fet 4: Els individus d'una mateixa espècie no són pas idèntics entre si, sinó que presenten diferències.

– Fet 5: Les variacions són adquirides o de naixement.

– Inferència 2: Només els individus que sobreviuen transmeten als seus descendents les variacions heretables que posseeixen. Aquesta supervivència desigual constitueix un procés de selecció natural, ja que de cada generació queden "no seleccionats" els individus que no sobreviuen fins a l'edat de reproduir-se.

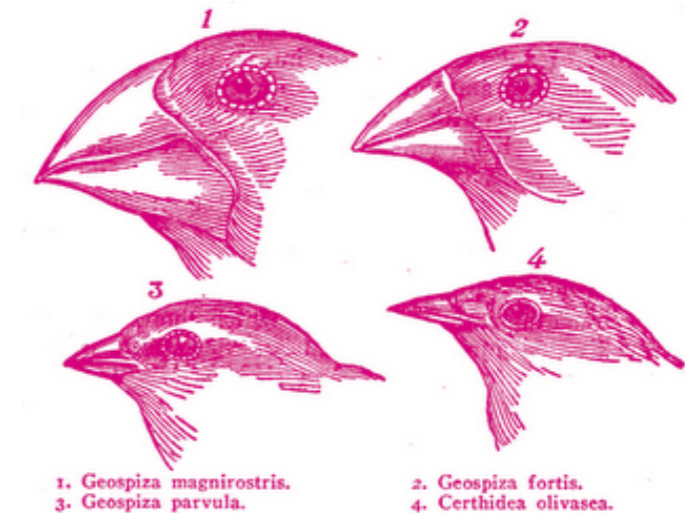
– Inferència 3: La selecció natural és el mecanisme principal que provoca l'evolució de les espècies. A través de les generacions, aquest procés de selecció natural porta al canvi de les poblacions, això és, a l'evolució i a la producció de noves espècies.⁴

Cal aclarir que l'evolució també es fa per altres mecanismes, com ara la deriva genètica, en la qual també es dona el cas que només són els supervivents els qui transmeten variacions heretables, però sense haver-hi hagut necessàriament selecció natural.



El probable parentiu entre les espècies de pinsans

Com es diu a l'article segon de la publicació *La teoria de l'evolució, 150 anys després*, "Darwin va observar que cada espècie presenta unes característiques que li permeten sobreviure i reproduir-se en les condicions que té l'hàbitat que ocupa, i va inferir de la comparació entre certes varietats properes que semblen derivar d'un més o menys antic ancestre comú, que aquestes tenen una diferent adaptació del cos al medi a causa de la impossibilitat de competir una massa nombrosa població d'aquella avantpassada espècie per uns mateixos recursos o un mateix hàbitat".⁵ I això és el que els va passar als nombrosos pinsans que van poblar les illes Galápagos: van haver de competir pels recursos i per l'hàbitat. A més, no ho van haver de fer pas en unes condicions climàtiques sempre estables, sinó entre erupcions volcàniques, pluges torrencials i secades diverses, és a dir, amb dificultats de tota mena que en cada nova circumstància només van poder superar els més adaptats.



4. MAYR, 1982, citat per A. PÉREZ-PÉREZ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

5. A. PÉREZ-PÉREZ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

5. El concepte científic de “lluita per la supervivència”

L'adaptació a unes condicions ambientals noves

“Cal aclarir que el terme «adaptació» és molt ampli i inclou característiques tant anatòmiques com bioquímiques o del comportament que fan que un organisme determinat pugui néixer, desenvolupar-se, créixer, alimentar-se i reproduir-se. L'èxit de l'individu en aquestes tasques, especialment la reproductiva, determinarà també l'èxit de l'espècie en conjunt.” D'això Darwin en va dir la “lluita per la supervivència”. L'arna dels bedolls o de Darwin (*Biston betularia*) era majoritàriament de color gris clar, com el tronc del bedoll, i això la feia bastant invisible per als ocells. “Amb la revolució industrial del començament del segle XIX, els troncs dels arbres es van cobrir de partícules contaminants i es van tornar foscos, i això va fer que la fins llavors majoritària (per menys visible pels predadors) varietat d'arna de color clar, al cap de poc esdevingués minoritària davant la nova majoria assolida per les més «adaptades» varietats fosques.”⁶

La lluita per la supervivència, “en directe”

Des de l'any 1973, el matrimoni de biòlegs Rosemary i Peter Grant estudien els pinsans d'una de les illes Galápagos, la Dafne Major. I han observat que en les èpoques de secada, com la dels anys 2002-2005, els que més sobreviuen són els més grossos i amb un bec prou fort per a trencar les llavors grosses i dures. Però amb les pluges provocades per El Niño el 1993 l'espècie que més va sobreviure va ser la de bec i cos més petits, ja que aleshores les llavors que es trobaven eren toves i petites. Rosemary Grant afirma que s'ha comprovat “que aquesta grandària s'hereta”. Els dos científics han analitzat més de dinou mil exemplars de vint-i-cinc generacions de pinsans. Aquests estudis descriuen l'evolució en directe i confirmen, en els mateixos ocells que va fer servir Darwin, que la lluita per la supervivència comporta una forta competència entre individus per trobar aliment, fugir



dels enemics i resistir a malalties i a condicions climàtiques extremes. I així unes espècies s'extingeixen i d'altres evolucionen heretant els trets dels individus més aptes.

Quan els individus evolucionen, l'espècie canvia

Les serps actuals més primitives, que són els pitons i les boes, tenen petites potes posteriors vestigials. Els fòssils de serp trobats fins ara recorden el varà, i els biòlegs creien que, en extintes espècies de rèptil marí, uns quants individus van néixer sense potes com si fossin anguiles, i que aquesta mutació els va ser útil per a sobreviure i que així van sorgir les serps. Però l'origen marí de les serps ara es posa en qüestió. L'any 2006, es va trobar la serp fòssil *Najash rionegrina*, que fa noranta-dos milions d'anys va viure a terra, a la Patagònia, i que tenia les dues potes posteriors senceres i molt fortes, i també os sacre i pelvis, inexistentes en cap altra serp fòssil. I ara es pensa que les primeres serps devien ser terrestres i excavadores.

Del cavall sabem que s'ha anat adaptant al medi durant els darrers seixanta milions d'anys. I això ho sabem també gràcies a l'estudi dels fòssils, la paleontologia. El nom científic del cavall és *Equus caballus*. Doncs el seu avantpassat de fa seixanta milions d'anys pertanyia a un gènere anomenat *Hyracotherium* o *Eohippus*, feia només 40 cm d'alçada i tenia quatre dits a cada

pota. L'actual és quatre vegades més alt i té un únic dit a cada pota, però ben protegit per un unglot dur anomenat casc. Amb aquestes i altres adaptacions, l'espècie actual és més forta i més veloç. Però no podem pas dir que els individus hagin anat estirant-se cap amunt i perdent dits, sinó que els que, al llarg de moltes generacions, anaven naixent més alts i amb un dit central més fort, com

que eren els més adaptats a un medi on calia córrer per a sobreviure, eren els que anaven tenint més fills. Per selecció natural, doncs, aquelles espècies primitives menys adaptades a les noves circumstàncies ambientals es van extingir, i ara només en coneixem uns quants exemplars fòssils.

6. A. PÉREZ-PÉREZ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

6. L'herència és al gen

Els organismes diploides heretem caràcters del pare i de la mare

Del conjunt de caràcters visibles d'un organisme se'n diu "fenotip" (paraula relacionada amb "fenomen", que és un fet que es veu, apareix o brilla). I anomenem "genotip" el conjunt de la informació genètica (les instruccions o gens que diuen com ha de ser l'individu en qüestió), que no és visible però que interactua amb el medi i dóna com a resultat el fenotip.

La cèl·lula humana, com la de molts altres organismes, és diploide: conté la informació en dos jocs de vint-i-tres cromosomes; el cromosoma és una mena d'estoig de gens que en té centenars o milers.

Cal dir, però, que les cèl·lules germinals o gàmetes dels diploides són haploides: tenen un sol joc de cromosomes, ja que són el fruit d'una divisió cel·lular anomenada "meiosi" després de la qual cada gàmeta es queda amb un sol joc. En el moment de la concepció d'una criatura, els dos jocs de cromosomes, el que aporta el gàmeta del pare o espermatozoide i el que aporta el gàmeta de la mare o òvul, s'ajunten per formar el doble joc de cromosomes de la primera cèl·lula del fill, que a partir de llavors s'anirà dividint, per un procés de "mitosi", en moltes d'iguals però un xic diversificades segons la funció que tindran en el fetus que s'anirà desenvolupant fins al naixement.

