

LA COMPRESIÓ DELS MECANISMES DE L'EVOLUCIÓ

DAVID DE LORENZO

Human Genetics Center. University of Texas. Houston, USA.

Adreça per a la correspondència: Human Genetics Center. University of Texas. P. O. Box 20334. Houston, TX 77225-0334. Telèfon: 1-713-500 9827.

Adreça electrònica: *david@delorenzo.com*

INTRODUCCIÓ

L'evolució com a coneixement és un dels camps de la ciència que desperta més interès, la qual cosa no implica que sigui el més entès i conegut. Ans al contrari; el lector probablement haurà sentit expressions com que l'evolució és simplement l'adquisició de millors característiques físiques, que els micos que veiem actualment són els nostres antecessors, o que no existeix cap organisme més evolucionat que l'ésser humà. Tanmateix, sabem que moltes espècies es van extingir, el que implica que l'evolució és quelcom més complex que millorar al llarg del temps. També sabem que els micos actuals han sofert un procés d'evolució i per tant la nostra relació amb ells és més aviat de cosins llunyans més que d'ascendents-descendents. Curiosament, però, sembla que l'home presenta una de les menors taxes de canvi (nombre de canvis per unitat de temps), amb la qual cosa es dedueix que l'home és *menys evolucionat* que altres dels

seus congèneres primats. Finalment, tot i que és cert que la nostra capacitat mental és clarament superior a la d'altres éssers vius, existeix també un elevat grau de complexitat en el mecanisme en què les plantes transformen la llum i el diòxid de carboni en matèria viva, que no és menys sofisticat que aquells que observem en la nostra espècie.

Sabem del cert que l'evolució s'ha produït i, com es veurà més endavant, tenim una idea clara dels seus mecanismes essencials. Aquest capítol no pretén ser un compendi sobre l'evolució. Senzillament pretén aclarir tot un seguit de conceptes mitificats tot aplicant-los a situacions del present i del futur cap a on s'adreça l'estudi de l'evolució en els nostres dies.

LA PASSIÓ PER APRENDRE O L'ART D'ENSENYAR?

L'home esta dotat de la capacitat de transmetre coneixements d'un individu a

l'altre, d'una generació a la següent, a través del llenguatge. Però hi ha quelcom més que diferencia l'home de la resta d'animals: l'ànima per transmetre aquests coneixements, el saber i en definitiva, el poder comunicar un conjunt d'idees prèviament adquirides, ja sigui a través de l'aprenentatge o fruit del pensament i la reflexió.

En l'àmbit de la ciència com a coneixement, és paradigmàtic el difícil que de vegades resulta la via de comunicació entre els científics i la societat. Molt sovint és conseqüència de la complexitat que s'ha donat al llenguatge científic i altres vegades, potser com a resultat de l'anterior, per la manca d'interès que genera. Tanmateix, el tema de l'evolució presenta un tret que el caracteritza: la facilitat de comprensió conceptual i el consegüent interès. En altres paraules, l'interès pels nostres propis orígens ens atrau potser com a resultat de l'antropocentrisme que en certa manera forma part del pensament, però especialment perquè es pot discutir sobre evolució ja en l'àmbit popular, sense haver de recórrer a coneixements profunds en la matèria. De fet, evolució és un dels temes de què es parla més en revistes de divulgació científica. I malgrat la quantitat d'articles que ha generat, és sorprenent veure el desconeixement que se'n té i, més, dels mecanismes de l'evolució. La paraula *evolució* s'utilitza exhaustivament, fins i tot en l'àmbit no científic, en referència a un sentit de millora o desenvolupament. Etimològicament, l'ús és correcte, però podem estar cometent un error quan, per exemple, parlem de la teoria de l'evolució de Darwin i Wallace de mitjan segle XIX.

PERÒ... ÉS REALMENT IMPORTANT SABER SOBRE EVOLUCIÓ?

