

UN DELS EXPERIMENTS MÉS IMPORTANTS DEL SEGLE XX

STANLEY MILLER I L'ORIGEN DE LA QUÍMICA PREBIÒTICA

JEFFREY L. BADA

Es coneix Stanley Miller principalment pel seu experiment clàssic de 1953 sobre la síntesi de compostos orgànics en la Terra primitiva, en el context de l'origen de la vida. No obstant això, va dur a terme alguns experiments més que són menys coneguts i, en alguns casos, mai van arribar a publicar-se. El descobriment en 2007 que Miller havia arxivat solucions deshidratades dels seus experiments dels anys cinquanta va oferir l'oportunitat d'analitzar el producte dels seus primers experiments usant tècniques modernes d'avantguarda. Aquests resultats, junt amb els resultats de Miller, ens han proporcionat un inventari d'una gran varietat de compostos que inclouen aminoàcids, amines, pèptids simples, hidroxiàcids, hidrocarburs simples i urea, que es poden sintetitzar simulant les condicions de la Terra primigènia.

Paraules clau: aminoàcids, descàrrega elèctrica, atmosfera reductora.

A la tardor de 1952, un professor i premi Nobel de seixanta anys, Harold C. Urey, i un estudiant de postgrau de 22, Stanley L. Miller, es van asseure en un despatx del Departament de Química de la Universitat de Chicago per discutir com podrien simular les condicions i reaccions que van produir els compostos orgànics de la Terra primitiva. Una conferència d'Urey a la tardor de 1951 va estimular l'interès de Miller per una qüestió que durant molt de temps s'havia considerat inextricable: com es va originar la vida a la Terra a partir de matèria inanimada. Després d'esperar quasi un any, Miller va aconseguir finalment reunir el valor per acostar-se a Urey i preguntar-li sobre la possibilitat de realitzar un experiment per verificar les idees d'Urey sobre la creació dels compostos orgànics en la Terra primerenca. Després d'una certa vacil·lació, Urey va accedir a permetre a Miller dur a terme l'experiment, sempre que obtinguera resultats en sis mesos que suggeriren que valia la pena continuar-lo. El problema que ocupava la seua atenció en la

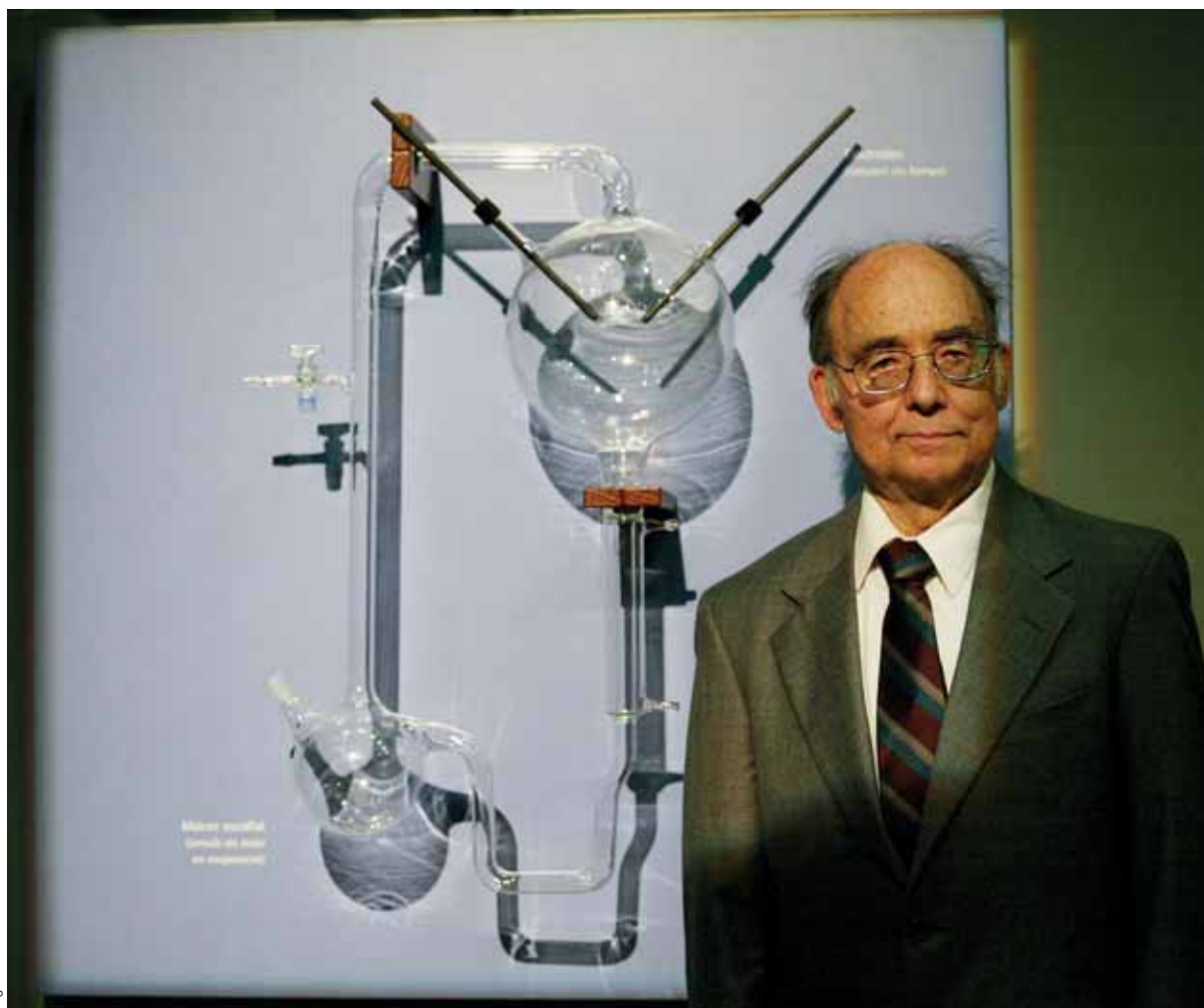
reunió de 1952 era com crear un experiment que poguera demostrar com es podrien haver produït alguns dels compostos orgànics essencials que es pensa que van ser importants per a l'origen de la vida (Bada i Lazcano, 2012).

