

La Tierra arcaica, los mundos microbianos y la fotosíntesis

CHO-012 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-012 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Segurola

Idioma: Español

Función del artículo: Columna cronológica

Ventana del artículo: [4.000, 2.500) Ga atrás

Corte de eventos: 13 septiembre 2026 · Corte de búsqueda bibliográfica: 13 septiembre 2026

Tipo de documento: Síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares

Resumen estructurado

Contexto. Entre 4.000 y 2.500 miles de millones de años atrás, la Tierra adquirió núcleos continentales de larga duración, reorganizó repetidamente su corteza y sus océanos, albergó ecosistemas microbianos diversos y desarrolló vías fotosintéticas que comenzaron a modificar las condiciones redox de la superficie. El intervalo no puede representarse como un ascenso uniforme hacia la Tierra moderna.

Pregunta. ¿Cómo interactuaron la geodinámica arcaica, el clima, el metabolismo microbiano y la fotosíntesis, y qué establece la evidencia sin convertir proxies locales o fechas de modelos en una única transición global?

Evidencia y método. Esta síntesis separa las observaciones medidas en rocas, isótopos y paleomagnetismo de las reconstrucciones geodinámicas, climáticas, biológicas y de relojes moleculares. Se conservan mecanismos competidores cuando un mismo proxy admite varias interpretaciones. La adjudicación de la evidencia de vida más antigua permanece en CHO-011; el Gran Evento de Oxidación desde 2.500 Ga en adelante permanece en CHO-013.

Resultados. La corteza félsica arcaica se formó mediante varios procesos, y la evidencia de placas móviles no fecha por sí sola el establecimiento de una red global de placas de estilo moderno. Las soluciones climáticas al problema del Sol joven débil requieren restricciones acopladas de efecto invernadero, albedo, nubes, bruma, presión e hidrología, incluida evidencia interpretada como un intervalo glaciario cerca de 2.90 Ga. Los mundos microbianos diversificaron los ciclos del carbono, metano, azufre y nitrógeno. La evidencia geológica y molecular permite la fotosíntesis oxigénica en el Arcaico, pero no identifica una única fecha de origen. Ambientes oxigenados locales o transitorios coexistieron con una atmósfera para la que los registros de isótopos de azufre con fraccionamiento independiente de la masa se interpretan habitualmente como evidencia de bajo oxígeno, aunque esa interpretación ha sido discutida.

Conclusión. Al aproximarse a la frontera de propiedad de 2.500 Ga, la Tierra era un planeta geológica y biológicamente acoplado, con regiones continentales estables, extensos ecosistemas microbianos y condiciones redox espacialmente heterogéneas. Estos desarrollos prepararon, pero no predeterminaron, la posterior oxigenación planetaria tratada en CHO-013. La capacidad de observador asignada aquí se limita a detección ambiental y respuesta regulada condicionales a nivel de linaje, no a cognición ni consciencia.

Palabras clave: Arcaico; corteza continental; tectónica de placas; Sol joven débil; ecología microbiana; metabolismo; fotosíntesis; oasis de oxígeno; isótopos de azufre

1. Orientación cronológica y estado heredado

CHO-012 es la columna cronológica para [4.000, 2.500) Ga atrás. El límite inferior es la transición Hádico-Arcaico convencional utilizada por esta serie, no un evento geológico globalmente sincrónico. El límite superior es una frontera estratigráfica de propiedad: cualquier dato exactamente en 2.500 Ga o más joven pertenece a CHO-013. Dentro del artículo, Ga denota miles de millones de años antes del presente.

CHO-009 transmite un planeta con interior diferenciado, corteza temprana, interacción con agua líquida, intercambio atmósfera-océano y un registro modificado repetidamente por impactos, fusión, alteración y metamorfismo. CHO-010 aporta múltiples componentes experimentalmente plausibles de la evolución química sin fechar un origen único de la vida. CHO-011 concluye que determinados registros eoarcaicos y paleoarcaicos respaldan una inferencia acotada de que algunos ambientes estaban habitados, sin identificar un fósil, metabolismo, hábitat o momento de origen más antiguo único.

La tarea aquí es, por tanto, distinta de encontrar un primer organismo. Consiste en reconstruir el sistema terrestre cambiante en el que las poblaciones microbianas persistieron, se diversificaron y modificaron sus ambientes. Cuatro transformaciones organizan el intervalo: producción y supervivencia de corteza continental; modos cambiantes de reciclaje tectónico; mantenimiento de agua superficial habitable bajo un Sol más débil; y expansión de los metabolismos microbianos, incluida la fotosíntesis y los ecosistemas localmente oxigenantes.

2. Construcción de continentes sin asumir un único régimen tectónico

En muchos terrenos, la corteza continental arcaica está dominada por conjuntos tonalita-trondhjemit-granodiorita y cinturones de rocas verdes asociados. Su química registra la fusión de precursores máficos, pero la química por sí sola no especifica un único mecanismo geodinámico. El basalto hidratado puede fundirse en entornos similares a subducción, dentro de corteza máfica engrosada o durante enterramiento y retrabajo relacionados con plumas. La deformación posterior puede yuxtaponer productos de procesos diferentes.

