

## ¿Qué son y cómo se forman las montañas?

### *What are mountains and how are they built?*

Las montañas, que cubren aproximadamente una cuarta parte de la superficie terrestre emergida, siempre han llamado la atención de los seres humanos. Desde épocas ancestrales, las diferentes civilizaciones han ubicado en sus cumbres las moradas de los dioses y demonios o, directamente, las han considerado lugares sagrados o malditos. Fuera por su carácter divino o por otras razones más terrenales, la verdad es que fue necesario mucho tiempo para que los naturalistas sintieran la inquietud de intentar entender el origen de las montañas. El ascenso al Mont Blanc por H.B. de Saussure en 1787, y los experimentos que realizó en la propia cumbre, encendieron la llama de la curiosidad intelectual que acabaría llevando a los científicos ilustrados hacia las montañas para desentrañar las claves de su formación. Tanto es así, que entender el origen de los grandes relieves terrestres se convirtió en uno de los temas clave de la entonces emergente ciencia de la Geología. Pero hubo que esperar casi dos siglos hasta que, en la década de los 70 del siglo XX, la teoría de la Tectónica de Placas encajara todas las piezas del puzzle recopiladas durante décadas de observaciones científicas, aventura y exploración. Esta teoría global ofreció, por fin, una explicación lógica a la distribución de las cordilleras terrestres y desveló un hilo conductor que permitía relacionar los principales procesos implicados en la formación de las montañas.

Pero la Tectónica de Placas no fue el final, sino el principio. Utilizándola como marco conceptual básico, los científicos han ido matizando en las últimas cinco décadas el modelo inicial. Además, los procesos orogénicos son de tal complejidad que la visión moderna de cómo se forman las montañas ha sido construida a base de aportaciones de muchas disciplinas científicas. Como si fueran una mezcla entre detectives y forenses de la Tierra, los científicos pueden calcular hoy en día con bastante precisión hace cuánto tiempo se formaron las rocas que forman las cordilleras, a qué temperatura y profundidad de la corteza terrestre se originaron o los procesos que sufrieron al ser enterradas. Podemos calcular la velocidad a la que se elevó una determinada cordillera, pero también el ritmo al que se erosiona. Podemos deducir cómo era la topografía de una región antes de que se formara una cordillera, incluso cómo eran los ríos que había antes de que se elevara. Podemos predecir cómo evolucionará una cadena montañosa y sabemos si crecerá más o cederá el paso a la erosión. Y podemos también entender cómo son los cientos de las cordilleras, a decenas de kilómetros de profundidad, y qué factores condicionan los procesos que ocurren en su superficie. Muchos de estos conocimientos los hemos

adquirido en las últimas dos décadas, demostrando que éste es un tema vivo.

Hoy en día sabemos a ciencia cierta que, para comprender las montañas, tenemos que conocer lo que pasa bajo ellas, en el interior terrestre. Precisamente por eso, entender cómo se originan no es fácil. La formación de una cordillera es un suceso de tal complejidad y magnitud, que implica una gran cantidad de procesos que se prolongan a lo largo de millones de años y que, a menudo, ocurren a decenas e incluso centenares de kilómetros de profundidad bajo la superficie terrestre. Necesitamos saber cuál es la estructura de una montaña para comprender por qué tiene esa forma y, sobre todo, por qué está ahí. Y eso es lo que ha cambiado sustancialmente en las últimas dos décadas. La aplicación de nuevas técnicas ha proporcionado mucha más precisión a la hora de conocer los procesos que actúan en la formación de las montañas. Así, la geocronología nos permite determinar la edad absoluta de los minerales y de las rocas con una precisión impensable hace tan sólo unos años, posibilitando conocer la duración de determinados eventos e incluso re-entender cómo se desarrollan. En especial, gracias al análisis isotópico de alta resolución podemos poner fecha y duración a los procesos implicados en la formación de las montañas. La tomografía sísmica de alta resolución permite obtener “imágenes” del interior terrestre y descubrir, por ejemplo, antiguas zonas de subducción o placas litosféricas que subdujeron en el pasado, influenciando de forma esencial la configuración actual del relieve. La geoquímica isotópica nos muestra información del interior terrestre, actual y pasado, gracias a nuevas técnicas numéricas que crean modelos de flujo y dinámica de fluidos en el interior de nuestro planeta. También nuevos ensayos de laboratorio se apoyan en estudios experimentales en modelización termodinámica y geodinámica y, en combinación con técnicas geofísicas, nos permiten deducir el comportamiento de la corteza continental en diferentes contextos, algo esencial para comprender cómo se forman las montañas. Estamos cada vez más cerca de “viajar” al pasado e incluso al centro de la Tierra, para entender su funcionamiento y comprender cómo se forman las cordilleras. En resumen, hoy en día sabemos con mucha precisión cómo se forman las montañas gracias a avances recientes. Mostrarlos es el objetivo de esta publicación, con especial énfasis a los referidos al origen, disposición y configuración de las grandes cordilleras.

Para ello, el monográfico comienza con un artículo introductorio del Profesor Mike Searle. Alpinista y, sobre todo, científico, utiliza el Himalaya como ejemplo para mostrar los avances en el conocimiento actual sobre la formación de cordilleras. Al fin y

al cabo, es la cordillera más espectacular la Tierra, pero también la más alta, la más reciente y la más activa tectónicamente. Para los geólogos, el Himalaya esconde los secretos acerca de cómo las placas tectónicas colisionan, cómo los continentes se amalgaman y cómo se forman las montañas, entre muchos otros. Y el Profesor Searle lleva más de cuatro décadas estudiándolos. Por ello, no se nos ocurre un mejor ejemplo como introducción.

