



**Meritxell Aulinas, Guillem Gisbert,  
Maria Ortuño**

# La Tierra, un planeta inquieto

**Volcanes y terremotos: por qué se originan,  
cómo nos afectan y cómo podemos  
convivir con ellos**



# Índice

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Prólogo, por Pere Santanach . . . . . | 13 |
|---------------------------------------|----|

## PARTE 1. INTRODUCCIÓN

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1. El origen del Universo . . . . .                                        | 21 |
| El Big Bang y la nucleosíntesis primordial. . . . .                                 | 21 |
| La formación de las estrellas y las galaxias. . . . .                               | 24 |
| ¿Cómo se forma una estrella y qué procesos tienen lugar<br>en su interior?. . . . . | 24 |
| Capítulo 2. La formación del Sistema Solar y de la Tierra . . . . .                 | 31 |
| La formación del Sol y de los planetas. . . . .                                     | 31 |
| La diferenciación de los planetas . . . . .                                         | 37 |
| El caso concreto de la Tierra . . . . .                                             | 39 |
| Capítulo 3. Tectónica de placas . . . . .                                           | 43 |
| La estructura interna de la Tierra y el comportamiento de las rocas . .             | 43 |
| Las placas tectónicas . . . . .                                                     | 49 |
| Límites convergentes . . . . .                                                      | 50 |
| Límites divergentes . . . . .                                                       | 54 |
| Límites transformantes. . . . .                                                     | 59 |
| ¿Por qué se mueven las placas tectónicas?. . . . .                                  | 60 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>La Tierra, un planeta caliente</i> . . . . .                                       | 60 |
| <i>El modelo de células de convección</i> . . . . .                                   | 62 |
| <i>El modelo actual</i> . . . . .                                                     | 63 |
| <i>La convección del manto</i> . . . . .                                              | 66 |
| ¿Qué pasará con la tectónica de placas a medida que la Tierra<br>se enfríe? . . . . . | 67 |