«UREY I MILLER VAN RECONÈIXER QUE EN ELS PROCESSOS QUÍMICS GENERALS QUE OCORREN EN LA SUPERFÍCIE DE LA TERRA PARTICIPAVEN TRES COMPONENTS GENERALS: L'ENERGIA, L'ATMOSFERA I ELS OCEANS»

■ MODELANT LA TERRA PRIMIGÈNIA AL LABORATORI

Urey i Miller van reconèixer que en els processos químics generals que ocorren en la superfície de la Terra participaven tres components generals: l'energia, l'atmosfera i els oceans. Però, com es podria simular la interacció d'aquests components en un experiment de laboratori? Es pensava que es podien utilitzar diversos tipus d'energia, incloent-hi la radiació còsmica i ultraviolada, la desintegració radioactiva, la calor

i les descàrregues elèctriques. Es van adonar que un problema amb l'ús de la radiació i la calor com a fonts d'energia era que resultaven massa energètiques i probablement destruirien qualsevol compost orgànic al



Miguel Lorenzo

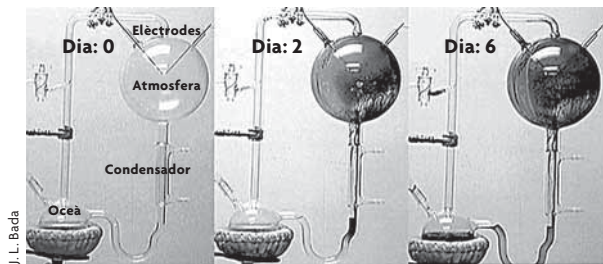
Stanley L. Miller en el Jardí Botànic de la Universitat de València, durant la primera conferència Pelegrí Casanova de Biodiversitat i Biologia Evolutiva (2003), amb una rèplica exacta de l'aparell de vidre dissenyat per ell en 1953.

mateix ritme que se sintetitzaven. Per tant, van decidir centrar-se en les descàrregues elèctriques com a font d'energia per al seu experiment.

Els químics havien estat experimentant amb espurnes elèctriques en mescles de gasos des del treball pioner de Lord Cavendish en el segle XVIII, que va demostrar que l'acció d'una descàrrega elèctrica resultava en la producció d'àcid nítrós (Cavendish, 1788). Durant el segle XIX es va produir una investigació extensa de la síntesi de compostos orgànics simples usant una varietat de condicions. El 1913 Walther Löb va aconseguir sintetitzar un aminoàcid simple, la glicina, mitjançant l'exposició de formamida humida a una descàrrega elèctrica silenciosa i a llum ultraviolada (Löb, 1913). No obstant això, sembla que ningú havia pensat de quina manera podrien relacionar-se aquests experiments amb la síntesi prebiòtica (abans de la biologia) i l'origen de la vida.