El trabajo experimental sobre composiciones de East Pilbara respalda la coexistencia, durante el Arcaico temprano, de fusión profunda similar a subducción y procesos intracrustales más someros [2]. En cambio, la modelización muestra que el sobreengrosamiento de corteza máfica puede generar magmas húmedos y oxidantes sin requerir subducción de estilo moderno [8]. Una compilación global publicada en 2025 identifica fuentes diversas para la corteza félsica temprana e interpreta una transición geodinámica importante cerca de 3.0 Ga [7]. Estos estudios reducen el espacio de procesos posibles; no convierten cada granitoide arcaico en un marcador de límite de placas.

Los continentes también tuvieron que emerger sobre el nivel del mar y permanecer suficientemente estables para interactuar de forma persistente con la atmósfera y los océanos. Un estudio del Cratón de Singhbhum atribuye una emergencia extensa alrededor de 3.3-3.2 Ga al engrosamiento magmático en un contexto sin tectónica de placas [1]. Es una reconstrucción regional, no una fecha para la primera tierra emergida en todo el planeta. Hacia el Arcaico tardío, sucesiones semejantes a márgenes pasivos y la estabilidad de los cratones se han interpretado como la creación de interfaces más duraderas entre meteorización, aporte de nutrientes, sedimentación y química atmosférica [9]. Es una interpretación regional del sistema corteza-superficie, no una prueba de que una única transición tectónica causara una innovación biológica.

La síntesis adecuada es plural. La corteza temprana pudo crecer, hundirse, fundirse y reciclarse bajo varios regímenes coexistentes. La transición geológica de interés no es la primera aparición local de una firma similar a subducción, sino la organización gradual de una movilidad y un reciclaje superficiales conectados y de larga duración.

3. ¿Cuándo se hizo global la tectónica de placas?

Ninguna observación aislada fecha de manera única el inicio de la tectónica de placas. Entre los indicadores candidatos figuran metamorfismo de alta presión, geoquímica semejante a arcos, gradientes térmicos emparejados, asociaciones semejantes a ofiolitas, movimiento paleomagnético, arquitectura de cuencas sedimentarias y evidencia de reciclaje profundo de volátiles. Cada uno registra solo una parte del sistema moderno.

El trabajo paleomagnético informa de movimiento del Cratón de East Pilbara respecto al eje de rotación terrestre, a velocidades comparables a las del movimiento de placas moderno, alrededor de 3.2 Ga [3]. El estudio no separa el movimiento diferencial de placas de la deriva polar verdadera ni de la rotación neta de la litosfera. La evidencia geoquímica de rocas derivadas del manto también se ha interpretado como un reenriquecimiento generalizado del manto a 3.2 Ga y, por tanto, como señal de reciclaje a escala global [4]. Son restricciones importantes, pero el movimiento de bloques corticales y el reciclaje de material son condiciones necesarias, no suficientes, para una red global de placas continuamente conectada.

Otros estudios sitúan una transición más amplia posteriormente. Las historias de enterramiento y exhumación de cinturones de rocas verdes se han interpretado como indicativas de un cambio hacia comportamiento de tectónica de placas en el Arcaico tardío [5], y los registros paleomagnéticos neoarcaicos respaldan movilidad relativa sin es-

pecificar por sí solos la topología global [6]. La evidencia puede reconciliarse si la subducción local, la movilidad episódica y el reciclaje impulsado por plumas precedieron al funcionamiento global estable. También puede reflejar desacuerdo real entre proxies, regiones y definiciones.

CHO-012 no imprime, por tanto, una fecha única de inicio. Distingue cuatro proposiciones: procesamiento local similar a subducción; movimiento entre bloques corticales; reciclaje profundo; y una red global persistente de placas móviles. La evidencia de un nivel no puede cerrar silenciosamente los demás.

4. Agua habitable bajo un Sol joven débil

La luminosidad solar era menor durante el Arcaico, pero los registros sedimentarios y de alteración requieren ambientes persistentes con agua líquida. La aparente contradicción es el problema del Sol joven débil. Es un problema climático acoplado, no la búsqueda de un único gas de efecto invernadero ausente.

Las soluciones propuestas combinan dióxido de carbono, metano, presión atmosférica, microfísica de nubes, albedo superficial, rotación, distribución continental y bruma fotoquímica. Rosing y colaboradores sostuvieron que una menor abundancia de núcleos de condensación de nubes y un menor albedo planetario podrían aliviar la paradoja mientras la evidencia geoquímica limitaba el dióxido de carbono [10]. Dauphas y Kasting cuestionaron la conversión de la química del agua de poro a dióxido de carbono atmosférico [11]. La modelización tridimensional indica además que la retroalimentación hielo-albedo y una rotación más rápida pueden aumentar el calentamiento necesario respecto a cálculos más simples [12].

El metano producido por ecosistemas microbianos es un gas de efecto invernadero eficiente en atmósferas reductoras [13], pero el metano abundante también puede generar bruma orgánica cuyo efecto climático depende de la distribución de partículas, las nubes y la circulación [14]. Las restricciones geológicas siguen siendo indispensables. Los registros de paleosuelos y meteorización se han utilizado para acotar el dióxido de carbono cerca de 3.2 Ga [15], mientras que las impresiones fósiles de gotas de lluvia restringen indirectamente la densidad del aire en lugar de medir una presión atmosférica exacta [16].

