The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Una primera corteza delgada y medio fundida: un modelo donde los impactos, no el calor interno, movían el Hádico

El primer eón de la Tierra, el Hádico, casi no dejó registro rocoso. Este estudio de modelado pregunta cómo habría sido la corteza cuando se deja de ignorar los impactos. Usando un modelo estocástico y decreciente de flujo de impactos y simulaciones benchmark de flujo de calor en corteza y manto, los autores encuentran que el calor de impactos habría superado todo el calor interno de la Tierra por al menos un orden de magnitud durante la mayor parte del Hádico, dejando una corteza delgada (menos de ~5 km) parcialmente fundida a solo unos kilómetros de profundidad — demasiado débil, argumentan, para la tectónica de placas, y propensa a reciclarse de vuelta al manto, lo que explicaría por qué sobrevive tan poco material hádico. Cuando los impactos disminuyeron después de ~3,9 Ga (hace unos 3,9 mil millones de años), pudo formarse corteza continental duradera, justo cuando aparecen las rocas félsicas supervivientes más antiguas: «probablemente no una coincidencia», en las palabras cuidadosas de los autores. Como usaron deliberadamente calentamiento conservador de límite inferior, el resultado cualitativo es robusto aunque los números exactos no estén fijados. Es un modelo fuerte y coherente de la infancia terrestre, no una observación directa.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

El capítulo de la historia terrestre del que casi no quedan páginas

La Tierra es el único planeta que conocemos con continentes: la tierra flotante, rica en sílice, donde vivimos. Sin embargo, cómo se formaron los primeros continentes es uno de los problemas no resueltos más antiguos de la geología, por una razón brutal: la evidencia casi ha desaparecido por completo.

El primer eón de la Tierra, el Hádico, va desde el nacimiento del planeta hasta hace unos 4,03 mil millones de años (Ga). De ese primer medio millar de millones de años casi nada sobrevive. Las rocas félsicas intactas más antiguas, de tipo continental, tienen alrededor de 4,03 Ga. Unas pocas rocas basálticas raras llegan a ~4,2 Ga. El material más antiguo de cualquier tipo es un puñado de cristales de circón — famosamente los de Jack Hills en Australia occidental — datados en 4,4 Ga. Ese es todo el archivo de la infancia terrestre: unas pocas localidades y minerales del tamaño de granos de arena.

Este estudio no añade una roca nueva a ese archivo. Hace otra cosa: construye un modelo físico de cómo habría sido la corteza hádica bajo esa física y plantea una pregunta que la mayoría de los modelos de la Tierra temprana dejan fuera. ¿Qué pasa cuando se deja de ignorar que la Tierra temprana estaba siendo bombardeada?

La respuesta a la que llegan los autores es llamativa. Durante la mayor parte del Hádico, el calor entregado por impactos habría abrumado todo el calor interno de la Tierra, dejando la corteza delgada y medio fundida, demasiado débil, argumentan, para algo parecido a la tectónica de placas moderna. Es un modelo, no un recuerdo. Pero es un modelo que, por una vez, intenta tener en cuenta la violencia de la era que describe.

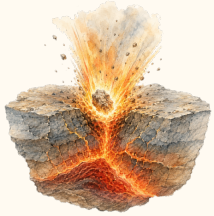
A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

Impact heat dominates

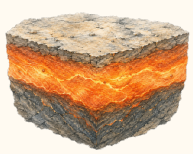
At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.



Consequence

Thin, shallowly molten crust

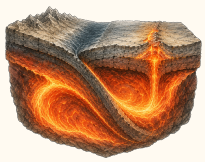
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

El calor de impactos domina el presupuesto energético del modelo, una corteza delgada fundida a poca profundidad se recicla a sí misma, y la corteza continental duradera aparece solo alrededor de la transición 4,0-3,9 Ga. Es un modelo del Hádico, no un recuerdo directo.

The Clean Paper CC BY 4.0

Qué hicieron los autores

El equipo combinó tres ingredientes que normalmente se mantienen separados.

Primero, un **modelo estocástico del flujo de impactos**: la lluvia de asteroides y cuerpos mayores que golpeaban el Sistema Solar interior durante el Hádico y el Arcaico temprano. Crucialmente, no es la vieja idea de un único pico de «Late Heavy Bombardment». Es un flujo que es intenso al principio y **declina con el tiempo**, con grandes impactos llegando al azar (estocásticamente) y no según un calendario. El modelo se reescala a partir de estadísticas de impactos lunares y del Sistema Solar interior, y se elige para ser consistente con espectros de edades de circones y evidencia paleomagnética disponible.