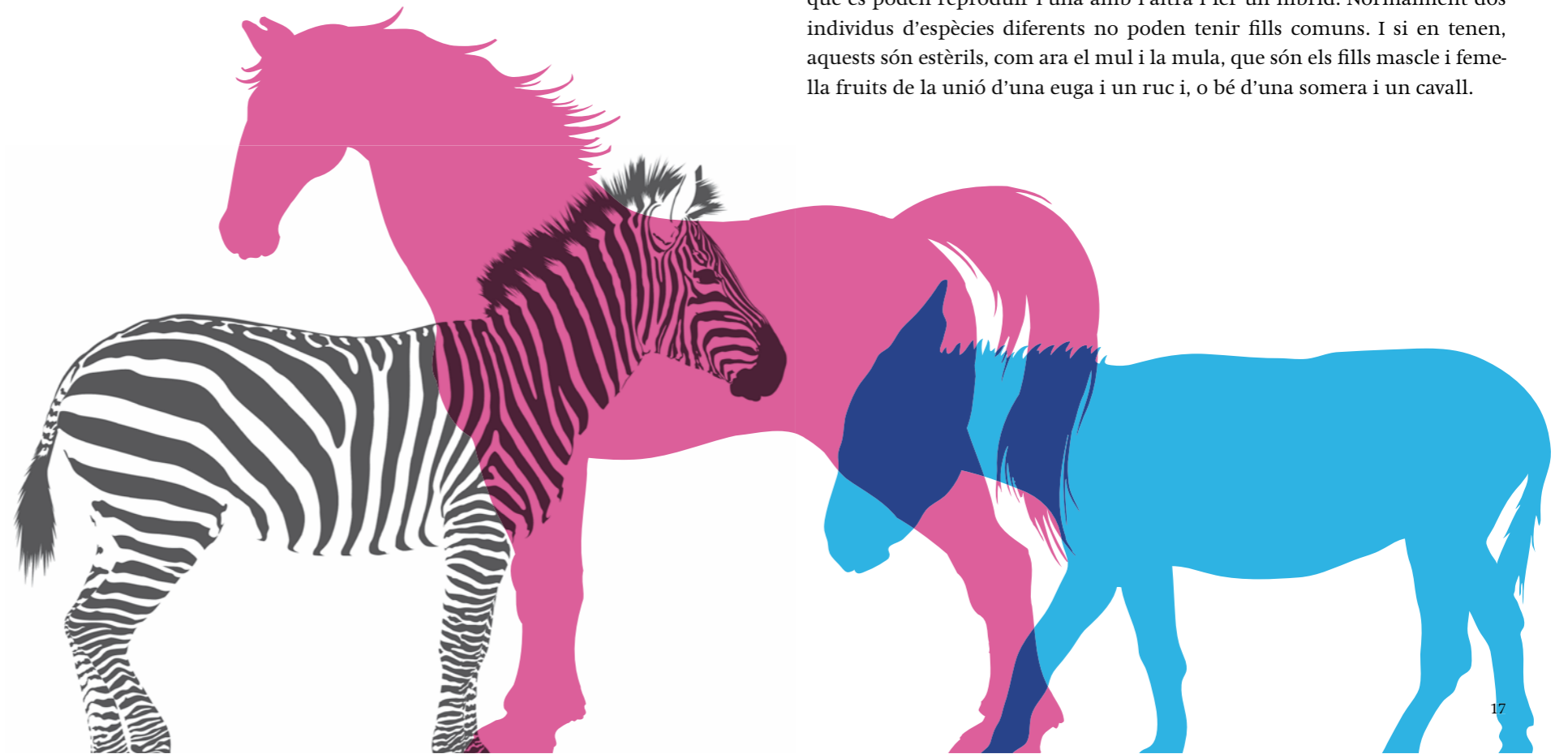
Cada persona, doncs, té els cromosomes doblats: el que li ve del pare i el que li ve de la mare. I, per tant, dos gens per a cada caràcter, com ara el color dels ulls. (Cal aclarir que aquí simplifiquem, ja que, de fet, les interaccions entre gens donen resultats enllaçats entre diversos caràcters.) I és per això que podem dir d'algú que "té els ulls de la seva mare" o "del seu pare". Però també podem dir "de la seva àvia" o "del seu avi". I és que aquests dos gens normalment no són idèntics, ja que cada gen té més d'una forma o versió, que anomenem "al·lel". En la seva manifestació externa, en el fenotip, de vegades els dos caràcters de pare i mare es barregen per formar un caràcter mestís, però altres vegades un dels dos domina sobre l'altre. Llavors, però, ¿com es "decideix" quin dels al·lells serà el que dominarà en el fill? Com que un dels dos al·lells és "dominant", amaga el "recessiu", i aquest només surt a la llum quan tots dos són recessius. Per exemple, per al caràc-

ter "color de l'iris", el qui és Bb perquè ha heretat un al·lel BRU (B) dominant i un de blau (b) recessiu, té els ulls bruns. I només els té blaus el qui és bb .

Al·lells diferents poden fer mestissos

Tal com hem dit a l'apartat anterior, no sempre un caràcter dominant s'imposa a un de recessiu. Pot haver-hi mescla de caràcters. Una mare negra i un pare blanc poden tenir un fill mestís (que en el cas dels humans se'n diu mulat). En aquest cas, dues varietats de la mateixa espècie fan una barreja d'al·lells.

I fins i tot hi ha espècies semblants, properes en la línia evolutiva, com ara la zebra, el cavall i l'ase (les tres que constitueixen la família dels èquids), que es poden reproduir l'una amb l'altra i fer un híbrid. Normalment dos individus d'espècies diferents no poden tenir fills comuns. I si en tenen, aquests són estèrils, com ara el mul i la mula, que són els fills mascle i femella fruits de la unió d'una euga i un ruc i, o bé d'una somera i un cavall.



7. La mutació, el canvi que s'hereta si queda fixat en els gens

Com se sap si hi ha evolució o només canvi en el fenotip de l'individu

Com diu Elliott Sober, “l'evolució es dona concretament quan hi ha un canvi en les freqüències dels gens d'una població”. Però cal subratllar que els biòlegs mesuren la freqüència dels gens “comptant caps”, és a dir comptant els individus que posseeixen uns gens determinats, i no pas el nombre total de cèl·lules que en posseeixen. Això vol dir que, si els individus d'una població s'han engruixat però hi ha el mateix nombre d'individus, la freqüència genètica no ha augmentat pas. I afegeix que “quan una població incrementa el seu pes mitjà, això pot ser a causa d'un canvi genètic o no. Els fills dels humans poden ser més alts que els seus pares simplement perquè hagi millorat la qualitat de la nutrició, i no pas perquè les dues generacions siguin genèticament diferents. Però en el cas del llinatge del cavall els biòlegs pensen que l'augment de pes de les successives espècies sí que reflecteix un canvi en la dotació genètica”.⁷ Un canvi merament fenotípic com l'augment de pes per una bona alimentació no es pot considerar evolució. L'evolució es dona quan el canvi és també genotípic i, per tant, heretable: quan hi ha hagut una mutació en les cèl·lules germinals.

Les mutacions són heretables si afecten les cèl·lules germinals

Pot ser que una planta faci flors de colors diferents a causa d'una mutació —és a dir, d'una alteració permanent d'un caràcter determinat— en les seves cèl·lules somàtiques (del cos en general). Doncs bé, les mutacions que es donen en aquestes cèl·lules no tenen repercussions en els descendents de l'individu en qüestió. En canvi, les que tenen lloc en les cèl·lules germinals o gàmetes, que són poc freqüents, afecten la dotació genètica que serà transmesa a la descendència. Aquestes variacions en els gens que creen al·lels nous poden sorgir de manera natural, com ara per un error en algun moment de la recombinació de cromosomes, però també a causa de l'exposició

7. SOBER, 2009.



de l'individu a radiacions o substàncies químiques perjudicials. Les mutacions poden ser beneficioses, neutres o bé nocives per a l'organisme.

L'adaptació la causen les mutacions avantatjoses

Si una mutació afecta els gàmetes, es transmet a la descendència. I, si és avantatjosa, es pot convertir en una adaptació de l'espècie al medi. Però cal entendre bé el significat del mot, ja que el terme “adaptació” té dos significats: el científic i el popular. “Tota adaptació en sentit estricte prové d'una mutació que la selecció natural ha fet que s'imposés, en l'exercici de certa funció, sobre altres solucions antigues no aptes. Hi ha casos en què la cosa adaptada pot servir per a complir també altres funcions a més de l'originària, com ara el nas humà, que no va triomfar pas perquè fos la millor manera d'aguantar les ulleres però que avui també serveix per a això. D'aquest altre ús se'n diu «exaptació». El corb marí utilitza les extremitats anteriors per a volar com a adaptació, i per a bussejar com a exaptació, un busseig que li és imprescindible per a menjar. Però ¿podria aquesta exaptació esdevenir adaptació, és a dir, aletes (impreses en els gens) com les del pingüí? Doncs sí, però només si uns depredadors més veloços en l'aigua estiguessin a punt d'extingir l'espècie en una zona determinada i si una mutació (o successives) hagués fet néixer individus amb aletes ràpides. Aquesta adaptació heretable generaria evolució. En canvi, si un arbre concret fa una «adaptació» de la seva forma torçant-se per oferir menys resistència al vent i així evitar ser abatut, aquesta «adaptació» no ho és pas en sentit estricte, ja que de les seves llavors creixeran arbres ben drets. [...] La cavitat bucal no es va originar pas com un espai per a protegir les cries, però diversos animals (peixos, grànates, cocodrils) la utilitzen a aquest efecte, fent servir el que formalment es pot considerar com una exaptació. Posteriorment en algun cas podria sorgir (sempre per mitjà d'una mutació prèvia que s'arribés a imposar per selecció natural) una veritable adaptació del disseny d'aquesta cavitat bucal, si la millora d'aquesta funció arribés a ser determinant per a la supervivència d'una població determinada.”⁸

