

Antes de la vida: un planeta lleno de química

QTC-020 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.0 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Interpretación científica actual

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

Antes de la biología, la Tierra no estaba químicamente vacía. Atmósfera, rocas, meteoritos, luz ultravioleta, rayos, impactos y flujo hidrotermal producían, destruían y redistribuían compuestos orgánicos. La dificultad central no era solo obtener ingredientes, sino concentrar algunos compatibles y enlazar reacciones antes de que dilución o degradación borrarán el resultado. Este artículo separa posibilidad experimental de prueba histórica. Miller produjo aminoácidos, no vida; los meteoritos aportaron moléculas orgánicas, no organismos; minerales y respiraderos catalizan reacciones seleccionadas sin proporcionar una ruta completa. Los ciclos húmedo-seco superficiales, sistemas hidrotermales porosos e interfaces minerales resuelven partes distintas y crean inconvenientes distintos. Ninguna cuna ha ganado. La evidencia sostiene un planeta con muchos laboratorios químicos conectados y una pregunta abierta: cuándo la química productiva se volvió evolución.

En 60 segundos

La química prebiótica pregunta qué procesos no biológicos podían operar antes de la evolución heredada. Los experimentos demuestran varias piezas sólidas. Las descargas eléctricas producen aminoácidos en mezclas gaseosas seleccionadas; la luz ultravioleta impulsa redes fotorredox útiles; los meteoritos contienen aminoácidos y azúcares; los choques de impactos pueden sintetizar compuestos orgánicos. Pero ingredientes dispersos en un océano no forman una ruta. Evaporación, congelación, ciclos húmedo-seco, adsorción mineral, termoforesis y poros microscópicos concentran moléculas, mientras arcillas y sulfuros metálicos catalizan ciertas reacciones. Cada mecanismo también causa pérdidas: el ultravioleta destruye productos, los minerales pueden atraparlos, las sales alteran membranas, el calor acelera la descomposición y cada traslado diluye material. Las charcas ofrecen deshidratación y ciclos repetidos. Los sistemas hidrotermales alcalinos ofrecen gradientes sostenidos de pH y redox. Ninguno ha reproducido una ruta continua, abastecida geológicamente, hasta la herencia. Un éxito de laboratorio responde a una pregunta condicional —qué química puede ocurrir aquí—, no a qué ocurrió históricamente. QTC-020 traza esa distinción y se detiene antes de que los sistemas químicos empiecen a evolucionar, frontera de QTC-021.

Por qué importa esta pregunta

Los relatos sobre el origen de la vida suelen convertir un lugar evocador en respuesta: un matraz con chispas, una charca templada, una arcilla o un respiradero alcalino. La evidencia exige más y ofrece más. Ambientes distintos aportan funciones distintas, y sus debilidades importan tanto como las reacciones famosas. Seguir entradas, energía, concentración, catálisis, degradación y transporte

impide transformar un producto de laboratorio en certeza histórica. También revela una posibilidad más profunda: quizá la unidad relevante no fuera una sola cuna, sino una red planetaria conectada cuyas etapas aún deben demostrarse, no solo narrarse.

1. Un planeta anterior a la biología

La pregunta

Si un matraz produce un ingrediente de la vida, ¿qué se ha demostrado exactamente? Establece una posibilidad química bajo condiciones controladas. La afirmación mayor —que la Tierra primitiva proporcionó, concentró y conectó esas condiciones— debe ganarse por separado.

La química prebiótica es química anterior a la biología en sentido explicativo: reacciones que no necesitan células, enzimas ni instrucciones heredadas. No nombra una era única cuyo principio y final estén conservados en roca, ni una receta ya conocida hacia la vida.[1,11,12] Los investigadores reconstruyen materias primas y ambientes posibles, prueban reacciones y comparan productos con límites geológicos. La tarea es histórica además de química. Una molécula obtenida hoy sin biología pudo ser irrelevante hace cuatro mil millones de años si sus reactivos nunca coincidieron, su concentración fue insuficiente o duró demasiado poco.

Esto crea una jerarquía crucial de evidencia. Un experimento establece primero que entradas, aparato, energía y tiempos especificados producen un resultado concreto. Una segunda pregunta examina si la Tierra primitiva podía suministrar cada condición. Una tercera pregunta si el producto se acumularía junto a productos y catalizadores necesarios después.[1,12,14,31] Solo entonces una reacción entra en una ruta histórica. «Plausible en condiciones prebióticas» es, por tanto, condicional: plausible bajo un modelo atmosférico, química lacustre, composición de respiradero o historia de irradiación que deben defenderse.[12,14,16] No certifica que la reacción ocurriera.

El registro experimental ya es impresionante. Se han producido aminoácidos, nucleobases, azúcares, nucleótidos activados, polímeros cortos, compartimentos anfílicos y redes conectadas de precursores.[1,11,12,18,24] Ningún experimento ha recreado el origen de la vida. No es un desprecio, sino la ubicación del logro. Los bloques no forman automáticamente un sistema; los compartimentos no son células; una red que funciona una vez no posee herencia. QTC-021 examinará el paso ausente a persistencia, variación y selección. Este artículo se queda con el planeta que ofreció oportunidades químicas antes del umbral.

Cinco funciones ordenan la comparación. Un ambiente necesita ingredientes; una fuente de energía capaz de impulsar ciertas reacciones; un modo de concentrar materia; superficies, gradientes o catalizadores que modifiquen velocidades; y ciclos o transporte que conecten pasos.[14,17,25,29,34] La lista no es otra teoría del origen. Sirve para revelar supuestos ocultos. Un poro hidrotermal concentra y aporta energía; una orilla húmedo-seco concentra y cicla; un mineral cataliza un paso y puede retener demasiado el producto para el siguiente. Cada ventaja propuesta crea una desventaja que pertenece a la misma frase.

