

A ORIXE DA VIDA

Rafael Seoane Prado

Universidade de Santiago de Compostela

1. INTRODUCCIÓN

1.1. A orixe do Universo e da Terra

A orixe última da vida está na formación da materia que a constitúe, momento no cal comezou un proceso continuo que había conducir, ó parecer irremisiblemente, á aparición dos seres vivos cada vez máis complexos. O feito de que poidamos formularnos cál foi a orixe do Universo pon xa unhas certas limitacións ás posibilidades que existen para explica-la súa orixe; tiveron que se da-las condicións que permitiran o posterior desenvolvemento da vida, xa que se non fose así non poderíamos facernos esta pregunta pola sinxela razón de que non existiríamos.

A teoría cosmolóxica máis aceptada actualmente é a do *big bang* ou grande explosión. Segundo esta teoría o Universo era, hai uns 10000 ou 15000 millóns de anos, un punto sen dimensións, de densidade e temperatura infinitas, que nun determinado

momento estoupou e comezou a se expandir. Ó cabo duns 10000 anos do momento inicial, o Universo tería arrefriado abondo como para conter átomos estables e continuar un proceso evolutivo que había conducir á formación de nubes frías de gas e po de elementos sinxelos, fundamentalmente hidróxeno e helio. Estas nubes condensáronse por forzas gravitatorias facendo que os seus núcleos queceran por mor das colisións interatómicas, ata acadaren unha temperatura na que era posible a realización das reaccións nucleares que orixinaron o resto dos elementos coñecidos; estes elementos reaccionaron entre si para formaren algunhas moléculas sinxelas. Baixo certas circunstancias producíanse explosións que sementaban o espacio intergaláctico con estes elementos pesados e moléculas sinxelas. Hai aproximadamente uns 5000 millóns de anos, unha destas nubes de gas e po fríos condensouse e queceu o suficiente para formar no seu centro o Sol. Nos laterais deste disco xiratorio formáronse outros agregados de materia, os

planetesimais, en órbita arredor do sol, que colisionarían e se agregarían para daren lugar ós planetas, nun proceso que durou uns cen millóns de anos.

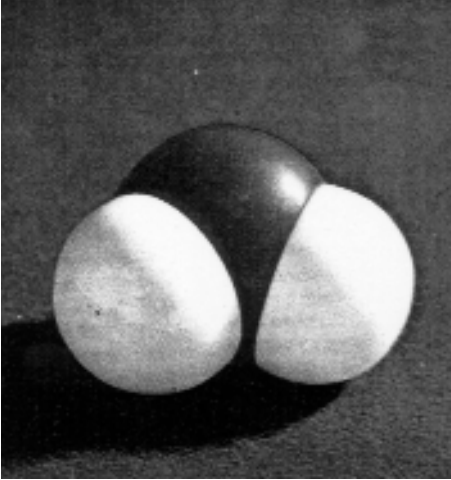
Temos así que, hai aproximadamente uns 4900 millóns de anos existía arredor do sol un corpo esferooidal duns 12000 km de diámetro e a unha temperatura elevadísima que constituía o embrión do que ía se-lo planeta Terra. Segundo as teorías aceptadas actualmente, nalgún momento un obxecto de gran tamaño colisionou coa Terra en formación, liberando tal cantidade de calor que a terra volveu ó estado fluído e a forza de rotación liberou da súa codia un obxecto duns 6000 km de diámetro que constituiría a Lúa. Neste proceso a Terra perdeu case que tódolos compostos volátiles, entre eles a auga que contiña. Durante os seguintes 600 millóns de anos de vida da Terra, novos impactos de menor entidade e a captación de material das cabeleiras dos cometas achegaron á Terra unha gran cantidade de materia que incluía moléculas orgánicas simples e mesmo a auga que constituiría os océanos. A calor producida polos impactos evaporaba a auga, que se condensaba na atmosfera e caía en forma de interminables chuvias sobre a superficie incandescente da Terra, onde volvía evaporarse. Este ciclo continuou ata que a superficie arrefriou abondo e se formaron os primitivos océanos.

1.2. A vida no Universo: cosmoquímica

O Cosmos está formado por un 92,8 % de hidróxeno, un 7,1 % de helio —os dous elementos máis sinxelos— e un 0,1 % do resto dos elementos, nunha orde de abundancia inversa ó seu peso atómico, xa que os elementos pesados se forman por reaccións nucleares a partir dos máis lixeiros. Un detalle de interese é que os elementos máis abundantes do Universo (He, H, O, S, C e P) sexan, agás o He, os elementos base de tódolos compostos orgánicos, que deben ser, xa que logo, moi abundantes no Cosmos. De feito, as cinco primeiras moléculas detectadas no po intergaláctico son amoníaco, auga, formaldehido, ácido cianhídrico e cianoacetileno, que deberon desempeñar un papel crucial na síntese das primeiras biomoléculas. Se engadimos a isto a composición do 5 % dos meteoritos, as chamadas **condritas carbónáceas**, moi ricos en compostos orgánicos como aminoácidos formadores de proteínas e outros de interese biolóxico, teremos que recoñecer que, haxa ou non vida noutros planetas, a composición química do Universo é moi uniforme e contén cantidades elevadas dos compostos básicos da vida.

1.3. O problema da definición da vida

Para podermos establecer cál foi a orixe da vida temos primeiro que lograr unha correcta definición dela, noutras palabras, temos que poder



Modelo dunha molécula de auga. A auga é un dos cinco compoñentes principais para a síntese das primeiras biomoléculas

establecer claramente a diferenca entre o vivo e o non vivo. Quizais un dos paradoxos máis chocantes da bioloxía moderna é que non sexa capaz de establecer unha perfecta definición do seu obxecto de estudio e teña que recorrer, para facelo, ó auxilio doutras disciplinas como poden se-la filosofía ou a termodinámica.