8. I. RIBERA. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

8. La deriva genètica també genera evolució

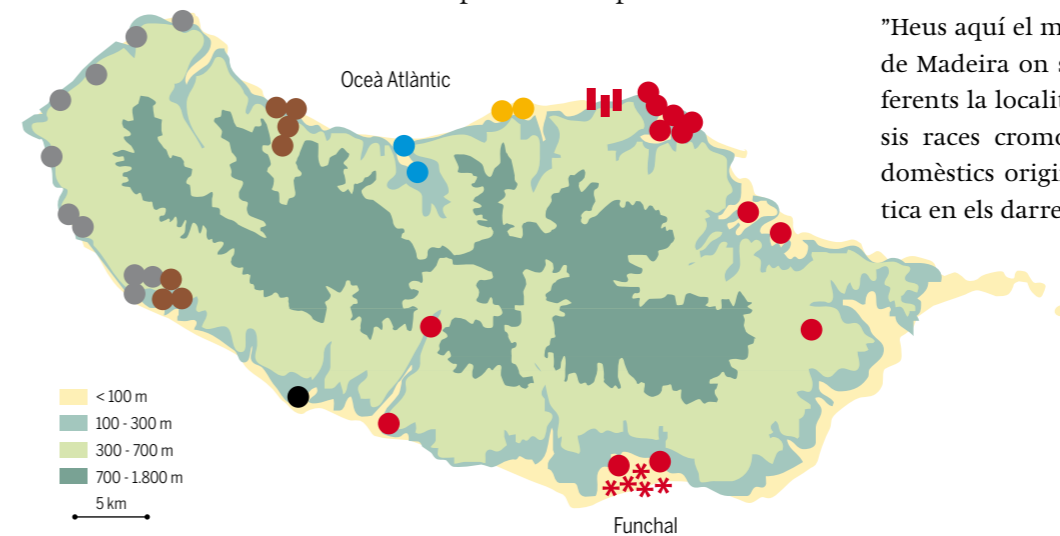
La deriva genètica, factor evolutiu que actua a l'atzar

“La mutació és un mecanisme d'innovació genètica que no respon als interessos o necessitats de l'organisme o de l'espècie en qüestió. La necessitat no fa sorgir una mutació que ajudi a perpetuar la població; si a una població li cal sobreviure en un lloc on el clima ha canviat, pot morir esperant la mutació adient sense que aquesta arribi mai. La mutació és aleatòria, apareix a l'atzar, tant si és favorable com si causa la mort. I només té èxit si genera una adaptació útil i si la selecció natural l'afavoreix. L'atzar pot fer que un organisme amb mutació avantatjosa no es reproduïx i que l'adaptació mori amb ell. Aquest concepte d'atzar rep el nom de «deriva». La deriva marca la diferència entre supervivència i extinció. L'evolució no es fa a l'atzar, però l'atzar hi té molt a dir. Fa seixanta-cinc milions d'anys, un meteorit va caure a la regió del golf de Yucatán, a Mèxic, i sembla que aquest impacte va provocar que els dinosaures i moltes altres espècies s'extingissin i que llavors els mamífers, que ja existien abans dels dinosaures, es poguessin diversificar. El seu èxit evolutiu va dependre de l'extinció dels dinosaures per un esdeveniment fortuït: un cos extraterrestre que va fer col·lisió amb la Terra. Tot i això, el mecanisme que va permetre la transformació i adaptació dels mamífers va ser la selecció natural, que no actua del tot a l'atzar”,⁹ sinó afavorint la propagació, d'entre les mutacions sorgides a l'atzar en els organismes en qüestió, de les que més bé els adapten a les noves circumstàncies.

Pot haver-hi evolució sense selecció natural

Especialment a les zones geogràfiques aïllades, com ara les illes, una espècie es pot arribar a dividir en d'altres sense que hagin hagut de triomfar per selecció natural les mutacions més adaptades a cada medi o circumstància particular. I és que sempre es pot donar una “radiació adaptativa” o escampament diversificador d'espècies per una simple evolució a l'atzar; és a dir, que triomfin mutacions neutres.

“Encara que la selecció natural és el mecanisme principal responsable d'aquestes radiacions, hi ha mecanismes no adaptatius com la deriva genètica que poden tenir-hi un paper important. N'és un bon exemple el ratolí domèstic (*Mus musculus domesticus*) de l'illa de Madeira. Un estudi recent demostra l'existència a l'illa de sis races cromosòmiques, l'origen de les quals s'explica per deriva genètica i no pas per selecció natural. Aquestes races viuen separades les unes de les altres per barreres muntanyoses i estan aïllades genèticament per la impossibilitat de formar híbrids a causa de les seves accentuades diferències cromosòmiques. Aquests resultats demostren que es poden donar casos d'elevades taxes d'evolució independentment dels processos adaptatius.



”Heus aquí el mapa topogràfic de l'illa de Madeira on s'indica amb colors diferents la localització geogràfica de les sis races cromosòmiques de ratolins domèstics originades per deriva genètica en els darrers cinc-cents anys.”¹⁰

9. A. PÉREZ-PÉREZ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

10. S. CARRANZA. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

9. La migració genètica i la selecció artificial generen evolució

La migració d'organismes canvia les freqüències gèniques

La migració genètica és la transferència dels al·lels dels gens d'una població a una altra. Aquests desplaçaments poden arribar a fer grans canvis en les freqüències al·lèliques. Els animals tendeixen a ser més mòbils que les plantes, tot i que el pol·len i les llavors també poden ser portats a grans distàncies pels animals o el vent. El moviment o flux genètic entre dues poblacions també pot conduir a una combinació de les dues dotacions de gens i a la reducció de la variació genètica entre els dos grups. Per exemple, si dues mates d'herba que s'havien separat com a espècies diferents creixen a banda i banda d'una carretera, el pol·len és probable que passi d'un costat a l'altre i viceversa. Si aquest pol·len és capaç de fertilitzar la planta i produir descendència viable, llavors, per simple atzar, la freqüència de certs al·lels de l'espècie que aporta el pol·len pot esdevenir alta en l'espècie hoste o receptora d'al·lels nous.

La selecció artificial de trets favorables per als humans

Des de molt abans que els humans introduíssim innovacions o manipulacions genètiques en diverses espècies, hem anat afavorint les mutacions que sortien soles en determinats vegetals i animals. I espontàniament en sortien més en certes espècies, com ara el gos, i menys en d'altres, com ara el gat.

“La selecció artificial pot actuar en poc temps, i això contradiu que l'evolució sigui un procés gradual i lent. Les races de gossos, sorgides del llop fa uns dotze mil anys, en són un bon exemple. La selecció artificial no sols selecciona trets desitjables, sinó que en rebutja de no desitjables. Del llop n'hem reduït l'agressivitat, cosa que no hem sabut fer amb altres espècies.”¹¹

11. D. SOL. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.



12. SAVOLAINEN *et al.*, 2002.

13. ANDERSON, 2009.

14. D. SOL. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

La selecció artificial pot crear espècies

Sabem que el gos prové del llop gris per selecció artificial. Els científics, però, encara no tenen clar si la selecció es va fer en tres o quatre zones del món o en una de sola. El pastor alemany és la raça de gos que té un ADN més proper al del llop, potser arran d'un encreuament més recent d'un gos ja evolucionat amb un llop encara salvatge. El 2002, Peter Savolainen i els seus col·laboradors van afirmar, a l'article “Evidència genètica d'un origen a l'est asiàtic dels gossos domèstics” que van publicar a la revista *Science*, que la gran diversitat de dotacions genètiques que tenen les races de gossos de la Xina fa pensar que totes provenen d'aquella regió.¹² Però l'agost del 2009 aquest possible origen asiàtic va ser posat en qüestió: Andrea Anderson va publicar a la revista *GenomeWeb Daily News* l'article “La genètica del gos africà suggereix que cal reconsiderar la domesticació”, en què diu que un equip de recerca internacional, liderat pel biòleg de la Universitat de Cornell Carlos Bustamante, ha suggerit “que la diversitat genètica dels gossos de l'Àfrica és gairebé tan gran com la dels gossos de l'Àsia oriental”.¹³

El difícil assilvestrament d'espècies domèstiques

La domesticació del llop ha comportat una sèrie de canvis físics típics dels mamífers domèstics, especialment la reducció de la grandària del cos, de les dents i del cervell (i això afecta en particular els aspectes relacionats amb la vigilància i el processament sensorial, tan necessaris a la natura). “Com que la selecció artificial no es fa per cobrir la necessitat de sobreviure i reproduir-se a la natura, pot generar fenotips inapropiats per a viure en llibertat, cosa que es veu quan els individus s'assilvestren. En el colom de ciutat, forma naturalitzada de colom domèstic, la selecció natural elimina els individus amb fenotips poc apropiats, i això fa que la població tendeixi a retornar al fenotip salvatge. La selecció artificial elimina variació genètica, la qual cosa fa els organismes més susceptibles a malalties. En gossos això sovint es tradueix en races de vida més curta”.¹⁴ Les varietats escollides per caràcters no vitals solen estar menys adaptades que d'altres a les circumstàncies naturals, que no deixen de ser presents en els no totalment artificials habitatges i entorns humans.

10. Altres seleccions paral·leles: la sexual i la social

¿Qui selecciona uns mascles tan captivadors... i capturables?