Los ambientes cálidos no fueron continuos en todas partes. El trabajo con isótopos triples de oxígeno en rocas Pongola-Mozaan de aproximadamente 2.90 Ga respalda meteorización por precipitaciones muy frías de alta latitud y un episodio glacial [17]. La fuente lo denomina la primera glaciación de la Tierra; tras la revisión del texto completo, CHO no adopta esa formulación de prioridad, aunque conserva el intervalo más frío como restricción del modelo. Una reconstrucción climática arcaica satisfactoria debe acomodar tanto la habitabilidad con agua líquida como la posibilidad, bajo esta interpretación, de al menos un estado glacial preservado. La habitabilidad fue una distribución en el espacio y el tiempo, no una temperatura global uniforme.

4.1 Base de evidencia, métodos de datación y límites de resolución

La cronología arcaica combina relojes que datan objetos distintos. Una edad numérica debe permanecer vinculada al objeto y al proceso realmente datados. La precisión está limitada por el eslabón más débil entre la incertidumbre analítica, la perturbación del sistema isotópico, la relación entre un mineral datado y su unidad hospedante, la correlación estratigráfica y la inferencia que conecta el hospedante con la afirmación ambiental o biológica.

Método o clase de evidencia	Qué fecha o restringe aquí	Principal límite de resolución
Geocronología U-Pb en circón y otros minerales	Cristalización o reajuste isotópico posterior de minerales datados; puede acotar la deposición cuando se demuestra la relación mineral-unidad	Una edad precisa de circón no es automáticamente la edad de sedimentación, de una partícula de carbono, de un metabolismo o de un régimen tectónico; deben comprobarse herencia, pérdida de Pb y retrabajo
Acotación estratigráfica y de campo	Orden relativo y un intervalo de deposición entre unidades datadas independientemente, niveles de ceniza o cuerpos discordantes	La señal ambiental hereda la incertidumbre de la acotación y la correlación; el extremo más antiguo no es una fecha exacta del evento
Paleomagnetismo combinado con geocronología independiente	Dirección y cambios de la magnetización remanente primaria a través del tiempo, utilizados para reconstruir movimiento cortical respecto al eje de rotación de la Tierra; el movimiento diferencial requiere restricciones adicionales [3,6]	La adquisición de remanencia, la sobreimpresión, la rotación de bloques y el control de edad afectan a la reconstrucción; la deriva polar verdadera y la rotación neta de la litosfera también deben distinguirse del movimiento diferencial de placas antes de inferir la topología tectónica
Geocronología La-Ce de anomalías de cerio	Momento del fraccionamiento La/Ce y, bajo la interpretación de la fuente, de la oxidación de Ce sin deposicional en los carbonatos estudiados [28]	Fecha la formación de la anomalía en depósitos concretos, no el origen evolutivo de la fotosíntesis oxigénica; deben excluirse mezcla, movilidad posterior y supuestos de isócrona
Isótopos triples de oxígeno	Condiciones hidrológicas y procedencia del agua de meteorización registrada por rocas ya datadas [17]	El sistema isotópico es un proxy climático, no el reloj que establece 2.90 Ga; la representatividad espacial y la preservación limitan la inferencia climática
Proxies elementales y de isótopos estables, incluidos MIF-S, nitrógeno, molibdeno y cerio	Procesos redox, fotoquímicos o metabólicos asociados a una muestra datada [21,22,26-28,32-34,42,43]	Intervienen producción, transporte, deposición y alteración del proxy; la edad del hospedante fecha la aparición de una señal, no necesariamente el origen, duración o extensión global de su proceso
Relojes moleculares y restricciones por transferencia horizontal de genes	Distribuciones de probabilidad para divergencias de linajes o familias de proteínas [20,29,30]	Los resultados dependen de topología, calibraciones, modelos de tasa, transferencia horizontal y descendientes muestreados; no son edades de rocas y no deben imprimirse como eventos puntuales
Fósiles moleculares	Edad deposicional de un compuesto indígena y sin-genético solo después de establecer su procedencia [35-39]	Migración, metamorfismo, perforación y contaminación de laboratorio pueden desacoplar una molécula de la edad de la roca hospedante e invalidar afirmaciones de prioridad biológica

Por consiguiente, el movimiento de placas a 3.2 Ga fecha un intervalo de movimiento inferido, no el comienzo de un sistema global. Los resultados La-Ce de 2.87, 2.85 y 2.78 Ga fechan la formación de anomalías concretas de cerio, no el primer linaje capaz de escindir agua. La edad de aproximadamente 2.90 Ga y la interpretación climática de isótopos triples de oxígeno son eslabones separados de un mismo argumento. Los intervalos de reloj molecular fechan divergencias modelizadas, mientras que los proxies geoquímicos fechan expresiones ambientales preservadas. CHO no informa ninguna transición biológica o planetaria con mayor precisión que la permitida por esta cadena completa.

5. Mundos microbianos en lugar de un único tipo de biosfera

El registro biológico arcaico está filtrado por la preservación y la interpretación de proxies. CHO-011 posee las afirmaciones sobre la evidencia más antigua. CHO-012 parte de la proposición más estrecha de que existían poblaciones microbianas y pregunta cómo pudieron organizarse los ecosistemas.