Precisament, l'interès generalitzat a què m'he referit prèviament és quelcom real-

ment extraordinari. Preguntes tan senzilles com *per què les aus volen o què ens ha permès poder percebre colors* es podrien respondre simplement en termes d'aerodinàmica o lleis fotoquímiques. Tanmateix, a més d'aquestes preguntes immediates n'existeixen d'altres que apunten més a la causa última de les coses, com per què les aus han adquirit la capacitat de volar o quin avantatge ens aporta el poder distingir els colors. I la causa última de les coses, en el món biològic, és essencialment l'evolució o pressió evolutiva. De fet, l'evolució pot considerar-se com una part de la filosofia (o com J. B. Lamarck va denominar-la, *Philosophie Zoologique*): s'empenen la raó i l'argumentació per a la recerca de la veritat i el coneixement de la realitat, especialment de les causes i naturalesa de les coses.

QUÈ ÉS EXACTAMENT L'EVOLUCIÓ?

Com he esmentat anteriorment, el concepte *evolució*, és dual. Pot referir-se a un procés gradual, com el progrés d'una forma senzilla cap a una de complicada i també pot referir-se al procés que permet explicar l'origen de les espècies com a un desenvolupament a partir de formes prèvies.

Etimològicament la paraula prové del mot llatí *evolutio*, que traduït és desenvolupament, desenrotllament. Amb aquest sentit va ser emprada per primer cop per referir-se al que avui coneixem com a teoria de la preformació proposada per Bonnet l'any 1762, la qual postulava que l'embrió, en comptes de formar-se com a resultat de la fecundació, és resultat d'una forma preexistent que conté rudiments de totes les parts del futur organisme. I amb aquest mateix sentit, *evolució* s'empra freqüentment com a desenvolupament d'una forma senzilla a una de més complexa.

Tanmateix, el concepte de teoria de l'e-

volució, a través de la qual s'explica el canvi en les característiques hereditàries de les espècies a través de les generacions, no té cap connotació de *millora*. L'evolució produeix espècies més adaptades a l'entorn en el qual es desenvolupen però resulta erroni pensar que genera espècies *millors*. Ben cert és que de vegades, el sentit evolutiu d'una espècie produeix una millora substancial en l'espècie, bé sigui en el mètode d'obtenció d'energia, en la capacitat d'escapada de depredadors o en la protecció de la descendència. Una *millora* és específica per a un determinat entorn. Si l'entorn llavors canvia la millora pot esdevenir fins i tot un desavantatge. Un canvi que podia tenir un determinat propòsit (o cap en absolut), pot al cap del temps ser *utilitzat* per a un altre propòsit avantatjós per a l'espècie. Però no sempre condueix a una millora.

L'estudi i desenvolupament de la teoria de l'evolució ha permès contestar dues preguntes que han intrigat els científics al llarg de cents d'anys.

1. Per què existeix tanta variació en el regne animal? No cal observar molt detalladament per descobrir un elevat nombre d'espècies diferents d'animals i plantes. I com més s'investiga i s'explora més augmenta la nostra estimació del nombre d'espècies a la Terra.

2. Per què hi ha tantes similituds entre espècies diferents? Malgrat la diversitat, hi ha un seguit de característiques comunes entre els diferents organismes. Com a exemple, la columna vertebral és una estructura compartida per un elevat nombre d'espècies, no només actuals sinó ja extingides. I a escala molecular, les similituds entre diferents espècies són encara més sorprenents. Des dels procariotes fins als mamífers, tots els éssers vius utilitzen els mateixos mecanismes per a dur a terme processos bàsics de la vida.

El concepte d'evolució biològica permet

respondre a aquestes preguntes. Dóna resposta a les semblances entre organismes argumentant que totes les diferents espècies de plantes, animals i microorganismes que viuen a la terra actualment provenen d'ancestres comuns. I dóna resposta a les diferències mitjançant el procés d'evolució per selecció natural: tal com Darwin va observar, els éssers vius a la natura produeixen més descendència de la que pot sobreviure i reproduir-se donades les limitacions de recursos, espai, etc. La descendència normalment difereix entre si per diferents trets físics, en darrer terme producte de mutacions en el sentit que són canvis aleatoris i heretables segons les lleis de la genètica mendeliana. Si alguns individus tenen caràcters que són avantatjosos en la lluita per la supervivència i la reproducció, llavors sobreviuran i transmetran aquests trets a la descendència.

Aquest procés repetit al llarg del temps, va dur als primers organismes sobre la Terra a diversificar-se en les plantes, animals i microorganismes existents actualment, que malgrat ser diferents, comparteixen molts dels trets ancestrals. Altrament, l'aprofitament exhaustiu de nous recursos i nínxols ecològics ha contribuït a augmentar la diversificació que coneixem en els nostres dies.