Hi ha diversos factors que actuen com a “mecanismes que generen l'evolució: 1) *Mutació*: Diversifica el material genètic, avantatjosament o no; altres mecanismes recombinen aquest material, com ara l'entrecruament dels cromosomes o la conversió al·lèlica dels gens. 2) *Selecció natural*: Escull les variants que es reproduiran més. 3) *Deriva genètica*: Altera la freqüència genètica amb fets aleatoris (extinció massiva, no-reproducció d'un individu adaptat, etc.). 4) *Migració*: Aporta a una població característiques d'altres. El resultat són variants que podran esdevenir espècies”.¹⁵

I encara podem destacar dos factors evolutius més: la selecció sexual i la social. Segons Darwin, la selecció sexual no depèn d'una lluita per l'existència, sinó d'una lluita entre els mascles per la possessió de les femelles; el resultat no és pas la mort del competidor que no ha tingut èxit, sinó la poca o nul·la descendència d'aquest.

Darwin “aviat va veure que la teoria de la selecció natural no podia explicar el perquè d'estructures com la cridanera cua del paó mascle, les grosses banyes de certs escarabats o els llampancs colors de diversos peixos i ocells, que augmenten el risc de predació i que, per tant, la natura no hauria d'haver afavorit. Fins que es va adonar que qui les selecciona són les femelles, les quals, escollint els mascles portadors d'aquests caràcters, n'augmenten l'èxit reproductor i afavoreixen que els gens que els codifiquen siguin seleccionats. Com que la principal funció d'aquestes estructures és atreure les femelles, es van batejar amb el nom d'ornaments. Però ¿per què les femelles prefereixen els mascles més guarnits? La resposta més convincent la va donar, el 1975, Amotz Zahavi amb l'anomenat principi del handicap, segons el qual els ornaments funcionen com a handicaps o desavantatges i els individus que els llueixen demostren tenir una gran qualitat pel fet de sobreviure amb handicaps i tot. Les femelles, per tant, escullen els mascles més guarnits per la gran qualitat que, d'una manera

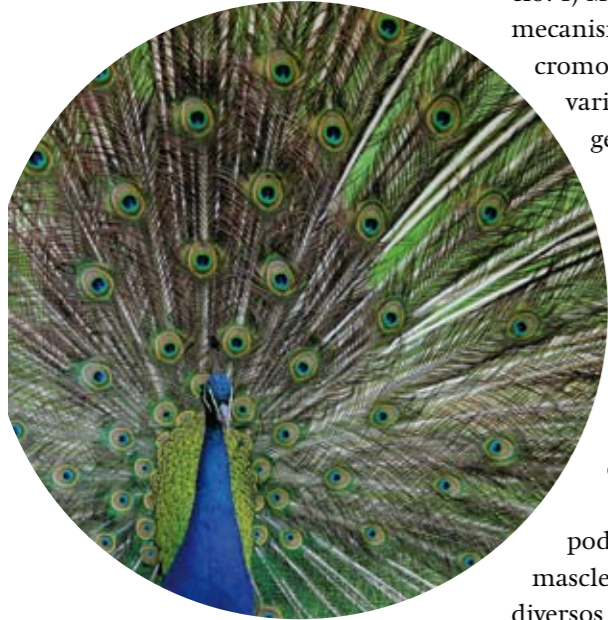
tan ostensiva, assegurin tenir”. Cal dir, però, que hi ha certes espècies en què les femelles més ornamentades també són escollides pels mascles. “Estudis recents demostren que els ornaments informen les femelles sobre qualitats dels mascles com ara la capacitat per a lluitar contra malalties i paràsits, l'habilitat per a trobar menjar, la dominància, la valentia per a defensar els fills o la predisposició per a donar-los menjar. I qualitats diferents es poden comunicar per mitjà d'ornaments diferents”.¹⁶

Les femelles seleccionen ornaments, i també “armaments”

Així com els ornaments serveixen per a atreure els individus de l'altre sexe, els mascles de determinades espècies tenen elements de defensa que també els poden servir per a imposar-se sobre els rivals del mateix sexe. “Hi ha altres estructures perquè els mascles lluitin entre si per obtenir els favors d'aquelles, com ara les banyes dels cérvols o els esperons dels galls. Aquests caràcters, que anomenem «armaments», són també indirectament seleccionats per les femelles, i és per això que també es diu que evolucionen per selecció sexual. I n'hi ha uns quants que es creu que primerament van evolucionar com a armaments, i posteriorment les femelles van aprendre que aquestes estructures assenyalaven les qualitats dels mascles en la lluita i els van seleccionar preferentment. (Tanmateix, cal dir que alguns d'aquests caràcters evolucionen estrictament per selecció social i no tenen res a veure amb la consecució de femelles per part dels mascles.)”¹⁷

Selecció de certs senyals socials que ajuden a evitar baralles

Un cas de selecció social el constitueixen les “taques de color o estructures que adverteixen el conjunt de la població de la dominància dels diferents individus, amb la clara funció d'intentar reduir el nombre de baralles i conflictes socials, atès que, en veure aquests inequívocs senyals, cada individu coneix ràpidament sobre qui pot dominar i sobre qui no pot fer-ho, i sol actuar en conseqüència. [...] A la natura, aquests caràcters moltes vegades augmenten el risc de predació dels individus portadors i no faciliten que les femelles els escullin com a parella; però, malgrat això, els avantatges socials que proporcionen fan que aquestes estructures hagin evolucionat amb èxit en moltes espècies, especialment d'ocells”.¹⁸



15. A. PÉREZ-PÉREZ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

16, 17 i 18. J. C. SENAR. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

11. L'estudi dels fòssils i l'ADN ajuden a entendre l'evolució

El registre fòssil no ens en mostra pas tots els passos

“El temps geològic és l'escala de l'evolució que està més a l'abast de tothom. Malgrat les discontinuïtats del registre estratigràfic i paleontològic, el temps geològic —reflectit en la successió d'estrats geològics— ha proporcionat evidències dels canvis soferts per la flora i la fauna al llarg de milions d'anys des de l'inici de la vida a la Terra, ara fa 3.800 milions d'anys. A més, els mecanismes de l'evolució són diversos i, abans que la genètica disposés d'eines per estudiar els fonaments «íntims» de l'evolució, el registre paleontològic

contingut en roques sedimentàries i fins i tot en algunes de baix metamorfisme (com ara llicorelles) era pràcticament l'única evidència tangible de l'evolució. La sistemàtica paleontològica no es basa en l'espècie, sinó essencialment en la morfoespècie, és a dir la morfologia dels organismes fòssils, ja que no és possible estudiar l'ADN ni els teixits ni els òrgans d'un fòssil. El concepte «evolució» s'anà consolidant a mesura que els paleontòlegs constataren les variacions morfològiques (tant a escala microscòpica com macroscòpica) dels teixits de suport o esquelets de vegetals, invertebrats i vertebrats que visqueren en el temps geològic.”¹⁹

El difícil estudi de l'ADN de les espècies extintes

Per seguir els passos de l'evolució, cada cop més els estudis genètics complementen els paleontològics. El mamut és un dels primers animals extints dels quals s'ha pogut conèixer l'ADN. L'any 2008, un equip de científics dels EUA i Rússia van publicar a la revista *Nature* l'estudi genètic que havien fet d'un mamut siberià congelat, no pas petrificat, un dels resultats més destacats del qual és la constatació que el genoma dels mamuts llanuts era molt similar al dels actuals elefants africans, amb només un 0,6% de diferències,

19. J. GALLEMÍ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

la meitat de la diferència genètica que hi ha entre els humans i els ximpanzés, que és de l'1,2%. L'estudi mostra que la seqüenciació del genoma de les espècies extingides revela trets que no són evidents en el registre fòssil i que poden ajudar a descobrir els factors genètics que afavoreixen l'extinció.

Van intentar sobreviure molts dissenys anatòmics

Com diu Stephen Jay Gould al seu llibre *La vida meravellosa*, podrien haver sobreviscut models corporals diferents dels actuals. Per exemple, actualment podrien existir animals sense potes, amb cinc ulls i una trompa acabada en pinça que els servís per a posar-se el menjar a la boca, descendents d'*Opabinia*, un invertebrat marí que s'ha trobat fossilitzat en estrats geològics d'un 500 milions d'anys d'antiguitat i que sembla que no va tenir continuïtat. L'enterrament ràpid dels organismes sota una allau de fang va preservar intactes aquells cossos fràgils i amb poques parts dures.

Darrerament s'han descobert unes petites potes posteriors en *Opabinia* que podrien relacionar-lo amb algun avantpassat dels artròpodes. Aquella època remota sembla que va ser molt especial; els paleontòlegs l'anomenen l'explosió cambriana arran de l'aparició sobtada en el registre fòssil del Cambrià d'una gran quantitat de dissenys anatòmics, la majoria dels quals tot seguit desapareixen. Un dels dissenys supervivents va ser el nostre, el dels cordats, que som els animals que tenim cordó dorsal o notocordi. I és que el primer cordat conegut en el registre fòssil és *Pikaia gracilens*, que s'ha trobat enterrat sota aquella allau de fang cambriana de què parlàvem, conjuntament amb *Opabinia* i altres espècies de dissenys corporals antics, després reeixits o extingits, als jaciments fossilífers de Burgess Shale, al Canadà. Cal dir que, arran de noves descobertes, *Pikaia* ha estat superat per fòssils cambrians d'autèntics vertebrats trobats a la Xina.