## PARTE 2. TERREMOTOS

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Capítulo 4. El origen de los terremotos. . . . .                                                       | 71  |
| La sismología, una ciencia joven . . . . .                                                             | 71  |
| ¿Qué es un sismo y por qué se produce? . . . . .                                                       | 74  |
| Ondas sísmicas . . . . .                                                                               | 76  |
| <i>Tipos de ondas sísmicas</i> . . . . .                                                               | 76  |
| Las placas litosféricas se mueven de sismo en sismo. . . . .                                           | 78  |
| <i>La profundidad de los terremotos, una de las evidencias<br/>        de la subducción.</i> . . . . . | 81  |
| <i>El campo de esfuerzos</i> . . . . .                                                                 | 82  |
| Los sismos asociados a volcanes . . . . .                                                              | 83  |
| Los sismos asociados a isostasia y a fenómenos de recuperación<br>elástica . . . . .                   | 85  |
| Sismos inducidos por la actividad humana . . . . .                                                     | 86  |
| Las fallas como principales fuentes sísmicas . . . . .                                                 | 88  |
| <i>Tipos de fallas</i> . . . . .                                                                       | 90  |
| <i>La Tierra es lenta porque no tiene prisa</i> . . . . .                                              | 91  |
| El ciclo sísmico . . . . .                                                                             | 92  |
| Capítulo 5. El tamaño de los terremotos: intensidad y magnitud . . . . .                               | 97  |
| La intensidad . . . . .                                                                                | 99  |
| <i>Mapas de isosistas y escalas de intensidad sísmica.</i> . . . . .                                   | 99  |
| <i>Escala de Mercalli</i> . . . . .                                                                    | 100 |
| <i>Escala macrosísmica europea (EMS98).</i> . . . . .                                                  | 102 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Escala sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón.</i>                     |     |
| <i>Escala Shindo</i> . . . . .                                                  | 103 |
| <i>¿La intensidad máxima coincide siempre con el epicentro</i>                  |     |
| <i>de un terremoto?</i> . . . . .                                               | 103 |
| <i>Movimiento del terreno</i> . . . . .                                         | 106 |
| La magnitud . . . . .                                                           | 107 |
| <i>Escala logarítmica para medir la magnitud local (o de Richter)</i> . . . . . | 109 |
| <i>Momento sísmico y magnitud momento</i> . . . . .                             | 110 |
| Energía sísmica de una región del planeta . . . . .                             | 112 |
| <i>Ley de Gutenberg-Richter</i> . . . . .                                       | 112 |
| Capítulo 6. Efectos geológicos de los sismos . . . . .                          | 115 |
| Efectos primarios . . . . .                                                     | 116 |
| Efectos secundarios. . . . .                                                    | 118 |
| <i>Licuefacción</i> . . . . .                                                   | 118 |
| <i>Grietas en el terreno</i> . . . . .                                          | 120 |
| <i>Movimientos de ladera</i> . . . . .                                          | 122 |
| <i>Otros efectos secundarios</i> . . . . .                                      | 123 |
| Tsunamis . . . . .                                                              | 124 |
| <i>¿Cuándo se produce un tsunami?</i> . . . . .                                 | 124 |
| <i>¿Cómo se propaga un tsunami y por qué es tan destructivo?</i> . . . . .      | 126 |
| <i>¿Todos los terremotos bajo el mar producen tsunamis?</i> . . . . .           | 128 |
| Capítulo 7. Cómo estudiamos los terremotos. . . . .                             | 131 |
| Entendiendo los sismos por la huella que dejan en el pasado:                    |     |
| paleosismología, arqueosismología y estudio del registro                        |     |
| histórico de sismos . . . . .                                                   | 135 |
| <i>La geología de los terremotos</i> . . . . .                                  | 135 |
| <i>La paleosismología</i> . . . . .                                             | 145 |
| <i>Sismología histórica y arqueosismología</i> . . . . .                        | 150 |
| Correlaciones entre los sismos que medimos actualmente y los sismos             |     |
| del pasado que han quedado registrados en la geología . . . . .                 | 152 |
| Entender los sismos midiendo sus propiedades físicas . . . . .                  | 153 |
| <i>Los primeros sismógrafos</i> . . . . .                                       | 154 |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Localizando el foco del sismo</i> . . . . .                              | 155 |
| <i>Estudiando la zona de deformación con tecnología satelital</i> . . . . . | 156 |
| Capítulo 8. Convivir con los terremotos . . . . .                           | 159 |
| Peligro, vulnerabilidad, riesgo... y otros términos útiles . . . . .        | 161 |
| Sismicidad en Cataluña y en la península Ibérica . . . . .                  | 163 |
| La predicción de los sismos. . . . .                                        | 164 |
| <i>Evaluación del peligro y del riesgo sísmico</i> . . . . .                | 165 |
| Reducción de los efectos destructivos de un sismo . . . . .                 | 169 |
| <i>Medidas estructurales</i> . . . . .                                      | 169 |
| <i>Medidas no estructurales</i> . . . . .                                   | 171 |