DARWIN I MENDEL: UN PUNT D'INFLEXIÓ

El món que ens envolta canvia constantment, no només a escala macroscòpica (noves muntanyes, noves valls, nous deserts) sinó a escala microscòpica i molecular (alteracions en la concentració de gasos a l'atmosfera, minerals al sòl...). Alguns d'aquests canvis són resultat de milers d'anys, mentre que d'altres són gairebé instantanis. L'acció de l'home modifica en gran mesura

la velocitat en què aquests canvis es produeixen. Amb més o menys rapidesa, són fruit d'una dinàmica no només en l'àmbit geològic sinó també biològic. Però l'home no en va ser conscient fins al segle XIX, quan la concepció estàtica que es tenia de la Terra es va transformar radicalment i va passar a ser una concepció dinàmica, d'un planeta en constant canvi.

En l'àmbit biològic, com que en general la velocitat de canvi és major que en l'àmbit geològic, ja existia una certa consciència de canvi en els éssers vius en l'època dels grecs. Tanmateix, amb l'arribada del cristianisme, el món occidental va acceptar la idea de la creació o gènesi del món en sis dies per part de Deu. No va ser fins al segle XIX, que molts naturalistes van començar a especular sobre la possibilitat que en els organismes s'hagin produït canvis al llarg de la història de la Terra, especialment quan es varen començar a descobrir formes fossilitzades d'espècies ja extingides. Però un altre cop, aquesta idea no va gaudir de gaire acceptació, en part a causa que no es proposava cap *mecanisme* fiable per produir aquests canvis.

L'any 1858, dos naturalistes anglesos, C. R. Darwin (1809-1882) i A. R. Wallace (1823-1913) van proposar el mecanisme de la selecció natural com a explicació per a l'origen de les diferents espècies. Ambdós eren conscients que tot i que la majoria de les espècies tenen una descendència nombrosa, la mida de llurs poblacions roman relativament constant. Només uns quants descendents arriben a l'etapa d'adultesa, la qual els permet reproduir-se i tenir una descendència, alhora que es genera una certa competència entre els nous individus. Com que cadascun dels membres de l'espècie varia lleugerament respecte dels altres, aquells que desenvolupin uns trets avantatjosos en l'ambient que els envolta, tindran una probabilitat més elevada de supervivència.

Darwin va presentar aquesta teoria en detall al llibre *On the Origin of Species by Natural Selection* l'any 1859, en el qual no només ordenava les proves a favor de l'evolució sinó que descrivia un mecanisme convincent, el de *selecció natural* en contraposició al terme *selecció artificial*, que seria conduït per l'home. Amb el procés de selecció natural explicaria l'evolució biològica, que ell anomenava *descendència amb modificació*, i l'aparició de noves espècies.

Però Darwin no explicava el mecanisme per què es genera la variació sobre la qual la selecció natural actua, ni com aquesta variació es transmet a la descendència. Cal especular però, que si els treballs de G. Mendel sobre els mecanismes de l'herència publicats el 1866 haguessin tingut impacte i acceptació, Darwin hagués pogut raonar sobre la generació de la variació. En aquella època, es va pensar que els exemples d'herència de Mendel eren meres excepcions i els seus treballs van ser ignorats fins a inicis del segle XX, quan es va reconèixer el seu significat, fet que va donar inici a la genètica moderna.

El desconeixement de les lleis de l'herència va fer que Darwin admetés en cert grau l'herència de caràcters adquirits com a part de la causa de l'evolució biològica, error força estès en el coneixement de la teoria de l'evolució fins i tot avui en dia. En general, es pensa que els organismes canvien llurs característiques en resposta al medi ambient, com si l'ambient actués sobre els individus generant en ells uns trets físics que poden ser transmesos genèticament a la descendència. Tanmateix, la selecció natural només pot actuar sobre la variació genètica que ja és present en cada generació, variació que s'esdevé aleatòriament per mutació i no pas com a resposta a unes necessitats. L'evolució no dissenya nous organismes, sinó que són els nous organismes els que emergeixen de la variació genètica inherent a les poblacions.