Probablement les descàrregues elèctriques eren comunes en les etapes primerenques de la Terra. L'atmosfera devia estar sotmesa a una gran quantitat de raigs amb efecte corona. Els raigs també devien estar associats amb les erupcions volcàniques, que també van ser comunes en la Terra primitiva. Al laboratori, amb una simple bobina comercial de Tesla es pot reproduir fàcilment una descàrrega que simule aquests processos.

A la Terra moderna, una de les principals característiques de la interacció atmosfera-oceà és l'evaporació de l'aigua i la condensació en l'atmosfera en forma de precipitació. A la Terra actual la precipitació que cau al continent torna als oceans mitjançant les aportacions dels rius. En una mitjana global, els rius descarreguen aproximadament $4,2 \times 10^{16}$ litres per any en els oceans (Fekete, Vörösmarty i Grabs, 2002). Com que els oceans de la Terra contenen $1,3 \times 10^{21}$ litres d'aigua, això



J. L. Bada

Figura 1. Sèrie temporal de l'experiment de Miller que mostra l'acumulació del material de color marró. Els aminoàcids i altres compostos orgànics s'acumulen en el matràs «oceà». Fotogrames d'un vídeo gravat en el laboratori de Miller per diversos dels seus estudiants i J. L. Bada al voltant dels anys 1997-1998.

vol dir que l'aportació d'aigua dels rius és la de la totalitat dels oceans en només uns 30.000 anys.

A la Terra primerenca probablement hi havia menys continents de grans dimensions i les úniques àrees de terra exposades sobre l'oceà eren illes relativament petites. Per tant, l'aportació d'aigua fluvial no podria haver estat un component important del cicle de l'aigua. Més aviat la forma dominant perquè l'aigua que s'evaporava de l'oceà hi tornava devia ser la precipitació directa sobre la seua superfície.

Per a modelar aquests processos generals Urey i Miller van dissenyar un aparell de vidre que incloïa un matràs d'aigua connectat a un altre matràs més gran amb elèctrodes que proporcionaven energia per descàrrega elèctrica (figura 1). El matràs d'aigua es podia escalfar per replicar l'evaporació. També hi havia un altre connector entre els dos matrassos en què un condensador actuava sobre l'aigua en estat gasós i la tornava al matràs d'aigua, simulant la precipitació. L'aparell es va evacuar primer per eliminar qualsevol traça d'aire (l'oxigen podia provocar una explosió) i després se li va afegir una mescla de gasos. Urey suggeria que l'atmosfera primitiva estava composta de gasos reductors com l'hidrogen, el metà i l'amoníac. Per tant, quan es van realitzar els primers experiments, es va utilitzar aquesta mescla de gasos.

■ EL NAIXEMENT DE LA QUÍMICA PREBIÒTICA

Els primers resultats van ser espectaculars! Poc després que començara la descàrrega entre els elèctrodes gràcies a la bobina de Tesla, les superfícies del vidre i l'aigua de l'aparell es van tornar marrons (figura 1).

Després de sis dies, tot estava cobert d'un material fosc i viscos d'aspecte oliós. Òbviament, s'havia produït algun tipus de reacció química. Miller va interrompre de seguida l'experiment per a determinar quins gasos quedaven en el matràs. A més dels gasos inicials, hidrogen, metà i amoníac, després de la descàrrega hi havia monòxid de carboni i nitrogen. Basant-se en les quantitats finals de metà més monòxid de carboni i en les quantitats inicials de metà, Miller va estimar que un 50-60 % del carboni present originàriament com a metà s'havia convertit en compostos orgànics, la immensa majoria dels quals eren materials polimèrics complexos (Miller, 1955).

Tot seguit, Miller va analitzar la solució aquosa i va realitzar alguns tests senzills per detectar alguns compostos orgànics específics. Va detectar-hi aminoàcids com la glicina, l'alanina, β -alanina i l'àcid α -aminobutíric, així com àcid fòrmic, àcid glicòlic, àcid làctic, àcid acètic i àcid propiònic. L'experiment va ser, per tant, el primer a demostrar que els compostos orgànics associats amb la bioquímica es podien simular sota les condicions possibles de la Terra primigènia. El primer article es va publicar en *Science* el 15 de maig de 1953 (Miller, 1953). Els mitjans de comunicació es van fer eco de la publicació i Miller es va fer mundialment famós.¹ Acabava de complir 23 anys. Resulta interessant d'aquesta reconeguda publicació que Miller hi apareguera com l'únic autor. Urey li va dir a Miller quan es va presentar el document que volia que fóra l'únic autor. Pensava que, si apareixia com a coautor, tothom li atorgaria a ell tot el crèdit.