### PARTE 3. VULCANISMO

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| Capítulo 9. Los magmas . . . . .                                         | 179 |
| ¿Qué son y cómo se forman los magmas? . . . . .                          | 179 |
| Los magmas y la tectónica de placas . . . . .                            | 186 |
| <i>Límites de placa divergentes</i> . . . . .                            | 186 |
| <i>Límites de placa convergentes</i> . . . . .                           | 187 |
| <i>Zonas de intraplaca</i> . . . . .                                     | 189 |
| Propiedades de los magmas . . . . .                                      | 192 |
| <i>Composición química y clasificación de los magmas.</i> . . . . .      | 193 |
| <i>Propiedades físicas de los magmas</i> . . . . .                       | 195 |
| Capítulo 10. Del magma a la roca . . . . .                               | 199 |
| Fusión parcial y diferenciación magmática . . . . .                      | 199 |
| <i>Fusión parcial</i> . . . . .                                          | 199 |
| <i>Cristalización fraccionada</i> . . . . .                              | 200 |
| <i>Mezcla de magmas y asimilación magmática</i> . . . . .                | 204 |
| Los productos del enfriamiento de los magmas: las rocas ígneas . . . . . | 206 |
| <i>La clasificación de las rocas volcánicas</i> . . . . .                | 210 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Capítulo 11. Tipos de erupciones volcánicas . . . . .           | 213 |
| Actividad efusiva. . . . .                                      | 215 |
| Actividad explosiva . . . . .                                   | 217 |
| <i>Erupciones estrombolianas</i> . . . . .                      | 217 |
| <i>Erupciones vulcanianas</i> . . . . .                         | 218 |
| <i>Erupciones plinianas</i> . . . . .                           | 221 |
| <i>Erupciones hidromagmáticas</i> . . . . .                     | 222 |
| El índice de explosividad volcánica (IEV) . . . . .             | 224 |
| <i>¿Qué es el índice de explosividad volcánica?</i> . . . . .   | 224 |
| Capítulo 12. Tipos de volcanes y productos volcánicos . . . . . | 227 |
| Volcanes monogenéticos . . . . .                                | 228 |
| <i>Conos de escorias</i> . . . . .                              | 228 |
| <i>Maares, conos de toba y anillos de toba</i> . . . . .        | 230 |
| Volcanes poligenéticos. . . . .                                 | 233 |
| <i>Volcanes en escudo</i> . . . . .                             | 233 |
| <i>Volcanes compuestos o estratovolcanes</i> . . . . .          | 235 |
| Calderas y supervolcanes . . . . .                              | 240 |
| <i>Calderas asociadas a estratovolcanes</i> . . . . .           | 242 |
| <i>Calderas asociadas a volcanes en escudo</i> . . . . .        | 243 |
| <i>Calderas renacientes o ignimbríticas.</i> . . . .            | 243 |
| Productos volcánicos. . . . .                                   | 244 |
| <i>Productos de erupciones efusivas</i> . . . . .               | 245 |
| <i>Productos y depósitos de erupciones explosivas</i> . . . . . | 250 |
| <i>Gases</i> . . . . .                                          | 255 |
| Capítulo 13. Convivir con los volcanes . . . . .                | 257 |
| Los peligros volcánicos . . . . .                               | 258 |
| Coladas de lava . . . . .                                       | 259 |
| Emisión y caída de piroclastos. . . . .                         | 261 |
| Flujos piroclásticos . . . . .                                  | 263 |
| Emisión de gases . . . . .                                      | 265 |
| Terremotos y temblor volcánico . . . . .                        | 268 |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| Derrumbes . . . . .                                          | 268 |
| Lahares . . . . .                                            | 269 |
| Tsunamis . . . . .                                           | 270 |
| Estudio y vigilancia de los volcanes . . . . .               | 270 |
| Capítulo 14. Los volcanes de Cataluña . . . . .              | 273 |
| Edificios volcánicos y estilos eruptivos . . . . .           | 274 |
| <i>Zonas volcánicas de El Empordà y La Selva</i> . . . . .   | 274 |
| <i>Zona volcánica de La Garrotxa</i> . . . . .               | 276 |
| Productos volcánicos . . . . .                               | 280 |
| <i>Los piroclastos</i> . . . . .                             | 280 |
| <i>Las lavas</i> . . . . .                                   | 282 |
| Composición del magma y tipos de rocas volcánicas . . . . .  | 284 |
| ¿Por qué hay volcanes en Cataluña? . . . . .                 | 285 |
| Los volcanes en Cataluña: ¿extinguidos o dormidos? . . . . . | 288 |
| Bibliografía y webs . . . . .                                | 289 |

## PRÓLOGO

En el transcurso de generaciones contemplamos el mismo paisaje. Montañas, valles y llanuras se nos presentan como un marco estático sobre el cual se desarrolla la vida. Solo de vez en cuando, y en determinados lugares de la Tierra, terremotos y volcanes, fenómenos de corta duración y de efectos a menudo catastróficos para las personas, llenan los noticiarios televisivos y nos muestran de manera contundente un planeta dinámico. Volcanes y terremotos son una manifestación palpable para todos de la actividad interna de la Tierra. Es justamente esta actividad la que levanta cordilleras y hunde depresiones ante nuestros ojos, aunque, debido a la lentitud de los procesos implicados, la superficie de la Tierra nos parezca estable.