Segundo, **simulaciones geodinámicas** de cómo se mueve el calor por la corteza y el manto superior. Usaron un código lattice-Boltzmann con benchmark (Planet_LB), ejecutando tanto cálculos simples 1D de temperatura frente a profundidad como instantáneas completas 2D de convección del manto a 4,1 Ga. Incluyen las fuentes internas ordinarias de calor — desintegración radiactiva y calor del núcleo — y, de forma importante, **advección magmática**: calor transportado hacia arriba por el ascenso de fundido, que la mayoría de los modelos térmicos de corteza omiten.

Tercero, **modelado de equilibrio de fases** de una corteza temprana realista — un metabasaltos hádico hidratado del cinturón de rocas verdes de Nuvvuagittuq — para calcular a qué temperatura y profundidad esa roca empezaría a fundirse.

Una elección metodológica importa para leer todo el artículo: los autores apilaron deliberadamente la baraja *contra* su propia conclusión. Supusieron un manto «no condritico» (uno con menos material radiactivo productor de calor que la referencia condritica), con menos de la mitad del calentamiento interno del modelo estándar, usaron tasas de calentamiento conservadoras e ignoraron el calentamiento de marea de la Luna joven y cercana. Eso significa que sus temperaturas corticales calculadas son **mínimos**: límites inferiores. En todo caso, el Hádico real era más caliente que su modelo.

Qué encontraron

Los impactos, no el calor interno, dominaron el presupuesto energético hádico. Cuando el calor de impactos se integra en el tiempo, empequeñece la contribución interna, por al menos un orden de magnitud durante la mayor parte del Hádico. En esta imagen, el calentamiento por impactos, no la desintegración radiactiva, es el motor principal de la tectónica temprana, y solo se desvanece a un

papel menor después de unos **3,9 Ga**.

Ese calor mantuvo la corteza delgada y fundida a poca profundidad. Sin impactos ni advección de fundido, su modelo da una corteza hádica parcialmente fundida solo por debajo de unos 10-15 km. Añade el calor de impactos, y la zona de fusión sube drásticamente: la corteza queda parcialmente fundida a solo unos **kilómetros de profundidad** (por debajo de unos 2-5 km). A unos 5 km de profundidad, los modelos predicen más de 30 % de fundido, un estado en que la roca es demasiado débil para sostenerse como una placa rígida. A 5-10 km, temperaturas de ~1000-1100 °C significan que la corteza está extensamente fundida casi independientemente de su composición. La corteza sólida superviviente habría sido **delgada, de menos de unos 5 km**.

Una corteza medio fundida se borra a sí misma. La fusión extensa permite que material denso, rico en hierro y magnesio, se hunda y se separe, mientras fundidos más ligeros, ricos en sílice, ascienden. Con el tiempo eso empuja la corteza promedio hacia composiciones más evolucionadas y ricas en sílice, y produce el tipo de fundido félsico que puede cristalizar circón. Casi toda esa corteza delgada habría sido reciclada de vuelta al manto convectivo, lo que encaja con el registro químico (isotópico). En este modelo, la casi total ausencia de roca hádica no es una laguna en el registro: es una *predicción*. Las rocas de 4,2 Ga y los circones de 4,4 Ga son los raros supervivientes de una corteza que fue destruida casi tan rápido como se formó.

El final del bombardeo se alinea con los primeros continentes duraderos. A medida que el bombardeo disminuyó durante la transición 4,0-3,9 Ga, la corteza por fin pudo engrosarse y perdurar. Las rocas continentales supervivientes más antiguas aparecen alrededor de esa misma transición. Los autores lo formulan con cuidado: que la corteza continental duradera apareciera alrededor de ese momento «probablemente no es una coincidencia».

Su inferencia titular: bajo estas condiciones — una corteza delgada, fundida a pocos kilómetros de profundidad — **la tectónica de placas hádica es implausible**.

También muestran por qué trabajos anteriores llegaron a la conclusión opuesta. Estudios previos de impactos estocásticos encontraron solo un efecto menor, con menos de 2,5 % de la corteza fundida en cualquier momento. Esos estudios dejaron fuera dos cosas que este incluye: el efecto global de grandes impactos sobre la fusión profunda del manto, y el transporte hacia arriba de ese calor por magma ascendente. Ponlos de nuevo, y la imagen térmica cambia drásticamente.

