

Eff-Darwich, A. (2009). 3. Tenerife bajo las leyes de la Física. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Misterios de la Gea: descifrando los enigmas ocultos en rocas, gases, agua y fuego*. pp. 71-98. Actas IV Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. ISBN 978-84-613-4817-6.

3. Tenerife bajo las leyes de la Física

Antonio Eff-Darwich

*Físico, Profesor del Dpto. de Edafología y Geología,
Universidad de La Laguna.*

Los que nos dedicamos a esto de la ciencia, vivimos en un tiempo en el que no existes si no publicas. Se publica siguiendo los estrictos protocolos que las revistas científicas marcan, no dejando mucho margen para el 'toque personal' en lo que escribimos. La ciencia en España se financia mayoritariamente del dinero que pagamos religiosamente todos los años a la Hacienda Pública; es por ello que la gente de ciencia debe también acercar sus resultados a aquellos que los financian, o sea a todos ustedes. Y como ustedes no van a ser tan estrictos en el modo en que escriba, permítanme dirigirme a todos de una manera coloquial y distendida, para así intentar transmitirles algo del entusiasmo que siento cuando hago ciencia.

Sirva este trabajo de homenaje al Profesor Juan Coello Armenta, al que le agradezco las estimulantes conversaciones que tuvimos sobre Tenerife, su evolución y su agua. Parte de los resultados e ilustraciones de este trabajo están inspirados en sus ideas y en el termómetro de bolsillo que siempre llevaba 'por si acaso'. Últimamente he descubierto que su sabiduría y entusiasmo por la ciencia tiene continuidad en la mano de su hijo Juan Jesús Coello Bravo al que le pido disculpas por las veces que le molesto preguntando sobre agua, fallas y diques.

Algunas reflexiones personales

La ciencia, mejor dicho la Ciencia, es muy amplia y por ello se ha dividido en ramas: desde la Biología a la Geología, de las Matemáticas a la Psicología, de la Física a la Medicina, y así hasta casi el infinito. Yo me

dedico a la Física, una de las ciencias más versátiles que hay. ¿Por qué digo esto? Un físico es un hombre o una mujer que intenta explicar fenómenos que se observan en la Naturaleza para poder predecir su comportamiento futuro. Puedo observar como una piedra que tengo en mi mano llega al suelo; puedo medir el tiempo que tarda en caer, si tarda lo mismo en caer de día o de noche, con frío o con calor, de pie en una guagua o en un tranvía, etcétera. Un físico intentará explicar cuales son los fenómenos que participan en la caída de la piedra e intentará crear un modelo matemático que explique la caída. Pero ahí no se termina el trabajo: ese modelo debe servir para explicar cómo caería la piedra en París o Moscú, o cuanto tardaría la piedra en caer si fuera más ligera o más pesada. En definitiva, intentamos buscar normas o leyes generales que expliquen el fenómeno de la caída de la piedra, pero también que pronostique cómo caerá esa piedra en otras condiciones.

En la Naturaleza no sólo hay piedras; así, los físicos que estudian los objetos celestes se llaman astrofísicos, los que estudian fenómenos geológicos se llaman geofísicos, o los que aplican sus conocimientos al mundo de la Biología y la Medicina se llaman biofísicos. Un físico es una especie de mercenario que puede combatir en distintos campos de batalla, pero siempre usando unas determinadas armas, que son las Matemáticas y las leyes de la Física. Con el devenir de los siglos, se han establecido una serie de leyes Físicas que permiten estudiar los más diversos fenómenos naturales y que además son universales, o sea me valen para un fenómeno que ocurra aquí en Tenerife, o en Australia, o en Marte o en una galaxia situada a distancias inimaginables. Hay leyes muy conocidas, como la Relatividad de Einstein, las leyes de la mecánica celeste de Kepler, las leyes de la termodinámica, o las de Newton. Otras son menos conocidas, pero igual de importantes, como las del electromagnetismo de Maxwell o las de la radiación de Planck, Wien o Stefan-Boltzman.

Todas estas leyes explican ciertos aspectos de la interacción de las cuatro fuerzas fundamentales del Universo: la gravitatoria, la electromagnética, la interacción débil y la interacción fuerte, estas dos últimas relacionadas con la interacción entre las partículas que componen los átomos. Tantas leyes y fuerzas, han hecho que la Física se diversifique en campos, como la Mecánica Clásica, la Termodinámica, la Mecánica Cuántica, la Dinámica de Fluidos, la Relatividad General y Especial, la Teoría Cuántica de Campos, y un largo etcétera. Yo, como mercenario, poseo un enorme arsenal con el que atacar, mejor dicho, complementar otras áreas del saber. Por ejemplo, un físico metido a geólogo, o sea un geofísico, usará armas como las almacenadas en la Termodinámica, la Mecánica Clásica o la Dinámica de Fluidos para estudiar fenómenos como los movimientos sísmicos. Una vez entendido que es eso de un movimiento sísmico, podrá buscar incluso utilidades a sus resultados, por ejemplo

utilizar movimientos sísmicos para buscar petróleo. ¿Ven ustedes?, no sólo se busca la comprensión de los fenómenos naturales, sino su aplicación a la vida cotidiana.