Las comunidades microbianas explotaban desequilibrios químicos generados por la luz solar, las reacciones agua-roca, los gases volcánicos, la circulación hidrotermal y la materia orgánica. Los metabolismos anaerobios debieron dominar grandes partes del intervalo: fermentación, metanogénesis, fotosíntesis anoxigénica, transformaciones del azufre y fijación de nitrógeno podían operar sin una atmósfera oxigenada. Su importancia relativa variaba entre aguas fóticas, sedimentos, sistemas hidrotermales, márgenes continentales y cuencas restringidas.

Las películas orgánicas del Buck Reef Chert de aproximadamente 3.4 Ga conservan diversidad geoquímica entre materiales sometidos a una historia metamórfica similar [19]. Esa heterogeneidad dentro de una misma unidad es

útil porque reduce la tentación de interpretar todo el carbono antiguo como un único producto biológico o de alteración. Aun así, no identifica taxonómicamente a los organismos.

Los análisis filogenómicos ofrecen un archivo distinto. La transferencia horizontal de genes se ha utilizado para restringir la diversificación de linajes metanógenos a tiempos arcaicos profundos [20]. Simulaciones de laboratorio publicadas en 2025 muestran que una vía de acetil-CoA dependiente de hidrógeno puede alimentarse bajo condiciones geoquímicas modelizadas de la Tierra temprana [23]. Un artículo de 2026 propone un sistema biosfera-atmósfera temprano rico en hidrógeno, metano y amoníaco [24]. Estos resultados difieren en tipo de evidencia: historias de linajes, viabilidad experimental y reconstrucción termodinámica no pueden colapsarse en una única observación geológica datada.

6. Ciclos del nitrógeno, azufre y metano

La productividad biológica requiere nitrógeno accesible. Un registro de isótopos de nitrógeno de 3.2 Ga se ha interpretado como evidencia de fijación mediada por nitrogenasa de molibdeno [21]. Esa interpretación depende de la calibración del fraccionamiento biológico y de excluir alternativas abióticas o diagenéticas. Experimentos con nitrógenas ancestrales reconstruidas publicados en 2026 reproducen biofirmas canónicas de isótopos de nitrógeno a través de variantes evolutivas [22], reforzando la base mecanística del proxy sin demostrar retroactivamente cada muestra antigua.

El metano conectaba biología y clima. Los metanógenos podían consumir hidrógeno y compuestos de carbono en ambientes anóxicos, añadiendo forzamiento de efecto invernadero y dejando patrones isotópicos que las reacciones hidrotermales abióticas a veces pueden imitar. El artículo separa por ello la historia evolutiva de los linajes metanógenos de la evidencia prioritaria de metano ya evaluada en CHO-011 y de las consecuencias climáticas.

Los isótopos de azufre restringen tanto el metabolismo como la atmósfera. El fraccionamiento independiente de la masa de los isótopos de azufre, o MIF-S, se interpreta ampliamente como registro de reacciones atmosféricas en fase gaseosa en condiciones de poco oxígeno [32]. Registros mesoarcaicos se han utilizado para defender anoxia atmosférica y cambios en la química del azufre [34]. Sin embargo, la ausencia de MIF-S en determinadas sucesiones de 2.92 y 2.76 Ga ha respaldado interpretaciones competidoras óxicas, fluctuantes o diagenéticas [33].

Estos registros exigen disciplina de escala. Una cuenca sedimentaria puede registrar producción local de oxígeno mientras la atmósfera global sigue siendo suficientemente reductora para preservar MIF-S en otros lugares. A la inversa, un intervalo sin señal MIF-S no demuestra por sí solo una atmósfera global permanentemente oxigenada. Producción, transporte, deposición, alteración y muestreo del proxy se interponen entre el estado atmosférico y la roca medida.

7. Fotosíntesis: varias innovaciones, varios relojes

La fotosíntesis no es una única invención indivisible. Los sistemas anoxigénicos utilizan luz sin escindir agua y pueden emplear donadores de electrones como hidrógeno, hierro ferroso o azufre reducido. La fotosíntesis oxigénica acopla dos centros de reacción para extraer electrones del agua y libera oxígeno molecular. Las cianobacterias corona, la maquinaria de oxidación del agua y los plastidios posteriores son objetivos relacionados pero cronológicamente distintos.

El registro de Buck Reef de 3.416 Ga se ha interpretado como tapetes microbianos fotosintéticos [18], pero la adjudicación de prioridad permanece en CHO-011 y la fuente no establece fotosíntesis oxigénica. Una señal asociada a uranio de 3.7 Ga se ha interpretado como evidencia de fotosíntesis oxigénica [25], mientras que familias de proxies posteriores proporcionan restricciones más jóvenes y calibradas de modo diferente.

Datos de manganeso y molibdeno se han utilizado para inferir fotosíntesis oxigénica al menos a 2.95 Ga [26]. La evidencia isotópica también se ha interpretado como aguas someras mesoarcaicas oxigenadas [27]. La geocronología La-Ce publicada en 2025 data directamente anomalías de cerio en aproximadamente 2.87, 2.85 y 2.78 Ga y sitúa la evolución de la fotosíntesis oxigénica en el Mesoarcaico o antes [28]. Son restricciones sobre producción de oxígeno y química redox, no observaciones del organismo de origen.