12. L'arbre de la vida. Tots tenim un avantpassat comú

La biodiversitat, el reflex viu de l'arbre filogenètic

"L'acumulació de diferències genètiques en una població per selecció natural i deriva genètica pot generar una nova espècie. Dues espècies qualssevol tenen un avantpassat comú. La relació avantpassat-descendent entre les espècies pot ser esquematitzada en un arbre filogenètic o genealògic d'espècies. El principal criteri per a establir les relacions filogenètiques és la compartició de caràcters. L'home i el ratpenat tenen un ancestre comú més proper que cap d'ells amb la sargantana perquè tenen pèl i nodreixen les cries amb placenta i glàndules mamàries. No tot tret similar, però, indica proximitat evolutiva. Certes semblances provenen d'adaptacions independents a règims de vida similars, com ara l'ala d'un ocell i la d'un ratpenat. La inferència filogenètica, o mètode per a reconstruir les relacions filogenètiques entre espècies, consisteix a destriar les semblances. Fins ara s'havia utilitzat la semblança morfològica per a fer la reconstrucció filogenètica. Però darrerament es fan servir molt dades moleculars, sobretot les seqüències d'ADN i d'aminoàcids dels gens, que són la font última de variabilitat. Gràcies al desenvolupament de les metodologies d'inferència filogenètica i de les tècniques de seqüenciació de l'ADN, comencem a fer realitat el somni de Darwin: reconstruir la filogènia de les espècies, l'arbre de la vida."²⁰

El rellotge molecular i els canvis en la molècula d'ADN

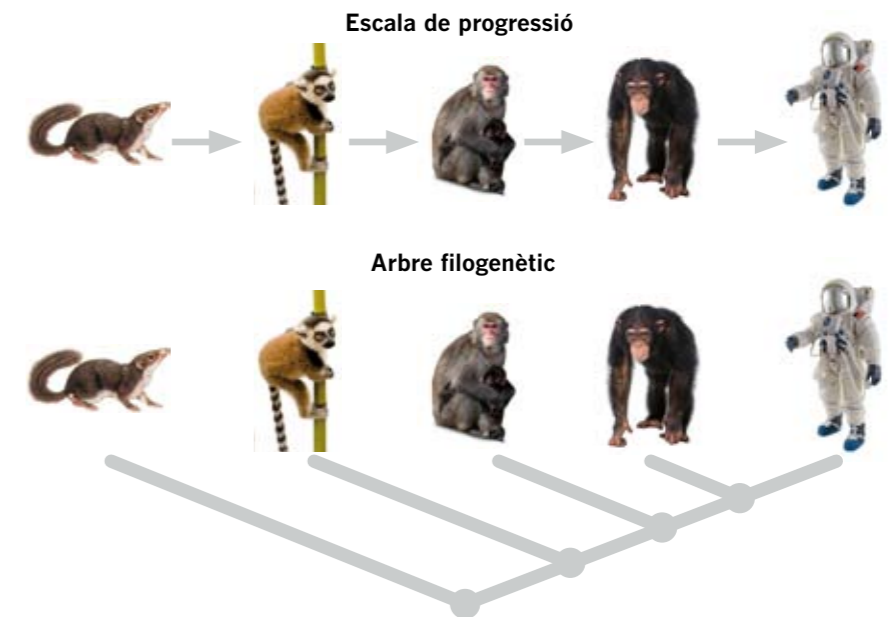
"Un dels avantatges de l'ús de l'ADN per a establir relacions filogenètiques és que permet establir quant fa que es van separar les espècies. El rellotge molecular estableix que les mutacions s'acumulen a un ritme més o menys constant, és a dir que el nombre de diferències en la seqüència d'ADN entre dues espècies és funció del temps de separació. Per a poder saber l'edat absoluta de separació, ens cal un punt de calibratge, és a dir una divergència genètica a la qual puguem assignar una edat absoluta. I això ens ho donen els fòssils i les datacions del estrats on es troben."²¹



20 i 21. M. À. ARNEO. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

L'arbre de la vida com a visió del parentiu de tots amb tots

"És freqüent referir-se a certs fets evolutius no en funció d'una filogènia, sinó d'una escala de progressió, i això pot comportar interpretacions errònies. Així doncs, és un error comú referir-se a l'evolució dels humans a partir de les mones, o a l'evolució de certa proteïna de metazous a partir de la proteïna de llevats. Tant les espècies com els gens cal posar-los en el seu context filogenètic, i l'evolució cal traçar-la en les diferents branques de l'arbre a partir dels nodes ancestrals",²² dels punts de divisió d'on arrenquen nous llinatges o línies genealògiques.



"La part superior de la figura representa la visió —incorrecta— d'una escala de progressió des de les tupaies als humans. A la part inferior, les mateixes espècies ocupen els vèrtexs o nodes terminals d'un arbre filogenètic. Els nodes interns d'aquest arbre, fonamentals per a poder fer-ne la interpretació, s'assenyalen amb cercles."²³

22 i 23. D. SOL. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

13. Totes les espècies actuals són igual d'evolucionades

L'evolució és el canvi (o l'absència d'aquest) en el temps

Totes les espècies actuals han evolucionat durant el mateix període de temps.

“Des del seu origen, des de l'ancestre comú de tota la vida que postula la teoria evolutiva, totes han evolucionat el mateix, han recorregut camins adaptatius equivalents per arribar on són. [...] L'home ocupa una branca tan evolucionada a l'arbre de la vida com un lèmur o qualsevol bacteri, i des del punt de vista evolutiu no representa res especial.

”Els cíclids dels llacs Tanganyika i Malawi són molt diversos i han evolucionat fins a aquesta diversitat en un temps rècord de només uns milers d'anys. L'esturió *Acipenser*, al contrari, presenta poca diversitat i gairebé no ha variat el seu aspecte en milions d'anys. Ambdós són igualment evolucionats (ha passat el mateix temps des del seu ancestre comú), però les pressions de l'ambient han estat diferents sobre cada llinatge influint en la taxa d'especiació i la necessitat d'adaptació.”²⁴

Ara bé, si comparem “espècies actuals amb espècies fòssils, hi ha una qüestió temporal que permet afirmar que, per exemple, un colibrí ha evolucionat més que un *Archaeopteryx*, ja que el seu llinatge evolutiu duu 150 milions d'anys més evolucionant. També depèn de què definim com evolucionat i si «evolució» s'empra com a sinònim de «canvi». En alguns casos ens podem fixar en una estructura particular d'una espècie que hagi experimentat un major grau de modificació que d'altres respecte a l'ancestre comú, o anàlogament un llinatge evolutiu en el qual un gen hagi evolucionat més ràpidament que en altres. En aquests casos, en què el nostre criteri d'evolució sí que és mesurable, llavors és possible establir una jerarquia i considerar aquests caràcters més evolucionats (= modificats) que d'altres”.²⁵



Milions d'anys	Període
65 - avui	Cenozoic
225-65	Mesozoic
543-225	Paleozoic - pluricel·lulars
610-543	Fauna laminar d'Ediacara
1.400	Primers fòssils eucariotes
3.500	Primers fòssils procariotes
3.800	Refredament de l'escorça
4.500	Formació de la Terra

L'evolució no comporta progrés en una direcció determinada

El canvi evolutiu “no és direccional, ja que depèn de factors aleatoris (mutacions com a font de variació, i èxit reproductiu diferencial). I el que entenem per millora és habitualment amb relació a l'òptima adaptació a un ambient que tanmateix és fluctuant, i el que ara es avantatjós per a una espècie pot ser un inconvenient en variar l'ambient. [...] La vida es va originar a partir d'elements i organismes simples en estructura. L'evolució en va augmentar la complexitat, i sí que la transició de simple a complex dóna una impressió de progrés. Però un procés evolutiu també pot conduir a la simplificació”.²⁶

Esquema aproximat de l'evolució de la vida. ¿De simple a complex?

La vida degué néixer quan es va refredar l'escorça de la Terra. Uns 300 milions d'anys (Ma) més tard ja van poder quedar impreses a les roques restes fòssils d'aquells primers éssers vius o procariotes (cèl·lules sense nucli). En roques 1.100 Ma posteriors ja trobem fòssils d'éssers vius amb cèl·lules amb nucli o eucariotes, i és probable que les parts d'aquesta cèl·lula més complexa siguin el resultat d'una simbiosi o associació de benefici mutu entre diverses cèl·lules procariotes. Més tard aquestes cèl·lules es van associar, també simbiòticament, per formar organismes pluricel·lulars. Cal dir, però, que molts dels organismes més senzills han evolucionat fins avui restant procariotes, com ara els virus, els bacteris i altres microorganismes unicel·lulars.

De la primera època del registre fòssil se'n diu Proterozoic o Precambrià perquè és l'immediatament anterior al Cambrià (543-490 Ma, moment de l'explosió cambriana), el període més antic dels sis en què es divideix l'era anomenada Paleozoic ('animal vell'), que és la més antiga de la història terrestre i que va seguida del Mesozoic ('animal mitjà') i el Cenozoic ('animal recent').

