

Sobre cómo se relacionan las explicaciones narrativas y los Modelos Experimentales en la geología

José Baena. Universidad Simón Bolívar USB. Venezuela

jbaena@usb.ve

David Suarez Pascal. UNAM. México

david.suarez@ciencias.unam.mx

Bilners Miguel Cabrera Machado. USB. Venezuela

miguelcabreram01@gmail.com

Recibido 28/06/2025 • Aceptado 30/10/2025

Resumen

La geología es una ciencia que integra de manera única enfoques de las ciencias naturales históricas y experimentales. A pesar de su naturaleza diversa, este campo no ha sido suficientemente explorado en la filosofía de la ciencia, particularmente en lo que respecta a su valor epistémico y estructura explicativa como ciencia histórica. Históricamente, la investigación experimental ha sido empleada en geología para validar teorías que explican fenómenos remotos. Este trabajo analiza las formas de explicación en geología desde el enfoque narrativo (storytelling), basado en la coherencia, el uso de modelos y la especulación productiva. Asimismo, evalúa el carácter epistémico de las explicaciones mediante modelos experimentales, discutiendo la relación entre ambas formas de explicación y el valor epistémico que ofrecen para abordar nuevos desafíos en la producción de conocimiento en las ciencias de la Tierra.

Palabras claves: Geología, ciencia histórica, modelos experimentales

Abstract

Geology is a science that uniquely integrates approaches from both the historical and experimental natural sciences. Despite its diverse nature, this field has not been sufficiently explored within the philosophy of science, particularly regarding its epistemic value and explanatory structure as a historical science. Historically, experimental research has been employed in geology to validate theories explaining remote phenomena. This paper analyzes forms of explanation in geology from the narrative (storytelling) perspective, emphasizing coherence, the use of models, and productive speculation. It also evaluates the epistemic character of explanations derived from experimental models, discussing the relationship between these two modes of explanation and the epistemic value they offer for addressing new challenges in the production of knowledge within the Earth sciences.

Keywords: geology, historical science, experimental models

Sobre cómo se relacionan las explicaciones narrativas y los Modelos Experimentales en la geología

José Baena. Universidad Simón Bolívar USB. Venezuela

jbaena@usb.ve

David Suarez Pascal. UNAM. México

david.suarez@ciencias.unam.mx

Bilners Miguel Cabrera Machado. USB. Venezuela

miguelcabreram01@gmail.com

Recibido 28/06/2025 • Aceptado 30/10/2025

Introducción

La geología se presenta como una disciplina científica singular, integrando de manera única la naturaleza de las ciencias naturales históricas con la de las ciencias experimentales. A pesar de esta rica dualidad y la complejidad de sus objetos de estudio, este campo no ha sido suficientemente explorado ni valorado en la filosofía de la ciencia. Específicamente, existe un vacío en el entendimiento de su valor epistémico intrínseco y de la estructura explicativa que la caracteriza como una ciencia inherentemente histórica. Convencionalmente, la investigación experimental ha jugado un papel crucial en geología, sirviendo como una herramienta fundamental para la validación de teorías y la formulación de explicaciones sobre fenómenos que ocurrieron en un pasado geológico remoto y a menudo inaccesible a la observación directa.

El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis de las diversas formas de explicación empleadas en el quehacer geológico. Se prestará especial atención al enfoque de la explicación narrativa, comúnmente denominado *storytelling*. Este tipo de explicación se fundamenta en la construcción de relatos que se caracterizan por su coherencia interna, el uso estratégico de modelos conceptuales y la capacidad de generar especulaciones que, lejos de ser meras conjjeturas, son productivas para la investigación. De forma paralela, se llevará a cabo una evaluación crítica del carácter epistémico de las explicaciones que se derivan del uso de modelos experimentales. Esta metodología ha experimentado un crecimiento significativo y una adopción cada vez mayor en las ciencias de la tierra, demostrando su utilidad para simular procesos complejos. El propósito central es dilucidar la relación intrínseca y a menudo compleja entre estas dos modalidades de explicación –la narrativa y la experimental–, aparentemente distintas, pero profundamente interconectadas en la

práctica geológica. Finalmente, se buscará determinar el valor epistémico combinado que ambas formas de explicación ofrecen para abordar los nuevos y crecientes desafíos en la producción de conocimiento en las ciencias de la Tierra, contribuyendo así a una comprensión más profunda y robusta de los vastos y complejos procesos geológicos que han configurado y continúan transformando nuestro planeta.