Miller es va disposar llavors a caracteritzar millor els diferents compostos sintetitzats en l'experiment. Va provar altres variacions del disseny original de l'aparell, així com diferents quantitats relatives de gasos. En total, Miller va informar de més de 20 compostos diferents sintetitzats en l'experiment. Miller també es va adonar que l'aminoàcid es formava per la síntesi de Strecker, coneguda des de feia cent anys (Strecker, 1850). En aquesta síntesi es formen reactius com el cianur d'hidrogen (HCN), els aldehids i les cetones en la descàrrega elèctrica. Aquests, en dissoldre's en aigua en presència d'amoníac, reaccionen i produeixen aminoàcids

¹ Miller va morir el 20 de maig de 2007, 54 anys després de la publicació d'aquest clàssic article. L'índex de citació més recent indica que l'article s'ha citat més de 2.300 vegades.

(després d'un parell de passos intermedis). El mateix procés va sintetitzar els hidroxiàcids detectats per Miller. Tot seguit es mostren les seqüències de reacció:



Per provar si aquesta seqüència de reacció explicava alguns dels compostos detectats per Miller, va realitzar noves anàlisis de la solució d'aigua (Miller, 1957). Va descobrir que, després de realitzar l'experiment durant 25 hores, el HCN era present en una concentració d'aproximadament $40 \mu\text{M}$, els aldehids en $1 \mu\text{M}$ i el total d'aminoàcids arribava a uns $2 \mu\text{M}$. Aquests components no s'havien pogut detectar al principi de l'experiment. A més, la concentració d'amoniac havia disminuït constantment durant l'experiment. Això va proporcionar proves clares que la síntesi de Strecker era, en efecte, el mecanisme per a la síntesi dels aminoàcids en l'experiment. Altres compostos detectats per Miller, com la urea, es podien sintetitzar senzillament a partir d'amoni i cianat (format en la descàrrega elèctrica), una reacció descoberta per Friedrich Wöhler el 1828 (Wöhler, 1828).

■ TROBAR UN TRESOR HISTÒRIC

A partir de finals de 1999 Miller va patir una sèrie de vessaments cerebrals que el van deixar cada vegada més incapacitat. El 2005 em van demanar ajuda per a netejar el seu laboratori i el seu despatx al departament de Química de la Universitat de Califòrnia a San Diego (UCSD). S'hi va traslladar una gran quantitat d'equip, productes químics i arxius al meu laboratori i al meu despatx de l'Institut Scripps d'Oceanografia (SIO). Més tard, el 2007, durant una conversa amb Antonio Lazcano, amic mutu de Miller i meu, va eixir a col·locació una caixa que Miller havia ensenyat una vegada a Lazcano. Segons ell, contenia part dels seus experiments dels anys cinquanta. Em vaig adonar immediatament que la caixa devia estar entre tot el material de Miller que vaig traslladar als meus laboratoris. Em va costar poc trobar dues caixes de cartó marcades com «Descàrrega elèctrica» amb lletra de Miller. Dins de les caixes hi havia una sèrie de capsetes clarament etiquetades que contenien petits vials de vidre tapats, també etiquetats (figura 2). El text de les etiquetes dels vials indicava el número d'experiment i les pàgines dels seus blocs de

«UN ASPECTE INTERESSANT DE L'EXPERIMENT H_2S ERA QUE L'ABUNDÀNCIA GENERAL RELATIVA D'AMINOÀCIDS ERA NOTABLEMENT SEMBLANT A LA QUE ES TROBA EN CERTS METEORITS CARBONACIS»



Figura 2. Exemples de capses de mostres que contenen vials guardats per Miller dels seus experiments anteriors.

notes on es descriuen els detalls dels experiments (aquests blocs de notes estan en part en les Col·leccions Especials Mandeville de la Biblioteca Geisel de la UCSD).

