

El sistema terrestre hadeano

CHO-009 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-009 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Segurola

Idioma: Español

Función del artículo: Superposición

Ventana del artículo: [S07, 4.000 Ga atrás)

Corte de eventos: 11 septiembre 2026 · Corte de búsqueda bibliográfica: 12 septiembre 2026

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

Resumen estructurado

Contexto. La Tierra hadeana se ensambló, diferenció, bombardeó, enfrió, volvió a fundirse, desgasificó y fue alterada por agua. Su archivo superviviente es fragmentario y está fuertemente filtrado.

Pregunta. ¿Qué pueden establecer los granos minerales, los sistemas isotópicos, los modelos de impactos y la física planetaria comparada sobre la Tierra entre la formación del Sistema Solar y hace 4.000 Ga?

Evidencia y método. La síntesis distingue las mediciones directas de circones y razones isotópicas de las reconstrucciones de corteza, océanos, atmósfera, impactos y regímenes tectónicos. Incorpora resultados disponibles hasta el corte de la edición, incluidos estudios de circones de 2025 y 2026.

Resultado. La Tierra no permaneció uniformemente fundida. Circones próximos a 4.4 Ga conservan evidencia interpretada como corteza diferenciada e interacción con agua a baja temperatura. Los proxies de redox magmático restringen, pero no especifican de forma única, la composición atmosférica. Los impactos calentaron, excavaron, mezclaron y enterraron repetidamente la corteza sin demostrar un único cataclismo terminal. El comportamiento tectónico fue probablemente heterogéneo en espacio y tiempo, en lugar de globalmente idéntico al sistema moderno de placas.

Conclusión. El Hádico proporcionó interfaces persistentes agua-roca-atmósfera y fuertes gradientes de energía, pero la habitabilidad fue parcheada y los mecanismos del origen de la vida siguen siendo dominio exclusivo de CHO-010. El estado del observador es N0.

Palabras clave: Hádico; circón; corteza temprana; océano; atmósfera; impactos; tectónica

1. Una historia reconstruida a partir de supervivientes

CHO-009 se solapa con CHO-008 desde S07 hasta hace 4.000 Ga, pero solo es responsable del sistema terrestre hadeano en evolución después del ensamblaje planetario inicial. No vuelve a apropiarse de la acreción ni de la formación de la Luna, y no explica redes de reacciones prebióticas.

El archivo está sesgado. La fusión posterior, el metamorfismo, la erosión, la sedimentación, la subducción y los impactos destruyeron o transformaron la mayor parte de los materiales tempranos. El circón es especialmente valioso porque puede conservar edades U-Pb e información química a través de ciclos geológicos posteriores. Sin embargo, un grano detrítico está separado de su roca y entorno originales. Toda reconstrucción global contiene, por tanto, inferencia.

2. Enfriamiento tras la acreción y los grandes impactos

La acreción y el acontecimiento formador de la Luna generaron fusión y vaporización extensas. Un océano de magma pierde calor a través de una atmósfera cuya opacidad, composición, nubes y tasa de escape afectan al enfriamiento. La cristalización separa minerales y fundido, mientras que la diferenciación núcleo-manto y el vuelco interno redistribuyen calor y elementos.

La expresión «Tierra con océano de magma» describe episodios y modelos, no todo el Hádico. Un circón con una edad validada internamente cercana a 4.4 Ga tuvo que cristalizar en material silicatado diferenciado después de al menos un enfriamiento local. La tomografía por sonda atómica ha confirmado dominios de edad antiguos en un circón de Jack Hills y, al mismo tiempo, ha revelado redistribución posterior a nanoescala [3]. Preservación y alteración coexisten en el mismo objeto.

3. Corteza anterior al registro rocoso superviviente

Los circones detríticos de Jack Hills proporcionaron evidencia de rocas fuente evolucionadas hacia 4.4 Ga [1]. Sus elementos traza, isótopos de hafnio, isótopos de oxígeno, inclusiones y temperaturas de cristalización se han utilizado para inferir diferenciación y reciclaje cortical.

Estas señales no exigen continentes de tamaño, espesor o contexto tectónico modernos. «Corteza continental» puede referirse a material composicionalmente evolucionado, no a una masa terrestre cartografiada. Los fundidos fuente pudieron formarse por varios procesos, y la alteración posterior puede afectar a inclusiones o dominios isotópicos.

Hopkins y colaboradores infirieron flujo de calor relativamente bajo y condiciones similares a *underthrusting* para un subconjunto de circones con inclusiones [5]. La comparación con márgenes convergentes modernos es sugerente, pero unas condiciones locales de presión-temperatura no establecen tectónica de placas global.