1. Marco Teórico y Análisis

El debate filosófico en torno a la naturaleza y aplicación de las leyes científicas ha sido un tema recurrente en la epistemología, adquiriendo una complejidad particular cuando se discute en el contexto de las ciencias históricas. La geología, por su propia esencia, se fundamenta en el principio del Uniformismo, también conocido como Actualismo. Este postulado central sostiene que las leyes y procesos físicos y químicos que observamos operando en el presente son los mismos que actuaron a lo largo de la historia geológica, permitiéndonos interpretar el pasado a la luz del presente (Gould, 1987; Whewell, 1858, 1872). Sin embargo, la aplicación de estas leyes en la reconstrucción de eventos históricos pasados se enfrenta a la inherente dificultad de la subdeterminación: la evidencia fragmentada y limitada del pasado a menudo permite que múltiples hipótesis plausibles puedan explicar un mismo conjunto de datos (Cleland, 2002). Clásicamente, las disciplinas científicas han sido categorizadas en nomotéticas, que buscan formular leyes generales y universales, e idiográficas, que se centran en la explicación de eventos individuales y únicos (Windelband, 1980). La geología, al dedicarse a la reconstrucción de eventos y procesos que, aunque regidos por leyes generales, son únicos e irrepetibles en su manifestación particular (p. ej., la orogenia andina, la formación de la Gran Barrera de Coral o la evolución específica de un delta), se alinea más estrechamente con un enfoque idiográfico. En este contexto, las explicaciones narrativas adquieren un papel predominante.

2. Estrategias Explicativas en la Geología Narrativa

Las explicaciones narrativas en geología son fundamentalmente reconstrucciones coherentes y plausibles de secuencias temporales de eventos pasados. Su propósito no es descubrir leyes universales, sino construir una «historia» que dote de sentido a la evidencia geológica, que a menudo se presenta fragmentada, dispersa y ambigua (Cleland, 2002; Frodeman, 1995; Kleinhans et al., 2018). La construcción de estas narrativas se asienta en varios pilares clave, asegurando su rigor y utilidad.

En primer lugar, la coherencia lógica y empírica es esencial: la narrativa debe ser internamente consistente y, crucialmente, compatible con la totalidad de la evidencia disponible, así como con los principios fundamentales de la física, la química y la geología. No se trata de una mera cronología, sino de una explicación causal encadenada que conecta los eventos de manera significativa. Asimismo, estas

narrativas no se construyen en el vacío, sino que se fundamentan en el empleo de modelos conceptuales y teóricos consolidados (por ejemplo, modelos de cuencas sedimentarias o de tectónica de placas), los cuales permiten interconectar los datos y las inferencias de manera estructurada. Finalmente, la especulación productiva juega un papel inevitable, dada la naturaleza incompleta del registro geológico. Sin embargo, esta especulación debe ser informada, basarse en la plausibilidad física y servir como un motor para la formulación de nuevas hipótesis y la orientación de futuras investigaciones, en lugar de ser un fin en sí misma.