Por qué un modelo no es un recuerdo

Todo lo anterior es salida de simulaciones, no una lectura tomada de rocas hádicas, porque esas rocas casi por completo ya no existen. Eso no debilita el resultado, pero sí fija qué tipo de resultado es.

La cadena corre así: un *modelo* del flujo de impactos alimenta un *modelo* del flujo de calor en manto y corteza, contrastado contra un *modelo* de cómo se funde una roca particular. Cada eslabón está motivado físicamente y, donde es posible, benchmarkeado; pero el conjunto es un argumento coherente sobre cómo *debió* verse el Hádico dada una física plausible, no una medición de cómo *se veía*.

Por eso las suposiciones conservadoras de los autores importan más de lo que podría parecer. Como

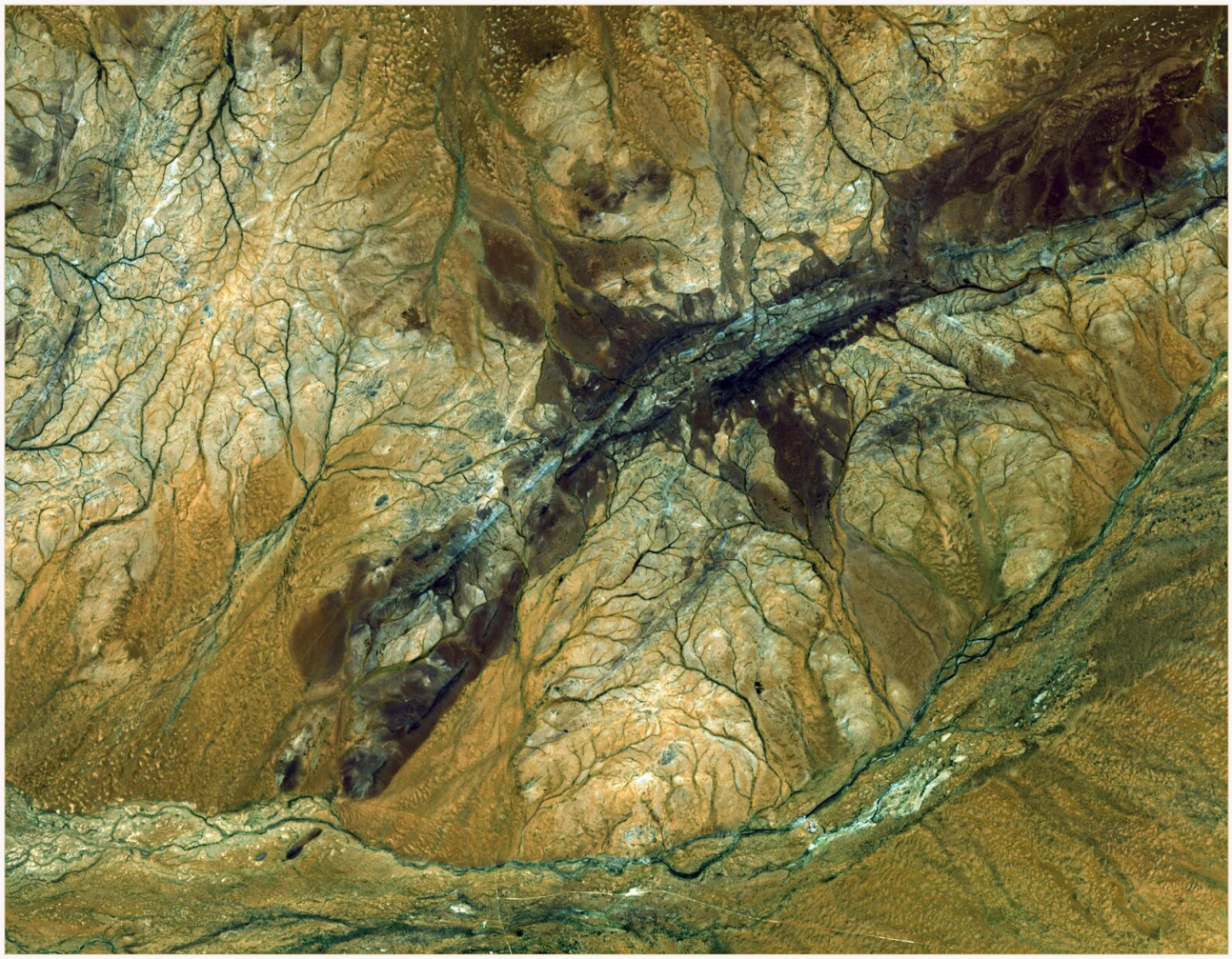
eligieron calentamiento de límite inferior y aun así obtuvieron una corteza superficial ampliamente fundida, la conclusión cualitativa — la corteza hádica era caliente y débil — es robusta frente a sus elecciones. Lo que *no* queda fijado por esto es el número preciso: los geotermos exactos, las fracciones exactas de fundido, el espesor exacto de la corteza. Lee la dirección del resultado como fuerte y los decimales como provisionales.