Els vials de les diferents capsetes eren dels experiments que va realitzar Miller entre 1952 i 1954 per a la investigació de la seua tesi doctoral en la Universitat de Chicago. També hi havia vials del seu experiment clàssic, descrit en l'article de *Science* de 1953,

així com d'altres d'experiments realitzats amb dos dissenys d'aparells diferents (Bada i Lazcano, 2003). Un d'aquests aparells configurats de manera diferent tenia una embocadura aspiradora connectada al matràs d'aigua que injectava vapor i gas al matràs de la descàrrega. Un tercer disseny incorporava el dispositiu d'aspiració però utilitzava una descàrrega silenciosa

Aminoàcid	Mols en relació a glicina = 1
Glicina	1,0
Àcid glicòlic	0,89
Sarcosina (N-metilglicina)	0,08
Alanina	0,54
Àcid làctic	0,49
N-metilalanina	0,02
Àcid α -amino-n-butíric	0,08
Àcid α -aminoisobutíric	0,002*
Àcid α -hidroxibutíric	0,08
β -Alanina	0,24
Àcid succínic	0,06
Àcid aspàrtic	0,006
Àcid glutàmic	0,01
Àcid iminodiacètic	0,09
Àcid iminodiacètic-propioníc	0,02
Àcid fòrmic	3,70
Àcid acètic	0,24
Àcid propiònic	0,21
Urea	0,03*

* Probablement és baix perquè Miller no es va adonar que el mètode de detecció de ninhidrina que utilitzava tenia una resposta molt baixa per a aquest aminoàcid en comparació a d'altres.

Taula 1. Producció en mols (relatiu a glicina=1) per als diferents compostos detectats per Miller en els seus experiments de descàrrega elèctrica. La quantitat de carboni afegida en forma de metà va ser de 710 mg. La quantitat de glicina sintetitzada va ser de 4,8 mg.

FONT: Basat en Miller i Urey, 1959.

en compte dels elèctrodes, una font d'energia que ja havien usat d'altres a començament del segle xx per estudiar com es podrien haver sintetitzat compostos en les plantes (Bada i Lazcano, 2002). De tots ells, el del dispositiu d'aspiració resultava intrigant perquè suposem que podria imitar una erupció volcànica amb molt contingut d'aigua acompanyada per raigs. Per tant, vam decidir denominar-lo aparell «volcànic».

Aquestes mostres arxivades van proporcionar una oportunitat única per a investigar mostres preparades pel pioner en la síntesi prebiòtica, utilitzant nous mètodes analítics que Miller no podria haver tan sols imaginat. Així doncs, vam analitzar els vials associats amb els seus experiments d'entre 1952 i 1954² (vegeu Bada, 2013, per a una discussió més completa dels resultats obtinguts amb totes les mostres arxivades analitzades fins

**«ÉS UN MISTERI COM ÉS QUE
A MILLER SE LI VA ACUDIR
LA IDEA D'USAR CIANAMIDA
EN UN EXPERIMENT DE
DESCÀRREGA ELÈCTRICA
QUASI UNA DÈCADA
ABANS QUE ALTRES HO
SUGGERIREN COM A AGENT
DE POLIMERITZACIÓ
D'AMINOÀCIDS»**

ara). Els residus dels diferents vials s'havien resuspès en alíquotes d'1 ml d'aigua bidestil·lada i van reaccionar amb OPA-NAC (*o*-ftaldialdehid/N-acetil-L-cisteïna) per formar derivats aminoàcids molt fluorescents, caracteritzats per una combinació de cromatografia líquida d'alt rendiment amb detecció fluorescent, i espectrometria de masses de temps de vol, cromatografia líquida i detecció per fluorescència. Les anàlisis dels vials de l'experiment original publicat en *Science* el 1953 van revelar que s'havien sintetitzat tretze aminoàcids i cinc amines, enfront dels set aminoàcids que va descriure Miller (taula 1). A més, les anàlisis dels vials de l'aparell «volcànic» van mostrar que s'havien sintetitzat 21 aminoàcids i cinc amines (Johnson et al., 2008). L'abundància general d'aminoàcids i amines semblava ser major que allò que s'ha observat per Miller. Sembla que en l'experiment «volcànic» se sintetitzen compostos hidroxilats. Això suggereix que el vapor injectat en la descàrrega divideix l'aigua en radicals H[•] i OH[•]. Possiblement, els radicals OH[•] hidroxilaren els aldehids i les cetones i aquestes, al seu torn, van reaccionar mitjançant la síntesi de Strecker per produir els aminoàcids hidroxilats en els extractes. La publicació d'aquests resultats ha revifat l'interès pel treball pioner de Miller.