La Tierra primitiva ofrecía muchos ambientes a la vez. Los impactos atravesaban atmósfera y océano; lluvia y ríos movían solutos sobre roca; la circulación hidrotermal conectaba corteza y mar; aerosoles y meteoritos añadían material externo.[10,21,25,33,34] Esos ambientes podían competir, cooperar u ordenarse en secuencia. Pero dibujar flechas entre ellos todavía no es

química. Cada flecha exige medir tiempo de viaje, supervivencia, flujo y concentración. La primera fase de la investigación es más sencilla: identificar qué materia podían colocar sobre la mesa el planeta y el Sistema Solar.

En qué punto estamos

La química prebiótica empieza con modestia disciplinada: una reacción es real bajo las condiciones que la produjeron, mientras su lugar en la historia terrestre es otra afirmación. Ingredientes, energía, concentración, catálisis y conexión forman la pista de auditoría. La pregunta siguiente sigue los ingredientes: desde gases atmosféricos y penachos volcánicos hasta choques y piedras ricas en carbono llegadas del espacio.

2. Ingredientes del aire, la roca y el espacio

La pregunta

El famoso matraz de chispas suele recordarse como un triunfo que creó vida o un fracaso que usó la atmósfera equivocada. No fue ninguna de las dos cosas. Fue un experimento decisivo cuyo resultado y alcance histórico deben describirse en escalas distintas.

En 1953 Stanley Miller hizo circular agua junto a metano, amoníaco e hidrógeno, lanzó chispas eléctricas por los gases y recogió productos orgánicos. La cromatografía en papel reveló aminoácidos, entre ellos glicina y alanina.[1] El artículo publicado era de Miller. Harold Urey aportó el marco teórico e institucional y supervisó el doctorado, pero no figuró como coautor. La distinción conserva agencia e influencia sin rebautizar el experimento. Y el aparato produjo aminoácidos, no proteínas, células ni vida. Su fuerza duradera fue metodológica: una afirmación sobre química primordial pasó de la especulación a un matraz con productos recuperables.

La mezcla gaseosa era una hipótesis, no una muestra de aire antiguo. Mediciones posteriores de circones hadeanos situaron la fugacidad de oxígeno del magma cerca del tampón fayalita-magnetita-cuarzo, lo que dificulta sostener una atmósfera global y persistente rica en metano y amoníaco procedente de desgasificación volcánica posterior.[2] El redox del manto no fija cada intervalo atmosférico, sobre todo durante acreción e impactos gigantes, pero rompe el relato simple. Mezclas neutras de CO₂-N₂ también producen compuestos orgánicos bajo descarga si participan hidrógeno u otros reductores, con eficiencias y productos distintos.[3] «La atmósfera era incorrecta» es tan tosco como «el experimento recreó la Tierra».

Los ambientes locales amplían el rango. En 2008 Johnson y sus colegas reanalizaron muestras archivadas del aparato volcánico de Miller y detectaron más aminoácidos de los que resolvían los métodos originales.[4] Parker y sus colegas estudiaron después una muestra de descarga de 1958 rica en H₂S y comunicaron 23 aminoácidos y cuatro aminas.[5] Los experimentos respaldan penachos volcánicos reductores o zonas ricas en azufre aunque la atmósfera media lo fuera menos. No demuestran que un penacho albergara el origen. La corrección es geográfica: una media global no elimina reactores locales transitorios.

El espacio aportó otra corriente. El meteorito Murchison contenía aminoácidos e hidrocarburos con evidencia de origen extraterrestre; análisis posteriores hallaron compuestos relacionados con azúcares, y meteoritos carbonáceos han proporcionado ribosa y otros azúcares bajo controles estrictos de contaminación e isótopos.[6,8,9] Algunos alfa-metil aminoácidos meteoríticos muestran

excesos modestos del enantiómero L, prueba de que procesos abióticos crean asimetría molecular antes de la biología.[7] Esto no significa que llegaran organismos. La afirmación defendible es más estrecha: el inventario orgánico no se limitaba a lo producido por la atmósfera terrestre.

Los impactos hicieron más que entregar. Experimentos de choque con materiales que contenían carbono, nitrógeno, hierro y agua produjeron ácidos grasos, aminas y glicina bajo condiciones de impacto oceánico simulado.[10] Los impactos naturales también vaporizarían, oxidarían y enterrarían materia, por lo que no cabe multiplicar productos recuperados por número de cráteres. Atmósfera, volcanes, meteoritos y choques forman una cartera de fuentes cuyas proporciones cambiaron. Una vez disponibles los ingredientes apareció un balance más difícil. La energía que crea una molécula puede destruirla, y una fuente que distribuye productos globalmente puede dejarlos demasiado diluidos.

En qué punto estamos

El experimento de Miller sobrevive a la corrección atmosférica porque su resultado profundo fue condicional y experimental: gases simples pueden volverse aminoácidos cuando la energía atraviesa una mezcla adecuada. Zonas volcánicas, meteoritos e impactos amplían el suministro sin entregar vida. El suministro cede ahora ante un problema más agudo: cómo impulsar química útil sin que la propia energía borre sus productos.

3. Energía que crea y destruye moléculas

Una reacción necesita algo más que ingredientes. Requiere una ruta sobre la barrera de activación y una razón termodinámica continua para avanzar. Miller utilizó descarga eléctrica; la Tierra primitiva ofrecía además fotones ultravioleta, choques, calor geotérmico y diferencias persistentes de redox o pH.[1,10,13,31] Esas fuentes no son monedas intercambiables. Un fotón tiene longitud de onda; una descarga, espectro; un choque, presión e historia de enfriamiento; un gradiente necesita un mecanismo que acople flujo y reacción. Decir que un planeta joven estaba «lleno de energía» no explica ningún producto sin esos detalles.