Qué no prueba esto

- **No** observa directamente la corteza hádica. Casi no hay roca de esta era; es un resultado de modelado sobre lo que implica la física, no una medición.
- **No** se apoya en un «Late Heavy Bombardment». El flujo de impactos usado es declinante y estocástico; el modelo no necesita ni invoca un pico repentino de bombardeo.
- **No** resuelve el debate de la tectónica de placas. «Implausible» aquí es una inferencia fuerte, físicamente fundamentada, a favor de una Tierra temprana caliente de tapa estancada o blanda, pero el modo tectónico del Hádico sigue realmente disputado.
- **No** prueba que los impactos *causaran* la aparición de continentes alrededor de la transición 4,0-3,9 Ga. La coincidencia temporal es una asociación fuerte que los propios autores llaman «probablemente no una coincidencia»: lenguaje cuidadoso para una correlación convincente, no una causa demostrada.
- Los circones de Jack Hills **no** son continentes preservados. Son granos supervivientes raros que muestran que material félsico y agua existían temprano; todo el punto del modelo es que la corteza que los produjo fue reciclada casi por completo.
- **No** reconstruye una historia completa de la Tierra temprana. Las simulaciones son idealizadas — perfiles 1D y cortes ecuatoriales 2D con impactos confinados cerca del ecuador, capturados como instantáneas — no un modelo completo en cuatro dimensiones del planeta.

Qué tan fuerte es la evidencia

Para su afirmación central — que el calentamiento por impactos fue un control de primer orden sobre la corteza hádica, manteniéndola delgada y fundida a poca profundidad — el argumento es coherente y, en un sentido importante, conservador. Usa un código geodinámico benchmarkeado, entradas físicamente razonables y supuestos de límite inferior, e integra una fuente de calor que la mayoría de los modelos previos simplemente ignoraban. También gana credibilidad al explicar dos hechos obstinados a la vez: por qué casi no sobrevive roca de más de ~4 Ga (reciclaje casi total) y por qué aparece corteza duradera justo cuando el bombardeo se desvanece.



Jack Hills, Australia occidental, visto por el instrumento ASTER de la NASA. Los circones de esta región incluyen algunos de los materiales supervivientes más antiguos conocidos de la corteza temprana de la Tierra, pistas diminutas de un eón cuyas rocas fueron casi todas borradas.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Los límites son igual de claros, y son los límites de cualquier modelo de tiempo profundo: son modelos construidos sobre modelos, anclados a un registro rocoso muy escaso, y su conclusión más citable — «la tectónica de placas es implausible» — es una inferencia, no una observación. La postura correcta es tratar esto como una hipótesis fuerte y bien razonada que reencuadra el Hádico, y que ahora invita a otros a probar sus supuestos — especialmente la elección del modelo de flujo de impactos — en lugar de como un caso cerrado.

El resumen más útil no es «así fue el Hádico» ni «es solo una simulación». Es: dada una física plausible y conservadora, una Tierra temprana bajo fuerte bombardeo habría tenido una corteza delgada, medio fundida y autorreciclada, y esa idea única explica una cantidad sorprendente de lo poco que realmente podemos ver.

Por qué importa

La imagen popular de la Tierra temprana tiende a oscilar entre dos extremos: un mundo acuático sereno con tectónica de placas casi como el actual, o un planeta infernal de lava. Este trabajo dibuja un punto medio específico y motivado físicamente: una corteza delgada y repetidamente refundida desde unos pocos kilómetros de profundidad, continuamente destruida y rehecha, con los impactos — no el calor interno — fijando las condiciones.