La evolución molecular aporta intervalos amplios y dependientes del modelo. Los análisis de diversificación del Fotosistema II respaldan una historia arcaica temprana de la maquinaria central de oxidación del agua [29]. El trabajo de reloj molecular separa el origen arcaico de la fotosíntesis oxigénica de la diversificación posterior de los

linajes corona de cianobacterias actuales [30]. La topología del árbol génico, la elección de calibraciones, la variación de tasas y la transferencia horizontal amplían la incertidumbre. Los proxies geológicos y los relojes moleculares pueden informarse mutuamente sin forzarlos a producir una única fecha de nacimiento.

8. La advertencia de los biomarcadores

Los hidrocarburos del Arcaico tardío se presentaron en su día como fósiles moleculares de eucariotas y cianobacterias [35,36]. Trabajos posteriores mostraron por qué las afirmaciones sobre biomarcadores antiguos exigen un control de contaminación excepcional. Una reevaluación vinculó los hidrocarburos relevantes con material más joven o contextos metamórficos [37]. Perforación ultralimpia, blancos procedimentales y múltiples laboratorios encontraron que los compuestos previamente diagnósticos eran contaminantes, al tiempo que identificaron hidrocarburos indígenas demasiado maduros térmicamente para las afirmaciones taxonómicas originales [38]. El propio aire del laboratorio puede transportar trazas de hidrocarburos [39].

Un enfoque distinto de 2025 analizó distribuciones de fragmentos liberados por pirólisis-cromatografía de gases-espectrometría de masas y los clasificó con bosques aleatorios supervisados [48]. Los autores informaron apoyo del modelo a ensamblajes moleculares biogénicos en rocas de Josefsdal de 3.33 Ga y describieron los resultados combinados de Gamohaan de 2.52 Ga como sugerentes de fotosíntesis, señalando a la vez que la mayoría de las muestras precámbricas de afinidad desconocida seguían indeterminadas, faltaban biomoléculas diagnósticas intactas y los efectos sistemáticos de contaminación requieren más pruebas. Este resultado de clasificación por patrones no resuelve las afirmaciones rechazadas de esteranos y 2-metilhopanos ni identifica un taxón arcaico o la fecha de origen de la fotosíntesis.

CHO-012 conserva este episodio como caso de falsación, no como evidencia positiva de datación. La interpretación cianobacteriana descartada pertenece aquí porque en su momento afectó a afirmaciones sobre fotosíntesis. La interpretación eucariota descartada pertenece a la superposición de prioridad CHO-014 que comienza en 2.800 Ga; se menciona aquí solo porque ambas interpretaciones surgieron de la misma clase de evidencia contaminada. La asociación biológica moderna de una molécula no establece su antigüedad, singenicidad ni organismo de origen.

9. Oasis de oxígeno antes de la acumulación atmosférica

La fotosíntesis oxigénica no tiene por qué producir una oxigenación atmosférica inmediata. El oxígeno era consumido por gases volcánicos reducidos, hierro disuelto, especies de azufre, materia orgánica y minerales de la corteza. La producción podía superar a los sumideros locales en un tapete, una masa de agua somera o una plataforma continental y seguir por debajo del umbral para una acumulación global sostenida.

Múltiples sistemas de proxies respaldan un redox arcaico heterogéneo. El registro de manganeso-molibdeno de 2.95 Ga, las señales mesoarcaicas de aguas someras y las anomalías de cerio meso- a neoarcaicas datadas directamente apuntan, bajo sus respectivas interpretaciones, a producción local de oxígeno [26-28]. Un estudio de 2013 defendió oxigenación atmosférica alrededor de 3.0 Ga [31], pero esta conclusión a escala atmosférica debe contrastarse con la evidencia MIF-S en lugar de tratarse como equivalente a un oasis local.

Los estudios mesoarcaicos y neoarcaicos añaden variabilidad temporal. En un testigo de perforación de Red Lake de 2.93 Ga, se ha modelizado que el reciclaje de fósforo permitió pulsos de productividad elevada y oasis de oxígeno espacialmente limitados [40]. Un trabajo neoarcaico independiente informa de oxigenación transitoria de las aguas de fondo de la plataforma continental hacia aproximadamente 2.65 Ga [41]. Los isótopos de nitrógeno se han interpretado como evidencia de un ciclo del nitrógeno vinculado al oxígeno a finales del Arcaico [42,43]. Estos registros describen redes ecológicas y estados redox locales; no miden una concentración atmosférica moderna de oxígeno.

El frecuentemente citado «soplo de oxígeno» cerca de 2.5 Ga ilustra el riesgo de frontera [44]. Una reevaluación de 2022, utilizando acotaciones deposicionales de 2533 ± 6 Ma y 2483 ± 7 Ma, atribuyó la señal global original a alteración postdeposicional y defendió un océano anóxico antes del Gran Evento de Oxidación [45]. Un comentario técnico de 2023 cuestionó esa reevaluación y defendió oxigenación transitoria pre-GOE [46]; los autores de la reevaluación respondieron que la pirita de etapa tardía comprometía la interpretación del soplo y que las señales primarias respaldaban en cambio condiciones anóxicas [47]. Este intercambio publicado permanece sin resolver aquí. Como el intervalo de este artículo es semiabierto, el material exactamente en 2.500 Ga y más joven es evidencia de CHO-013. Las muestras más antiguas solo pueden aportar contexto cuando sus fechas, historias de alteración y propiedad están explícitas.

