

El oxígeno transforma la Tierra

CHO-013 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-013 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Seguro

Idioma: Español

Función del artículo: Columna cronológica

Ventana del artículo: [2.500, 1.800) Ga atrás

Corte de eventos: 14 septiembre 2026 · Corte de búsqueda bibliográfica: 14 septiembre 2026

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

Resumen estructurado

Contexto. Entre 2.500 y 1.800 miles de millones de años atrás, el oxígeno dejó de ser únicamente un subproducto reactivo producido localmente y pasó a ser un componente persistente, aunque variable, del sistema superficial terrestre. Esta transformación alteró la química atmosférica, la meteorización continental, la estructura redox oceánica, los ciclos de nutrientes y el clima.

Pregunta. ¿Qué cambió durante el Gran Evento de Oxidación y sus secuelas, y cómo puede reconstruirse la transición sin tratar distintos proxies, cuencas y compartimentos ambientales como si registraran un único cambio global sincrónico?

Evidencia y método. Esta síntesis mantiene separadas las señales de isótopos de azufre, los minerales detríticos, los registros de cromo y molibdeno, los balances de masa isotópicos de talio y vanadio, la especiación del hierro, los archivos de sulfato y las excursiones de isótopos de carbono hasta que sus escalas espaciales y temporales pueden compararse. Una propuesta publicada sobre capas rojas terrestres se conserva solo como afirmación bibliográfica atribuida porque su evidencia interna no está disponible aquí de forma independiente. Las edades medidas y las observaciones de proxies se separan de las reconstrucciones atmosféricas y los modelos causales. Los límites de 2.500 Ga y 1.800 Ga son fronteras de propiedad, no fechas de eventos afirmadas.

Resultados. El registro disponible respalda una transición prolongada y localmente compleja, no un ascenso instantáneo e irreversible. La desaparición de señales de isótopos de azufre con fraccionamiento independiente de la masa fue asincrónica o episódica entre sucesiones; la acumulación a escala atmosférica, la oxigenación acoplada atmósfera-oceano y la oxigenación persistente del océano superficial no tuvieron por qué ocurrir simultáneamente. La meteorización oxidativa y el reservorio marino de sulfato se expandieron de manera desigual. Las glaciaciones paleoproterozoicas se solapan con el intervalo de oxigenación, pero los mecanismos de colapso del metano, nutrientes, vulcanismo y carbono profundo siguen siendo explicaciones competidoras, no una causa única demostrada. Los carbonatos atribuidos a la excursión Lomagundi-Jatuli registran una perturbación importante del ciclo del carbono, aunque su sincronía global, duración, magnitud y relación con un exceso de oxígeno siguen discutidas. Registros posteriores indican descenso del sulfato y de las condiciones redox en muchas cuencas, con contraejemplos importantes de persistencia.

Conclusión. El oxígeno transformó la Tierra mediante una secuencia de umbrales acoplados pero no idénticos. Para 1.800 Ga, el planeta heredado por CHO-014 tenía una atmósfera permanentemente alterada, océanos estratificados espacialmente y oportunidades biogeoquímicas aerobias ampliadas, pero no mares uniformemente oxigenados ni una trayectoria monótona hacia la vida compleja. El estado de observador sigue limitado a OC1 microbiano, detección ambiental y respuesta regulada; la disponibilidad de oxígeno por sí sola no establece prioridad eucariota ni cognición.

Palabras clave: Gran Evento de Oxidación; Paleoproterozoico; oxígeno; isótopos de azufre; meteorización oxidativa; glaciación Huroniana; excursión Lomagundi-Jatuli; redox oceánico; biogeoquímica aerobia

1. Orientación cronológica y estado heredado

CHO-013 posee el intervalo de la columna cronológica [2.500, 1.800] Ga atrás. Exactamente 2.500 Ga pertenece aquí; exactamente 1.800 Ga y edades más jóvenes pertenecen a CHO-014. Ninguno de los límites se afirma como un evento medido. Las edades en Ga denotan miles de millones de años antes del presente, mientras que las edades radiométricas citadas conservan la precisión y la incertidumbre comunicadas por sus fuentes.

CHO-012 transmite un planeta en el que la fotosíntesis oxigénica operaba en algún lugar, podían desarrollarse ambientes oxigenados locales o transitorios y los gases volcánicos reducidos, el hierro disuelto, las especies de azufre, la materia orgánica y los minerales corticales seguían consumiendo gran parte del oxígeno producido. Cerca de la frontera, el discutido registro del «soplo» de 2.5 Ga ilustra por qué una geoquímica local no puede elevarse sin más a un estado atmosférico global. Una reevaluación de texto completo respalda un océano anóxico para el intervalo estudiado, mientras que la interpretación original, el comentario técnico y la respuesta mantienen una disputa activa de evidencia [1,2,3,4].