Los rayos lo muestran. Las descargas fragmentan gases estables y permiten que radicales reactivos se recombinen en compuestos orgánicos, pero los rendimientos cambian mucho con el estado de oxidación y el hidrógeno disponible.[1,3,4] El colector de un experimento también protege productos solubles al apartarlos de nuevas chispas. Una atmósfera natural ofrece lluvia, aerosoles, océanos y roca. Estimar producción exige reunir frecuencia de descarga, composición gaseosa, destrucción y retirada. El mismo relámpago puede iniciar una secuencia sintética y borrar otra molécula antes de que ambas lleguen a un depósito útil.

La luz ultravioleta ofrece una prueba más continua en el espacio. Ritson y Sutherland usaron química fotorredox para obtener azúcares simples desde materias derivadas de HCN; Patel y sus colegas conectaron fotoquímica con precursores de ARN, aminoácidos y lípidos; trabajos posteriores trazaron rutas con sulfito y ferrocianuro.[13–15] Rimmer y sus colegas compararon química luminosa productiva con reacciones oscuras competidoras bajo irradiación dependiente de la longitud de onda.[16] Los fotones seleccionan rutas, no solo calientan. También endurecen el ambiente: profundidad, neblina, blindaje mineral, hora y absorbentes deciden qué luz llega.

La luz tiene doble filo porque la fotoquímica carece de intención. Puede generar electrones hidratados y radicales útiles, romper subproductos inestables, destruir productos deseados o

agotar un sensibilizador.[13–16] Un ambiente plausible puede necesitar fases expuestas para síntesis y fases sombreadas, enterradas u oscuras para conservar. Los ciclos convierten la contradicción en mecanismo solo si los compuestos sobreviven al traslado. La variable importante es la acumulación neta después de toda la historia luz-oscuridad, no el rendimiento máximo en el instante más favorable.

Los gradientes difieren de los pulsos. Donde agua alcalina rica en hidrógeno encuentra un océano más ácido con CO₂ a través de barreras minerales, las diferencias de pH y redox persisten mientras continúa el flujo.[29–31] Almacenan energía libre en separación espacial. Pero un gradiente no trabaja si cargas o moléculas no cruzan por una vía catalítica. El calor también acelera síntesis y descomposición; la ribosa, por ejemplo, se degrada con rapidez a alta temperatura bajo condiciones neutras medidas.[35] La energía resuelve activación solo cuando concentración, catálisis y conservación resuelven pérdidas. Eso lleva a lugares donde la materia deja de dispersarse.

En qué punto estamos

La energía no es un ingrediente mágico, sino una interacción cronometrada y filtrada entre materia y ambiente. Descargas, fotones, choques, calor y gradientes abren reacciones mientras aceleran pérdidas. Todo escenario debe presentar un balance químico neto después de destrucción y transporte. Los ciclos de agua superficial ofrecen la prueba siguiente: ¿pueden concentración y secado repetidos volver temporalmente reversible la dilución?

4. Charcas superficiales: concentración mediante ciclos

La expresión «sopa primordial» oculta un problema físico. Un océano global es gran disolvente y enorme diluidor. Las reacciones que unen monómeros suelen liberar agua, por lo que mucha agua puede favorecer la reacción inversa. La hidrología local cambia la aritmética. La evaporación reduce volumen; la congelación expulsa solutos a salmueras; la filtración retira agua; la lluvia reinicia la mezcla.[17,20,33] Nada garantiza química útil, porque sales e inhibidores también se concentran. Pero una charca fluctuante convierte un problema estático en una secuencia donde fases secas y húmedas cumplen tareas distintas.

El fosfato muestra cuánto importa el lugar. El calcio de aguas ordinarias tiende a retirar fosfato en minerales poco solubles. Toner y Catling combinaron experimentos y modelos para mostrar que lagos ricos en carbonato pueden suprimir calcio disuelto mediante precipitación y permitir que el fosfato alcance altas concentraciones con evaporación adecuada.[17] El resultado no dice que todo lago resuelva el fosfato. Exige alcalinidad carbonatada, equilibrio hidrológico y fuentes de fósforo. Su valor es sustituir una escasez planetaria por una clase comprobable de aguas locales.

Los experimentos húmedo-seco han unido reacciones difíciles en agua diluida permanente. Rajamani y sus colegas produjeron polímeros semejantes al ARN desde mononucleótidos en ciclos asistidos por lípidos; Forsythe y sus colegas impulsaron enlaces amida mediados por éster con secados repetidos; Becker y sus colegas mantuvieron síntesis continua de nucleósidos canónicos y no canónicos a través de ciclos.[18–20] Son sistemas distintos, no una ruta completa. Juntos establecen un principio físico: actividad del agua y concentración oscilan, con química de deshidratación en seco y dispersión, plegamiento o encapsulación en húmedo.

Las membranas vuelven visible la química del agua. Milshteyn y sus colegas probaron compuestos anfílicos seleccionados en agua de un manantial hidrotermal y en agua marina. Las vesículas se ensamblaron en el agua termal, pero no en el agua de mar ensayada, donde sales e iones divalentes interfirieron.[21] No prohíbe todo compartimento marino; otros lípidos y microambientes se comportan distinto. Sí muestra por qué «había agua» es demasiado débil. La composición iónica decide si las mismas moléculas se vuelven frontera o quedan dispersas.

Modelos de charcas templadas combinan aporte meteorítico, degradación, filtración y secado para calcular cuándo podrían acumularse nucleobases.[33] La hipótesis de charcas hidrotermales fluctuantes extiende el ambiente a membranas y selección combinatoria entre fases acopladas.[34] Ambas predicen, pero siguen inciertas la superficie emergida, abundancia de charcas, lluvia, ultravioleta y continuidad de materias primas. Un escenario superficial gana deshidratación y ciclos y acepta desecación, fotólisis y suministro interrumpido. Su afirmación fuerte no es que Darwin acertara. Es que una orilla cambiante puede funcionar como máquina química.