24 i 25. J. GÓMEZ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

26. J. GÓMEZ. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

14. La biogeografia com a revelador resultat de l'evolució

Espècies semblants que habiten llocs allunyats entre si

“Una de les més grans incògnites del món anterior a Darwin era per què diferents continents acollien espècies tan disperses però alhora distribuïdes amb tan clars patrons geogràfics i de proximitat morfològica. De fet, per a la gestació de les idees evolucionistes tant de Darwin com de Wallace (i de molts altres després d'ells) va ser d'extrema importància l'observació que van fer que les espècies de les illes eren diferents, però no gaire, de les de les masses de terra properes, i que el grau de diferenciació semblava relacionat amb el grau d'aïllament. Les diferències entre les faunes i les flors de les diferents zones del planeta es deuen a la seva divergència evolutiva, sigui per haver-se quedat aïllades les unes de les altres (i produir-se llavors la substitució d'un tàxon per un altre de sistemàticament afí en hàbitats semblants de dues regions geogràfiques separades, o en hàbitats diferents d'un mateix territori), sigui per modificació de poblacions establertes per dispersió. Les grans zones biogeogràfiques són àrees que han evolucionat, en gran part de manera independent durant molt de temps, prou per acumular un gran nombre d'espècies (i gèneres o famílies) exclusius.”²⁷ En són un cas clar el jaguar americà i el lleopard africà.

“Alfred Russell Wallace va ser el fundador de la biogeografia moderna amb els seus estudis a l'arxipèlag Malai i a Australàsia. La «línia de Wallace», entre Borneo i Sulawesi, es continua considerant una de les principals fronteres biogeogràfiques, que separa la regió Oriental (Àsia), a l'oest, de l'Australiana («Wallacea» i Austràlia), a l'est. Es pot dir que les illes oceàniques són un experiment evolutiu constant: a causa del seu aïllament, només són colonitzades per una representació molt escassa, i esbiaixada, de la fauna i flora de les regions properes, que una vegada establertes en un nou espai evolucionen fins a divergir, de vegades de manera irrecognoscible, dels seus avantpassats directes. Una bona part de les idees sobre l'origen de les espècies i l'evolució de la biodiversitat s'ha generat a través de l'estudi d'aquestes illes.

27. I. RIBERA. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.



“Wallace va proposar les grans divisions zoogeogràfiques que s'accepten en l'actualitat, les regions Neàrtica, Neotropical, Paleàrtica, Etiòpica, Oriental i Australiana. Les illes Galápagos han estat un dels llocs preferits per a estudis biogeogràfics i evolutius, però Darwin no es va adonar de la seva importància fins bastant després d'haver-les visitades. En el seu viatge amb el *Beagle* ni tan sols va mantenir separades les col·leccions que va fer a cadascuna de les illes.”²⁸

28. I. RIBERA. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

15. Solucions diverses per a la reproducció i la cria

Espècies “aïllades”, com ara l'ornitorinc o el cangur

L'aïllament geogràfic és un gran motor de l'evolució. Hi ha dues menes d'illa: la darwiniana i l'illa fragment. La primera és una àrea nova (com ara una illa volcànica) amb organismes que “provenen de la colonització i diversificació local de pioners”, i hi “prolifereixen ràpidament noves espècies amb grans diferències morfològiques i ecològiques a partir de pocs colonitzadors”; el difícil accés a l'illa “fa que la colonitzin pocs individus, i això, per deriva genètica, genera grans diferències en les freqüències al·lèliques entre la població insular i la d'origen”, fenomen que es coneix per “efecte fundador”. I l'illa fragment és un tros de terra que s'ha aïllat, sovint per fragmentació d'una regió amb organismes, i que “pot esdevenir refugi per a espècies sovint desaparegudes a la regió continental propera arran de la competència amb espècies novvingudes. Són els casos dels cangurs i els ornitorincs a Austràlia i els lèmurs a Madagascar”.²⁹ L'evolució d'aquestes espècies que han quedat aïllades i sotmeses a poca pressió selectiva consisteix en una millora dels caràcters antics poc útils, en el manteniment dels útils i en l'adopció, per deriva genètica, d'altres de nous no desfavorables.

A la regió zoogeogràfica Australiana, entre altres espècies endèmiques, hi habiten l'ornitorinc i l'equidna, els dos únics representants vius dels monotremes, un ordre de mamífers amb trets ben antics i comuns amb els amfibis, els rèptils i els ocells, com ara el fet de pondre ous o el de tenir cloaca, l'orifici on desemboquen, a més del recte, els conductes urinaris i genitals. Això ens podria fer pensar erròniament que els monotremes són els ancestres dels placentaris, com si fossin la baula vivent de la falsa cadena rèptil-monotrema-marsupial-placentari. Cal aclarir que dels avantpassats comuns a tots els mamífers n'han sortit tres branques independents igual d'evolucionades: monotremes, marsupials i placentaris (i encara caldria afegir-hi els extingits pantoteris del Mesozoic). Això sí, podem constatar que els placentaris posseeixen unes característiques més “noves” que els han per-

29. M. À. ARNEDO. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.



més sobreviure en un medi amb requeriments “nous” respecte als que va mantenir el continent australià quan es va aïllar dels altres a causa de la deriva continental provocada per la tectònica de plaques.

Protecció i aliment a l'ou, el marsupi, la placenta, el niu i el cau

Com que no hi ha cap peix vivent que sigui l'ancestre dels amfibis actuals, ni cap amfibi vivent el dels rèptils, ni cap rèptil vivent el dels mamífers, cal descartar qualsevol hipotètica escala de progressió com ara la de gobi-tritó-llangardaix-ratolí. El que sí que és probable, però, és que els primers amfibis tinguessin algun tret semblant als dels peixos actuals que aguanten una estona fora de l'aigua, ja que el primer element clau per a fer el pas a viure en terra degué ser, precisament, la respiració d'oxigen pres directament de l'atmosfera, sigui per via cutània, sigui, sobretot, pel triomf adaptatiu en condicions d'assecamament de tolls d'una cavitat apareguda per mutació a l'esòfag —i per això de vegades ens ennuagem: pel fet de compartir conducte per a la deglució i la respiració traqueal—, precursora dels pulmons.

El segon pas per a la “conquesta de la terra” pels vertebrats va ser l'ou de closca dura conservador de líquids, un enduriment sorgit igualment per mutació, i transmès majoritàriament, també, on s'assecaven els estanyols. Aquest ou dels primers rèptils oferia protecció a la cria i a la reserva d'aliment, fins al punt que només devien sobreviure els individus que en sortien ben formats i a punt per a la difícil vida en un medi absolutament sec. Els amfibis primitius —com els actuals—, en canvi, instal·lats a les zones humides, es permetien el “luxe” de sortir del seu tou ou estant encara a mig fer, encara mig peixos branquiats i pendents de créixer amb la metamorfosi que els feia esdevenir adults sense la larvària dependència total de l'aigua.

La tercera novetat en el confort per a unes cries —i adults— ara amenaçades, no pas per la secada, sinó pel fred, va ser el tret “sang calenta”, és a dir, el mecanisme de regulació d'una temperatura estable, que sovint anava acompanyat d'una gran protecció parental. Dels rèptils antics en van sorgir dos dissenys anatòmics que van adoptar aquest nou tret: els ocells i els mamífers. I la resta van continuar evolucionant mantenint el seu reeixit disseny reptilià en ambients favorables, fins a arribar als rèptils actuals, que posseeixen trets molt vells, però moltes espècies també altres de més nous.

16. L'evolució continua, i l'espècie humana la pot condicionar

¿El motor que impulsa l'evolució és intern o extern als organismes?

“Els canvis (les mutacions) que es produeixen en els individus i generen la variació sobre la qual pot treballar l'evolució constitueixen la gasolina que impulsa el motor d'aquesta. Uns canvis que tenen dues limitacions: l'una no depèn del mateix organisme, i l'altra, sí. L'externa és l'atzar: si no es dóna mai una determinada mutació en una població, per més que pogués representar una millora ideal per a aquell grup, aquest caràcter no el tindrà mai. I la interna són limitacions tècniques o estructurals pròpies dels organismes. Posem-ne dos exemples: 1) Per a una determinada espècie que és depredada per ocells, disposar d'un ull a la part alta del cap podria ser un gran avantatge. Si es produís una mutació en algun individu que fes que tingués aquest tercer ull, segurament el nou caràcter seria seleccionat favorablement i es presentaria en tota la població al cap d'unes quantes generacions. Però si aquesta mutació no apareix per atzar, aquesta espècie no arribarà mai a tenir aquest tercer ull. 2) Per a nedar calen unes aletes en forma de rem, i les solucions per a construir-les a partir de l'extremitat d'un tetràpode no són gaires. Això explica que les extremitats dels cetacis i les de certs dinosaures fòssils siguin estructuralment molt semblants malgrat haver evolucionat de manera independent.

“El que determina quins canvis dels que s'han produït es mantenen a les poblacions i quins desapareixen —i, per tant, el resultat final de l'evolució— són diversos factors externs als organismes: 1) *La selecció natural*. Provocarà que els canvis que milloren l'adaptació dels individus al seu entorn es mantinguin, mentre que farà desaparèixer els que l'empitjoren. 2) *L'atzar*. Per als canvis que no afecten la viabilitat de l'individu (capacitat de supervivència o per a deixar descendents) l'atzar serà el factor principal que determinarà si aquests canvis es mantenen o no a la població. A més, els accidents històrics, com ara la caiguda d'un meteorit o l'atropellament en una carretera, poden dur a l'extinció individus, poblacions o espècies senceres malgrat estar ben adaptats. Així doncs, l'escenari de la vida que tenim avui és el resultat de les



circumstàncies històriques —clima, geologia, accidents— que ha tocat viure a cada organisme, de l'atzar i de les limitacions internes a les variacions que es produeixen, i de la selecció natural que escull els canvis millors en cada moment. Però si tornéssim a començar, ¿obtindríem el mateix resultat?”³⁰

L'enginyeria genètica pot interferir en l'evolució

Els humans podem introduir canvis genètics en determinades espècies, fins i tot en la nostra.