La transformación tratada aquí no es, por tanto, el origen de la fotosíntesis oxigénica. Es la reorganización de los balances entre fuentes y sumideros que permitió al oxígeno afectar la atmósfera, el océano superficial, el sistema de meteorización y la biosfera a escalas mayores y más persistentes. La expresión «Gran Evento de Oxidación» se conserva como nombre histórico, no como afirmación de que un único evento instantáneo ocurriera en todas partes.

2. Leer el oxígeno mediante archivos diferentes

Ninguna roca conserva directamente una serie temporal atmosférica global completa. La reconstrucción depende de proxies que responden a procesos y umbrales diferentes. El fraccionamiento independiente de la masa de isótopos de azufre, o S-MIF, surge de la fotoquímica atmosférica y se utiliza habitualmente para seguir una atmósfera y un sistema de ozono con oxígeno muy bajo [45]. Algunos registros arcaicos han respaldado una interpretación óxica [46], mientras que otros se han interpretado como evidencia de anoxia y cambios en la química atmosférica del azufre [47]. Su desaparición puede indicar un cambio de umbral, pero la deposición, la historia de la cuenca, el reciclaje y la escala analítica intervienen entre la producción atmosférica y el sedimento medido.

Otros archivos responden a preguntas diferentes. La piritita detrítica y la uraninita comprueban si minerales reducidos sobrevivieron al transporte continental. Un artículo de 2024 identifica en su título publicado capas rojas terrestres y las presenta como evidencia del GOE [20]; CHO-013 registra esa propuesta atribuida sin adjudicar la evidencia interna inaccesible, el control de edad o la comparación de prioridad. Los sistemas de cromo y molibdeno siguen aspectos de la meteorización oxidativa y el transporte marino. Los balances de masa isotópica de talio y vanadio se han utilizado para inferir cambios en la extensión geográfica o la persistencia de ambientes marinos oxigenados. La especiación del hierro distingue masas de agua ferruginosas, euxínicas y oxigenadas bajo calibraciones declaradas. Los minerales de sulfato y los isótopos de azufre restringen el tamaño y el ciclo del reservorio marino de sulfato. Los isótopos de carbono registran desequilibrio del ciclo del carbono, no directamente la concentración atmosférica de oxígeno.

El acuerdo entre estos archivos es un resultado de síntesis. Un umbral de proxy en una cuenca no puede convertirse sin un modelo en un porcentaje global de oxígeno, un estado del océano completo o una fecha única. A la inversa, el desacuerdo no significa automáticamente que un proxy esté equivocado: la atmósfera, el océano somero, el océano profundo, los continentes y las cuencas restringidas pudieron cambiar en momentos distintos.

3. El Gran Evento de Oxidación como transición prolongada

El trabajo estratigráfico clásico planteó explícitamente el problema como la datación del ascenso del oxígeno atmosférico [5]. Como aquí solo está controlada su manifestación bibliográfica, CHO-013 no utiliza ese artículo para establecer un inicio numérico. Estudios de texto completo describieron una desaparición rápida de S-MIF alrededor de 2.33 Ga [6], mientras que restricciones paleomagnéticas y geocronológicas relacionaron la oxigenación con depósitos glaciares a lo largo de un intervalo más amplio [7]. Estos resultados ayudaron a sustituir una transición sin acotar por intervalos estratigráficos datados, pero no establecieron un inicio globalmente sincrónico único.

Las comparaciones regionales indican que las transiciones S-MIF/S-MDF pueden ser asincrónicas [8]. Las mediciones a escala de grano y a granel muestran que la preservación y la escala analítica pueden complicar trayectorias

aparentemente simples [11], mientras que trabajos posteriores han intentado reconciliar registros divergentes en lugar de asumir que toda diferencia representa una oscilación atmosférica [12]. Nueva geocronología Re-Os de la sucesión del Transvaal proporciona una restricción deposicional de 2443 ± 33 Ma y se ha interpretado como evidencia de episodios discretos de oxigenación, incluidas desapariciones repetidas de S-MIF [13].

La descripción más segura es un intervalo de cruces de umbral, reversiones y expresión regional. Un intervalo publicado de 2501.5 ± 1.7 Ma a 2434 ± 6.6 Ma cruza la frontera de 2.500 Ga por su extremo más antiguo y sigue siendo una restricción estratigráfica específica de la fuente, no un comienzo universal [9]. El valor central 2501.5 Ma se sitúa en CHO-012, mientras que su cola de incertidumbre más joven alcanza 2499.8 Ma y, por tanto, atraviesa el intervalo de propiedad de este artículo.