En qué punto estamos

Las charcas convierten geografía en reactivo. Evaporación, congelación y ciclos húmedo-seco concentran solutos, cambian actividad del agua y alternan síntesis con rehidratación; la química lacustre puede liberar fosfato de un cuello aparentemente global. El precio es exposición y continuidad incierta. Un ambiente contrastante sitúa el reactor bajo el agua y sustituye ciclos atmosféricos por paredes minerales, gradientes fluyentes y poros microscópicos.

5. Respiraderos hidrotermales: gradientes y poros

La pregunta

Las palabras «respiradero hidrotermal» evocan una chimenea negra abrasadora, pero los modelos del origen suelen referirse a flujo alcalino más frío a través de barreras minerales porosas. Temperatura, pH, salinidad, minerales y mezcla difieren tanto que la evidencia de uno no vale para todos.

Los sistemas hidrotermales sustituyen el llenado y vaciado de una charca por flujo continuo a través de roca. Russell, Hall y Turner cultivaron chimeneas de sulfuro de hierro en laboratorio al reunir soluciones adecuadas, demostrando que la precipitación construye estructuras compartimentadas de pared fina.[26] Russell y sus colegas propusieron después que membranas catalíticas de sulfuro de hierro en respiraderos alcalinos separaban fluido rico en hidrógeno de un océano más ácido con CO₂. [27] La propuesta unía catálisis mineral, compartimentos microscópicos y gradiente electroquímico persistente. Era una hipótesis comprobable, no una primera célula fosilizada.

La fuente atractiva es el desequilibrio geoquímico. La serpentinización y otras reacciones agua-roca generan hidrógeno; su mezcla con dióxido de carbono oceánico crea potencial redox, mientras una diferencia de pH almacena energía protón-motriz.[27,29,31] Las células modernas usan gradientes de protones, pero el parecido no demuestra continuidad. La pregunta prebiótica es si una barrera inorgánica acopla esas semirreacciones sin enzimas. Debe ser permeable para mover materias primas y productos y conservar a la vez separación suficiente para mantener el gradiente.

Ya existen reacciones individuales. Huber y Wächtershäuser formaron derivados activados del ácido acético desde monóxido de carbono y sulfuro de metilo sobre sulfuros de hierro y níquel.[28] Herschy y sus colegas detectaron productos de reducción de carbono en un reactor diseñado para simular respiraderos alcalinos.[29] Barge y sus colegas mostraron que estado redox, pH y temperatura de oxihidróxidos de hierro controlaban la aminación reductora de piruvato a alanina.[30] Cada resultado demuestra una posibilidad catalítica en un sistema definido. Ninguno integra secuencia completa, procedencia de entradas, salida de productos y recurrencia.

Hudson y sus colegas aislaron un paso especialmente informativo. En un dispositivo microfluídico, un gradiente de pH a través de Fe(Ni)S recién precipitado acopló oxidación de hidrógeno y reducción de CO₂ a temperatura ambiente y presión moderada. El marcaje isotópico confirmó formiato, en torno a 1,5 micromolar; reducir el gradiente, retirar hidrógeno o eliminar el precipitado no dio producto detectable.[31] Los controles establecen el papel causal del gradiente en esa reacción. No convierten formiato micromolar en metabolismo. La precisión sobre el producto pequeño fortalece el experimento.

Las desventajas son igual de físicas. El agua caliente acelera descomposición de azúcares e intermediarios; los iones marinos alteran compartimentos de ácidos grasos; el flujo abierto diluye; los precipitados envejecen y obstruyen; composición oceánica y flujo hidrotermal siguen inciertos.[21,25,32,35] La termoforesis en poros ofrece una respuesta, pero depende de geometría y diferencia térmica.[25] «Los respiraderos destruyen orgánicos» es demasiado amplio; «resuelven el metabolismo», también. Sistemas porosos más fríos ofrecen gradientes y concentración, pero toda ruta necesita un balance químico compatible.

En qué punto estamos

Los sistemas hidrotermales alcalinos convierten flujo continuo en gradientes, compartimentos y catálisis mineral. Reactores controlados demuestran reacciones seleccionadas de carbono y aminoácidos, incluido formiato micromolar impulsado por gradiente, pero no metabolismo vivo. Sus debilidades —calor, sales, dilución y continuidad incierta— llevan a las propias superficies. Los minerales editan química donde agua y roca se encuentran, no solo en respiraderos.

6. Minerales como editores químicos

Una molécula disuelta explora agua tridimensional; una adsorbida queda junto a sus vecinas en una superficie bidimensional. Eso eleva concentración local, orienta grupos reactivos y altera barreras de activación. También inmoviliza o facilita hidrólisis. «Los minerales catalizaron el origen» comprime selección, concentración y pérdida en un verbo halagador. La pregunta útil compara: qué cara mineral, carga y fluido cambian qué reacción, y si el producto puede salir disponible para el paso siguiente.

La montmorillonita ofrece el ejemplo clásico de polímeros. Ferris y sus colegas mostraron que nucleótidos activados forman oligómeros semejantes al ARN más largos sobre superficies minerales que en la química correspondiente en solución.[22] La arcilla no fabricó los monómeros activados y las secuencias reflejaban el sistema de reacción, no información biológica. El experimento estableció formación de enlaces asistida por superficie. Su uso histórico exigiría activación compatible, suministro repetido y liberación o transferencia antes de que la adsorción se volviera trampa.

Los minerales pueden proteger además de unir. Ricardo y sus colegas encontraron que el borato estabilizaba ribosa en mezclas de formosa y limitaba reordenamiento y descomposición.[23] El resultado aborda una inestabilidad famosa sin resolver todo el problema del azúcar. La Tierra aún debía aportar borato junto a precursores, y trasladar después ribosa estabilizada a activación y nucleótidos. Una solución mineral para un cuello crea un requisito geográfico para el siguiente. Por eso las rutas completas son más difíciles que un catálogo de reacciones exitosas por separado.