As dificultades á hora de defini-la vida xorden por non existir uniformidade ningunha en manifestacións tan diferentes coma un rato, un virus, unha árbore, unha célula embrionaria, unha bacteria ou un home en coma. Malia estas dificultades, adoita haber coincidencia en que o fenómeno vital require un certo ordenamento estrutural, cunha organización extremadamente

complexa. Existe tamén acordo xeral en que os seres vivos se caracterizan polo que A. L. Leningher denomina **lóxica molecular da vida**; así, un organismo vivo contén unhas estruturas e moléculas cunha función ou funcións específicas necesarias para o mantemento da súa complexidade estrutural e a produción de réplicas exactas de si mesmo. A vida, ademais, non está dispersa no espacio, senón localizada en sistemas discretos, espacialmente illados do medio exterior co que manteñen unhas interaccións limitadas.

A pesar da dificultade, moitos autores intentaron defini-la vida. Califano definiu como ser vivo todo aquilo que transforma a enerxía; esta definición é tan simple que poden considerarse incluídos nela fenómenos tan dispares como un incendio, o mar ou un reactor nuclear. Oro afirma que un ser vivo é aquel capaz de se reproducir, mutar e reproduci-las súas mutacións dando lugar, a través dun proceso de selección natural, a outros organismos mellor adaptados ó ambiente. Esta definición máis concreta cá anterior podería, levada ó límite, deixar fóra do contexto do vivo un ser estéril como a mula que, sen embargo, está formada por unidades máis pequenas que si están vivas (as células). ¿Pode aceptarse que a acumulación de estruturas vivas dean lugar a unha estrutura non viva?

Poida que sexa a termodinámica a disciplina que mellor pode defini-la

vida. Van Holde define o ser vivo como aquela porción do Universo que constitúe un sistema termodinamicamente aberto, rodeado por unha interfase semipermeable, con algún mecanismo de reprodución do todo ou da parte, e que degrada enerxía para crear e mante-la súa orde interna. Esta definición podería incluso apoiar-la hipótese de *Gaia*; é dicir, a Terra no seu conxunto é un enorme organismo, ou un sistema interactivo composto por organismos, que é quen de controlar e regula-la súa propia composición e que se cadra algún día se reproduza nalgunha colonia espacial.

Para segui-lo proceso de evolución bioquímica que se explicará a continuación, consideraremos que, coa excepción dos virus —estructuras que algúns autores non consideran estrictamente “seres vivos”—, tódolos seres vivos están compostos en todo ou en parte por células vivas. Unha célula é unha estrutura illada do medio exterior por unha membrana semipermeable composta por lípidos, que contén nos seus ácidos nucleicos a información necesaria para o seu funcionamento e perpetuación. Esta información só é útil cando é traducida a proteínas, especialmente encimas, que aceleran (catalizan) as reaccións biolóxicas e utilizan a enerxía almacenada en forma de enlaces fosfato de alta enerxía no ATP para mante-la estrutura organizada da célula e sintetizar novas macromoléculas.

1.4. Antigüidade da vida na Terra

Os primeiros fósiles orgánicos coñecidos datan duns 3500-3800 millóns de anos e constitúen uns agregados granulares de materia orgánica altamente carbonizada e organizada en pequenas vesículas esferoidais e ocas similares ás actuais cianobacterias. Non se discerniu ata agora se proceden de meros procesos fisicoquímicos ou son xa verdadeiramente biolóxicos, aínda que algúns parámetros estatísticos apoian a súa orixe biolóxica. Mesmo sendo os fósiles máis antigos dos coñecidos, a súa estrutura é xa complexa de máis como para aceptar que foran os primeiros seres vivos na Terra, polo que debemos supoñer que a vida se orixinou hai máis de 3500 millóns de anos, é dicir, menos de 1000 millóns de anos despois da formación da Terra. Os primeiros fósiles plurinucleares datan de hai 800-1000 millóns de anos, aínda que debido a que a fosilización require condicións moi especiais, puideron existir antes.

1.5. Evolución histórica das teorías sobre a orixe da vida

Desde que o desenvolvemento da filosofía e a ciencia experimental permitiu a aparición de teorías alternativas á creación directa por unha divindade todopoderosa, postuláronse diferentes hipóteses para a orixe da vida na Terra. Desde a Grecia clásica e ata mediados do século XVIII sostívose a teoría da xeración espontánea, segundo



Nesta miniatura móstrase Cristo empregando un compás para reconstruí-la creación do Universo a partir do caos primixenio. *O Creador. Bible Moralisée*. Francia. Século XIII.

a cal os seres vivos podían xurdir da materia orgánica en descomposición. O desenvolvemento do método científico e a súa aplicación por Redi, Spallanzani e Pasteur durante os séculos XVIII e XIX desbotaron esta posibilidade.

O abandono da teoría da xeración espontánea permitiu que gañasen forza teorías alternativas ou ata totalmente opostas, como o pensamento vitalista segundo o cal para a produción dos compostos orgánicos non abundaban os meros procesos fisicoquímicos senón que era precisa unha **forza vital**. Esta teoría abandonouse cando Wöhler sintetizou un produto orgánico, a urea, a partir de reactivos plenamente inorgánicos. A forza que a teoría vitalista chegou ter reflíctese na frase de Huxley: “A materia viva nace sempre doutra vida preexistente”. En 1865, Ritcher propuxo a teoría da **panspermia**, segundo a cal a Terra tería recibido a vida en forma de xermes procedentes doutros planetas e transportados ata ela nos meteoritos ou polo vento solar. A teoría da panspermia foi tamén defendida polo sueco Svante Arrhenius, e en 1966 Robinson postulou que os xermes da vida estaban xa presentes nos planetesimais que orixinaron a Terra. En 1973 dous científicos da importancia de F. H. C. Crick e L. E. Orgel lanzaron, quizais como un reto á imaxinación científica, a teoría da panspermia dirixida, segundo a cal a Terra tería sido sementada

por seres intelixentes procedentes doutros planetas. Debido á falta de probas a favor ou en contra da panspermia e a que, de ser certa, o único que fai é pospoñer-lo problema da orixe da vida a outro tempo e outro lugar, centrámonos desde agora na hipótese da evolución bioquímica.