Los terremotos y los volcanes son manifestaciones breves y episódicas de procesos geológicos lentos y de larga duración. Los terremotos son consecuencia del movimiento de las fallas —dislocaciones de la corteza de la Tierra—, las cuales causan la formación de montañas y depresiones. Las fallas se deslizan a velocidades medias del orden de milímetros por año, o incluso menos, durante decenas de millones de años, y de esta forma generan relieves sin que nos demos cuenta de ello. Sin embargo, las fallas no se mueven de manera continua, sino de forma episódica, a sacudidas espaciadas en el tiempo. Hacen saltos, pequeños desplazamientos bruscos que pueden llegar a alcanzar algunos metros y que están separados entre sí por largos períodos de quietud. Estos saltos provocan las vibra-

ciones que conocemos como terremotos. Cada falla produce terremotos con una determinada cadencia, separados por intervalos de tiempo que duran desde unos pocos años hasta decenas de miles de años. Esto depende del grado de actividad de la región donde se ubica la falla. La existencia de fallas con períodos de tiempo largos entre saltos explica que puedan ocurrir terremotos en regiones donde hasta ahora son desconocidos. Por lo tanto, debemos tener cuidado: ¡regiones aparentemente tranquilas podrían temblar algún día!

Los volcanes son el resultado de la llegada a la superficie de la Tierra de un fundido de rocas, el magma, que se origina en profundidad. Para que un volcán haga erupción, es necesario que en algún lugar del interior de la Tierra se funda la roca y se forme el magma, y que luego el magma migre y se acumule cerca de la superficie, hasta que se den las condiciones que permitirán la erupción. En conjunto, se trata de un proceso largo y complejo. El volcán solo es un fenómeno superficial y breve que pone en evidencia la actividad magmática del interior de la Tierra. El magma no siempre termina en manifestaciones volcánicas; puede consolidarse en el interior de la corteza.

Si prestamos atención a los noticiarios, nos daremos cuenta de que la mayoría de los terremotos y erupciones volcánicas se concentran en algunas regiones, como por ejemplo alrededor del océano Pacífico; otras regiones, en cambio, no salen nunca en las noticias en relación con estos fenómenos, como es el caso de Escandinavia. Hay regiones más activas y otras más tranquilas. Esto se debe a la manera como se organiza la dinámica de las capas más externas de la Tierra. Hay que entender esta dinámica para comprender los terremotos y los volcanes.

Desde la más remota antigüedad, los terremotos y los volcanes llamaron la atención del hombre, que trató de darles explicación. Interpretaciones míticas y sobrenaturales primero, que poco a poco fueron dejando paso a explicaciones científicas, de acuerdo con las visiones que se tenía en cada momento de la Tierra y su funcionamiento. No se trata, ni aquí ni

en este libro, de contar la historia de estas explicaciones. Solo mencionaré, a modo de ejemplo, algunas interpretaciones de los terremotos y volcanes de mediados del siglo XVIII, cuando se estaban estableciendo los fundamentos de la geología, Lavoisier sentaba las bases de la química y se acababa de descubrir la electricidad. Se consideraba que los terremotos eran la consecuencia de tormentas eléctricas en el interior del globo comparables a las que se producen en la atmósfera. Se propuso incluso fabricar «paraterremotos», que, concebidos a la manera de los pararrayos, consistirían en cables que se enterrarían profundamente para disipar la electricidad responsable de los terremotos. En la misma época se pensaba que el magma que hacía erupción a través de los volcanes se debía a la fusión de rocas bastante superficiales causada por el incendio de capas de carbón de piedra.