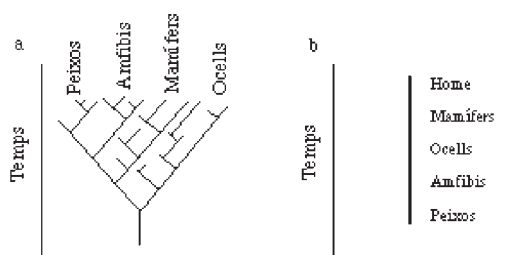


FIGURA. 1. La teoria proposada per Darwin suggeria que l'evolució s'havia esdevingut com un arbre amb branques (a), en contrast amb la idea tradicional que l'evolució segueix una línia ascendent i unidimensional, on el darrer punt seria l'home. De fet, el quadern de notes de Darwin presenta un esquema del que podria considerar-se el primer arbre filogenètic de la història.

La variació genètica és aleatòria, però la selecció natural no. La selecció natural *experimentalment* en cada individu i deixa proliferar aquells que tenen una habilitat més gran per sobreviure i reproduir-se de manera que les poblacions d'éssers vius estan en constant adaptació al medi on es troben. La gran diversitat de nínxols ecològics al nostre planeta permet explicar, a través de la selecció natural, la gran variació que existeix entre els éssers vius. La necessitat d'estar adaptats a un medi en constant canvi per sobreviure fa que existeixi tanta diversitat en els éssers vius.

EVOLUCIÓ CONTÍNUA O DISCONTÍNUA

Un dels aspectes criticats de la teoria de l'evolució ha estat el problema dels punts intermedis. És a dir, si la selecció natural és la força motriu de l'evolució, quin avantatge aporten als individus els estadis intermedis dels òrgans, per exemple? En el cas de la visió és fàcil entendre el fet que hagin existit diversos estadis de l'òrgan visual, des de cèl·lules fotosintètiques fins al complex ull

dels mamífers o dels cefalòpodes. I en cada moment, una petita millora en la capacitat visual era beneficiosa per a l'individu en el qual apareixia. Tanmateix, hi ha altres casos on no és tan evident el procés d'evolució mitjançant petits canvis acumulatius. Per exemple, les plomes de les aus: de què serveixen als ancestres de les aus les plomes primordials, altrament insuficients per al vol? Per tant, les plomes devien aparèixer en un estadi força avançat, suficient com per permetre un vol rudimentari, la qual cosa és improbable que s'esdevingués a l'atzar.

L'explicació de l'evolució de les plomes a través de la selecció natural no necessita un canvi tan dràstic. S'ha proposat que les plomes, en un primer moment, tenien una funció d'aïllant tèrmic. Posteriorment, en augmentar de mida, les plomes primordials van començar a permetre petits vols, i posteriorment es van especialitzar en la funció del vol fins a obtenir la morfologia de la ploma actual.

Contràriament a l'explicació de l'evolució contínua dels caràcters s'argumentava el fet que si era de tal manera, el registre fòssil hauria de mostrar una sèrie contínua d'espècies amb petites diferències en llurs característiques. L'explicació clàssica a l'absència d'aquests exemplars era que el registre fòssil és incomplet i, per tant, existeixen *graons perduts* en la cadena de l'evolució de les espècies.

Actualment, sí que es considera la possibilitat que aquests *salts* detectats en el registre fòssil siguin reals: el 1972, N. Eldredge i S. J. Gould van proposar que potser l'esmentat registre no estava incomplet i que les discontinuïtats del registre no eren artefactes, sinó que eren reals, és a dir, que s'esperaria trobar discontinuïtats fins i tot si el registre fòssil fos complet. Segons ells, el procés d'especiació no hauria de ser considerat un procés lent i a llarg termini, sinó més aviat un esdeveniment puntual (en l'es-

cala geològica del temps). D'alguna manera separaven dos processos:

1. El d'evolució intraespecífica (és a dir, el procés pel qual es produeixen canvis entre individus d'una mateixa espècie).

2. El d'especiació (procés pel qual apareixen espècies diferents), producte de macromutacions (mutacions que produeixen canvis dràstics en l'individu). Aquesta idea està sostinguda per l'estudi de mutacions de gens del desenvolupament, que impliquen grans canvis en la morfologia de l'individu.