O primeiro enfoque verdadeiramente bioquímico da orixe da vida deuno o ruso A. I. Oparin, quen postulou en 1924, case simultaneamente co inglés Haldane, a primeira teoría da orixe da vida como resultado dun proceso de evolución química prebiótica. Estes precursores diferían nun punto que segue hoxe a suscitar discusións e controversia entre os teóricos da orixe da vida. Para Haldane o primeiro ser vivo foi unha molécula de material xenético autorreplicable ou xene espi-do; pola contra, para Oparin sería unha estrutura illada do medio externo e dotada dun sinxelo metabolismo, o **protobionte** ou **proxenote**. Pero tamén é posible, e mesmo probable, a evolución paralela do metabolismo proteico e do material xenético.

2. SÍNTESE ABIÓTICA DE BIOMOLÉCULAS

2.1. Condicións ambientais da Terra primitiva

Das tres partes da litosfera ou parte sólida da Terra (núcleo, manto e codia), só a codia puido ter importancia no desenvolvemento da vida.

Actualmente está formada por silicatos de aluminio, sodio e potasio, e non hai razón para supoñer que a súa composición primitiva fora diferente de como é na actualidade. A natureza química dos compostos carbonados da litosfera prebiótica non é descoñecida, aínda que debido á enorme abundancia de compostos orgánicos sinxelos no Universo podemos pensar que a litosfera primitiva tiña unha certa riqueza en compostos orgánicos debida, ou polo menos incrementada, pola achega realizada polos meteoritos como as condritas carbonáceas.

Unha vez que a superficie terrestre arrefriou o suficiente para permitir que a auga permanecese en estado líquido, esta foi acumulándose nas cavidades da coida formando os primitivos océanos, que axiña terían un volume e composición química similares ós actuais. Os gases liberados pola actividade volcánica e a retención do osíxeno nos minerais da codia conferían á atmosfera un carácter reductor, moito menos agresivo para as moléculas biolóxicas cá actual atmosfera oxidante.

Na Terra primitiva existía unha gran variedade de fontes de enerxía capaces de favorecer as reaccións de formación das moléculas orgánicas; entre elas destacarían a radiación solar, en especial a radiación UV que penetraría facilmente na atmosfera xa que non existía a capa de ozono que

actualmente a filtra, e mailas descargas eléctricas atmosféricas. Outras fontes de enerxía como os volcáns, o vento solar e as ondas de choque producidas polas caídas de meteoritos, moi abundantes nun sistema solar aínda novo, completaban as fontes de enerxía presentes.

2.2. Formación abiótica dos monómeros bioquímicos

Os seres vivos están constituídos fundamentalmente por moléculas orgánicas de gran tamaño, as **macromoléculas**, formadas polo encadeamento de moléculas de menor tamaño denominadas monómeros. As macromoléculas pertencen fundamentalmente a catro tipos diferentes: **proteínas**, compostas pola polimerización de decenas ou de centos dos vinte e un aminoácidos proteinoxénicos; os **polisacáridos**, compostos pola polimerización duns vinte tipos de azucres diferentes, os **ácidos nucleicos**, formados polos nucleótidos, os cales están formados pola unión dunha das cinco posibles bases nitroxenadas (adenina, timina, citosina, guanina e uracilo) a un azucre (ribosa no caso do ARN e desoxirribosa no caso do ADN) e os **lipidos**, obtidos pola unión de polialcois e ácidos graxos. Para que a vida puidese aparecer na Terra terían que formarse primeiro estes monómeros ou piares básicos das macromoléculas. Parece polo tanto que a vida puido orixinarse na Terra porque nunha primeira fase de evolución prebiótica as

m o l é c u l a s precursoras da atmosfera formaron unha ampla variedade de moléculas orgánicas sinxelas que incluían estes monómeros bioquímicos.

As moléculas máis importantes para a síntese prebiótica de moléculas orgánicas (cianhídrico, cianoacetileno, formaldehído amoníaco e auga) son moi abundantes no Universo e existen numerosos experimentos, como os realizados por Miller, Fox, Oró e outros autores, que, imitando as condicións da Terra primitiva e utilizando unha mestura destes compostos, obtiveron aminoácidos, hidroxiaácidos, bases nitroxenadas, polialcois e ácidos graxos. Aínda máis, os compostos obtidos nestes experimentos son practicamente os mesmos que compoñen as condritas carbonáceas, o que apoia a ubicuidade da súa formación no Cosmos. Para que estes produtos non fosen destruídos de novo, as condicións de temperatura, pH e poder de oxidación debían ser pouco agresivas.

Obtivéronse experimentalmente, ou polo menos coñécense, reaccións que ó funcionar nas condicións da Terra primitiva permitirían obter moitos destes monómeros: case tódolos aminoácidos que forman proteínas e algúns outros que, aínda que non forman proteínas, cumpren outras importantes funcións nos seres vivos, as bases nitroxenadas que constitúen os nucleótidos, moitos azucres, pero non

a ribosa que intervéñen na formación dos ácidos nucleicos, ácidos graxos e polialcois. Se ben a formación prebiótica de bases nitroxenadas é relativamente sinxela, non se conseguiu explicar polo de agora a formación dos nucleótidos (asociación dunha base e un azucre, ribosa no ARN e desoxirribosa no ADN), forma na que se atopan nos ácidos nucleicos. Si se obtiveron, sen embargo, os “nucleopéptidos” formados pola unión de aminoácidos e bases nitroxenadas; a posible explicación disto discutírase máis adiante.