Desde entonces, el conocimiento de la Tierra y de los procesos que tienen lugar en ella ha progresado mucho y ha cambiado radicalmente. La teoría de la tectónica de placas, formulada hace poco más de medio siglo, explica la dinámica de las capas más externas de la Tierra e integra, en un marco dinámico global, la mayoría de los fenómenos geológicos, entre los que cabe mencionar la sismicidad y el vulcanismo

El libro que tenéis en vuestras manos ofrece una visión clara de los conocimientos actuales sobre volcanes y terremotos en el marco de la dinámica de la Tierra, tal como la entendemos hoy. Los tres primeros capítulos explican los conceptos fundamentales de la teoría de la tectónica de placas; para entender cómo la Tierra ha llegado a este comportamiento, previamente repasan de manera breve la evolución de las estrellas, los sistemas solares y los planetas, en particular la evolución de la Tierra.

Los terremotos son el objeto de cinco capítulos. Se expone qué es un sismo y por qué se produce, y se destaca el papel de las fallas como fuentes de los terremotos. A continuación se trata el tamaño de los sismos y se definen los conceptos de magnitud e intensidad, que siempre hay que distinguir en sismología. También se describen los efectos que producen los

sismos y los métodos de estudio de los sismos recientes y los ocurridos en épocas pretéritas, tanto aquellos de los que se tiene noticia histórica como los más antiguos, para los que hay que recurrir a la información que proporciona el registro geológico. Una vez expuesto el fenómeno sísmico, se aborda el problema de la convivencia del hombre con los terremotos. ¿Se pueden prever? ¿Cómo se pueden mitigar sus efectos?

La última parte del libro habla de los volcanes, en cinco capítulos adicionales. Explica qué son los magmas, cómo se forman, sus distintos tipos y su relación con la dinámica de las placas. Se sigue con los procesos de consolidación de los magmas, los tipos de rocas a los que dan lugar y el papel de los volcanes en estos procesos. Se dedica un capítulo a describir las características de los diferentes tipos de volcanes y de los productos que emiten: escorias, gredas, bombas, lavas, etc. De forma análoga al tratamiento de los sismos, también se discuten los peligros de los volcanes y la vigilancia de la actividad volcánica.

Tanto en lo que respecta a los volcanes como a los terremotos, los autores ilustran los distintos conceptos con ejemplos de todo el mundo, incluido nuestro país. El lector no debe creer que los temas tratados en este libro tienen solamente un interés científico ajeno a nuestra realidad. También tienen interés para nuestro país, que, pese a no estar situado en una zona de gran actividad sísmica y volcánica, no está exento de los peligros ocasionados por estos fenómenos. El hombre vio los volcanes de la región de Olot en acción, dado que su última erupción tuvo lugar hace solo 11.000 años. ¿Los volcanes de La Garrotxa se han extinguido o están tan solo dormidos? Terremotos destructivos han ocurrido mucho más recientemente. En 1829 un sismo destruyó Torrevella y otras poblaciones del Baix Segura, y en el siglo xv una serie de terremotos sacudió La Garrotxa. Varias poblaciones fueron destruidas, entre ellas Olot, y el terremoto ocurrido el día de la Candelaria de 1428, el más fuerte de la serie, mató a unas mil personas. Hoy en día, hay una central nuclear situada sobre una falla aparentemente tranquila, pero que en los últimos 100.000 años ha

ocasionado diversos terremotos, causados por saltos de la falla que han producido rupturas notorias del terreno. ¿Pueden las fallas aparentemente inactivas de nuestro país producir terremotos destructivos?

Espero que estos apuntes acaben de despertar el interés del lector y lo animen a introducirse en el mundo de los terremotos y los volcanes.

Finalmente, conviene recalcar que este libro es el resultado de la voluntad divulgadora de Meritxell Aulinas, Guillem Gisbert y Maria Ortuño, investigadores de volcanes y terremotos y profesores de Geología de la Universidad de Barcelona, y de la voluntad de Edicions de la Universitat de Barcelona de exponer a un público amplio el estado actual de los conocimientos científicos.