Tot seguit vam centrar la nostra atenció en les capsas de vials dels experiments de 1958. Per raons que desconeixem, Miller mai va arribar a analitzar-les després de l'experiment. Un conjunt de vials corresponia a un experiment en què un dels gasos de la mescla era sulfur d'hidrogen (H₂S). Vam realitzar anàlisis detallades d'aquestes mostres amb la tècnica descrita per a l'aparell «volcànic». En total, es van detectar 23 aminoàcids i quatre amines, incloent-hi sis aminoàcids que contenen sofre i una amina que conté sofre (Parker et al., 2011). També

hi havia proves que indicaven que es generaven alguns aminoàcids més amb alt contingut en carboni, però en unes quantitats molt més baixes en comparació. L'experiment H₂S també va generar aminoàcids com la treonina, leucina i isoleucina, que no es van detectar en altres experiments de Miller amb descàrregues elèctriques. A més, l'experiment H₂S de 1958 va ser la primera demostració de la producció d'una varietat de compostos d'organosofre a partir d'un experiment de descàrrega elèctrica dissenyat per imitar les possibles condicions de la Terra primitiva.

² Com que Miller (1957) havia descobert que el tercer aparell tenia menor rendiment i produïa una mescla d'aminoàcids menys diversa, vam decidir no analitzar els vials d'aquest experiment.

Un aspecte interessant de l'experiment H_2S era que l'abundància general relativa d'aminoàcids era notablement semblant a la que es troba en certs meteorits carbonacis. Diverses proves suggereixen que els aminoàcids meteorítics es van sintetitzar durant un procés primerenc d'alteració aquosa en l'asteroide d'origen del meteorit (Bada, 2013; Burton, Stern, Elsila, Glavin i Dworkin, 2012; Peltzer, Bada, Schlesinger i Miller, 1984). És probable que els reactius com el HCN, els aldehids/cetones i l'amoníac s'hagueren sintetitzat en un altre lloc en què, a més de gasos com el metà i l'hidrogen, el H_2S fora un component. Posteriorment aquests reactius es van incorporar als cossos de què provenien, on els aminoàcids finalment es van sintetitzar per l'aigua alliberada en l'interior, que es filtrava fins a la superfície.

Encara quedaven unes quantes capses de mostres més en la col·lecció que vam trobar. Després de revisar-les acuradament buscant canvis en la composició de la mescla de gasos, en el disseny de l'aparell, etc., vam decidir adreçar la nostra atenció a un altre grup de mostres de 1958 amb el qual Miller havia realitzat un experiment que incloïa una descàrrega sobre una mescla de gasos que contenia CH_4 , NH_3 , i H_2O , mentre afegia de manera intermitent un possible agent de condensació prebiòtic, la cianamida, durant el transcurs de l'experiment. Fa quasi cinquanta anys es va descobrir que la cianamida se sintetitzava a partir de gasos reductors i llum ultraviolada i es va proposar com un possible agent de condensació prebiòtic (Schimpl, Lemmon i Calvin, 1965). És un misteri com és que a Miller se li va acudir la idea d'usar cianamida en un experiment de descàrrega elèctrica quasi una dècada abans que altres ho suggeriren com a agent de polimerització d'aminoàcids.

Les nostres anàlisis han descobert que es van sintetitzar més de dotze aminoàcids, deu dipèptids amb glicina i tres dicetopiperazines amb glicina (dipèptids cíclics) en l'experiment (Parker et al., 2014). No obstant això, hi havia un problema: estudis previs sobre la polimerització d'aminoàcids gràcies a la cianamida indicaven que la reacció tenia lloc en valors àcids de pH, mentre que el pH de la solució de la descàrrega era 8,5-9 (això es devia a l'amoníac present en l'experiment de descàrrega elèctrica). Ho vam confirmar utilitzant una solució d'aminoàcids aquosa que també contenia cianamida escalfada a valors de pH que anaven des de 2-3 fins a 10. Els nostres resultats van confirmar que la polimerització era òptima amb pH àcid. Sospitàvem que els intermediaris en la síntesi de Strecker que produïen els aminoàcids, nitrils aminoàcids i amides podrien estar reaccionant amb la cianamida, en compte de fer-ho amb els propis aminoàcids.