Outros compostos de interese para os cales é doado atopar unha explicación na formación da Terra primitiva son os polifosfatos; os seus enlaces de alta enerxía terían permitido almacenala enerxía necesaria para a formación de moléculas complexas. Non debemos esquecer que a principal moeda de enerxía na célula actual é un enlace fosfato de alta enerxía, o do ATP.

2.3. Aparición dos biopolímeros

Vimos xa como tódolos piares das macromoléculas biolóxicas, quizais coa excepción dos nucleósidos, puideron ser sintetizados por medios abióticos. Imos comentar agora a forma en que estes monómeros puideron unirse entre si para daren lugar ás macromoléculas. Todas elas poden formarse a partir dos monómeros por reaccións que consomen enerxía e liberan auga; isto quere dicir que en presenza de auga as

macromoléculas tenden a romperse liberando enerxía. Os seres vivos actuais superan estes problemas realizando a reacción mediante intermediarios con enlaces fosfato de alta enerxía. Na Terra primitiva os polifosfatos poderían ter permitido este tipo de reacción, pero requiren sistemas bastante complexos, difíciles de explicar en condicións prebiolóxicas.

Outra estratexia para a síntese prebiótica de macromoléculas puido se-la de realiza-la condensación en ausencia de auga, pero a síntese dos monómeros necesita, polo contrario, realizarse en solución acuosa. Estas dificultades superaríanse baixo ciclos periódicos de deshidratación e rehidratación asociados á evaporación e condensación que teñen lugar no día e a noite. Como veremos máis adiante, estes ciclos de deshidratación-rehidratación explican moitos aspectos da evolución prebiótica e é hoxe a teoría máis aceptada. Comentaremos a seguir o estado dos coñecementos actuais sobre a síntese prebiolóxica dos catro tipos de macromoléculas.

Proteínas: xa se describiron procesos prebióticos que explicarían a condensación de aminoácidos en cadeas máis ou menos longas; ata se obtiveron polímeros de aminoácidos proteinoxénicos, os **proteínoides térmicos**, que serven como axentes nutritivos a bacterias e animais superiores, aínda que a súa capacidade nutritiva é inferior á

das proteínas actuais, e presentan tamén certas propiedades catalíticas e hormonais, se ben estas propiedades están moito menos refinadas ca nas proteínas actuais.

Ácidos nucleicos: para explica-la súa orixe existen máis problemas. Os actuais polinucleótidos caracterízanse por presentaren enlaces entre os átomos da posición 3' do azucre dun nucleótido e a posición 5' do azucre do nucleótido seguinte. Aínda que moitos experimentos de simulación das condicións prebióticas renderon polímeros de nucleótidos, na maioría dos casos os enlaces establecíanse en posicións diferentes ás biolóxicas. Podemos resumir entón que, como sucede coa formación dos seus monómeros, os nucleósidos, a condensación de nucleótidos en condicións prebiolóxicas é un problema que require aínda unha solución definitiva. Estas dificultades dan nova forza á hipótese proposta por Nielsen de que un tipo molecular hoxe existente nos seres vivos, os ácidos peptidonucleicos (APN), poderían ter sido os portadores iniciais da información xenética. Estes compostos son capaces de formar dobres hélices complementarias similares, pero moito máis estables cás dos ácidos nucleicos actuais (ADN e ARN) en condicións prebiolóxicas.

Polisacáridos: o termo de polisacáridos resérvase para aqueles polímeros de monosacáridos ligados por enla-

ces glicosídicos, os máis abondosos nos organismos vivos. Con todo, a maior parte dos polímeros obtidos en simulación das condicións prebióticas posúen enlaces doutros tipos diferentes. Só a polimerización térmica produce polímeros semellantes ós polisacáridos biolóxicos, variando o peso molecular dos produtos de condensación en relación directa coa temperatura de reacción. Novamente este dato apoia a importancia dos ciclos de deshidratación-rehidratación na formación dos biopolímeros ou macromoléculas.

Lípidos: os lípidos esenciais para a formación das membranas biolóxicas foron obtidos en diferentes experimentos de simulación das condicións prebióticas, e mesmo algúns deles se organizaron en vesículas pechadas do tipo dos liposomas.

3. BIOXÉNESE

3.1. Características termodinámicas do ser vivo

Unha das principais propiedades das pequenas porcións de materia que constitúen os seres vivos é a súa capacidade para perpetuárense, propagárense e acadaren un alto grao de complexidade nun universo que tende a alcanzal-lo máximo de desorde. Para que ningún momento se puidese forma-la primeira estrutura organizada “proto-biótica”, esta debía poder intercambiar materia e enerxía co seu contorno, de

xeito que a súa maior orde provocase unha desorde meirande do seu contorno por disipación da enerxía liberada. Para que isto fose posible debía estar illado do “resto do Universo” por unha membrana semipermeable que permitise o paso dunhas substancias e non doutras. Finalmente, tiña que ser capaz de dividirse posto que, como a superficie crece na relación do cadrado mentres que o volume o fai en relación do cubo, un sistema non pode medrar indefinidamente. A partir dun determinado tamaño a superficie sería demasiado pequena para permitir un intercambio suficiente de materia e enerxía co contorno. Para lograr mante-la súa complexidade, o protoorganismo debía xa que logo consumir enerxía, estar illado do seu contorno e ser quen de se dividir.