Las superficies también conectan compartimentos y polímeros. Hanczyc, Fujikawa y Szostak comunicaron que la montmorillonita aceleraba la conversión de micelas de ácidos grasos en vesículas; partículas de arcilla con ARN adsorbido podían encapsularse.[24] El experimento une tres módulos separados a menudo —catálisis mineral, adsorción de ácidos nucleicos y ensamblaje de membranas— sin afirmar una protocélula completa. Encapsular no produce reproducción ni selección, pero muestra que un mineral no debe quedar fuera. Las partículas transportan química al interior mientras ayudan a formar la frontera.

La física de poros amplía el papel más allá de la adsorción. Baaske y sus colegas usaron gradientes térmicos y convección en poros hidrotermales simulados para acumular nucleótidos en órdenes de magnitud.[25] Geometría, difusión, flujo y temperatura crearon el efecto; un océano caliente genérico no. Juntos, los experimentos indican que los minerales editan química seleccionando lugares y tiempos de residencia, además de reacciones. Concentran, estabilizan, catalizan, encapsulan o secuestran. El signo neto pertenece a toda la mezcla, decisivo cuando deben funcionar varias familias moleculares.

En qué punto estamos

Los minerales no son solución universal, sino una biblioteca de interfaces selectivas. La arcilla alarga oligómeros activados y entra en vesículas; el borato estabiliza ribosa; los poros acumulan nucleótidos. Cada beneficio depende de fluido, materia prima y liberación. El obstáculo siguiente es integrar: si síntesis exitosas por separado de bases, azúcares y precursores de aminoácidos y lípidos pueden coexistir como red, no como museo de reacciones.

7. De bloques de construcción a redes

La pregunta

Supongamos que un experimento produce una nucleobase, otro un azúcar y un tercero una membrana. El inventario crece, pero el problema histórico sigue sin resolverse hasta que reactivos, sales, temperaturas y tiempos compartan una secuencia sin destruirse mutuamente.

Los primeros estudios de síntesis empezaban a menudo con una molécula célebre. Oro calentó cianuro de hidrógeno concentrado y obtuvo adenina, mostrando que cinco unidades pequeñas de HCN se ensamblan en una base purínica bajo condiciones escogidas.[11] La ruta fue poderosa porque conectó una materia prima simple de carbono y nitrógeno con un componente biológico. Su carga histórica seguía siendo la concentración: dónde se produjo, protegió y reunió bastante HCN. Además, la adenina es una base; sin azúcar, fosfato, activación y una ruta de ensamblaje compatible no se vuelve ARN.

Powner, Gerland y Sutherland cambiaron la arquitectura del problema del ribonucleótido. En vez de sintetizar por separado ribosa y base pirimidínica y forzar su unión, usaron una secuencia

donde precursores menores convergían en ribonucleótidos pirimidínicos activados.[12] La irradiación ultravioleta ayudó a destruir estereoisómeros no deseados mientras sostenía la ruta productiva. El logro no fue solo otro componente: mostró que un enlace difícil podía evitarse eligiendo otro camino. Pero orden de reactivos, fosfato, cambios de pH e irradiación aún necesitan coreografía ambiental.

La química de sistemas empuja varias ramas hacia entradas comunes. Ritson y Sutherland produjeron azúcares simples mediante química fotorredox derivada de HCN.[13] Patel y sus colegas comunicaron una red cianosulfídica hacia precursores de ribonucleótidos, aminoácidos y lípidos; Xu y sus colegas ampliaron la homologación reductora fotoquímica con sulfito y ferrocianuro.[14,15] Las materias comunes reducen la improbabilidad de mundos separados. No prueban que cada rama operara simultáneamente. Una corriente común todavía puede dividirse en ambientes con pH, metales o exposición luminosa incompatibles.

La quiralidad añade otro problema de integración. Cronin y Pizzarello midieron excesos modestos del enantiómero L en ciertos alfa-metil aminoácidos meteoríticos.[7] El resultado establece que la química abiótica del Sistema Solar rompe simetría especular antes de la vida. No suministra la casi homoquiralidad de proteínas y ácidos nucleicos ni muestra cómo un exceso extraterrestre pasa a otras familias. Amplificación, selección y conservación siguen por demostrar. La lección correcta es la posibilidad de un sesgo, no el origen resuelto de la lateralidad.

Una red debe funcionar en el tiempo además de en un diagrama. Sales útiles para fosforilar alteran membranas; el ultravioleta que selecciona un producto destruye otro; el calor que acelera síntesis acorta la vida de azúcares; minerales que concentran monómeros retienen polímeros. [16,20,21,23,35] Ambientes secuenciales relajan compatibilidad simultánea, pero añaden transporte, dilución y conservación. La meta experimental no es un matraz perfecto, sino un sistema continuo o cíclico con balance de masa, entradas realistas y productos aún disponibles para la transformación siguiente.

En qué punto estamos

La química de sistemas sustituye la lista de compras por compatibilidad. Adenina, nucleótidos pirimidínicos activados y redes precursoras comunes muestran que una ruta evita viejos cuellos; la asimetría meteorítica prueba que un sesgo abiótico es posible. Pero cada rama lleva sus condiciones al paso siguiente. La evaluación final debe comparar ambientes y secuencias conectadas sin convertir el experimento más vívido en lugar de nacimiento único.

8. Ninguna cuna ha ganado

Los ambientes principales resuelven ecuaciones distintas. Las charcas concentran por evaporación y usan ciclos húmedo-seco para deshidratación. Los sistemas hidrotermales alcalinos mantienen gradientes redox y de pH y aportan poros. Las interfaces minerales adsorben, orientan y catalizan. Meteoritos, atmósfera e impactos amplían entradas.[9,17,25,31,34] Ninguno demuestra todas las funciones y ningún experimento recupera un lugar único solo por funcionar. La comparación correcta pregunta qué cuello resuelve, cuál crea y si se cierra todo el flujo material.