La permanencia es otra cuestión. La evidencia se ha interpretado como indicativa de un retraso de aproximadamente 200 millones de años entre la oxigenación temprana y la acumulación atmosférica permanente [10]. Síntesis y modelos recientes también describen una fluctuación prolongada en lugar de estabilización inmediata [17,43]. Por ello, «primera acumulación a escala atmosférica», «última recurrencia de S-MIF» y «oxigenación permanente» son objetivos distintos y pueden requerir fechas diferentes.

4. La atmósfera y el océano no se oxigenaron como un único compartimento

El océano estaba estructurado vertical y geográficamente. El oxígeno generado en aguas superficiales podía coexistir con aguas profundas ferruginosas, márgenes euxínicos y una atmósfera próxima a un umbral de proxy. Un estudio de isótopos de talio de 2024 sitúa el inicio de la oxigenación acoplada atmósfera-océano cerca de 2.3 Ga [14]. Un estudio de isótopos de vanadio de 2025 interpreta lutitas de aproximadamente 2.32-2.26 Ga como registro de expansión persistente de condiciones oxigenadas del océano superficial [15]. Son proposiciones relacionadas pero no idénticas: acoplamiento, expansión espacial y persistencia describen rasgos distintos de la transición.

Otros registros conservan suboxia extensa durante el mismo episodio amplio [25]. Datos de texto completo sobre hierro y azufre se han utilizado para reconstruir cambios desde aguas profundas oxigenadas hacia euxinia generalizada entre aproximadamente 2.15 y 2.08 Ga [26]. Un título publicado distinto informa de una transición a un océano sulfhídrico hacia aproximadamente 1.84 Ga [28], pero CHO-013 no utiliza la evidencia interna no disponible para establecer el momento, la extensión o el mecanismo de esa transición. Un contraejemplo de alrededor de 2.0 Ga se ha interpretado como evidencia de océanos todavía oxigenados después del intervalo Lomagundi-Jatuli [27].

El cuadro resultante no es un océano uniformemente oxigenado. Es una topología redox: hábitats superficiales y de plataforma oxigenados que se expanden y contraen sobre aguas profundas que permanecen habitualmente ferruginosas o se vuelven sulfhídricas, con diferencias entre cuencas. La distinción es ecológica además de geoquímica, porque la disponibilidad de oxígeno, nitrato, sulfato, hierro y sulfuro determina qué metabolismos son energéticamente posibles en cada hábitat.

5. Los continentes se meteorizan, el sulfato se expande

Una vez que el oxígeno afectó con mayor persistencia a las superficies continentales, cambiaron los minerales y solutos suministrados al océano. Los isótopos de cromo se han interpretado como registro de fluctuaciones en la oxigenación atmosférica [18]. La oxidación de pirita por bacterias aerobias se ha vinculado al drenaje ácido y a cambios en el aporte de hierro durante el GOE [19]. Un artículo de 2024 se titula «Earth's oldest terrestrial red beds as direct evidence for the Great Oxidation Event ca. 2.3 Ga» [20]. CHO-013 registra esa formulación únicamente como proposición publicada atribuida; no confirma de forma independiente el superlativo, el control de edad, el conjunto de comparación ni la interpretación deposicional. Un registro de molibdeno de lutitas negras se ha interpretado asimismo como evidencia de niveles oscilantes de oxígeno en el Paleoproterozoico temprano [21].

Estos archivos no describen oxidación completa en todas partes. Evidencia sobre minerales detríticos y meteorización de sulfuros publicada en 2025 respalda intervalos prolongados de oxidación incompleta y bajo oxígeno atmosférico durante la transición más amplia [16]. La conclusión adecuada es una expansión heterogénea de la meteorización oxidativa, no una conversión súbita de toda superficie continental a condiciones modernas.

El sulfato marino respondió a la meteorización y al ciclo del azufre. Evaporitas próximas a 2.0 Ga conservan evidencia de un sistema de sulfato sustancialmente modificado [22]. Registros de múltiples isótopos de azufre indican expansión del reservorio de sulfato del agua de mar cerca del GOE y contracción cerca del final del intervalo Loma-

gundi [23,24]. La abundancia de sulfato importa porque conecta la oxidación continental con la reducción microbiana de sulfato, la producción de sulfuro, el enterramiento de pirita y la estructura redox oceánica. Sin embargo, el tamaño del reservorio, la velocidad de su renovación y su representatividad espacial siguen dependiendo del modelo.

6. Glaciación durante una atmósfera cambiante

El Paleoproterozoico temprano incluye glaciaciones severas tradicionalmente agrupadas dentro del Huroniano. Las correlaciones entre los supergrupos Transvaal y Huroniano utilizan capas volcánicas datadas y estratigrafía para relacionar depósitos glaciares entre cratones [38]. Trabajos de isótopos de azufre y geocronología sitúan la oxigenación a escala atmosférica antes de al menos un gran intervalo paleoproterozoico de «Tierra bola de nieve» [9]. La secuencia es científicamente importante, pero el orden temporal por sí solo no identifica una única causa.