4. Evidencia de una hidrosfera temprana

Las mediciones de isótopos de oxígeno en circones antiguos se han interpretado como exigencia de rocas fuente alteradas por agua líquida a bajas temperaturas superficiales antes de volver a fundirse [2]. Junto con las composiciones evolucionadas de los circones, esto respalda un ciclo hidrológico mucho más temprano que el registro extenso de rocas más antiguas conservado.

La inferencia está a un paso de distancia de un océano. Los circones no contienen un medidor global del nivel del mar. El agua líquida pudo ocupar océanos, lagos, sistemas hidrotermales, espacios porosos o reservorios superficiales transitorios. Presión atmosférica, fracción continental, volumen oceánico y distribuciones de temperatura están débilmente restringidos.

La persistencia de agua tampoco implica habitabilidad uniforme. Grandes impactos pueden vaporizar reservorios superficiales regionales o globales, mientras que la condensación y la circulación subsuperficial restauran ambientes líquidos. La historia relevante es una distribución cambiante de nichos, no un interruptor binario entre lava estéril y océano moderno.

5. Atmósfera y estado redox

La atmósfera más temprana combinó material liberado por fundidos, aportado por impactores, intercambiado con océanos y corteza y perdido al espacio. La radiación ultravioleta y la química de impactos alteraron los inventarios moleculares. No sobrevive ninguna muestra directa de aire hadeano.

El comportamiento del cerio en circón se ha calibrado como proxy de fugacidad de oxígeno del magma. Trail y colaboradores infirieron fundidos hadeanos próximos a un estado redox comparable al tampón fayalita-magnetita-cuarzo y argumentaron que la desgasificación hadeana tardía no tenía por qué producir una atmósfera fuertemente reductora [4]. La inferencia depende de calibración, identificación del fundido fuente, temperatura y de cómo equilibraron los gases volcánicos durante el ascenso.

Un proxy redox del manto no determina por sí solo la composición atmosférica. Presión, inventario de volátiles, intercambio oceánico, fotoquímica, escape y aportes de impactos también importan. CHO rechaza, por tanto, tanto una atmósfera uniformemente metano-amoniaco como la afirmación de que ya existían condiciones atmosféricas modernas.

6. Impactos como destrucción y transformación

Los planetesimales residuales siguieron golpeando la Tierra y la Luna. Los impactos excavaron y fundieron corteza, generaron sistemas hidrotermales, alteraron la atmósfera, redistribuyeron volátiles y en ocasiones esterilizaron re-

giones expuestas. Sus efectos dependían del tamaño, velocidad y ángulo del proyectil, profundidad del océano y estado de atmósfera y corteza.

El trabajo numérico indica que los impactos pudieron mezclar y enterrar repetidamente la corteza temprana [6]. Esto ayuda a explicar el pobre registro rocoso hadeano, pero depende del modelo. El calentamiento por impacto puede destruir hábitats superficiales a la vez que crea circulación subsuperficial duradera y gradientes químicos después del enfriamiento.

Las edades de muestras lunares respaldaron en el pasado un «bombardeo intenso tardío» concentrado cerca de 3.9 Ga. El análisis estadístico de distribuciones de edades y sesgos de muestreo debilita la inferencia de un único pico a escala de todo el Sistema Solar [7]. El flujo de impactos cambió con seguridad; su curva exacta y si contenía un cataclismo estrecho siguen sin resolverse.

7. Regímenes tectónicos sin un falso binario

La tectónica de placas moderna incluye placas rígidas, expansión, subducción, movimiento transformante y reciclaje global. La litosfera hadeana, más caliente, delgada y repetidamente impactada, no tenía por qué operar de manera idéntica. Entre las alternativas propuestas están tapas estancadas, vuelcos episódicos, subducción local, reciclaje por goteo, regímenes dominados por plumas y comportamiento de tapa móvil.

Un estudio de circones de 2026 concluyó que regímenes de tapa móvil y tapa estancada pudieron coexistir en la Tierra hadeana [9]. Es un modelo de trabajo mejor que exigir una única fecha global de inicio para la tectónica de placas. También concuerda con un planeta heterogéneo en el que las historias térmicas, composicionales y de impactos diferían localmente.

Hopkins y colaboradores infirieron bajo flujo de calor e interacciones similares a *underthrusting* a partir de inclusiones minerales y termometría de elementos traza en circones de más de 4 Ga [5]. Houchin y colaboradores utilizaron estructura de absorción de rayos X cerca del borde del uranio para argumentar condiciones redox magmáticas cercanas a las modernas hacia 4.15 Ga y comportamiento de tapa móvil para el Arcaico temprano [10]. Ambas son reconstrucciones locales basadas en proxies. Ninguna demuestra por sí sola que ya operara la red global moderna de placas.