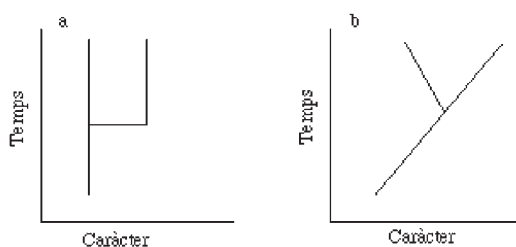


FIGURA 2. Segons Eldredge i Gould, la major part dels canvis entre espècies es genera en el moment de l'especiació (a), a diferència de la visió clàssica (b), en què les diferències anaven augmentant segons passava el temps.

A diferència de la visió gradualista clàssica (fig. 2, a), en què les noves espècies es generaven per transformació lenta del conjunt complet de la població ancestral en llurs espècies descendents, Eldredge i Gould, en el seu model de l'equilibri puntuat (*punctuated equilibrium*) postulaven que les noves espècies es generaven per la separació ràpida de petites subpoblacions des de la població ancestral. La diferència entre un model i l'altre rau principalment en la taxa de canvi o evolució durant i entre successos d'especiació. Sembla que en la natura es dóna un ampli rang de taxes de canvi, amb la qual cosa es podria dir que ambdós models són extrems d'una àmplia gamma de possibilitats en la generació de noves espècies.

Per tant, sembla clar que en l'evolució, la força motriu que dirigeix els processos de canvi en la morfologia i trets dels éssers vius és el medi ambient. Que queda per conèixer? En el següent apartat es comentaran controvèrsies que podrien ser *antigues* per a una teoria que té més de cent anys d'existència, però que encara hi són presents i que van fer que H. J. Muller sentenciés el dia del centenari de la publicació de *The Origin of Species* que «cent anys sense Darwin són més que suficients». I malgrat tot, no hi ha res del tot clar. L'era de la biologia molecular i les dades de variació de les espècies a nivell molecular van plantejar tota una sèrie de qüestions, ja que en gran mesura, els canvis a escala de seqüència de DNA són aparentment invisibles en la selecció natural.

LA TEORIA DE L'EVOLUCIÓ ACTUAL

La teoria de l'evolució explica el procés pel qual les formes de vida de la Terra han canviat. El terme *teoria* però, no es refereix a quelcom que s'intueix o sospita, tal com es podria entendre en llenguatge de carrer, sinó a explicacions que es donen als fenòmens naturals i que es construeixen a partir de l'observació i d'hipòtesis comprovables empíricament. La teoria de l'evolució és la millor explicació disponible per a la gran quantitat d'observacions realitzades sobre la vida a la Terra. L'abundància de proves és tan gran que ja ningú dubta de la seva veracitat. No és només pel que fa a petits canvis en els individus, sinó també pel que fa a l'aparició de noves espècies. Malauradament, als científics ens resulta sorprenent veure aparèixer notícies relacionades amb el nostre camp de coneixement. En el camp de l'evolució, però, és relativament freqüent veure notícies sobre el descobriment de noves espècies (un dels exemples més recent és

el de l'artròpode *Culex pipiens*, un mosquit del qual s'ha format una nova espècie als túnels del metro de Londres en el lapse de temps d'un segle; *El País*, 28 d'agost de 1998).

El perquè de l'impacte d'aquest tipus de notícia podria venir donat per la curiositat que això desperta i pel fet que el tema de la teoria de l'evolució és en certa manera encara sota estudi, per la qual cosa, qualsevol prova en favor seu resulta interessant i transcendent, a més de l'interès que susciten aquests exemples quan pensem en l'espècie humana i perquè som com som.

Tanmateix, hom no pot pensar que la teoria de l'evolució necessiti ser contrastada en els nostres dies, és a dir, no existeix cap alternativa científica que pugui substituir la teoria de l'evolució. L'evolució s'esdevé contínuament, malgrat que hi ha moltes preguntes sense resposta de les quals tractaré més endavant. Sovint, s'intenta contraposar el *creacionisme* (explicació de l'origen de les espècies segons les escriptures del Gènesi) amb la *teoria de l'evolució*. Tanmateix, no es troben al mateix nivell. La Teoria de l'evolució és una teoria científica (creada a partir d'observacions i proves empíriques, que pot ser modificada segons els resultats de les observacions i proves), i el creacionisme és un dogma de fe (per tant, acceptat sense proves experimentals que ho demostrin).