La Tierra ofreció pronto una oportunidad amplia. Los circones de Jack Hills registran interacción corteza-agua hacia hace 4.400 millones de años, lo que implica agua líquida y corteza diferenciada cuando el planeta era joven.[36] No conservan una charca, un respiradero ni fecha del origen. El

contexto geológico funciona mejor como filtro: no se supone tierra emergida sin evidencia; la composición de un respiradero debe seguir reacciones agua-roca; una materia atmosférica debe sobrevivir a la fotoquímica. El archivo limita el diseño del escenario más veces de las que identifica el escenario histórico.

La vida química afina el filtro. Larralde, Robertson y Miller midieron vidas medias de la ribosa de unos 73 minutos a pH 7 y 100 °C y 44 años a pH 7 y 0 °C.[35] No refutan un origen relacionado con ARN, pues síntesis, estabilización, enfriamiento o uso rápido pueden superar la pérdida. Sí prohíben una flecha sin tiempo que diga «la ribosa se acumula» en todo ambiente. Las velocidades son parte de la plausibilidad. Un compuesto existente en análisis puede estar ausente funcionalmente si se destruye más rápido de lo que llega.

Los ambientes conectados siguen siendo plausibles y exigentes. Un producto de impacto podría llover en un lago carbonatado, un ciclo húmedo-seco formar oligómeros y el agua subterránea llevarlos a poros minerales. Cada traslado también puede oxidar, adsorber, hidrolizar o diluir la carga.[10,20,25,33,34] Una historia multietapa se fortalece solo al cuantificar flujo y supervivencia. De otro modo gana flexibilidad desplazando cada dificultad. La red planetaria es un programa de investigación, no una escapatoria por la que experimentos incompatibles cooperan automáticamente.

Lo establecido es considerable: rutas abióticas producen orgánicos diversos; ambientes locales los concentran; luz, minerales y gradientes seleccionan reacciones; compartimentos simples se ensamblan en ciertas aguas.[1,9,12,17,21,24,31] Falta una transición continua y abastecida geológicamente desde esos procesos hasta herencia abierta. La ausencia no vuelve sobrenatural ni incognoscible la emergencia de la vida. Identifica la frontera experimental siguiente. QTC-020 termina con química bastante organizada para persistir. QTC-021 empieza cuando la persistencia puede variar, reproducirse y sufrir selección.

En qué punto estamos

Antes de la vida, la Tierra ya era una red de reactores químicos. Aire, espacio, roca, luz, ciclos del agua, minerales y flujo hidrotermal ofrecían posibilidades complementarias, limitadas por pérdidas e incertidumbre histórica. Ninguna cuna merece exclusividad y ninguna reacción aislada cruzó el umbral biológico. El artículo siguiente pregunta qué organización adicional permite conservar diferencias el tiempo suficiente para que empiece la evolución.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Descargas eléctricas, fotoquímica ultravioleta y choques sintetizan compuestos orgánicos desde entradas simples seleccionadas.[1,3,10,13–16]
- Los meteoritos carbonáceos contienen aminoácidos extraterrestres, compuestos relacionados con azúcares y ribosa.[6–9]
- Ciclos húmedo-seco, adsorción mineral, termoforesis y poros concentran o unen moléculas relevantes en experimentos.[17–25]
- Catalizadores minerales y gradientes de pH o redox impulsan ciertas reacciones de carbono y aminoácidos en sistemas hidrotermales controlados.[26–31]
- Ningún experimento ha producido una transición continua y abastecida geológicamente desde materias simples hasta herencia abierta.[12,24,31,34]

Lo que todavía no sabemos

- Qué ambientes primitivos produjeron los mayores flujos útiles, no solo los mayores rendimientos aislados de laboratorio.
- Cómo se acumularon materias compatibles mientras se controlaban sales destructivas, ultravioleta, calor e hidrólisis.
- Si charcas, poros hidrotermales, hielo e interfaces minerales actuaron como alternativas, socios o etapas de una secuencia.
- Cómo se amplificó y mantuvo la quiralidad molecular entre distintas familias de precursores.
- Qué transición experimentalmente reproducible convirtió química productiva en herencia persistente y evolución.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un archivo geológico que conecte directamente un ambiente primitivo concreto con productos y condiciones diagnósticos.
- Experimentos continuos donde un ambiente propuesto reúna materias primas, concentración, energía, catálisis y conservación.
- Experimentos de transporte con balance de masa que demuestren supervivencia a través de una secuencia de ambientes.
- Replicación independiente que elimine una ruta clave bajo impurezas, sales, espectros ultravioleta o ciclos térmicos realistas.
- Un sistema reproducible donde entradas geoquímicamente limitadas generen compartimentos con variación heredable y selección sostenida.

Si solo recuerdas una cosa

Antes de la vida, la Tierra ofrecía muchos reactores químicos, no una cuna demostrada. Los experimentos establecen reacciones posibles; la historia exige ingredientes, energía, concentración, conservación y transporte compatibles antes de empezar la herencia.

Artículos relacionados

- QTC-016 — Cómo se construye un planeta
- QTC-019 — El termostato de la Tierra
- QTC-021 — Cuando la química empezó a evolucionar

Referencias

[1] Stanley L. Miller. A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. Science 117(3046), 528–529 (1953). DOI 10.1126/science.117.3046.528.
<https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528>

[2] Dustin Trail; E. Bruce Watson; Nicholas D. Tailby. The Oxidation State of Hadean Magmas and Implications for Early Earth's Atmosphere. Nature 480, 79–82 (2011). DOI 10.1038/nature10655.
<https://doi.org/10.1038/nature10655>

[3] H. James Cleaves; John H. Chalmers; Antonio Lazcano; Stanley L. Miller; Jeffrey L. Bada. A Reassessment of Prebiotic Organic Synthesis in Neutral Planetary Atmospheres. Origins of Life and

Evolution of Biospheres 38, 105–115 (2008). DOI 10.1007/s11084-007-9120-3.