10. Capacidades de observador presentes

CHO utiliza «observador» de forma operativa. Para la vida microbiana, la única capacidad aplicable aquí es OC1: detección ambiental evolucionada acoplada a respuesta regulada. Quimiotaxis, fototaxis, regulación del estrés y cambio metabólico en linajes vivos son ejemplos de la clase funcional general, pero ningún mecanismo concreto está fosilizado directamente en una roca arcaica.

OC1 es, por tanto, una reconstrucción condicional a nivel de linaje. Si una población estaba viva, se mantenía y se reproducía bajo condiciones variables, las interacciones reguladas con su ambiente son biológicamente plausibles. Esta clasificación no implica sistemas nerviosos, modelos internos, experiencia fenoménica ni consciencia reflexiva. Tampoco clasifica como observadores las respuestas minerales o atmosféricas no vivas solo porque codifiquen información ambiental.

11. Contingencia y contemporáneos

Los desarrollos arcaicos no fueron aislados ni inevitables. Los continentes pudieron crecer mediante varios mecanismos y después hundirse o ser retrabajados. La movilidad local podía no convertirse en una red global persistente. El calentamiento de efecto invernadero podía verse compensado por bruma o retroalimentación hielo-albedo. La escasez de nutrientes y los sumideros redox podían limitar la expansión fotosintética. Los linajes productores de oxígeno podían permanecer geográficamente restringidos o desaparecer sin dejar descendientes reconocibles.

Los ambientes contemporáneos diferían marcadamente. Los cratones emergentes se meteorizaban bajo el mismo Sol más débil que iluminaba tapetes microbianos; los sistemas hidrotermales suministraban poder reductor mientras las aguas someras admitían luz; una química atmosférica anóxica a escala global coexistía con posibles oasis locales de oxígeno. El registro Pongola-Mozaan de aproximadamente 2.90 Ga, bajo su interpretación glaciaria publicada, muestra que un modelo de planeta habitable debe permitir frío regional o episódico intenso.

El registro geológico también es contingente. La supervivencia de un cratón, una cuenca o un chert crea una oportunidad de observación; metamorfismo, deformación, erosión y contaminación destruyen o imitan evidencia. La ausencia en el registro superviviente no equivale, por tanto, a ausencia biológica.

12. Interpretaciones competidoras y preguntas no resueltas

Persisten varias preguntas centrales:

1. ¿Cuándo se convirtió el reciclaje cortical local y episódico en una red global persistente de placas?
2. ¿Qué combinación de gases de efecto invernadero, presión, albedo, nubes y bruma reprodujo la distribución completa de climas arcaicos?
3. ¿Hasta qué punto las cuencas sedimentarias supervivientes representan la diversidad microbiana global?
4. ¿Qué proxies geológicos requieren fotosíntesis oxigénica en lugar de oxidación no biológica o alteración posterior?
5. ¿Cómo deben reconciliarse las distribuciones de relojes moleculares con registros rocosos incompletos y localmente sesgados?
6. ¿Con qué frecuencia se formaron oasis de oxígeno, qué extensión tuvieron y qué sumideros impidieron la acumulación global?
7. ¿Qué componentes de los ciclos del nitrógeno, azufre y metano estuvieron mediados biológicamente en cada entorno datado?

La reconstrucción de hidrógeno-metano-amoniaco de 2026 [24] y los marcos convencionales de dióxido de carbono-nitrógeno hacen supuestos marcadamente diferentes sobre el redox del manto, la composición atmosférica y los sustratos biológicos. CHO conserva la propuesta más reciente como alternativa discutida en lugar de tratar su recencia como confirmación.

13. Clases de afirmaciones, fronteras y exclusiones

Medido u observado: edades de rocas, distribuciones minerales y elementales, razones isotópicas, magnetización remanente, estructuras sedimentarias y productos de reacción medidos experimentalmente informados por los estudios citados.

Reconstruido a partir de evidencia: emergencia subaérea, entorno tectónico, temperatura ambiental, metabolismo biológico, agua oxigenada y estructura de ecosistemas.

Dependiente del modelo: topología tectónica global, soluciones climáticas, fechas de relojes moleculares, mezcla atmosférica, retroalimentaciones de nutrientes y magnitud de los flujos biológicos de gases.

Activamente discutido: inicio de la tectónica de placas global; restricciones sobre dióxido de carbono atmosférico; interpretación de determinadas ausencias de MIF-S; fotosíntesis oxigénica muy temprana; oxigenación atmosférica del Arcaico tardío; y modelo de biosfera de hidrógeno-metano-amoniaco.

Rechazado como evidencia positiva de datación en esta síntesis: afirmaciones de prioridad basadas en esteros y 2-metilhopanos arcaicos cuando fallan los controles de contaminación y singenicidad.

Especulativo o abierto: una única fecha para el origen de la fotosíntesis, ascendencia directa entre cualquier comunidad preservada y clados vivos, y cualquier afirmación de cognición o consciencia arcaicas.

Solo CHO-011 posee la adjudicación de prioridad de la vida más antigua antes de 3.200 Ga. CHO-012 puede heredar esos registros como contexto ambiental, pero no puede reabrir su clasificación. Solo CHO-014 posee la prioridad de eucariotas y endosimbiosis dentro de su superposición desde 2.800 Ga. CHO-013 posee el Gran Evento de Oxidación y cualquier dato exactamente en 2.500 Ga o más joven. La desaparición de MIF-S cerca del Gran Evento de Oxidación no se cierra, por tanto, aquí.