Aminoàcids	Amines	Pèptids
Glicina	Metilamina	Glicil-alanina
Alanina	Etilamina	Glicil-treonina
β -Alanina	Etanolamina	Glicil-prolina
Serina	Isopropilamina	Prolil-glicina
Isoserina	N-propilamina	Glicil-valina
Àcid α -aminoisobutíric	Cisteamina	Valil-glicina
Àcid β -aminoisobutíric		Àcid glicil-glutàmic
Àcid α -aminobutíric		Glutamil-glicina
Àcid β -aminobutíric		Leucil-glicina
Àcid γ -aminobutíric		ciclo(glicilglicina)
Homoserina		ciclo(glicilprolina)
α -Metilserina		ciclo(leucilglicina)
Treonina		
Àcid aspàrtic		
Àcid β -hidroxiaspàrtic		
Valina		
Isovalina		
Norvalina		
Ornitina		
Àcid glutàmic		
Àcid α -metilglutàmic		
Leucina		
Isoleucina		
Àcid α -aminoadípica		
Fenilalanina		
Àcid homocisteic		
S-Metilcisteina		
Metionina		
Metionina sulfòxid		
Metionina sulfona		
Etionina		

Taula 2. Aminoàcids, amines i pèptids detectats en els experiments de descàrrega elèctrica efectuats per Miller en els anys cinquanta.

FONT: Johnson et al., 2008; Parker et al., 2011; Parker et al., 2014.

«ELS ESTUDIS PIONERS DE MILLER VAN AJUDAR A DEFINIR ELS PROCESSOS QUE VAN FACILITAR L'INVENTARI QUÍMIC PREBIÒTIC NECESSARI PER A L'EVOLUCIÓ QUÍMICA I, FINALMENT, PER A L'ORIGEN DE LA VIDA»

Vam provar-ho utilitzant solucions aquoses amb diferents valors de pH que contenien o bé el nitril aminoàcid o bé l'amida aminoàcida juntament amb la cianamida. Els resultats mostraven que la polimerització en un pH de 8,5-10, efectivament, produïa dipèptids, l'espècie reactiva més important del qual era l'amida aminoàcida. Aquests experiments van confirmar que els intermediaris en la síntesi d'aminoàcids de Strecker compleixen un paper fonamental a facilitar la polimerització en presència de la cianamida.

L'experiment amb la cianamida de Miller posa de relleu la importància potencial dels agents condensadors que ofereixen un mecanisme per a explicar com compostos orgànics simples com els aminoàcids es podrien haver polimeritzat per formar biomolècules més complexes com els dipèptids. La síntesi de dipèptids i dicetopiperazina (DKP) per la reacció de polimerització de cianamida podria tenir implicacions addicionals, ja que s'ha descobert que alguns dipèptids i DKP tenen propietats catalítiques que podrien haver estat importants a la Terra primigènia (Weber i Pizzarello, 2006).

■ CONCLUSIONS

Els estudis pioners de Miller van ajudar a definir els processos que van facilitar l'inventari químic prebiòtic necessari per a l'evolució química i, finalment, per a l'origen de la vida. Les noves anàlisis amb mètodes analítics moderns i avançats dels arxius que Miller va desfer després dels seus revolucionaris experiments en els anys cinquanta han descobert que ell va sintetitzar 31 aminoàcids, sis amines i dotze dipèptids/ciclopèptids (taula 2). Els estudis de Miller de l'ús d'un reactiu de condensació prebiòtic suggereixen que són vies plausibles per a generar molècules més complexes a partir d'altres de simples com els aminoàcids. Tot i que encara hi ha molt a fer, entendre que l'evolució química prebiòtica contínuua pot, probablement, generar molècules cada vegada més complexes és important. Amb el continu augment de complexitat química, finalment es van produir polímers que d'alguna forma presentaven funcions catalítiques primitives. Allò, al seu torn, va evolucionar cap a una molècula polimèrica complexa que podia catalitzar la seua pròpia replicació imperfecta. Això va marcar el punt d'origen de la vida i de l'evolució.

En el llibre *Elegant solutions: Ten beautiful experiments in chemistry* (Ball, 2005) se seleccionen els treballs fonamentals de Miller junt amb altres èxits notables de Henry Cavendish, Louis Pasteur, Ernest Rutherford i Marie i Pierre Curie. És un reconeixement merescut a la investigació clàssica de Miller. 🌱