Una hipótesis influyente propone que la fotosíntesis oxigénica elevó el oxígeno, oxidó el metano atmosférico y debilitó el calentamiento de efecto invernadero lo suficiente para desencadenar glaciación global [37]. Las síntesis de glaciación global amplían las consecuencias climáticas y biológicas propuestas [39]. Sin embargo, la metanogénesis pudo persistir mediante retroalimentaciones de meteorización de sulfuros [40], mientras que el reciclaje de nutrientes, el forzamiento volcánico, el albedo y el ciclo profundo del carbono ofrecen controles adicionales [41,42].

CHO-013 trata por tanto el colapso del metano como una familia de modelos, no como un único desencadenante demostrado. El intervalo de oxigenación y las glaciaciones se solapan; su conexión causal depende de los flujos de fuentes y sumideros, el dióxido de carbono de fondo, la producción de metano, la bruma, la retroalimentación hielo-albedo y el orden de los eventos. Tampoco denomina este artículo al episodio paleoproterozoico primera glaciación de la Tierra: la evidencia glacial candidata más antigua pertenece a CHO-012.

7. El problema Lomagundi-Jatuli

El título publicado de Karhu y Holland vincula los isótopos de carbono con el ascenso del oxígeno atmosférico [29]; CHO-013 conserva ese encuadre histórico sin utilizar el texto interno no disponible para establecer una historia cuantitativa del oxígeno. Un segundo título publicado presenta explícitamente «oxygen overshoot and recovery» como modelo para el Paleoproterozoico temprano [30]. Aquí se conserva solo como familia de modelos atribuida, no como evidencia interna verificada de forma independiente. Los registros de texto completo de carbono y azufre, los cambios en el sulfato marino y la expansión del ciclo aerobio del hierro aportan evidencia separada de una reorganización importante del sistema terrestre [23,33-35].

La aparente simplicidad de una única curva global está ahora cuestionada directamente. Una síntesis de aproximadamente 9 400 mediciones pone en duda que la excursión Lomagundi-Jatuli fuera globalmente sincrónica y destaca la expresión local, la completitud estratigráfica y la alteración deposicional [34]. Los estudios a nivel de muestra también muestran que la preservación local y los procesos posteriores pueden influir en la señal de carbono registrada [49]. Una compilación de 2026 revisa el momento, la magnitud y la descomposición global frente a local [35]. Un estudio independiente de 2025 informa de una edad de isócrona Pb-Pb de 2194 ± 5 Ma para lutitas negras de la Formación FB de Franceville, en Gabón, dentro de una reconstrucción de forzamiento volcánico [36]; ese valor fecha un componente de ese modelo, no la excursión en su conjunto.

En consecuencia, CHO-013 no convierte un valor positivo de carbonatos en una única curva global de oxígeno atmosférico. La excursión se conserva como fenómeno del ciclo del carbono activamente discutido cuyo inicio, duración, magnitud y sincronía siguen dependiendo de la fuente y de la cuenca. Exceso de oxígeno, entradas variables de carbono, reservorios autigénicos, procesos locales, retroalimentaciones de nutrientes, forzamiento volcánico y desgasificación profunda siguen siendo explicaciones competidoras o potencialmente interactivas.

8. Declive, recuperación y fin de un ascenso simple

Si el oxígeno aumentó durante el GOE, no permaneció simplemente en un máximo. Los registros de azufre indican contracción del reservorio marino de sulfato cerca de aproximadamente 2.05 Ga [23,24]. Estudios de cromo, especiación del hierro y redox de cuencas se han interpretado como registro de descenso de la oxidación superficial y euxinia más extensa después del intervalo positivo de isótopos de carbono [18,26,28]. La oxidación de materia orgánica durante el evento Shunga añade otra perturbación importante del ciclo del carbono [31].

Al mismo tiempo, la evidencia de algunas sucesiones respalda la persistencia de una oxigenación sustancial [27]. Estas observaciones pueden coexistir si el oxígeno atmosférico, el sulfato marino y el redox oceánico variaron entre compartimentos y cuencas. «Declive post-Lomagundi» es, por tanto, una síntesis comparativa, no un retorno al estado arcaico ni evidencia de que la fotosíntesis oxigénica se detuviera.

Un estudio con isótopos triples de oxígeno y azufre se ha modelizado como indicativo de un gran descenso de productividad cerca de 2.018 Ga [32]. El resultado es un cambio inferido en la productividad primaria global, no una extinción masiva observada directamente ni un censo taxonómico. Esta distinción impide que un modelo de flujo biogeoquímico se convierta silenciosamente en una afirmación sobre desaparición de organismos.