LA TEORIA DE L'EVOLUCIÓ A ESCALA MOLECULAR

Un cop es va començar a estudiar la variació de les poblacions naturals a escala molecular, inicialment a escala de proteïna i posteriorment d'àcid nucleic (DNA), es van trobar inicialment diverses observacions que es contraposaven al que s'esperava sota la teoria de l'evolució:

1. El grau de variació observat en les poblacions va resultar més elevat de l'esperat. En altres paraules, hi havia un nombre relativament elevat de variants a escala molecular (d'acord amb la hipòtesi segons la qual la selecció natural elimina les variants no avantatjoses i selecciona les avantatjoses, caldria esperar que les poblacions presentessin un aspecte uniforme pel que fa a aquest nivell de variació).

2. Es va veure que, per a una mateixa proteïna, la taxa de canvi era significativament constant en diferents tàxons. Era difícil explicar com animals tan diferents com l'home i el colibrí, adaptats a ambients tan diferents en termes de canvi en l'ambient i, per tant, de selecció natural, presentaven la mateixa taxa de canvi a escala molecular.



FIGURA 3. Existeix una bona correlació entre el nombre de canvis observats en una proteïna entre dues espècies, i el temps transcorregut des de la seva separació. Per tant, si es té calibrat aquest rellotge per a una determinada proteïna, un cop sabut el nombre de diferències entre dues espècies, pot fer-se una estimació del temps que ha transcorregut des de la seva separació en dues espècies independents.

D'aquest parell d'observacions varen sorgir dues conclusions que definitivament han marcat l'estudi a escala molecular de l'evolució.

1. El rellotge molecular (*The Molecular Clock*, Zuckerkandl i Pauling, 1965). Si la taxa de canvi per a una determinada proteïna és constant en dues espècies diferents, es pot conèixer el temps que ha transcorregut

des de la separació en termes evolutius de les dues espècies tot observant el nombre de canvis esdevinguts comparativament entre la corresponent proteïna de cada una de les dues espècies (figura 3).

2. La teoria neutralista de l'evolució molecular (M. Kimura, 1968). Kimura va mostrar que el grau de variació genètica observat a escala molecular en les poblacions era massa elevat per a poder ser mantingut per la selecció natural. Amb tantes variants, existiria en cada generació un nombre massa elevat d'individus *no òptims* que serien eliminats per efecte de la selecció natural si aquesta era realment important. Per tant, per Kimura, no tots els canvis podien ser adaptatius, és a dir, fruit de canvis selectius en els individus d'una espècie, sinó més aviat canvis selectivament neutres apareguts per mutació, la qual presenta una freqüència que oscil·la per efecte de l'atzar.

El polimorfisme observat en les poblacions no es podia mantenir per l'efecte de la selecció natural, sinó més aviat seria producte de l'efecte de l'atzar (deriva genètica, figura 4), que manté un cert grau d'heterozigotitat a les poblacions. Tot i que els heterozigots són formes de transició (els nous polimorfismes apareixen per mutació i augmenten o disminueixen en freqüència per efecte de la deriva genètica, fins assolir la pèrdua o bé la fixació), existeix un nivell d'equilibri que depèn de la mida poblacional i de la taxa de mutació.

Molta de la recerca que es fa actualment en l'àmbit de l'evolució a escala molecular es centra bàsicament en dos aspectes:

1. L'estudi de la taxa de canvi a nivell molecular i el seu ús i aplicacions en la filogènia.

2. L'estudi de la variació molecular i com s'ajusta a les prediccions de la teoria neutra.

En aquest segon aspecte, últimament s'ha qüestionat si el paper de la deriva genè-