REFERÈNCIES

- Bada, J. L. (2013). New insights into prebiotic chemistry from Stanley Miller's spark discharge experiments. *Chemical Society Reviews*, 42, 2186–2196. doi:10.1039/c3cs35433d.
- Bada, J. L., & Lazcano, A. (2002). Miller revealed new ways to study the origins of life. *Nature*, 416, 475. doi:10.1038/416475a
- Bada, J. L., & Lazcano, A. (2003). Prebiotic Soup--Revisiting the Miller Experiment. *Science*, 300, 745–746. doi: 10.1126/science.1085145
- Bada, J. L., & Lazcano, A. (2012). Stanley L. Miller (1930–2007): A Biographical Memoir. National Academy of Sciences (USA). pp. 1–40. www.nasonline.org/memoirs
- Ball, P. (2005). *Elegant solutions*. Londres: Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/9781847552600
- Burton, A. S., Stern, J. S., Elsil, J. F., Glavin, D. P., & Dworkin, J. P. (2012). Understanding prebiotic chemistry through the analysis of extraterrestrial amino acids and nucleobases in meteorites. *Chemical Society Reviews*, 41, 5459–5472. doi: 10.1039/C2CS35109A
- Cavendish, H. (1788). On the conversion of a mixture of dephlogisticated and phlogisticated air into nitrous acid, by the electric spark. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 78, 261–276.
- Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J., & Grabs, W. (2002). High-resolution fields of global runoff combining observed river discharge and simulated water balances. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(3), 1–10. doi: 10.1029/1999GB001254
- Johnson, A. P., Cleaves, H. J., Dworkin, J. P., Glavin, D. P., Lazcano, A., & Bada, J. L. (2008). The Miller volcanic spark discharge experiment. *Science*, 322, 404. doi: 10.1126/science.1161527
- Löb, W. (1913). Über das Verhalten des Formamids unter der Wirkung der stillen Entladung Ein Beitrag zur Frage der Stickstoff-Assimilation. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 46(1), 684–697.
- Miller, S. L. (1953). A production of amino acids under possible primitive earth conditions. *Science*, 117, 528–529. doi: 10.1126/science.117.3046.528
- Miller, S. L. (1955). Production of some organic compounds under possible primitive earth conditions. *Journal of the American Chemical Society*, 77, 2351–2361. doi: 10.1021/ja01614a001
- Miller, S. L. (1957). The mechanism of synthesis of amino acids by electric discharges. *Biochimica et Biophysica Acta*, 23, 480–489. doi:10.1016/0006-3002(57)90366-9
- Miller, S. L., & Urey, H. C. (1959). Organic compound synthesis on the primitive earth. *Science*, 130, 251–251. doi:10.1126/science.130.3370.245.
- Parker, E. T., Cleaves, H. J., Dworkin, J. P., Glavin, D. P., Callahan, M., Aubrey, A., Lazcano, A. & Bada, J. L. (2011). Primordial synthesis of amines and amino acids in a 1958 Miller H₂S-rich spark discharge experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 5526–5531. doi: 10.1073/pnas.1019191108
- Parker, E. T., Zhou, M., Burton, A. S., Glavin, D. P., Dworkin, J. P., Krishnamurthy, R., Fernández, F. M. & Bada, J. L. (2014). A plausible simultaneous synthesis of amino acids and simple peptides on the primordial Earth. *Angewandte Chemie*, 126, 8270–8274. doi: 10.1002/ange.201403683
- Peltzer, E. T., Bada, J. L., Schlesinger, G. & Miller, S. L. (1984). The chemical conditions on the parent body of the Murchison meteorite: Some conclusions based on amino, hydroxy and dicarboxylic acids. *Advances in Space Research*, 4, 69–74. doi:10.1016/0273-1177(84)90546-5
- Schimpl, A., Lemmon, R. M., & Calvin, M. (1965). Cyanamide formation under primitive Earth conditions. *Science*, 147, 149–150. doi: 10.1126/science.147.3654.149
- Strecker, A. (1850). Ueber die künstliche Bildung der Mùchsäure und einen neuen, dem Glycocoll homologen Körper. *Liebigs Annalen der Chemie*, 75, 27–45.
- Weber, A. L., & Pizzarello, S. (2006). The peptide-catalyzed stereospecific synthesis of tetroses: a possible model for prebiotic molecular evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 12713–12717. doi: 10.1073/pnas.0602320103
- Wöhler, F. (1828). Sur la Formation artificielle de l'Urée. *Annual Review of Physical Chemistry*, 37, 330–333.
- Jeffrey L. Bada.** Professor investigador distingit i professor emèrit distingit de l'Institut Scripps d'Oceanografia de la Universitat de Califòrnia a San Diego (UCSD). Va obtenir el seu doctorat en química en la UCSD el 1968 i la seua tesi va ser supervisada per Stanley Miller. Ha investigat sobre els entorns de la Terra primigènia que van proporcionar les condicions òptimes per a la síntesi dels compostos orgànics necessaris per a l'origen de la vida.