9. Se expande la biogeoquímica aerobia

El oxígeno alteró metabolismos antes de producir hábitats uniformemente óxicos. La evidencia de isótopos de nitrógeno se ha interpretado como indicativa de disponibilidad generalizada de nitrato y ciclo aerobio del nitrógeno cerca de 2.31 Ga [44]. Los sistemas de cromo, molibdeno, selenio, hierro y azufre también registran cambios en meteorización oxidativa y redox marino bajo sus respectivas calibraciones [18,21,25,26,33]. Estos cambios ampliaron las oportunidades ecológicas para la respiración y los ciclos oxidativos de nutrientes, conservando a la vez nichos anóxicos.

La acumulación de oxígeno refleja un balance, no solo producción. Entre los mecanismos candidatos figuran el enterramiento de carbono reducido y pirita, cambios en los flujos de reductores volcánicos y metamórficos, reciclaje de fósforo, retroalimentaciones de meteorización y ciclo profundo del carbono [30,37,40-43]. Ningún mecanismo único se trata aquí como suficiente. Un planeta puede albergar fotosíntesis oxigénica durante un intervalo prolongado mientras los sumideros impiden acumulación a escala atmosférica, y más tarde puede conservar oxígeno aunque la productividad fluctúe si cambian los sumideros.

El GOE transformó en consecuencia la habitabilidad al aumentar la disponibilidad espacial y temporal de metabolismo aerobio de alta energía y al modificar los ciclos de nutrientes y metales traza. No convirtió todos los ambientes en óxicos. Los metabolismos anaerobios siguieron siendo esenciales en sedimentos, aguas euxínicas, cuencas ferruginosas y el interior de comunidades microbianas.

10. Capacidades de observador presentes

CHO utiliza «observador» como categoría biológica operativa, no como afirmación de que la observación sea necesaria para la realidad física. La única capacidad asignada en CHO-013 es OC1: detección ambiental evolucionada acoplada a respuesta regulada. Las poblaciones microbianas pueden detectar gradientes redox, oxígeno, luz, nutrientes y especies tóxicas y modificar en consecuencia su movimiento, expresión génica o metabolismo.

Ningún mecanismo sensorial concreto está fosilizado directamente en una roca paleoproterozoica. OC1 es, por tanto, una inferencia condicional a nivel de linaje a partir de sistemas vivos y de la necesidad ecológica de persistir en ambientes variables. La expansión de hábitats oxigenados amplía los gradientes ambientales a los que los organismos podían responder; no establece por sí sola cognición, consciencia, multicelularidad ni identidad eucariota.

La prioridad de organismos se excluye deliberadamente. Eucariotas, endosimbiosis y organización compleja pertenecen a CHO-014, incluida la evidencia anterior a la frontera de la columna de 1.800 Ga bajo la superposición temática de ese artículo. CHO-013 aporta únicamente contexto ambiental.

11. Evidencia, datación y límites de resolución

Las edades radiométricas pueden fechar capas de ceniza volcánica, intervalos deposicionales o eventos posteriores; su relación geológica con el sedimento portador del proxy debe comprobarse antes de que restrinjan la oxigenación. Una edad central y su incertidumbre analítica no datan automáticamente una transición atmosférica global. El caso de frontera 2501.5 ± 1.7 Ma demuestra por qué los intervalos de incertidumbre deben manejarse explícitamente en lugar de redondearse hasta asignarlos a un propietario.

Los registros de proxies también tienen soportes espaciales diferentes. El registro publicado que denomina «terrestres» a las discutidas capas rojas se utiliza aquí únicamente como propuesta sobre la superficie continental, nunca como medición de oxígeno marino [20]. Una lutita de plataforma no representa todo el océano. La desaparición de S-MIF no es un porcentaje directo de oxígeno. Una excursión de isótopos de carbono no es un medidor de oxígeno.

Los modelos pueden conectar estas observaciones, pero entonces los supuestos del modelo pasan a formar parte de la afirmación.

Se consultó texto completo portador de afirmaciones para 37 de las 49 fuentes registradas; el acceso a las 12 restantes se limitó a resúmenes, metadatos o páginas bibliográficas. Esos registros limitados respaldan únicamente las proposiciones explícitamente atribuidas que contienen y no implicaciones claramente acotadas. No aportan métodos no disponibles, detalles numéricos, conjuntos de comparación ni afirmaciones causales del cuerpo del texto.

12. Contingencia y contemporáneos

La transición no era inevitable. Los ecosistemas productores de oxígeno podían quedar limitados por nutrientes o geografía. Gases volcánicos reducidos, hierro ferroso, sulfuro y minerales corticales podían consumir oxígeno más rápido de lo que se acumulaba. Las retroalimentaciones del metano podían calentar o enfriar el planeta según producción, oxidación y bruma. El enterramiento orgánico podía elevar el oxígeno neto, mientras que una oxidación posterior podía revertir parte de ese efecto.