<https://doi.org/10.1007/s11084-007-9120-3>

[4] Adam P. Johnson; H. James Cleaves; Jason P. Dworkin; Daniel P. Glavin; Antonio Lazcano; Jeffrey L. Bada. The Miller Volcanic Spark Discharge Experiment. *Science* 322(5900), 404 (2008). DOI 10.1126/science.1161527. <https://doi.org/10.1126/science.1161527>

[5] Eric T. Parker; Henderson J. Cleaves; Jason P. Dworkin; Daniel P. Glavin; Michael Callahan; Andrew Aubrey; Antonio Lazcano; Jeffrey L. Bada. Primordial Synthesis of Amines and Amino Acids in a 1958 Miller H₂S-Rich Spark Discharge Experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(14), 5526–5531 (2011). DOI 10.1073/pnas.1019191108. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019191108>

[6] Keith A. Kvenvolden; James G. Lawless; Katherine Pering; Etta Peterson; Jose Flores; Cyril Ponnamperna; I. R. Kaplan; Carleton Moore. Evidence for Extraterrestrial Amino-Acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite. *Nature* 228, 923–926 (1970). DOI 10.1038/228923a0. <https://doi.org/10.1038/228923a0>

[7] John R. Cronin; Sandra Pizzarello. Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids. *Science* 275(5302), 951–955 (1997). DOI 10.1126/science.275.5302.951. <https://doi.org/10.1126/science.275.5302.951>

[8] George Cooper; Novelle Kimmich; Warren Belisle; Josh Sarinana; Katrina Brabham; Laurence Garrel. Carbonaceous Meteorites as a Source of Sugar-Related Organic Compounds for the Early Earth. *Nature* 414, 879–883 (2001). DOI 10.1038/414879a. <https://doi.org/10.1038/414879a>

[9] Yoshihiro Furukawa; Yoshito Chikaraishi; Naohiko Ohkouchi; Nanako O. Ogawa; Daniel P. Glavin; Jason P. Dworkin; Chiaki Abe; Tomoki Nakamura. Extraterrestrial Ribose and Other Sugars in Primitive Meteorites. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(49), 24440–24445 (2019). DOI 10.1073/pnas.1907169116. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907169116>

[10] Yoshihiro Furukawa; Toshimori Sekine; Masahiro Oba; Takeshi Kakegawa; Hiromoto Nakazawa. Biomolecule Formation by Oceanic Impacts on Early Earth. *Nature Geoscience* 2, 62–66 (2009). DOI 10.1038/ngeo383. <https://doi.org/10.1038/ngeo383>

[11] J. Oró. Mechanism of Synthesis of Adenine from Hydrogen Cyanide under Possible Primitive Earth Conditions. *Nature* 191, 1193–1194 (1961). DOI 10.1038/1911193a0. <https://doi.org/10.1038/1911193a0>

[12] Matthew W. Powner; Béatrice Gerland; John D. Sutherland. Synthesis of Activated Pyrimidine Ribonucleotides in Prebiotically Plausible Conditions. *Nature* 459, 239–242 (2009). DOI 10.1038/nature08013. <https://doi.org/10.1038/nature08013>

[13] Dougal Ritson; John D. Sutherland. Prebiotic Synthesis of Simple Sugars by Photoredox Systems Chemistry. *Nature Chemistry* 4, 895–899 (2012). DOI 10.1038/nchem.1467. <https://doi.org/10.1038/nchem.1467>

[14] Bhavesh H. Patel; Claudia Percivalle; Dougal J. Ritson; Colm D. Duffy; John D. Sutherland. Common Origins of RNA, Protein and Lipid Precursors in a Cyanosulfidic Protometabolism. *Nature Chemistry* 7, 301–307 (2015). DOI 10.1038/nchem.2202. <https://doi.org/10.1038/nchem.2202>