“L'enginyeria genètica és la tecnologia que permet manipular i transferir material genètic a un organisme, i això pot afectar l'evolució de les espècies. En els organismes pluricel·lulars de reproducció sexual, perquè una determinada modificació genètica tingui importància des del punt de vista evolutiu, cal que es modifiquin les cèl·lules reproductores (línia germinal), de manera que el canvi realitzat pugui passar a les generacions següents. Les tècniques d'enginyeria genètica s'han utilitzat en diverses aplicacions, com ara en agricultura (per exemple, per fer varietats més resistents al clima, a plagues, amb més alt poder nutritiu, etc.), en la producció de diferents productes utilitzant bacteris modificats genèticament (com ara per a la fabricació d'insulina, d'interferó, etc.), i en el repte del tractament de malalties genètiques en humans. En aquest darrer cas, les fortes limitacions tècniques i ètiques han fet que fins ara només hi hagi uns quants exemples de manipulació de cèl·lules somàtiques.

“Un cop modificat el material genètic d'un organisme, és impossible saber si aquesta modificació perduraria si estigués sotmesa als mecanismes evolutius. Generalment, però, aquest no és el cas, ja que en els organismes transgènics es fa una «selecció positiva» dels organismes modificats per interessos comercials. En el cas de les plantes, aquest fet està provocant que les espècies transgèniques desplacin altres varietats no transgèniques, de tal manera que disminueix la diversitat de races i varietats, amb els efectes contraproductius que això comporta des del punt de vista evolutiu.”³¹

30. M. À. ARNEDO. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

31. S. CARRANZA. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

17. ¿Venim del mico? Por i fascinació vers els orígens humans

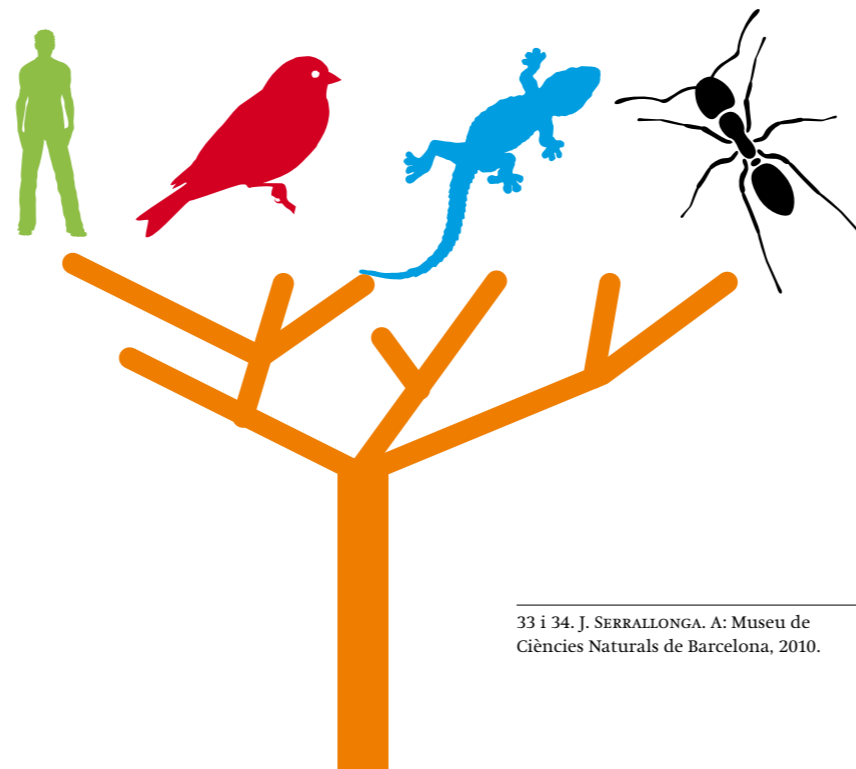
Els humans som primats i provenim de l'Àfrica

“L'estudi de l'evolució humana ha hagut de vèncer l'antropocentrisme i l'etnocentrisme més radicals. Des que Darwin i alguns dels seus coetanis noucentistes van proposar que descendíem de formes simiesques, hi ha hagut un esforç, fins i tot provinent de l'Acadèmia, de defugir aquesta gènesi primat que ens vincula —com és lícit i científic— al regne animal. Problema que es repetí pel que fa als orígens geogràfics. Darwin situà els orígens humans a l'Àfrica. Aquesta teoria no va agradar als defensors d'un origen digne i noble de la humanitat: Europa. La paleontologia primerament i la genètica després han ratificat la teoria de la gènesi africana. Exemples fòssils: *Orrorin tugenensis* (6 Ma), *Ardipithecus kadabba* (5,8 Ma), *Australopithecus anamensis* (4 Ma), *Australopithecus africanus* (3,5 Ma), *Homo erectus* o *ergaster* (1,8 Ma), *Homo sapiens* (200.000 anys), etc. Però encara apareixen notícies —amb un cert suport d'estaments polítics i socials— en què s'intenta recuperar el tan desitjat com fals bressol occidental.

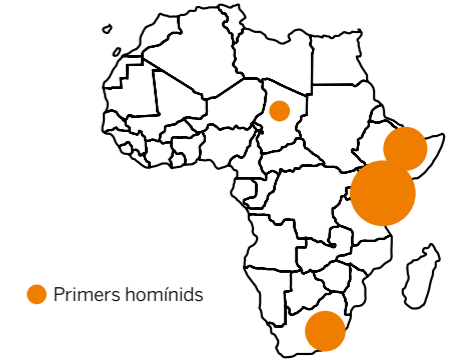
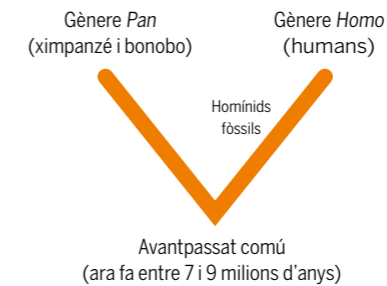
“Alguns titulars de mitjans de comunicació destaquen descobriments de restes fòssils que demostrarien la troballa de la famosa «baula perduda». Així es va assegurar l'any 1983, arran de trobar a Etiòpia l'homínid fòssil més antic del món amb una antiguitat de 4,5 milions d'anys: *Ardipithecus ramidus*. ¿L'*Ardipithecus* és la baula perduda definitiva? ¿Una forma mig humana i mig simiesca (l'home-simi plantejat per Darwin) de la qual descendim els humans? No. Encara hi ha moltes baules perdudes per trobar. L'*Ardipithecus* fou considerat aleshores com l'homínid més antic, però és un primat fòssil. Avui, l'homínid més antic conegut és l'*Orrorin tugenensis*.”³²

Trenquem amb els tòpics sobre el present i el futur de l'*Homo sapiens*

“El tractament que es fa sobre l'origen i l'evolució de la nostra espècie moltes vegades és diferent del de la resta d'éssers vius, però no hauria de ser així. No



Els ximpanzés són cosins nostres



som pas una espècie elegida ni escollida, sinó una espècie més que, des dels seus orígens, ha evolucionat segons els mecanismes de la selecció natural.

“L'evolució no és pas una piràmide on els humans ocupem el punt més elevat, i la resta d'éssers vius, posicions inferiors. L'evolució —tal com ja va plantejar Darwin— és un arbre a la copa del qual situem tota la biodiversitat actual a una mateixa altura.

“L'evolució humana no respon tampoc a la típica seqüència lineal que va des d'un quadrúpede, passant per una sèrie d'homínids —de més a menys— geperuts, fins a arribar a un *Homo sapiens* digne i erecte. L'evolució humana també és en forma d'arbre: molts homínids ara extints, de diferents línies evolutives, van conviure en un mateix moment.

“No existeixen les races humanes. La classificació en artificioses races o, fins i tot, en espècies inferiors als «blancs» del «Primer Món» va justificar des de l'esclavatge fins a deplorables actituds sociopolítiques (com ara l'apartheid a Sud-àfrica). Tots els humans, malgrat les diferències entre ètnies (color, alçada, etc.), som *Homo sapiens*.”³³

És possible que l'espècie *Homo sapiens* “sigui el darrer graó de l'evolució humana. La selecció natural ha estat, en part, substituïda per la selecció cultural (vacunes, pròtesis, etc.), però hi és present. L'augment demogràfic, la sobreexplotació dels recursos naturals o l'acumulació de residus són efectes que cal tenir en compte en el nostre futur com a espècie. Ara bé, si ens extingim (i aquí actuarà la selecció natural: la cultura és biologia), la vida al planeta Terra continuarà. No som imprescindibles”.³⁴

32. J. SERRALLONGA. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

33 i 34. J. SERRALLONGA. A: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010.

18. ¿Ja no evolucionem més, els humans?