A pesar de su innegable utilidad, las explicaciones narrativas han sido objeto de críticas, principalmente por la cuestión de la subdeterminación, que permite la posibilidad de múltiples narrativas para la misma evidencia, y por el riesgo de una especulación no controlada. No obstante, su valor epistémico es incuestionable. Las narrativas poseen la capacidad única de integrar vastos y heterogéneos conjuntos de datos —desde la petrología hasta la paleontología y la geofísica—, generando una comprensión holística de fenómenos geológicos extremadamente complejos. Sirven como herramientas heurísticas poderosas, guiando la observación y la experimentación, y comunicando el conocimiento de una manera accesible y significativa (Goudge, 1958; Kleinhans et al., 2018).

3. Modelos Experimentales en Geología

111

Los modelos experimentales, particularmente los modelos análogos (como el uso de arena, silicona o jarabes para simular rocas o fluidos geológicos), se han consolidado como herramientas metodológicas indispensables para la simulación controlada de procesos geológicos (Paola, 2000; van Heijst et al, 2001, 2012). Su principal fortaleza radica en permitir la manipulación controlada de variables: a diferencia de la observación directa de la naturaleza, en un laboratorio es posible aislar y modificar variables clave como la gravedad, la viscosidad del material, la tasa de deformación o sedimentación, y la composición, lo que facilita la observación del desarrollo de un fenómeno en condiciones específicas. Además, estos modelos posibilitan la visualización de procesos inobservables, haciendo accesibles a la observación directa aquellos fenómenos que, en la escala geológica natural, ocurren a lo largo de millones de años o en escalas espaciales gigantescas o microscópicas. Esto facilita la comprensión de mecanismos fundamentales que de otro modo serían puramente inferenciales. Finalmente, los modelos experimentales son cruciales para la generación y evaluación de hipótesis, ya que pueden revelar patrones, comportamientos o mecanismos causales no anticipados, lo que conduce a la formulación de nuevas hipótesis. También permiten probar la viabilidad física de hipótesis existentes, ayudando a discriminar entre explicaciones alternativas.

Junto a los modelos experimentales, las simulaciones numéricas (también conocidas como modelos computacionales) representan otra rama vital en la modelización geológica. Estas involucran la resolución de ecuaciones matemáticas que describen los procesos físicos subyacentes, empleando algoritmos computacionales. Su gran ventaja reside en la capacidad de explorar escenarios que son inalcanzables en modelos físicos, por ejemplo, debido a limitaciones de material, escala temporal o condiciones extremas. Las simulaciones numéricas permiten una cuantificación precisa de parámetros, una flexibilidad en la manipulación de propiedades del material (incluso en rangos no realistas para entender sensibilidades) y la posibilidad de ejecutar múltiples iteraciones con variaciones mínimas para entender la influencia de cada factor. Son particularmente valiosas para modelar la propagación de ondas sísmicas, el flujo de fluidos en medios porosos, la deformación de la litosfera a escalas continentales, o la evolución térmica de sistemas geológicos a lo largo de millones de años.

Sin embargo, tanto los modelos experimentales como las simulaciones numéricas no están exentos de limitaciones que deben ser reconocidas. En los modelos experimentales, uno de los desafíos más significativos es el problema de escala y escalamiento: la extrapolación de los resultados obtenidos en el laboratorio a las dimensiones y tiempos geológicos naturales es compleja, requiriendo una cuidadosa aplicación de principios de escalamiento (Paola, 2000). Además, ambos tipos de modelos implican una simplificación necesaria de la abrumadora complejidad de los sistemas naturales, lo que conlleva decisiones críticas sobre qué aspectos incluir, qué simplificar y qué omitir, pudiendo limitar la aplicabilidad directa de los resultados. En el caso de las simulaciones numéricas, las limitaciones pueden surgir de la capacidad computacional, la precisión de los algoritmos y, fundamentalmente, de las suposiciones inherentes en las ecuaciones constitutivas que describen el comportamiento de los materiales geológicos, las cuales no siempre capturan la complejidad real.