Kirkland y colaboradores propusieron una transición cerca de 3.9 Ga desde un magmatismo cortical fuertemente afectado por impactos hacia un impulso predominantemente interno [8]. El resultado marca una transición modelizada a nivel poblacional, no un cese instantáneo y mundial de la influencia de impactos.

8. Gradientes de energía y químicos

El Hádico ofrecía luz solar, radiación ultravioleta, calentamiento por impactos, calor radiactivo, vulcanismo, circulación hidrotermal, ciclos húmedo-seco, superficies minerales, contrastes redox y gradientes de pH. Son posibles impulsores de química. Enumerarlos no establece qué vía condujo a la vida.

La compatibilidad ambiental debe evaluarse de forma conjunta. Una reacción demostrada bajo una condición de laboratorio puede requerir materias primas o concentraciones no disponibles en el mismo entorno natural. A la inversa, un promedio global hostil puede coexistir con ambientes locales e intermitentes adecuados para química compleja.

9. Clases de evidencia

Clase	Uso en CHO-009
E1 medido	Edades de circones, razones isotópicas, elementos traza, inclusiones
E2 reconstruido	Rocas fuente, interacción con agua, historias de impactos
E3 dependiente de modelo	Atmósfera, enfriamiento de océano de magma, regímenes tectónicos
E4 controvertido	Inicio global de la tectónica de placas, cataclismo tardío estrecho
E5 especulativo	Estado superficial global único o afirmaciones biológicas no observadas

10. Estado del observador y ausencia de teleología

El estado del observador es N0. Los minerales conservan estados físicos, pero la preservación no es observación por un agente. Los científicos posteriores seleccionan los raros granos que sobrevivieron y reconstruyen el planeta ausente mediante instrumentos calibrados y modelos.

Agua, química del carbono y gradientes de energía no garantizaban la vida. El Hádico es relevante porque los observadores posteriores descendieron de vida terrestre, no porque el planeta estuviera físicamente dirigido hacia ellos.

11. Estado final y transición

Hace 4.000 Ga, la Tierra no puede representarse mediante una única escena global. Poseía reservorios corticales diferenciados, interacción con agua líquida, intercambio atmósfera-océano-roca, impactos continuos y comportamiento tectónico y térmico heterogéneo. El registro es escaso, pero incompatible con un océano de magma global ininterrumpido.

CHO-010 se superpone entre hace 4.400 y 3.500 Ga y pregunta cómo la geoquímica no viva pudo generar compartimentos, herencia, catálisis y evolución. CHO-011 pone a prueba por separado las afirmaciones sobre la evidencia más antigua de vida real. CHO-012 retoma la columna cronológica hace 4.000 Ga.

Referencias

1. Wilde, S. A., et al. "Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago." *Nature* 409, 175–178 (2001). <https://doi.org/10.1038/35051550>
2. Mojzsis, S. J., Harrison, T. M., and Pidgeon, R. T. "Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago." *Nature* 409, 178–181 (2001). <https://doi.org/10.1038/35051557>
3. Valley, J. W., et al. "Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography." *Nature Geoscience* 7, 219–223 (2014). <https://doi.org/10.1038/ngeo2075>
4. Trail, D., Watson, E. B., and Tailby, N. D. "The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere." *Nature* 480, 79–82 (2011). <https://doi.org/10.1038/nature10655>
5. Hopkins, M., Harrison, T. M., and Manning, C. E. "Low heat flow inferred from >4 Gyr zircons suggests Hadean plate boundary interactions." *Nature* 456, 493–496 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature07465>
6. Marchi, S., et al. "Widespread mixing and burial of Earth's Hadean crust by asteroid impacts." *Nature* 511, 578–582 (2014). <https://doi.org/10.1038/nature13539>
7. Boehnke, P., and Harrison, T. M. "Illusory Late Heavy Bombardments." *PNAS* 113, 10802–10806 (2016). <https://doi.org/10.1073/pnas.1611535113>
8. Kirkland, C. L., et al. "An exogenic to endogenic thermal transition on Earth 3.9 billion years ago." *Communications Earth & Environment* 6, 587 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02575-9>
9. Valley, J. W., et al. "Contemporaneous mobile- and stagnant-lid tectonics on the Hadean Earth." *Nature* 650, 636–641 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-10066-2>
10. Houchin, S. K., et al. "Oxidized Hadean magmas and Archean mobile-lid tectonics revealed by Jack Hills zircon." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 123, e2525466123 (2026). <https://doi.org/10.1073/pnas.2525466123>

Declaración

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