3.2. Formación de microestructuras organizadas: o protoorganismo

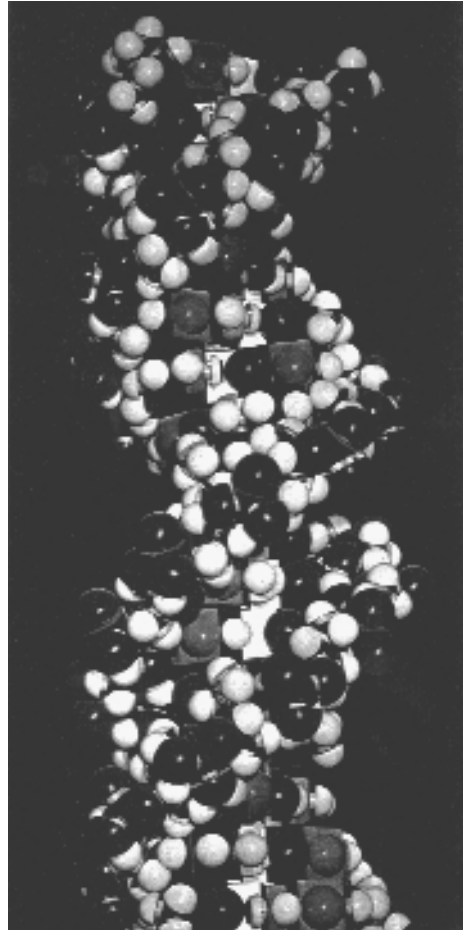
A orixe da vida, tal e como hoxe a coñecemos, non dependeu da aparición dunha simple molécula autorreplicativa, senón máis ben da evolución dun sistema de moléculas interdependentes pero illado do seu contorno. Polo tanto, un aspecto crucial na orixe da vida foi a aparición de sistemas illados rodeados dalgún sistema membranoso. Un dos conceptos que máis dificultades puxo ó entendemento da orixe da vida foi cómo as macromoléculas puideron ordenarse nunha entidade tan complexa como un organismo

vivo. Esta gran dificultade desapareceu ó se realiza-los primeiros experimentos de autoensamblaxe, nos cales certas macromoléculas en solución se autoorganizan axiña en estruturas fixas. Os principais modelos de estruturas autoensambladas prebiolóxicas son as gotas de coacervados (formados por polisacáridos e proteínas), as microesferas proteinoides (formadas por proteinoides térmicos) e os liposomas (formados por lípidos similares ós das actuais membranas biolóxicas). Obtivéronse estruturas destes tres tipos capaces de medrar, realizar certo metabolismo e dividírense; existen argumentos a prol e en contra de calquera delas como orixe da primeira estrutura protobiolóxica.

O protoorganismo tiña que ser capaz tamén de utiliza-la enerxía para sintetizar biomoléculas, medrar e finalmente dividirse. Como xa dixemos, nas células actuais esta enerxía provén do enlace fosfato de alta enerxía do ATP. Esta molécula xérase en tódalas células gracias a un sistema de bombeo de ións entre ámbolos lados da membrana. Así, un sistema protocelular puido aproveitar un sistema deste tipo para sintetizar ATP, ou máis probablemente pirofosfato inorgánico menos complexo, e utilizar esta enerxía para a síntese de novos compostos.

3.2.1. ¿Onde se formaron as protocélulas?

As ideas tradicionais sobre a



Modelo dunha molécula de ADN que ven a se-lo soporte da información xenética. Pode chegar a ter decenas de milleiros de átomos.

orixe da vida sitúan o nacemento das protocélulas en medios anaerobios a elevada temperatura, que xurdiron en ambientes similares ós dos primeiros fumeiros submariños actuais.

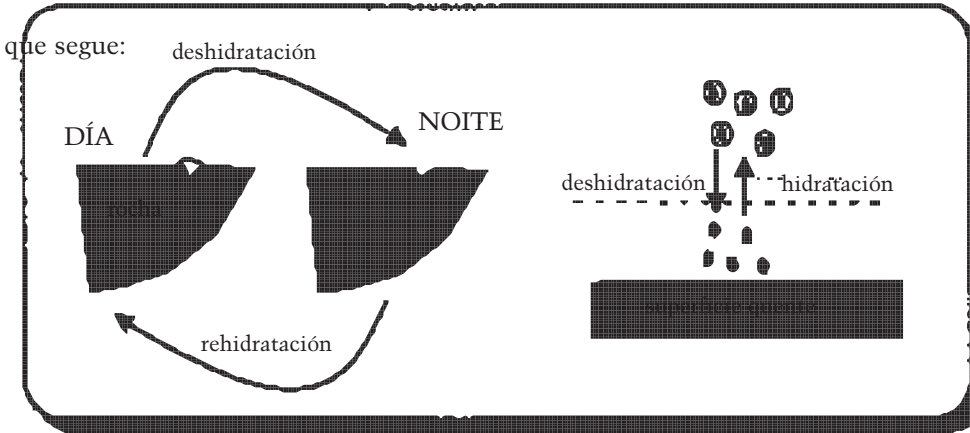
A orixe anaerobia da vida apóiase,

non só en toda a discusión química sobre a orixe dos compostos orgánicos na terra primitiva, senón tamén en datos dos propios seres vivos. Así, o eixe central da ruta principal de obtención de enerxía por tódolos seres vivos, a glicólise, é fundamentalmente anaerobia e unha das encimas máis antigas implicadas na síntese de desoxirribonucleótidos funciona tamén en condicións anaerobias, o que suxire que o paso do ARN ó ADN como soporte da información xenética tivo lugar en condicións anaerobias. Debido a todo isto, hoxe existen poucas dúbidas sobre esta orixe anaerobia.