- [15] Jianfeng Xu; Dougal J. Ritson; Sukrit Ranjan; Zoe R. Todd; Dimitar D. Sassellov; John D. Sutherland. Photochemical Reductive Homologation of Hydrogen Cyanide Using Sulfite and Ferrocyanide. *Chemical Communications* 54, 5566–5569 (2018). DOI 10.1039/C8CC01499J. <https://doi.org/10.1039/C8CC01499J>
- [16] Paul B. Rimmer; Jianfeng Xu; Samantha J. Thompson; Ed Gillen; John D. Sutherland; Didier Queloz. The Origin of RNA Precursors on Exoplanets. *Science Advances* 4(8), eaar3302 (2018). DOI 10.1126/sciadv.aar3302. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar3302>
- [17] Jonathan D. Toner; David C. Catling. A Carbonate-Rich Lake Solution to the Phosphate Problem of the Origin of Life. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(2), 883–888 (2020). DOI 10.1073/pnas.1916109117. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916109117>
- [18] Sudha Rajamani; Alexander Vlassov; Seico Benner; Amy Coombs; Felix Olasagasti; David Deamer. Lipid-Assisted Synthesis of RNA-Like Polymers from Mononucleotides. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 38, 57–74 (2008). DOI 10.1007/s11084-007-9113-2. <https://doi.org/10.1007/s11084-007-9113-2>
- [19] Jay G. Forsythe; Sheng-Sheng Yu; Irena Mamajanov; Martha A. Grover; Ramanarayanan Krishnamurthy; Facundo M. Fernández; Nicholas V. Hud. Ester-Mediated Amide Bond Formation Driven by Wet-Dry Cycles: A Possible Path to Polypeptides on the Prebiotic Earth. *Angewandte Chemie International Edition* 54, 9871–9875 (2015). DOI 10.1002/anie.201503792. <https://doi.org/10.1002/anie.201503792>
- [20] Sidney Becker; Christina Schneider; Hidenori Okamura; Antony Crisp; Tynchtyk Amatov; Milan Dejmek; Thomas Carell. Wet-Dry Cycles Enable the Parallel Origin of Canonical and Non-Canonical Nucleosides by Continuous Synthesis. *Nature Communications* 9, 163 (2018). DOI 10.1038/s41467-017-02639-1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02639-1>
- [21] Daniel Milshteyn; Bruce Damer; Jeff Havig; David Deamer. Amphiphilic Compounds Assemble into Membranous Vesicles in Hydrothermal Hot Spring Water but Not in Seawater. *Life* 8(2), 11 (2018). DOI 10.3390/life8020011. <https://doi.org/10.3390/life8020011>
- [22] James P. Ferris; Aubrey R. Hill, Jr.; Rihe Liu; Leslie E. Orgel. Synthesis of Long Prebiotic Oligomers on Mineral Surfaces. *Nature* 381, 59–61 (1996). DOI 10.1038/381059a0. <https://doi.org/10.1038/381059a0>
- [23] Alonso Ricardo; Matthew A. Carrigan; Alison N. Olcott; Steven A. Benner. Borate Minerals Stabilize Ribose. *Science* 303(5655), 196 (2004). DOI 10.1126/science.1092464. <https://doi.org/10.1126/science.1092464>
- [24] Martin M. Hanczyc; Shelly M. Fujikawa; Jack W. Szostak. Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth, and Division. *Science* 302(5645), 618–622 (2003). DOI 10.1126/science.1089904. <https://doi.org/10.1126/science.1089904>
- [25] Philipp Baaske; Franz M. Weinert; Stefan Duhr; Kono H. Lemke; Michael J. Russell; Dieter Braun. Extreme Accumulation of Nucleotides in Simulated Hydrothermal Pore Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(22), 9346–9351 (2007). DOI 10.1073/pnas.0609592104. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609592104>

- [26] Michael J. Russell; Allan J. Hall; Dugald Turner. In Vitro Growth of Iron Sulphide Chimneys: Possible Culture Chambers for Origin-of-Life Experiments. *Terra Nova* 1(3), 238–241 (1989). DOI 10.1111/j.1365-3121.1989.tb00364.x. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1989.tb00364.x>
- [27] Michael J. Russell; Roy M. Daniel; Allan J. Hall; John A. Sherringham. A Hydrothermally Precipitated Catalytic Iron Sulphide Membrane as a First Step toward Life. *Journal of Molecular Evolution* 39, 231–243 (1994). DOI 10.1007/BF00160147. <https://doi.org/10.1007/BF00160147>
- [28] Claudia Huber; Günter Wächtershäuser. Activated Acetic Acid by Carbon Fixation on (Fe,Ni)S Under Primordial Conditions. *Science* 276(5310), 245–247 (1997). DOI 10.1126/science.276.5310.245. <https://doi.org/10.1126/science.276.5310.245>
- [29] Barry Herschy; Alexandra Whicher; Eloi Camprubi; Cameron Watson; Lewis Dartnell; John Ward; Julian R. G. Evans; Nick Lane. An Origin-of-Life Reactor to Simulate Alkaline Hydrothermal Vents. *Journal of Molecular Evolution* 79, 213–227 (2014). DOI 10.1007/s00239-014-9658-4. <https://doi.org/10.1007/s00239-014-9658-4>
- [30] Laura M. Barge; Erika Flores; Marc M. Baum; David G. VanderVelde; Michael J. Russell. Redox and pH Gradients Drive Amino Acid Synthesis in Iron Oxyhydroxide Mineral Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(11), 4828–4833 (2019). DOI 10.1073/pnas.1812098116. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812098116>
- [31] Reuben Hudson; Ruvan de Graaf; Mari Strandoo Rodin; Aya Ohno; Nick Lane; Shawn E. McGlynn; Yoichi M. A. Yamada; Ryuhei Nakamura; Laura M. Barge; Dieter Braun; Victor Sojo. CO₂ Reduction Driven by a pH Gradient. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(37), 22873–22879 (2020). DOI 10.1073/pnas.2002659117. <https://doi.org/10.1073/pnas.2002659117>
- [32] Stanley L. Miller; Jeffrey L. Bada. Submarine Hot Springs and the Origin of Life. *Nature* 334, 609–611 (1988). DOI 10.1038/334609a0. <https://doi.org/10.1038/334609a0>
- [33] Ben K. D. Pearce; Ralph E. Pudritz; Dmitry A. Semenov; Thomas K. Henning. Origin of the RNA World: The Fate of Nucleobases in Warm Little Ponds. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(43), 11327–11332 (2017). DOI 10.1073/pnas.1710339114. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710339114>
- [34] Bruce Damer; David Deamer. Coupled Phases and Combinatorial Selection in Fluctuating Hydrothermal Pools: A Scenario to Guide Experimental Approaches to the Origin of Cellular Life. *Life* 5(1), 872–887 (2015). DOI 10.3390/life5010872. <https://doi.org/10.3390/life5010872>
- [35] R. Larralde; M. P. Robertson; S. L. Miller. Rates of Decomposition of Ribose and Other Sugars: Implications for Chemical Evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 92(18), 8158–8160 (1995). DOI 10.1073/pnas.92.18.8158. <https://doi.org/10.1073/pnas.92.18.8158>
- [36] Simon A. Wilde; John W. Valley; William H. Peck; Colin M. Graham. Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr Ago. *Nature* 409, 175–178 (2001). DOI 10.1038/35051550. <https://doi.org/10.1038/35051550>