Existían mundos diferentes al mismo tiempo: superficies glaciadas y aguas abiertas, ambientes terrestres oxidantes y poros sedimentarios reducidos, plataformas oxigenadas y cuencas profundas ferruginosas o euxínicas. La oxigenación local podía expandirse mientras otra cuenca conservaba sedimento con S-MIF. Una etiqueta global no debe borrar estos contemporáneos.

La preservación también fue contingente. Hiatos, metamorfismo, alteración, autigénesis y supervivencia desigual de cuencas configuran la cronología aparente. La disputa de Lomagundi muestra que una curva compuesta suave puede ocultar estratigrafía local y secciones incompletas. El registro rocoso es un archivo filtrado de un sistema terrestre heterogéneo.

13. Interpretaciones competidoras y preguntas no resueltas

Persisten varias preguntas:

1. ¿Qué sucesión datada restringe mejor el primer cruce de umbral a escala atmosférica y hasta qué punto fue globalmente sincrónico?
2. ¿Cómo deben separarse las reversiones regionales de S-MIF y la preservación a escala de grano de verdaderas oscilaciones atmosféricas?
3. ¿Cuándo se hicieron geográficamente extendidas y persistentes las condiciones oxigenadas del océano superficial?
4. ¿Qué proxies de meteorización continental pueden relacionarse cuantitativamente con el oxígeno atmosférico y a qué escala espacial?
5. ¿Cómo se relacionaron causalmente, si es que lo hicieron, la oxigenación y las glaciaciones paleoproterozoicas?
6. ¿Fue la señal Lomagundi-Jatuli una excursión globalmente sincrónica, excursiones regionales solapadas o una combinación de procesos locales y globales?
7. ¿Qué magnitud tuvo cualquier exceso de oxígeno y qué mecanismos de carbono, azufre, nutrientes, vulcanismo o Tierra profunda lo produjeron?
8. ¿Hasta qué punto disminuyeron el oxígeno y el sulfato después de la excursión y por qué algunas cuencas conservaron condiciones más oxigenadas?
9. ¿Qué cambios biológicos siguieron a la expansión de hábitats aerobios sin importar prioridad de organismos desde CHO-014?

Una revisión de 2026 es útil para cartografiar la terminología y las disputas actuales [48], pero la recencia y la amplitud no permiten que cierre afirmaciones cuantitativas primarias o de prioridad. Estas siguen vinculadas a la evidencia subyacente.

14. Clases de afirmaciones, fronteras y exclusiones

Medido u observado: edades radiométricas, relaciones estratigráficas, razones isotópicas, supervivencia de minerales, abundancias elementales e indicadores sedimentarios de redox informados por los estudios de texto completo citados. El artículo sobre capas rojas está representado únicamente por su proposición bibliográfica publicada y no se incluye en esta clase de medido u observado.

Reconstruido a partir de evidencia: cruces de umbral a escala atmosférica, extensión espacial del agua oxigenada, meteorización oxidativa, expansión y contracción del reservorio de sulfato y cambios en los ciclos biogeoquímicos.

Dependiente del modelo: porcentajes de oxígeno, definiciones de estado permanente, glaciación impulsada por metano, balances fuente-sumidero, exceso de oxígeno, magnitud de productividad y forzamiento de carbono profundo.

Activamente discutido: sincronía y ritmo de la pérdida de S-MIF; momento de la oxigenación atmosférica permanente; acoplamiento espacial de atmósfera y océano; sincronía global, duración y magnitud de la excursión Lomagundi-Jatuli; y magnitud y causa del declive redox posterior a la excursión.

Especulativo o abierto: un desencadenante único del GOE, una única curva atmosférica global derivada de valores locales de carbonatos, consecuencias taxonómicas directas de la disponibilidad de oxígeno y cualquier afirmación de cognición o consciencia paleoproterozoicas.

CHO-012 posee la evidencia ambiental anterior a 2.500 Ga excepto cuando un intervalo de incertidumbre atraviesa la frontera. CHO-013 posee las consecuencias sobre atmósfera, océano, meteorización, glaciación y ciclo del carbono dentro de [2.500,1.800) Ga. CHO-014 posee exactamente 1.800 Ga y edades más jóvenes y todas las prioridades de eucariotas, endosimbiosis y organización compleja bajo su superposición autorizada.