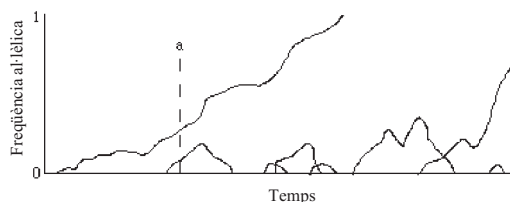


FIGURA 4. Efecte de l'atzar o deriva genètica en la freqüència de variants no sotmeses a selecció natural (variants neutres). La freqüència d'aquestes variants canvia en cada generació per processos purament estocàstics, de manera que pot arribar a la seva fixació en la població (variants en què la freqüència acaba a la línia superior) o a perdre's. En un determinat moment (com pot ser, per exemple, el punt *a*), existeixen una sèrie de variants en la població (dues en aquest cas) amb una determinada freqüència. La intensitat d'aquest procés depèn principalment de la mida de la població. En poblacions petites és molt fort, per la qual cosa els processos de pèrdua o fixació són realment ràpids (de manera similar a la manera com passa en pobles petits o illes, on sol predominar un cognom).

tica (o atzar) és tan important a escala molecular com es va plantejar en un principi. És a dir, quina és la proporció de noves variants substrat de la selecció.

L'ESPECIACIÓ A ESCALA MOLECULAR

Finalment, una altra de les grans preguntes de l'evolució: quins són els mecanismes pels quals es generen noves espècies? Des de l'establiment, per part de C. R. Darwin, de la teoria de l'evolució de les espècies per selecció natural, han estat nombrosos els mecanismes observats d'especiació, però de pocs d'ells es comprèn l'acció a escala molecular. És coneguda des de fa temps l'esterilitat reproductiva dels híbrids entre diferents espècies, però incompresa a escala molecular, la qual cosa reflecteix la complexitat del procés en què participen gens del desenvolupament, del comportament i d'altres lligats al procés reproductiu, i on, sovint, s'estableixen interaccions epistàtiques

entre ells. És, per tant, un camp de recerca que queda obert i que genera un alt grau d'interès dins l'evolució molecular.

CONSIDERACIONS FINALS

Un dels objectius de la ciència és comprendre la natura. *Comprendre*, en ciència, significa relacionar un fenomen natural amb un altre i reconèixer-ne les causes i efectes. Tanmateix, els científics mai no poden estar segurs si una explicació concreta és definitiva. La teoria de l'evolució de C. R. Darwin, com a teoria general, s'ha mostrat sòlida durant cent anys. Un gran esforç d'investigació ha convertit el que inicialment va ser una hipòtesi en una teoria consolidada. Posteriors descobriments, com les dades de variació a escala molecular, han permès incrementar els nostres coneixements dels processos de l'evolució a aquesta escala.

Amb la moderna teoria neutra de l'evolució molecular, el que es qüestiona no és el procés de l'evolució a escala molecular, sinó el paper predominant de la selecció natural en aquest procés. S'ha vist, tanmateix, que la variació existent en una zona del DNA depèn en gran mesura de l'*ambient* genètic en el qual es troba (és a dir, la seqüència gènica que l'envolta) i en quin grau aquest ambient influeix en aquesta zona. Malgrat el fet que una regió de DNA sigui invisible a l'acció de la selecció natural, si aquesta regió es

troba lligada genèticament (per trobar-se en una regió amb nivells reduïts de recombinació) a una altra regió sotmesa a una forta pressió selectiva, és evident que la regió suposadament *neutra* també ha d'experimentar aquest efecte de la selecció natural.

En resum, l'estudi de l'evolució roman com un camp actiu d'investigació, amb un elevat nombre de nous descobriments que augmenten contínuament el nostre coneixement de la manera com s'ha produït l'evolució dels éssers vius en el nostre planeta.

AGRAÏMENTS

Voldria agrair al Dr. J. Bertranpetit l'oportunitat d'escriure aquest treball, com també als Drs. M. Agudé, G. Barbujani, D. Graur, M. Gómez-Angelats i S. Ramos-Onsins els seus comentaris i ajut.

BIBLIOGRAFIA

- DARWIN, C. R. (1859). *On the Origin of Species*. Londres: John Murray.
- GRAUR, D.; W.-H. LI (1999). *Fundamentals of Molecular Evolution*, 2a edition. Sunderland: Sinauer Associates.
- KIMURA, M. (1983). *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- RIDLEY, M. (1996). *Evolution*, 2a edició. Boston: Blackwell Scientific Publications.
- RIDLEY, M (ed.) (1997). *Oxford Readers Series: Evolution*. Oxford: Oxford University Press.