Non ocorre o mesmo, sen embargo, con respecto á orixe “quente”. A prol desta hipótese está o feito de que as análises de similitudes xenéticas sitúan na base dos troncos filoxenéticos a tódolos organismos, tanto bacterias coma arqueobacterias hipertermófilas, é dicir, que viven a elevadas temperaturas. Así e todo, estes hipertermófilos comparten co resto dos seres vivos moitas das súas características fundamentais. Máis aínda, unha encima crucial para estabiliza-lo ADN dos hipertermófilos, a **xirasa reversa**, parece provir da combinación de dous xenes (helicasa e topoisomerasa) presentes en bacterias que viven a temperaturas medias. Polo tanto, tamén é posible que a hipertermofilia sexa o resultado dunha adaptación secundaria de poboacións máis antigas fronte a

modificacións ambientais drásticas como puideron se-lo quentamento dos océanos debido ós impactos de obxectos siderais durante os primeiros períodos do establecemento da vida. Segundo esta hipótese, estas variacións farían desaparecer os antepasados mesófilos máis antigos e permitirían só a supervivencia dos adaptados ás elevadas temperaturas, dos cales descenderían posteriormente o resto dos seres vivos.

É difícil imaxina-la formación das protocélulas nun ambiente oceánico, pois vimos que a formación dos biopolímeros requiriu, posiblemente, a existencia de ciclos de deshidratación e rehidratación e, ademais, é moi pouco probable que a primeira cuberta semipermeable estivese perfeccionada abondo como para sobrevivir no medio oceánico. A situación é moito máis favorable en pequenas masas de auga sometidas a evaporación e rehidratación. Tanto as gotas de auga apreixadas nas cavidades das rochas coma as pequenas gotas de auga suspendidas na atmosfera presentan as condicións requiridas. Os sistemas iniciais serían abertos e susceptibles dunha selección natural prebiolóxica ou **evolución molecular**. Só cando lograsen acadar un nivel de complexidade suficiente para realizar ciclos autocatalíticos poderían chegar a sobrevivir no océano primitivo. Estes dous hipotéticos modelos represéntanse no esquema



3.3. Selección química e evolución molecular

Estes dous procesos foron os únicos que puideron existir antes da aparición do material xenético como almacén da información. Así, os microsistemas que por azar contivesen catalizadores capaces de realizar polimerizacións “útiles” sobrevivirían máis cós restantes. As posibilidades de supervivencia estarían daquela directamente relacionadas coa complexidade e eficiencia do seu primitivo metabolismo. Durante moito tempo a forte selección química favorecería os microsistemas que daban tomado substancias e enerxía do contorno e transformalas en substancias promotoras da supervivencia non só deles, senón tamén dos sistemas producidos polo seu fraccionamento ó acadaren un tamaño excesivo. Neste punto é interesante sinalalo feito de que algunhas proteínas poden sintetizarse bioloxicamente sen necesidade dun molde

xenético, e que as microesferas proteínoideas e os coacervados presentan mecanismos de reprodución que non precisan a existencia de material xenético.

A evolución molecular suscita, sen embargo, un problema grave. A gran cantidade de posibilidades isoméricas das macromoléculas faría da evolución ó azar un proceso tan lento que sería imposible aceptar que os primeiros seres vivos puidesen aparecer só mil millóns de anos despois da formación da Terra. Isto obriga a pensar que a evolución das macromoléculas non foi un mero proceso ó chou, senón que foi un proceso máis ou menos determinado. Un factor de grande importancia puido ser que certas combinacións estaban termodinamicamente favorecidas para as reaccións de condensación; isto podería explicar tamén a quiralidade das moléculas biolóxicas,

é dicir, que os seres vivos conteñan só unha das dúas posibles conformacións simétricas dos aminoácidos, azucres e ácidos nucleicos.

3.4. Orixe e evolución do código xenético

A evolución dos primeiros protobiontes tivo que ser moi lenta, xa que ó non existir un mecanismo de almacenamento da información, moitas das vantaxes adquiridas podían perderse ó non seren transmitidas á xeración seguinte. Este problema resolveuse coa aparición do material e do código xenético como soportes da información da vida.

Xa vimos que no medio primitivo podían existir curtos polímeros de ARN e, se cadra, de APN cunhas certas posibilidades de autorreplicación. Existían tamén proteinoídes con certa capacidade catalítica. Nalgún momento o azar reuniu nun mesmo microsistema inicial (fose este unha microesfera proteinoide, un coacervado ou un liposoma) un ácido nucleico de interese evolutivo e un proteinoide que favorecese a súa replicación. Esta sería a orixe da primeira célula dotada de material xenético. Non existen probas da existencia de protocélulas con APN, pero a capacidade de transferir información de APN a ARN, a existencia de ARN con actividade catalítica e o feito de que a polimerización de ADN non poida ter lugar sen un cebador previo de ARN suxiren que, existira ou non

un mundo de APN, dos dous soportes actuais da información xenética é o ARN o máis antigo.

Pero a importancia do almacén de información só se acadou cando se logrou pasa-la información a función, é dicir, cando a información do ARN ou ADN puido transferirse á conformación dunha proteína. Isto só puido suceder coa aparición do código xenético. Novamente o funcionamento dos seres vivos actuais apoia a existencia dun “mundo de ARN” anterior ó ADN. A fábrica de proteínas, o ribosoma, está formado por un ARN (coa función catalítica) e proteínas coa única función de aumenta-la fidelidade do proceso de tradución, podemos imaxinar entón un “protorribosoma” como unha molécula de ARN capaz de cataliza-la unión de aminoácidos para sintetizar proteínas.

Discutiuse se o código xenético ten a actual configuración por azar ou porque é a única, ou a que mellor pode funcionar. Algúns datos suxiren que o código xenético se trata dun accidente conxelado, pero outros parecen indicar que tivo, na súa orixe, que utiliza-la clave que segue utilizando na actualidade.

Os primeiros procesos de tradución e de replicación do ARN, en ausencia de proteínas catalíticas especializadas, serían moi pouco precisos e cometerían moitos erros. Este problema

solucionouse coa aparición do ADN de dobre cadea, moito máis estable e de maior fidelidade de copia, como soporte da información xenética. Sen embargo, este refinamento do almacén de información suscitou un novo problema: a gran fidelidade dos mecanismos de transmisión da información obrigou a buscar novos medios de asegurala variabilidade necesaria para que a evolución puidese continua-lo seu curso. Fixeron a súa aparición os mecanismos de intercambio de información xenética entre individuos diferentes, o que se coñece como recombinación xenética.