Le sigue un primer bloque de artículos dedicados a desarrollar fundamentos conceptuales. Todos ellos están pensados para responder preguntas básicas que cualquier lector se haría a la hora de querer saber cómo se forman las montañas. En el primero se resumen y se relacionan entre sí las ideas clave sobre este tema. El artículo responde a la pregunta ¿qué debería saber para entender, de manera sencilla, cómo se forman las cordilleras? Escrito por el coordinador del monográfico, pretende, además, ser una introducción para aspectos desarrollados con más profundidad en los siguientes artículos. Le sigue una selección del mismo autor de las principales aportaciones recientes de la Tectónica de Placas en relación con los procesos orogénicos. ¿Cómo ha cambiado la interpretación de los procesos orogénicos en la Placas en las últimas décadas? ¿Cuáles han sido los descubrimientos más sorprendentes? ¿Y los retos para el futuro? De esta manera queda fijado el marco conceptual y los conceptos básicos que luego se ampliarán en los siguientes capítulos.

Sin duda, uno de los aspectos más complejos es relacionar los procesos que tienen lugar en un ciclo orogénico, en especial la combinación de metamorfismo, tectónica y magmatismo. ¿Cuál condiciona a los demás? ¿Son todos simultáneos? ¿Hasta qué punto conocemos cómo funcionan? Estas son solo algunas de las preguntas a las que se da respuesta en el texto escrito por la Dra. Ana Crespo, investigadora del CSIC y de la Universidad de Granada.

Le sigue un artículo sobre los terremotos como fenómenos generadores de relieve al disipar en superficie la energía acumulada en el interior terrestre. Al fin y al cabo, todas las montañas orogénicas son fruto de infinidad de terremotos. ¿Cómo se crean los relieves a bases de seísmos? ¿A lo largo de cuánto tiempo? ¿Podemos identificar antiguos terremotos para saber cómo han influido en la formación de una cordillera? Los Drs. Pablo Silva y Miguel Ángel Rodríguez Pascua, de la Universidad de Salamanca y del IGME respectivamente, son los responsables de dar respuesta a estas preguntas.

Sin duda, un aspecto en el que se ha hecho más avances en los últimos años es en la aplicación de técnicas de datación en orógenos. ¿Cuánto tarda en formarse una cordillera? ¿Qué otros procesos relacionados con la formación de las montañas podemos datar? ¿Qué técnicas se utilizan? A grandes rasgos, sabemos que es una sucesión de procesos que se prolongan durante decenas de millones de años, pero la respuesta detallada corre a cargo de la Dra. Mercedes Vázquez y los Dres. Antonio Jabaloy y Javier Carrillo-Rosúa, todos ellos de la Universidad de Granada.

Un aspecto esencial para entender una cordillera es cómo se inician los procesos de erosión que la desmantelan. Ángel Salazar, del IGME, da respuesta

en su artículo a cuestiones como ¿Cuándo y cómo comienza la erosión? ¿Hasta qué punto depende de la estructura tectónica? ¿Es posible estimar cuánto “durará” una cordillera antes de que la erosión la arrase por completo?

Un último artículo de este bloque repasa las montañas existentes en otros planetas del Sistema Solar. En algunos de ellos existen montañas más altas que las terrestres pero, por el contrario, no hay cordilleras o cinturones montañosos que puedan seguirse durante miles de kilómetros, como sí ocurre en nuestro planeta. La explicación es que las montañas extraterrestres son debidas a efectos meteoríticos o a erupciones volcánicas. Estos volcanes constituyen gigantescos edificios ígneos que dejan pequeñas las montañas terrestres. Será el Dr. Francisco Anguita, colaborador habitual de esta revista, quien desarrolle estos asuntos en su capítulo.

A continuación, se incluyen dos aportaciones que pretenden enfatizar la importancia de las montañas en la enseñanza general de las ciencias de la Tierra. El primer artículo, escrito por el Dr. Ánchel Belmonte, propone utilizar un territorio muy especial, el Geoparque de Sobrarbe-Pirineos (Huesca), que podría calificarse como el “geoparque de las montañas”, para transmitir sobre el terreno nuestros conocimientos sobre el origen de una cordillera. ¿Qué se puede ver allí? ¿Hay rutas que permitan conocer cómo se formaron esas montañas? ¿Puede utilizarse ese material con fines docentes? Estas son algunas de las preguntas que responderá el Coordinador Científico de este Geoparque. La segunda aportación, más que un artículo, es un mini-atlas que ofrece una breve descripción de la geología de algunas montañas míticas. Aparte de los contenidos, este atlas funciona como una propuesta de trabajo que puede ser replicada por los docentes.

Para cerrar este monográfico hemos buscado un artículo que refleje una mirada a las montañas diferente, pero muy necesaria para la transversalidad que se busca en la enseñanza actual de las ciencias. Como se ha comentado con anterioridad, las montañas siempre han llamado la atención del ser humano. No sólo han servido para alentar nuestra curiosidad científica e intentar desentrañar su origen, sino también como inspiración para el desarrollo intelectual, artístico, espiritual y, en definitiva, cultural. El Dr. Eduardo Martínez de Pisón desarrolla estos aspectos en un capítulo distinto pero complementario a los anteriores.

Por último, ofrecemos una pequeña colección de reseñas de libros recientes que miran las montañas desde diversas ópticas y que pueden ser de utilidad al docente para obtener más información y recursos.

Esta recopilación de preguntas organizadas en artículos no pretende dar todas las respuestas. Pero sí ser una actualización de la interpretación que hoy en día da la Geología a la formación de las montañas. Ojalá dentro de una década otro monográfico de la Revista de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra pueda mostrar los nuevos avances. Eso significará que conoceremos aún mejor las montañas que tanto admiramos.

**Luis Carcavilla Urquí**  
*Coordinador del monográfico*