15. Estado de cierre transmitido a CHO-014

En el límite exclusivo de 1.800 Ga, el oxígeno había cambiado permanentemente el sistema superficial terrestre, pero el estado heredado no era moderno. El oxígeno atmosférico había cruzado umbrales que alteraron la fotoquímica del azufre y la meteorización continental. Las aguas superficiales y de plataforma podían estar persistentemente oxigenadas en algunas regiones, mientras que los océanos profundos seguían siendo habitualmente ferruginosos o euxínicos. Los ciclos marinos de sulfato y nutrientes se habían expandido y contraído. Las glaciaciones y las perturbaciones del ciclo del carbono demostraban un fuerte acoplamiento entre biología, atmósfera, océanos, continentes y Tierra sólida.

El resultado central no es una única línea ascendente. Es un nuevo régimen planetario capaz de sostener oxígeno durante largos intervalos mientras conserva grandes reservorios anóxicos y una marcada variabilidad espacial. Este mundo de redox mixto proporciona a CHO-014 oportunidad y restricción ambientales. No predetermina la aparición de eucariotas, la endosimbiosis, la multicelularidad ni la consciencia posterior.

Referencias

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. Bekker, A., et al. "Dating the rise of atmospheric oxygen." *Nature* 427, 117–120 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature02260>
6. Luo, G., et al. "Rapid oxygenation of Earth's atmosphere 2.33 billion years ago." *Science Advances* 2, e1600134 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600134>
7. Gumsley, A. P., et al. "Timing and tempo of the Great Oxidation Event." *PNAS* 114, 1811–1816 (2017). <https://doi.org/10.1073/pnas.1608824114>
8. Philippot, P., et al. "Globally asynchronous sulphur isotope signals require re-definition of the Great Oxidation Event." *Nature Communications* 9, 2245 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04621-x>
9. Warke, M. R., et al. "The Great Oxidation Event preceded a Paleoproterozoic 'snowball Earth'." *PNAS* 117, 13314–13320 (2020). <https://doi.org/10.1073/pnas.2003090117>
10. Poulton, S. W., et al. "A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation." *Nature* 592, 232–236 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03393-7>
11. Izon, G., et al. "Bulk and grain-scale minor sulfur isotope data reveal complexities in the dynamics of Earth's oxygenation." *PNAS* 119, e2025606119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2025606119>