14. Estado de cierre transmitido a CHO-013

Al aproximarse al límite exclusivo de 2.500 Ga, la Tierra contenía regiones continentales y cuencas sedimentarias estables, aunque el momento y la organización global de la tectónica de placas seguían en debate. Los ambientes con agua líquida persistían bajo un Sol más débil e incluían heterogeneidad climática, con el registro Pongola-Mozan de aproximadamente 2.90 Ga interpretado como evidencia de glaciación. Los ecosistemas microbianos explotaban múltiples vías energéticas y de nutrientes. La fotosíntesis oxigénica operaba en algún lugar del Arcaico bajo varias interpretaciones independientes, aunque su origen seguía siendo intervalar y dependiente del modelo.

La producción de oxígeno había comenzado a reestructurar determinadas aguas, plataformas y ciclos de nutrientes, mientras que los proxies atmosféricos y sedimentarios seguían registrando anoxia extensa y fuertes sumideros. No es una versión fallida del mundo moderno. Es el estado heredado necesario para explicar la siguiente transformación.

CHO-013 comienza en 2.500 Ga y pregunta cómo el oxígeno escapó de los balances locales de producción-consumo, se acumuló de manera desigual en atmósfera y océanos, interactuó con la glaciación y el ciclo del carbono y transformó la habitabilidad planetaria. La transición fue preparada por procesos arcaicos, pero no estaba garantizada por ellos.

Referencias

1. Chowdhury, P., et al. "Magmatic thickening of crust in non-plate tectonic settings initiated the subaerial rise of Earth's first continents 3.3 to 3.2 billion years ago." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118, e2105746118 (2021). <https://doi.org/10.1073/pnas.2105746118>
2. Hastie, A. R., et al. "Early Archaean subduction and intracrustal processes: experimental evidence from the East Pilbara Terrane, Australia." *Nature Communications* 17, 4875 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41467-026-71442-8>
3. Brenner, A. R., et al. "Paleomagnetic evidence for modern-like plate motion velocities at 3.2 Ga." *Science Advances* 6, eaaz8670 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz8670>
4. El Dien, H. G., et al. "Geochemical evidence for a widespread mantle re-enrichment 3.2 billion years ago: implications for global-scale plate tectonics." *Scientific Reports* 10, 9461 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66324-y>
5. Ivan, Z., et al. "Greenstone burial-exhumation cycles at the late Archean transition to plate tectonics." *Nature Communications* 13, 7893 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35208-2>
6. Ding, J., et al. "Paleomagnetic evidence for Neoproterozoic plate mobilism." *Nature Communications* 15, 10814 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55117-w>
7. Wang, H., et al. "Diverse genesis of early Earth's continental crust hints the geodynamic transition at about 3.0 Gyrs ago." *Communications Earth & Environment* 6, 1023 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02973-z>

8. Hernández-Urbe, D. "Generation of Archaean oxidizing and wet magmas from mafic crustal overthickening." *Nature Geoscience* 17, 809-813 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01489-z>
9. Peng, Y., et al. "Passive margins in accreting Archaean archipelagos signal continental stability promoting early atmospheric oxygen rise." *Nature Communications* 13, 7821 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35559-w>
10. Rosing, M. T., et al. "No climate paradox under the faint early Sun." *Nature* 464, 744-747 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature08955>
11. Dauphas, N., and Kasting, J. F. "Low CO₂ in the pore water, not in the Archean air." *Nature* 474, E1 (2011). <https://doi.org/10.1038/nature09960>
12. Kienert, H., Feulner, G., and Petoukhov, V. "Faint young Sun problem more severe due to ice-albedo feedback and higher rotation rate of the early Earth." *Geophysical Research Letters* 39, L23710 (2012). <https://doi.org/10.1029/2012GL054381>
13. Pavlov, A. A., et al. "Greenhouse warming by CH₄ in the atmosphere of early Earth." *Journal of Geophysical Research: Planets* 105, 11981-11990 (2000). <https://doi.org/10.1029/1999JE001134>
14. Mak, M. T., et al. "3D Simulations of the Archean Earth Including Photochemical Haze Profiles." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 128, e2023JD039343 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023JD039343>
15. Hessler, A. M., et al. "A lower limit for atmospheric carbon dioxide levels 3.2 billion years ago." *Nature* 428, 736-738 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature02471>
16. Som, S. M., et al. "Air density 2.7 billion years ago limited to less than twice modern levels by fossil raindrop imprints." *Nature* 484, 359-362 (2012). <https://doi.org/10.1038/nature10890>
17. Hofmann, A., and Bindeman, I. N. "Earth's first glaciation at 2.9 Ga revealed by triple oxygen isotopes." *Geochemical Perspectives Letters* 26, 20-24 (2023). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2319>
18. Tice, M. M., and Lowe, D. R. "Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean." *Nature* 431, 549-552 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature02888>
19. Alleen, J., et al. "Inherited geochemical diversity of 3.4 Ga organic films from the Buck Reef Chert, South Africa." *Communications Earth & Environment* 2, 6 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00066-7>
20. Wolfe, J. M., and Fournier, G. P. "Horizontal gene transfer constrains the timing of methanogen evolution." *Nature Ecology & Evolution* 2, 897-903 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0513-7>
21. Stüeken, E. E., et al. "Isotopic evidence for biological nitrogen fixation by molybdenum-nitrogenase from 3.2 Gyr." *Nature* 520, 666-669 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14180>
22. Rucker, H. R., et al. "Resurrected nitrogenases recapitulate canonical N-isotope biosignatures over two billion years." *Nature Communications* 17, 616 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67423-y>
23. Helmbrecht, V., et al. "Simulated early Earth geochemistry fuels a hydrogen-dependent primordial metabolism." *Nature Ecology & Evolution* 9, 769-778 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02676-w>
24. Ohmoto, H., and Ferry, J. G. "The hydrogen, methane and ammonia biosphere on early Earth." *Scientific Reports* 16, 14017 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-43917-7>
25. Rosing, M. T., and Frei, R. "U-rich Archaean sea-floor sediments from Greenland: indications of 3700 Ma oxygenic photosynthesis." *Earth and Planetary Science Letters* 217, 237-244 (2004). [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00609-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00609-5)
26. Planavsky, N. J., et al. "Evidence for oxygenic photosynthesis half a billion years before the Great Oxidation Event." *Nature Geoscience* 7, 283-286 (2014). <https://doi.org/10.1038/ngeo2122>
27. Eickmann, B., et al. "Isotopic evidence for oxygenated Mesoarchaeon shallow oceans." *Nature Geoscience* 11, 133-138 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0036-x>
28. Patry, L. A., et al. "Dating the evolution of oxygenic photosynthesis using La-Ce geochronology." *Nature* 642, 99-104 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09009-8>
29. Cardona, T., et al. "Early Archean origin of Photosystem II." *Geobiology* 17, 127-150 (2019). <https://doi.org/10.1111/gbi.12322>
30. Fournier, G. P., et al. "The Archean origin of oxygenic photosynthesis and extant cyanobacterial lineages." *Proceedings of the Royal Society B* 288, 20210675 (2021). <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0675>
31. Crowe, S. A., et al. "Atmospheric oxygenation three billion years ago." *Nature* 501, 535-538 (2013). <https://doi.org/10.1038/nature12426>
32. Farquhar, J., Bao, H., and Thiemens, M. "Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle." *Science* 289, 756-758 (2000). <https://doi.org/10.1126/science.289.5480.756>
33. Ohmoto, H., et al. "Sulphur isotope evidence for an oxic Archaean atmosphere." *Nature* 442, 908-911 (2006). <https://doi.org/10.1038/nature05044>