Es crucial entender que la naturaleza de la falsación en estos modelos difiere de las leyes determinísticas de la física. Ni los modelos análogos ni las simulaciones numéricas «falsan» teorías geológicas en un sentido popperiano estricto (Popper, 1959). Más bien, sirven para demostrar que ciertas explicaciones narrativas son inconsistentes con los resultados de los modelos bajo condiciones análogas o computacionales, o para validar la plausibilidad mecánica de otras (Kleinhans et al., 2018). Un modelo puede mostrar que una narrativa es físicamente implausible, pero no necesariamente que sea «falsa» en todos los contextos naturales. En este sentido, la investigación geológica moderna a menudo se beneficia de la sinergia entre los modelos experimentales y numéricos. Los modelos análogos pueden validar la pertinencia de las suposiciones físicas en las simulaciones numéricas, mientras que las simulaciones pueden explorar el impacto de variables y escalas que son imposibles de recrear físicamente. Juntos, proporcionan un marco robusto para comprender y reconstruir los procesos geológicos complejos.

4. Relación y Valor Epistémico de Ambas Formas de Explicación

La tesis central de este trabajo es que las explicaciones narrativas y los modelos experimentales no solo coexisten en la geología, sino que son intrínsecamente complementarios y se refuerzan mutuamente, potenciando la capacidad explicativa de la disciplina.

Las narrativas proporcionan el macro-marco contextual, planteando las grandes preguntas sobre «cómo» y «por qué» un evento geológico particular se desarrolló en el pasado. Ofrecen una primera síntesis coherente y unificadora de la evidencia disponible, tejiendo los fragmentos del registro geológico en una historia comprensible. Por otro lado, los modelos experimentales actúan como un banco de pruebas de la plausibilidad física y la robustez mecánica de segmentos específicos de esas narrativas. Permiten aislar y explorar mecanismos causales individuales, contribuyen a descartar hipótesis alternativas mecánicamente inviables y, crucialmente, refinan las narrativas existentes al demostrar qué procesos son físicamente posibles y cuáles resultados morfológicos o estructurales pueden producirse bajo condiciones análogas a las inferidas para el pasado (Kleinhans et al., 2018; van Heijst & Postma, 2001). Un modelo, por sí solo, no «prueba» definitivamente una narrativa, pero eleva su credibilidad al proporcionar una base mecanicista observable que valida las inferencias históricas.

Esta interrelación da lugar a un ciclo iterativo y dinámico de investigación geológica. Todo comienza con la observación detallada del registro geológico, lo que conduce a la formulación de una narrativa preliminar sobre los eventos pasados. Posteriormente, se diseñan y ejecutan modelos experimentales para poner a prueba la viabilidad física de los mecanismos y procesos propuestos dentro de esa narrativa. Los resultados obtenidos del modelo son utilizados para refining, modificar o incluso descartar ciertas partes de la narrativa inicial, lo que a su vez puede llevar a la necesidad de nuevas observaciones de campo o al diseño de experimentos adicionales, cerrando así el ciclo de retroalimentación y mejora continua.

El valor epistémico combinado de estas dos aproximaciones es profundo. Aunque la geología, por su carácter histórico y la complejidad de sus sistemas, no aspira a producir leyes universales determinísticas en el mismo sentido que la física teórica, la combinación de narrativas lógicamente coherentes y empíricamente apoyadas, junto con la validación de sus mecanismos a través de modelos experimentales rigurosos, permite la construcción de una comprensión robusta, progresivamente más precisa y predictiva de los eventos pasados. Este conocimiento profundo de la historia y dinámica de la Tierra es indispensable no solo para la reconstrucción académica, sino también para la predicción de fenómenos geológicos futuros y para la gestión sostenible de los recursos naturales (Carbone & Frodeman, 2017). La sinergia entre narrativas y modelos experimentales dota a la geología de una capacidad explicativa única y poderosa.