Ese reencuadre hace trabajo real. Ofrece un mecanismo para dos de los grandes hechos sobre la infancia terrestre — la casi total ausencia de registro rocoso y el momento de los primeros continentes duraderos — y pone en el centro de la historia un proceso normalmente descuidado, el calentamiento por impactos. Si se sostiene, cambia cómo razonamos sobre cuándo la Tierra se volvió un planeta de continentes estables, y se traslada a otros mundos rocosos que se formaron bajo sus propios bombardeos.

Nada de eso requiere que el modelo sea la última palabra. Requiere que sea una hipótesis lo bastante buena para probarse, y al atarse al registro superviviente de circones e isótopos, lo es. El «Hádico oculto» del título es exactamente el punto: una era a la que casi solo podemos llegar modelando, porque la era borró sus propias pruebas.

Resumen limpio

El primer eón de la Tierra, el Hádico (antes de ~4,03 Ga), casi no dejó registro rocoso. Este estudio de modelado pregunta cómo habría sido la corteza al incluir una fuente de calor normalmente dejada fuera: los impactos. Usando un modelo estocástico y decreciente de flujo de impactos junto con simulaciones benchmark 1D y 2D de flujo de calor en corteza y manto (incluido el calor transportado por fundido ascendente), los autores encuentran que el calor de impactos integrado en el tiempo habría superado todo el calor interno de la Tierra por al menos un orden de magnitud durante la mayor parte del Hádico. La consecuencia es una corteza delgada (menos de ~5 km) parcialmente fundida a solo unos kilómetros de profundidad y, a ~5 km, fundida en más de 30 %, demasiado débil para sostener tectónica de placas, que los autores llaman implausible para el Hádico. Tal corteza se reciclaría mayoritariamente de vuelta al manto, lo que explicaría por qué sobrevive tan poco material hádico; cuando los impactos disminuyeron durante la transición 4,0-3,9 Ga, pudo formarse corteza continental duradera, alrededor del momento en que aparecen las rocas félsicas supervivientes más antiguas: «probablemente no una coincidencia». Como los autores usaron deliberadamente calentamiento conservador de límite inferior, el resultado cualitativo es robusto, aunque los números exactos no estén fijados. Es un modelo fuerte y coherente de la infancia terrestre, no una observación directa.

No-BS check

Lo que muestra el artículo: En simulaciones físicamente fundamentadas que incluyen calentamiento por impactos y transporte magmático de calor, la corteza hádica sale delgada y parcialmente fundida a pocos kilómetros de profundidad, dominada por calor de impactos más que por calor interno, mayoritariamente reciclada de vuelta al manto y, en este modelo, incapaz de sostener tectónica de placas.

Lo que es plausible pero no está probado: Que los impactos sean la razón por la que aparecen continentes duraderos alrededor de 3,9 Ga; que el Hádico fuera un mundo de tapa estancada o blanda en lugar de uno con tectónica de placas temprana; que casi no sobreviva roca hádica específicamente porque una corteza fundida se recicló a sí misma.

Lo que no muestra: Una medición directa de corteza hádica; una respuesta cerrada al debate sobre tectónica de placas; un vínculo causal demostrado entre el declive del bombardeo y los primeros continentes; que los circones de Jack Hills representen continentes preservados; un modelo completo del planeta temprano.

Principales limitaciones: El registro rocoso hádico casi no existe, así que el resultado es un modelo limitado por muy pocos datos; apila modelos sobre modelos (flujo de impactos → geodinámica → equilibrio de fases); el propio flujo de impactos es una elección representativa e incierta; las simulaciones son idealizadas (cortes 1D y 2D ecuatoriales, instantáneas en el tiempo). Los supuestos conservadores de límite inferior fortalecen la conclusión cualitativa, pero no hacen precisos los geotermos específicos.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Alta en que, bajo una física plausible, una Tierra temprana fuertemente bombardeada habría tenido una corteza caliente, delgada y fundida a poca profundidad. Moderada en que esto haga improbable la tectónica de placas hádica y explique el registro rocoso perdido. Baja para cualquier afirmación de que esto *prueba* cómo se formaron los continentes o exactamente cuándo: es un modelo fuerte y conservador que reencuadra el Hádico, no una mirada directa a él.

Sources

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402