3.5. A evolución celular

Unha vez formada a protocélula, iniciárase a evolución celular que levaría á aparición de células cada vez máis complexas e, posteriormente, dos seres pluricelulares. Un aspecto crucial desta evolución foi o incremento da información xenética contida en cada célula. O proceso máis eficaz e rápido para o aumento desta información nun mundo procariota é a duplicación de xenes e a posterior evolución independente de cada un deles. Os eucariotas desenvolveron posteriormente un novo mecanismo moi eficaz de aumento e intercambio da información xenética: a reprodución sexual, que implica a fusión da información xenética de dúas células completas. Estudos recentes apoian a importancia da duplicación xénica na evolución

celular, por exemplo, o 40 % das proteínas da bacteria *Escherichia coli* semellan se-lo resultado de procesos de duplicación duns poucos xenes iniciais. Este mecanismo parece estar detrás de moitos aspectos comúns á estrutura de proteínas, moi conservados ó longo da evolución. Aínda máis, a duplicación xénica ten lugar espontaneamente nun de cada 10000 xenes en cada duplicación celular, o que permitiría, mesmo cos cálculos máis conservadores, o paso en só uns 10 millóns de anos dun ser extremadamente sinxelo duns 100 xenes (pouco máis ca un virus complexo actual) a un organismo complexo duns 7000 xenes, similar a unha cianobacteria.

3.5.1. A primeira protocélula: ¿proxenote ou cenancestor?

Inicialmente considerouse a primeira protocélula como unha estrutura moito máis sinxela cá máis simple célula actual, que incluíría un sistema aínda rudimentario de tradución da información xenética en moléculas cunha determinada función. Esta estrutura denominouse **proxenote**. Sen embargo, estudos recentes sobre os aspectos comúns ás tres grandes ramas dos seres vivos actuais: bacterias, arqueobacterias e eucariotas, suxiren que o antepasado común a tódalas formas de vida coñecidas era unha célula relativamente complexa con sistemas refinados de duplicación e tradución da información xenética, rutas metabólicas de obtención de

enerxía bastante elaboradas e ata sistemas de resposta ás variacións do contorno. Este cadro fai supor que o antepasado común de tódolos seres vivos actuais era unha entidade cunha complexidade, adaptabilidade e potencial evolutivo semellante ás actuais bacterias. O proxenote, tal e como se describiu máis arriba, se algunha vez existiu, extinguiuse moito antes da separación das tres principais ramas evolutivas, cun antepasado común que foi denominado por Fitch e Upper como **cenancestor**, utilizando un prefixo grego que pode ser traducido tanto por “último” coma por “común”.

3.5.2. O paso da anaerobiose á aerobiose

Xa vimos como se puideron formar os primeiros seres vivos unicelulares. Estes seres vivían nun mundo sen osíxeno atmosférico e moi rico en substancias orgánicas formadas por procesos non biolóxicos; debían ser, polo tanto, heterótrofos anaerobios, é dicir, utilizarían como fonte de carbono a rotura química de moléculas orgánicas sen a utilización do osíxeno.

Co tempo, a materia orgánica abiótica foise consumindo e os seres autótrofos, é dicir, os que poden utilizar a materia inorgánica para a formación de moléculas orgánicas, conseguiron unha gran vantaxe evolutiva. Nalgún momento apareceu unha nova forma de obter a enerxía necesaria para a síntese da biomasa, a **fotosíntese**, que permitiu

aproveita-la enerxía da luz solar para a síntese de moléculas orgánicas por medios biolóxicos. Este feito foi crucial para toda a evolución posterior da Terra e a vida sobre ela, pois o osíxeno liberado como subproduto acumulouse na atmosfera, a cal pasou de ser reductora a posuír un carácter oxidante. O osíxeno atmosférico transformouse en ozono por acción da luz UV e constituíuse a capa de ozono que protexe hoxe a Terra das radiacións UV solares, o que favorece a estabilidade da información xenética. Nun principio os seres vivos debéron adaptarse só a tolera-la presenza do osíxeno, pero máis tarde algúns empezaron a utilizalo como aceptador de electróns nas reaccións de oxidación dos hidratos de carbono. A vantaxe evolutiva dos seres aerobios foi enorme, eran capaces de obter 18 veces máis enerxía pola oxidación de cada molécula na respiración aerobia.

3.5.3. Aparición da célula eucariota

Os seres vivos iniciais tiñan unha estrutura moi sinxela e carecían de membranas internas, especialmente da nuclear que separa o material xenético do resto da célula; eran **procariotas**. Nalgún momento da evolución, hai uns 3000 millóns de anos, deuse o paso á formación da célula **eucariota**, capaz de alcanzar un tamaño unhas 10000 veces maior e, polo tanto, moito máis complexa.

Unha hipótese con grande aceptación sobre a orixe da célula eucariota

—dotada dunha membrana nuclear e un complexo sistema de orgánulos delimitados por membranas— é a da **endosimbiose**. Esta teoría postula que os orgánulos da célula eucariota dotados de ADN propio (cloroplastos e mitocondrias), e mesmo algúns sen contido de ADN como os peroxisomas, non serían máis ca procariotas que se adaptaron a vivir no interior dunha célula maior, tamén procariota e carente de parede externa ríxida, o **urcariota**, que debía ter unha organización moi similar á dos actuais *Mycoplasmas*. Esta hipótese non explica as grandes diferencias que existen entre procariotas e eucariotas a nivel molecular, xa que postula unha orixe procariota para as dúas estruturas simbióticas que orixinaron a célula eucariota. O descubrimento das arqueobacterias botou nova luz sobre o problema. Estes organismos presentan unhas características moleculares similares ás dos eucariotas pero cunha estrutura procariota, e permite establecer a orixe da célula eucariota como a endosimbiose de organismos procariotas (que formarían algúns dos orgánulos) e un proxenote proveniente probablemente dunha arqueobacteria.