L'evolució biològica i l'evolució cultural de l'espècie humana

En un passat no gaire llunyà, en la nostra espècie encara van tenir lloc canvis evolutius relacionats amb la supervivència dels individus. En detectem un de ben clar en la tolerància a la lactosa que avui tenen una part dels humans: els descendents de pobles de pastors que, com a imprescindible complement alimentari, consumien llet i derivats lactis obtinguts dels seus ramats. A l'altre extrem hi ha, entre d'altres, la immensa majoria dels asiàtics, nadius americans i bantus, a qui, una vegada superat el període de lactància infantil, els apareix una forta intolerància a aquest disacàrid natural, que és la pròpia de tots els adults dels mamífers.

En l'actualitat, encara evolucionem biològicament, però molt més culturalment. Ara bé, cal dir que els trets culturals evolucionen ben independentment de les conseqüències que puguin tenir en la supervivència i l'èxit reproductiu, que, com sabem, són els indicadors del triomf de tot canvi evolutiu biològic. Així com les variacions biològiques apareixen per atzar, les culturals sorgeixen quan algú les introdueix intencionadament (tot i que de vegades en les recerques científiques i en altres camps del coneixement, l'art i la literatura, l'atzar també hi dóna un petit cop de mà).

Les variacions culturals prosperen perquè s'escampen quan són útils. La tan bombejada "comunicació" precisament significa 'compartició'. I això és el que fan els nostres cervells: viure en una mena de teixit d'idees i sentiments compartits, el nostre internet natural, la nostra xarxa comunicativa a través, fonamentalment, del nostre complex llenguatge. I és evident que l'acció d'aquest conjunt de cervells entrelligats per mitjà de l'evolució cultural pot reduir bastant l'evolució biològica de l'espècie. Això no vol dir, però, que d'aquesta no n'hi hagi gens ni mica, ja que els individus encara viuen i moren diferencialment per motius que tenen components genètics. Ara bé, el que sí que és sorprenent és constatar que la implacable evolució biològica hagi creat un cervell, l'humà, capaç d'engagar un procés cultural tan poderós, que sovint pot contrarestar amb prou eficàcia les fortes pressions que ella mateixa, tossuda, continua exercint.



L'aprofitament de les immenses possibilitats de l'evolució cultural

L'arbitrari vaivé del conill, que sovint li permet a aquest fugir del perseguidor, és un bon exemple dels avantatges que ofereixen els actes no rutinaris, "creatius". I el nostre cervell té unes possibilitats creatives gairebé il·limitades. N'hi ha prou d'imaginar-se el gran servei que als primers humans els va fer l'elaboració d'eines de pedra i tot seguit fer un vertiginós salt de desenes de mil·lennis fins als avenços actuals en tots els camps. I això, pràcticament amb el mateix cervell que teníem en aquells primers temps. Això vol dir que a partir de l'imprecís moment en què vam esdevenir *Homo sapiens*, més que no pas mutacions avantatjoses, hem acumulat innovacions avantatjoses. La història de la humanitat ha estat plena d'entrebanca, sigui posats per l'entorn natural, sigui per nosaltres mateixos els uns contra els altres a causa la nostra marcada agressivitat. Però cal dir que sovint també hem tingut grans encerts en l'esforç per superar aquestes dificultats en favor d'una vida més feliç tant en el pla individual com en el col·lectiu. Avui, els humans, menys lligats a la satisfacció de les necessitats immediates, podríem ser més lliures, més creatius i més sociables. Però, malauradament, encara no aconseguim que els avenços culturals i tècnics arribin a tota la comunitat d'uns primats tan "socials".

Molts organismes han evolucionat fins a adoptar elements culturals i socials. El cos humà mateix és un exemple de cooperació entre grups de cèl·lules ben diverses i té un funcionament comparable a altres fenòmens solidaris que trobem a la natura. La generosa acció de les nostres cèl·lules sanguínies quan porten l'aliment a totes les altres, i també el formigueig d'emoció que ens recorre tot el cos quan abracem un nadó, recorden molt l'actitud de l'abella de la mel, un dels animals socials per antonomàsia, quan fa la seva expressiva dansa per a indicar a les altres on hi ha pol·len i l'immediat viatge de retorn per a alimentar les seves germanes acabades de néixer —i la mare comuna, no cal dir-ho.

Semblantment, les idees que generem els humans, si som capaços d'utilitzar-les amb fins no destructius, poden nodrir el nostre cos social i contribuir a una cada dia més avançada evolució cultural que alhora sigui bona per al conjunt de la humanitat i al màxim respectuosa amb la natura.

Referències bibliogràfiques

ANDERSON, A. "African dog genetics suggest new view of domestication needed". *GenomeWeb Daily News*, agost del 2009.

JACOB, F. "Evolution and tinkering". *Science*, 196 (1977): 1161-1166.

JAY GOULD, S. *El pulgar del panda* (original 1980). Trad. A. Resines, rev. J. Ros. Madrid: Hermann Blume, 1983.

MAYR, E. *The growth of biological thought: Diversity, evolution, and inheritance*. Harvard: Bellknap, 1982.

SAVOLAINEN, P. *et al.* "Genetic evidence for an East Asian origin of domestic dogs". *Science*, 298 (2002): 1610-1613.

SOBER, E. *Filosofia de la biología* (original 2000). Trad. T.R. Fernández i S. Viso. Barcelona: Publicacions i Edicions UB, 2009.

URIBE, F. (ed.); PÉREZ-PÉREZ, A.; GÓMEZ, J.; CARRANZA, S.; RIBERA, I.; SENAR, J. C.; ARNEDO, M. À.; GALLEMÍ, J.; MOYÀ, J.; CASTRESANA, J.; SOL, D.; ROZAS, J.; RIUTORT, M.; SERRALLONGA, J. *La teoria de l'evolució, 150 anys després*. Barcelona: Museu de Ciències Naturals de Barcelona, 2010. Consultable en línia a <http://www.blogmuseuciencias.org>.

Pàgines web

2009 Año Darwin. 12 de febrero de 2009: Día de Darwin: www.sesbe.org/darwin_day. La Sociedad Española de Biología (SESBE) ofereix un recurs per a docents, "Comprendiendo la evolución".

American Museum Natural History: www.amnh.org/exhibitions/darwin. Exposició en línia sobre la teoria de l'evolució.

Darwin 200: www.darwin200.org. Pàgina del Natural History Museum de Londres.

Darwin 2009. 150 años de la teoría de la evolución: www.darwin2009.csic.es. Conté activitats, publicacions i una exposició virtual.

Darwin. The genius of evolution: www.bbc.co.uk/darwin. Vídeos sobre l'evolució de la cadena de televisió britànica BBC.

Maleta d'evolució: www.xtec.cat/cdec. Recurs disponible al web del CDEC/CESIRE.

The Complete Work of Charles Darwin Online: www.darwin-online.org.uk. L'obra completa de Charles Darwin.

The Tree of Life Web Project: www.tolweb.org/tree/phylogeny.html. Arbre de la vida interactiu amb fotografies i descripcions de les espècies. Inclou més de deu mil pàgines i està en constant evolució.

Índex

- 5 La teoria de l'evolució, avui
- 6 1. Les espècies evolucionen
- 8 2. Les espècies no són pas perfectes
- 10 3. Una teoria científica: la teoria de l'evolució
- 12 4. Com va entendre Darwin l'evolució
- 14 5. El concepte científic de "lluita per la supervivència"
- 16 6. L'herència és al gen
- 18 7. La mutació, el canvi que s'hereta si queda fixat en els gens
- 20 8. La deriva genètica també genera evolució
- 22 9. La migració genètica i la selecció artificial generen evolució
- 24 10. Altres seleccions paral·leles: la sexual i la social
- 26 11. L'estudi dels fòssils i l'ADN ajuden a entendre l'evolució
- 28 12. L'arbre de la vida. Tots tenim un avantpassat comú
- 30 13. Totes les espècies actuals són igual d'evolucionades
- 32 14. La biogeografia com a revelador resultat de l'evolució
- 34 15. Solucions diverses per a la reproducció i la criança
- 36 16. L'evolució continua, i l'espècie humana la pot condicionar
- 38 17. ¿Venim del mico? Por i fascinació vers els orígens humans
- 40 18. ¿Ja no evolucionem més, els humans?
- 42 Referències bibliogràfiques

Edició:

Institut d'Educació de l'Ajuntament de Barcelona

Text:

Ricard Bonmatí i els autors respectius de les citacions

Fotografies:

Istockphoto

Pàg. 2: Jordi Vidal F.

Pàg. 12-13: Jordi Serrallonga

Pàg. 18-19: Julius Rückert

Pàg. 24: Manel Segarra i Oliva

Pàg. 30-31: lafotografis

Coordinació:

Francesc Uribe i Pere Viladot del Museu de Ciències Naturals de Barcelona

Revisió pedagògica:

Institut d'Educació de l'Ajuntament de Barcelona i el Centre de

Documentació i Experimentació en Ciències del Departament d'Educació de la Generalitat de Catalunya

Disseny gràfic:

Jordi Salvany

Impressió:

Departament d'Imatge i Producció Editorial municipal

D.L.:

Primera edició: novembre de 2010



Quaderns del
Consell de
Coordinació
Pedagògica



Ajuntament de Barcelona
Institut d'Educació



Ajuntament de Barcelona
Barcelona Cultura
Museu de Ciències Naturals