12. Uveges, B. T., et al. "Reconciling discrepant minor sulfur isotope records of the Great Oxidation Event." *Nature Communications* 14, 279 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35820-w>
13. Millikin, A. E. G., et al. "A new Re-Os age constraint informs the dynamics of the Great Oxidation Event." *Geology* 52, 857–862 (2024). <https://doi.org/10.1130/G52481.1>
14. Ostrander, C. M., et al. "Onset of coupled atmosphere–ocean oxygenation 2.3 billion years ago." *Nature* 631, 335–339 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07551-5>
15. Heard, A. W., et al. "Onset of persistent surface ocean oxygenation during the Great Oxidation Event." *Nature Communications* 16, 10190 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66323-5>
16. Goto, K. T., et al. "Incomplete oxidative sulfide weathering and low atmospheric oxygen levels during the Great Oxidation Event." *Communications Earth & Environment* 6, 906 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02841-w>
17. Wang, H., et al. "Two-billion-year transitional oxygenation of the Earth's surface." *Nature* 645, 665–671 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09471-4>
18. Frei, R., et al. "Fluctuations in Precambrian atmospheric oxygenation recorded by chromium isotopes." *Nature* 461, 250–253 (2009). <https://doi.org/10.1038/nature08266>
19. Konhauser, K. O., et al. "Aerobic bacterial pyrite oxidation and acid rock drainage during the Great Oxidation Event." *Nature* 478, 369–373 (2011). <https://doi.org/10.1038/nature10511>
20. Shawwa, N. A., et al. "Earth's oldest terrestrial red beds as direct evidence for the Great Oxidation Event ca. 2.3 Ga." *Precambrian Research* 409, 107423 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107423>
21. Asael, D., et al. "Molybdenum record from black shales indicates oscillating atmospheric oxygen levels in the early Paleoproterozoic." *American Journal of Science* 318, 275–299 (2018). <https://doi.org/10.2475/03.2018.01>
22. Blättler, C. L., et al. "Two-billion-year-old evaporites capture Earth's great oxidation." *Science* 360, 320–323 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar2687>
23. Planavsky, N. J., et al. "Sulfur record of rising and falling marine oxygen and sulfate levels during the Lomagundi event." *PNAS* 109, 18300–18305 (2012). <https://doi.org/10.1073/pnas.1120387109>
24. Scott, C., et al. "Pyrite multiple-sulfur isotope evidence for rapid expansion and contraction of the early Paleoproterozoic seawater sulfate reservoir." *Earth and Planetary Science Letters* 389, 95–104 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.12.010>
25. Kipp, M. A., et al. "Selenium isotopes record extensive marine suboxia during the Great Oxidation Event." *PNAS* 114, 875–880 (2017). <https://doi.org/10.1073/pnas.1615867114>
26. Canfield, D. E., et al. "Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of Earth's atmosphere." *PNAS* 110, 16736–16741 (2013). <https://doi.org/10.1073/pnas.1315570110>
27. Mänd, K., et al. "Palaeoproterozoic oxygenated oceans following the Lomagundi–Jatuli Event." *Nature Geoscience* 13, 302–306 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0558-5>
28. Poulton, S. W., Fralick, P. W. & Canfield, D. E. "The transition to a sulphidic ocean ~ 1.84 billion years ago." *Nature* 431, 173–177 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature02912>
29. Karhu, J. A. & Holland, H. D. "Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen." *Geology* 24, 867–870 (1996). [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024%3C0867:CIATRO%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024%3C0867:CIATRO%3E2.3.CO;2)
30. Bekker, A. & Holland, H. D. "Oxygen overshoot and recovery during the early Paleoproterozoic." *Earth and Planetary Science Letters* 317–318, 295–304 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.012>
31. Kump, L. R., et al. "Isotopic evidence for massive oxidation of organic matter following the Great Oxidation Event." *Science* 334, 1694–1696 (2011). <https://doi.org/10.1126/science.1213999>
32. Hodgskiss, M. S. W., et al. "A productivity collapse to end Earth's Great Oxidation." *PNAS* 116, 17207–17212 (2019). <https://doi.org/10.1073/pnas.1900325116>
33. Ajagunjeun, A. A., et al. "Expansion of the aerobic iron biogeochemical cycle during the Paleoproterozoic Lomagundi event." *Communications Earth & Environment* 6, 113 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02106-6>
34. Hodgskiss, M. S. W., Crockford, P. W. & Turchyn, A. V. "Deconstructing the Lomagundi–Jatuli Carbon Isotope Excursion." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 51, 301–330 (2023). <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-031621-071250>
35. Edmonds, S. & Dyer, B. "Timing and magnitude of the Lomagundi–Jatuli carbon isotope excursion." *PNAS* 123, e2512767123 (2026). <https://doi.org/10.1073/pnas.2512767123>
36. Blichert-Toft, J., et al. "Volcanic forcing of the Lomagundi–Jatuli carbon isotope excursion." *PNAS* 122, e2519431122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2519431122>
37. Kopp, R. E., et al. "The Paleoproterozoic snowball Earth: A climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis." *PNAS* 102, 11131–11136 (2005). <https://doi.org/10.1073/pnas.0504878102>
38. Rasmussen, B., Bekker, A. & Fletcher, I. R. "Correlations of Paleoproterozoic glaciations based on U-Pb zircon ages for tuff beds in the Transvaal and Huronian Supergroups." *Earth and Planetary Science Letters* 382, 173–180 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.037>
39. Kirschvink, J. L., et al. "Paleoproterozoic snowball Earth: extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences." *PNAS* 97, 1400–1405 (2000). <https://doi.org/10.1073/pnas.97.4.1400>

40. Wang, S.-J., et al. "Methanogenesis sustained by sulfide weathering during the Great Oxidation Event." *Nature Geoscience* 12, 296–300 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0320-z>
 41. Eguchi, J., Seales, J. & Dasgupta, R. "Great Oxidation and Lomagundi events linked by deep cycling and enhanced degassing of carbon." *Nature Geoscience* 13, 71–76 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0492-6>
 42. Alcott, L. J., et al. "Earth's Great Oxidation Event facilitated by the rise of sedimentary phosphorus recycling." *Nature Geoscience* 15, 210–215 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00906-5>
 43. Wogan, N. F., et al. "Rapid timescale for an oxic transition during the Great Oxidation Event and the instability of low atmospheric O₂." *PNAS* 119, e2205618119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2205618119>
 44. Zerkle, A. L., et al. "Onset of the aerobic nitrogen cycle during the Great Oxidation Event." *Nature* 542, 465–467 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature20826>
 45. Farquhar, J., Bao, H. & Thiemens, M. "Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle." *Science* 289, 756–758 (2000). <https://doi.org/10.1126/science.289.5480.756>
 46. Ohmoto, H., et al. "Sulphur isotope evidence for an oxic Archaean atmosphere." *Nature* 442, 908–911 (2006). <https://doi.org/10.1038/nature05044>
 47. 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>
 48. Crockford, P. W., et al. "Revisiting the greatness of Earth's great oxidation." *Communications Earth & Environment* 7, 348 (2026). <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03518-8>
 49. Santos, F. H., et al. "The origin and fate of organic carbon in graphite–manganese bearing rocks and implications for the Lomagundi–Jatuli Event." *Scientific Reports* 14, 21191 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71877-3>
-

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.