5. Conclusiones: Principales Hallazgos y Asuntos Pendientes

El análisis precedente subraya la naturaleza intrínsecamente híbrida de la geología, una fortaleza que radica en su capacidad para integrar eficazmente la reconstrucción histórica con la investigación experimental. La complementariedad esencial entre las explicaciones narrativas y los modelos experimentales emerge como un hallazgo central. Lejos de ser enfoques divergentes, operan en profunda sinergia: las narrativas construyen el marco contextual que da coherencia a eventos pasados, mientras que los modelos experimentales funcionan como herramientas críticas para evaluar plausibilidad física y desentrañar los mecanismos causales subyacentes.

Esta sinergia es un mecanismo poderoso de validación y refinamiento. Los modelos experimentales no buscan una refutación popperiana estricta; más bien, actúan como «filtros de plausibilidad» o «pruebas de consistencia mecánica». Son fundamentales para descartar narrativas superficialmente coherentes, pero físicamente inviables, y para fortalecer aquellas que se ajustan a los mecanismos observados en laboratorio. Este proceso iterativo mejora sustancialmente la robustez de las explicaciones geológicas.

El valor epistémico dual y progresivo de esta aproximación combinada es innegable. El conocimiento geológico se valida en un ciclo dinámico: la especulación productiva de las narrativas genera hipótesis cruciales, y los modelos experimentales aportan el rigor mecánico y la comprensión empírica para consolidarlas. Esta integración no solo confiere mayor credibilidad a las explicaciones del pasado terrestre, sino que impulsa una comprensión cada vez más precisa y confiable de la evolución de la Tierra.

A pesar de esta sinergia, persisten desafíos significativos. El problema del escalamiento y la extrapolación sigue siendo un reto principal, exigiendo un continuo desarrollo en los principios de escalamiento y validación multiescala. Asimismo, es crucial formalizar la integración metodológica, desarrollando marcos más explícitos y, si es posible, cuantitativos para articular narrativas y modelos. Finalmente, la delimitación de la especulación productiva requiere criterios epistemológicos más rigurosos para diferenciar la especulación que impulsa la investigación de aquella que carece de fundamento. Abordar estos puntos fortalecerá el valor epistémico de la geología, mejorando su capacidad para desentrañar los misterios del pasado de la Tierra con creciente precisión y predictibilidad.

6. Bibliografía

- Carbone, G., & Frodeman, R. (2017), «On the epistemic value of narrative in geology», *Zygon: Journal of Religion & Science*, 52(1), 164-184.
- Cleland, C. (2002), «Methodological and epistemic differences between historical science and experimental science», *Philosophy of Science*, 69(3), 474-496.

- Frodeman, R. (1995). «Geological reasoning: Geology as an interpretive and historical science», *Geological Society of America Bulletin*, 107(8), 960-968.
- Goudge, T. A. (1958). «The appeal to common sense», *The Philosophical Review*, 67(4), 540-554.
- Gould, S. J. (1987). Time's arrow, time's cycle: Myth and metaphor in the discovery of geological time. Harvard University Press.
- Kleinhans, M. G., Buscombe, D., Civitarese, G., van der Vegt, M., & van der Wal, D. (2018), «Experimental modelling of sedimentary systems», en *Treatise on Geomorphology*, 12: Sediment Transport and Depositional Processes (pp. 1-28). Elsevier.
- Paola, C. (2000), «Quantitative models of sedimentary basin filling», *Sedimentology*, 47(S1), 121-178.
- Popper, K. R. (1959), *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson.
- van Heijst, M. W. I. M., & Postma, G. (2001), *Fluvial response to sea-level changes: a quantitative analogue, experimental approach*. Basin Research, 13, 269-292.
- Whewell, W. (1858), *History of Scientific Ideas, being the First Part of the Philosophy of the Inductive Sciences*. 3rd ed., vol. 2. John S. Parker.
- Whewell, W. (1872), *History of the Inductive Sciences from the Earliest to the Present Time*. 3rd ed., 2 vols. D. Appleton.
- Windelband, W. (1980), «Rectorial address, strasbourg, 1894», *History and Theory*, 19(2), 169-185. (Obra original publicada en 1894).