34. Farquhar, J., et al. "Isotopic evidence for Mesoarchaeoan anoxia and changing atmospheric sulphur chemistry." *Nature* 449, 706-709 (2007). <https://doi.org/10.1038/nature06202>
35. Brocks, J. J., et al. "Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes." *Science* 285, 1033-1036 (1999). <https://doi.org/10.1126/science.285.5430.1033>
36. Summons, R. E., et al. "2-Methylhopanoids as biomarkers for cyanobacterial oxygenic photosynthesis." *Nature* 400, 554-557 (1999). <https://doi.org/10.1038/23005>
37. Rasmussen, B., et al. "Reassessing the first appearance of eukaryotes and cyanobacteria." *Nature* 455, 1101-1104 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature07381>
38. French, K. L., et al. "Reappraisal of hydrocarbon biomarkers in Archean rocks." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 5915-5920 (2015). <https://doi.org/10.1073/pnas.1419563112>
39. Illing, C. J., et al. "Airborne hydrocarbon contamination from laboratory atmospheres." *Organic Geochemistry* 76, 26-38 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.07.006>
40. Cañadas, F., et al. "Archean oxygen oases driven by pulses of enhanced phosphorus recycling in the ocean." *Nature Geoscience* 18, 430-435 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01678-4>
41. Chen, X., et al. "Transient marine bottom water oxygenation on continental shelves by 2.65 billion years ago." *Nature Geoscience* 18, 423-429 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01681-9>
42. Garvin, J., et al. "Isotopic evidence for an aerobic nitrogen cycle in the latest Archean." *Science* 323, 1045-1048 (2009). <https://doi.org/10.1126/science.1165675>
43. Pellerin, A., et al. "Neoarchaeoan oxygen-based nitrogen cycle en route to the Great Oxidation Event." *Nature* 633, 365-370 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07842-x>
44. Anbar, A. D., et al. "A whiff of oxygen before the Great Oxidation Event?" *Science* 317, 1903-1906 (2007). <https://doi.org/10.1126/science.1140325>
45. Slotznick, S. P., et al. "Reexamination of 2.5-Ga 'whiff' of oxygen interval points to anoxic ocean before GOE." *Science Advances* 8, eabj7190 (2022). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj7190>
46. Anbar, A. D., et al. "Technical comment on 'Reexamination of 2.5-Ga 'whiff' of oxygen interval points to anoxic ocean before GOE'." *Science Advances* 9, eabq3736 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq3736>
47. Slotznick, S. P., et al. "Response to comment on 'Reexamination of 2.5-Ga 'whiff' of oxygen interval points to anoxic ocean before GOE'." *Science Advances* 9, eadg1530 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adg1530>
48. Wong, M. L., et al. "Organic geochemical evidence for life in Archean rocks identified by pyrolysis-GC-MS and supervised machine learning." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2514534122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2514534122>

Declaración

Este documento es una síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares. Juan Seguro es el único autor. Aprobó el texto final y es responsable de su contenido.