Aulinas y Gisbert centran su investigación en la geoquímica y la petrología de las rocas volcánicas. El principal objeto de investigación de Aulinas es el vulcanismo de las islas Canarias, en particular el vulcanismo reciente de la isla de Gran Canaria. También ha trabajado en el Vesubio y en Campi Flegrei, cerca de Nápoles. Gisbert se ha ocupado principalmente del vulcanismo antiguo de la isla de Cerdeña, así como del reciente de La Garrotxa; además, ha hecho algunas incursiones en el vulcanismo de América Central. Ortuño investiga terremotos prehistóricos, para cuyo conocimiento hay que basarse en la huella que han dejado en los materiales geológicos. Ha estudiado terremotos ocurridos durante los últimos 300.000 años en los Pirineos, en el sudeste de la península Ibérica y también en Nicaragua y México.

PERE SANTANACH

Profesor emérito del Departamento  
de Dinámica de la Tierra y el Océano,  
Universidad de Barcelona

# **Parte I**

## **Introducción**

## CAPÍTULO 1

### El origen del Universo

A menudo, cuando se quiere explicar la presencia de volcanes y terremotos en nuestro planeta, se recurre a la teoría de la tectónica de placas, una teoría de la que casi todo el mundo ha oído hablar alguna vez. Ahora bien, rara vez se explica el fenómeno de la tectónica de placas en sí, lo cual es fundamental para entender las causas de los sismos y las erupciones volcánicas. Para ello, hay que remontarse casi hasta el origen del Universo, ya que la tectónica de placas es el resultado de la dinámica de formación de las estrellas, los sistemas solares y los planetas.

#### EL BIG BANG Y LA NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL

El modelo más aceptado sobre la formación del Universo conocido es la teoría del Big Bang. Según este modelo, el Universo se formó hace aproximadamente 13.700 millones de años a partir de la «explosión» (el Big Bang) de un punto minúsculo infinitamente denso y caliente que concentraba toda la materia y la energía del Universo observable. La evolución del Universo durante sus primeros segundos de vida fue trepidante. En poco más de tres minutos se pasó de un estadio en el que toda la masa y energía del Universo se concentraban en un punto minúscu-

lo a una temperatura inimaginable (se calcula que  $10^{-43}$  s —es decir, 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 01 segundos— después del Big Bang la temperatura del Universo era de unos  $10^{32}$  °C —esto es, ¡un 1 seguido de 32 ceros!—), a un estadio en el que ya existían núcleos atómicos. En el inicio, la temperatura era tan elevada que las partículas elementales aún no podían existir, y las cuatro fuerzas fundamentales que actúan hoy en el Universo (gravitatoria, interacción nuclear fuerte, interacción nuclear débil y electromagnética) estaban unificadas en una sola fuerza. Durante una minúscula fracción del primer segundo transcurrido después del Big Bang, el Universo experimentó una expansión increíblemente rápida, la cual se conoce como época inflacionaria. Esta expansión hizo que el Universo se fuera enfriando. Es un proceso equivalente al que tiene lugar con los productos envasados en forma de aerosol: aunque el bote esté caliente, el spray (por ejemplo, un desodorante) siempre sale frío debido a la expansión. A medida que la temperatura fue bajando, las fuerzas se fueron separando y empezaron a aparecer las partículas; se formaron los quarks y los leptones, que son los constituyentes fundamentales de la materia, y las partículas responsables de las fuerzas fundamentales. A partir de entonces, el Universo siguió expandiéndose, pero más lentamente. Inicialmente se creó materia y antimateria en proporciones casi idénticas. Con el tiempo, la materia y la antimateria se aniquilaron mutuamente en proporciones estrictamente idénticas. Ahora bien, por razones que aún no se conocen con exactitud, existía un ínfimo exceso de materia respecto a la antimateria, que quedó como residuo al final del proceso. Esta materia residual es la que constituye el Universo conocido. Conforme fue disminuyendo la temperatura debido a la expansión, fueron apareciendo partículas más complejas, de tal modo que, alrededor de 100 segundos después del Big Bang, ya se habían formado protones y neutrones (los constituyentes de los núcleos atómicos), en una proporción de 7 a 1. El núcleo atómico más simple posible es el del hidrógeno (H), que consiste únicamente en un protón; es el núcleo más peque-