Segundo esta hipótese, a perda da parede permitiría a aparición de ondulacións na membrana que aumentarían a superficie de intercambio e, xa que logo, permitirían que as células acadaran un tamaño maior e unha maior complexidade antes de teren

que dividirse. En certo momento a célula eucariota foi quen de internar vesículas da súa propia membrana e dixerir alimentos no seu interior, é dicir, fíxose fagocítica. Este paso foi crucial para o desenvolvemento da célula eucariota tal e como hoxe a coñecemos; por unha parte permitiulle dotarse de sistemas internos de membranas cos que illa-los diferentes compartimentos encargados de realizar distintas funcións celulares, e por outra forneceulle o mecanismo polo cal incorporar no seu interior células procariotas de menor tamaño, capaces de realizar diferentes funcións de interese para a célula. Os primeiros quizais fosen os peroxisomas, que dotaron o urcariota da capacidade de elimina-lo osíxeno, tóxico para as células anaerobias primitivas; en fases posteriores incorporaríanse as mitocondrias e os cloroplastos, capaces de realizar a respiración aerobia e a fotosíntese respectivamente. Co paso do tempo a información xenética do endosimbionte trasladaríase do orgánulo ó núcleo da célula, de tal xeito que os endosimbiontes máis antigos, os peroxisomas non conteñen xa material xenético, mentres que os máis recentes, mitocondrias e cloroplastos, aínda conteñen maquinaria xenética propia. Esta hipótese explicaría a existencia en células eucariotas de xenes tipicamente eubacterianos, arqueobacterianos e propiamente eucariotas.

3.5.4. Os seres pluricelulares

Unha vez formada a célula eucariota aeróbica, cunha gran capacidade de obtención de enerxía e unha estabilidade da información xenética acompañada dunha certa variabilidade por recombinación, a evolución acelerouse para dar paso ós seres vivos pluricelulares. Chama a atención o feito de que só tiveran que transcorrer mil millóns de anos desde a formación da terra ata a aparición da primeira célula, un período de tempo similar para o paso dos primeiros seres pluricelulares ata o home e, sen embargo, foron necesarios 3000 millóns de anos para o paso da

organización unicelular á pluricelular. A evolución dos seres vivos pluricelulares axústase á clásica evolución darwiniana e sae xa do obxectivo do presente traballo. Mencionaremos só que parece moi probable que o salto ós organismos pluricelulares tivese lugar moitas veces ó longo da evolución, polo menos unha que separou os seres pluricelulares fotosintéticos e outra que separou os pluricelulares non fotosintéticos.

Un cadro resumo de tódolos procesos que conduciron á vida tal e como a coñecemos hoxe sería:

Millóns de anos	Suceso	Atmosfera
10000	Orixe do universo	Non existe
5000	Formación da Terra	Carente de osíxeno
5000 - 4000	Acumulación de materia orgánica	
¿4000?	Aparición da protocélula	
¿3800?	Separación do reino eubacteriano do tronco evolutivo	
¿3700?	Separación entre o reino arqueobacteriano e o precursor eucariota	
2500 - 2000	Aparición do fagocito anaerobio precursor dos eucariotas (urcariota)	Cada vez con máis osíxeno
2000	Primeiras células fotosintéticas	
2000 - 1500	Endosimbiose: aparición da célula eucariota	Rica en osíxeno
1500	Primeiros seres pluricelulares	
1500 - 1000	Separación dos catro reinos eucariotas: protista, animal, vexetal e fungos	
1000 - 0	Diversificación dos seres pluricelulares	

BIBLIOGRAFÍA

- Dickerson, R. L., “La evolución química y el origen de la vida”, *Investigación y Ciencia*, 26, p. 34.
- “El origen de la célula eucariota”, *Investigación y ciencia*, 237, p. 18.
- “En el principio”, *Investigación y ciencia*, 237, p. 18.
- Fox, S. W., K. Dose, *Molecular Evolution and the Origin of Life*, revised edition (ed. Marcel Dekker), inc Nova York.
- Gale, G., “El principio antrópico”, *Investigación y ciencia*, 65, p. 94.
- Gavaudan, P., *Biogenèse: Colloque su les systèmes biologiques élémentaires et la biogenèse*, París, Ed. Masson.
- H. O. Halvorson and K. E. Van Hole, Alan R. Liss (ed.), *The Origins of Life and Evolution*, inc Nova York.
- Hofstadter, D. R., “¿Es arbitrario el código genético?”, *Investigación y ciencia*, 68, p. 112.
- ISSOL 93. Reunión de la Sociedad Internacional para el estudio del Origen de la Vida*. Número monográfico de Microbiología SEM, Xuño, 1995.
- Joëlo de Rosnay, *Orígenes de la vida*, Barcelona, Ed. Martínez Roca.
- Kimball, A. P., and J. Oró (ed.), *Prebiotic and Molecular Evolution*, North Hollans Publishing Co Amsterdam.
- Leningher, A. L., *Bioquímica*, Ed. Omega (2ª ed.).
- Schopf, J. W., “La evolución de las células primitivas”, *Investigación y ciencia*, 26, p. 58.
- Villamate, M. M., “Cosmología y observaciones”, *Investigación y ciencia*, 58, p. 110.
- Wilkzec, F., “Asimetría cósmica entre materia y anti-materia”, *Investigación y ciencia*, 53, p. 32.
- Woese, C. R., “Archibacterias”, *Investigación y ciencia*, 59, p. 48.