Algo que a mi me sigue asombrando es ver que ciertos fenómenos naturales se repiten a distintas escalas espaciales y temporales. Les voy a poner un ejemplo: un cazo de agua hirviendo y la superficie del Sol comparten un mismo fenómeno físico que es la convección, aunque ocurra a escalas muy distintas. La convección hace que la materia caliente ascienda, libere energía, se enfríe y descienda. En el cazo hirviendo, el agua caliente asciende, libera calor en la superficie del caldero y se hunde al enfriarse, provocando el borboteo del agua. En la superficie del Sol se observa el mismo borboteo, pero en esta ocasión hablamos de un caldero de casi ¡700.000 kilómetros de radio! He puesto el ejemplo de la convección para bajarme un poco los humos y esa especie de ‘chulería’ que desprende mi discurso sobre lo maravilloso que es ser físico. Pues bien, pese a ser uno de los fenómenos más comunes, aún no existe una teoría del todo satisfactoria que explique el fenómeno de la convección.

Muchos estudiantes sienten pánico a la Física, no tanto a lo que representa, sino a como se representa: las temidas ecuaciones y relaciones matemáticas. Debemos entender las matemáticas como un lenguaje, que entiende igual un ruso que un chino o un argentino. Por ejemplo, la serie de ecuaciones que se muestran en la figura 1 dan un poco de respeto, incluso su nombre, ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes, dan respeto.

Ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes

<i>Continuidad</i>	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$			
<i>Momento</i>	$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$ $\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$			
<i>Energía</i>	$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \Phi - \rho c_v \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right)$			
	<table style="margin: auto; border: none;"> <tr> <td style="padding: 0 10px;"><i>Sujeto</i></td> <td style="padding: 0 10px;"><i>Verbo</i></td> <td style="padding: 0 10px;"><i>Predicado</i></td> </tr> </table>	<i>Sujeto</i>	<i>Verbo</i>	<i>Predicado</i>
<i>Sujeto</i>	<i>Verbo</i>	<i>Predicado</i>		

Fig. 1. Forma simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido.

Sin embargo, hay que mirarlás como si se tratasen de oraciones, con un sujeto, verbo y predicado. En este sentido, la ecuación de la energía dice algo tan trivial como: El cambio en el tiempo de la temperatura de un fluido (sujeto) viene (verbo) dado por la transmisión de calor de las zonas más calientes a las más frías (primer término del predicado), más el calor generado por alguna fuente (segundo término del predicado), más el calor transportado por el movimiento del fluido (tercer término del predicado), la famosa convección.

Escrito así suena mejor, pero recuerden que necesito transmitir esta información a gentes que hablan otros idiomas y además necesito cruzar la información de varias de estas 'oraciones' matemáticas, por lo que las ecuaciones son absolutamente necesarias e incluso divertidas, si, divertidas.

Las leyes de la Física se basan en la repetición, o sea, que puedo describir un fenómeno porque soy capaz de repetirlo o ver como se repite cuantas veces quiera hasta que mi teoría case con las observaciones. Sin embargo, hay muchos campos del saber donde la repetición no es posible y muchas veces no es deseable. Por ejemplo, no es posible repetir el experimento Teide (léase una erupción del Teide) cuantas veces quiera. Ese experimento ocurrió una vez y no se repetirá más, así que hay que echar mano de nuestro arsenal de leyes y de mucha imaginación para resolver fenómenos como puede ser el volcán Teide. Es más, ¿qué les parece si montamos un experimento llamado Tenerife? ¿Podríamos aplicar las leyes de la Física a Tenerife? A esta pregunta y a otras parecidas intentan buscar respuestas los geofísicos, unos investigadores a los que les es más difícil entender que ocurre a 1.000 metros bajo el cráter del Teide, que a un astrofísico explicar como gira una estrella que se encuentra a billones de kilómetros de nosotros. Sin embargo, la relación de pareja entre los físicos y los geólogos no pudo tener peor comienzo.

David contra Goliat

En 1862, Lord Kelvin, una de las mentes más brillantes del siglo XIX, publicó un artículo donde estimaba la edad del planeta Tierra. William Thomson, el nombre real que se escondía tras el aristocrático Lord Kelvin, calculó la edad de la Tierra en 100 millones de años. Asumió que en un principio, el planeta había sido un globo de material líquido y después estimó (empleando la segunda ley de la termodinámica) el tiempo que habría necesitado para llegar a la temperatura actual, suponiendo que el interior del planeta es homogéneo y el transporte de calor se realiza mediante conducción (el flujo de calor va desde lo más caliente a lo más frío). Los resultados de Kelvin tenían en cuenta además que la temperatura

aumenta aproximadamente 1 grado centígrado por cada 28 metros que profundicemos en el subsuelo.

Las estimaciones de Kelvin desesperaron a otro grande del siglo XIX, el naturalista Charles Darwin (Fig. 2), que tras su largo viaje por el mundo a bordo del Beagle, había observado cómo las distintas condiciones ambientales y geográficas habían dado lugar a distintas especies. Pero para que su teoría funcionase y los pequeños cambios sufridos por los animales en cada generación pudiesen dar lugar a la gran cantidad de especies que existen, Darwin necesitaba que la edad de la Tierra fuese mayor que la calculada por Kelvin. Sin embargo, los resultados de Kelvin se tomaron como dogma durante los siguientes treinta años. Pesaba mucho el prestigio de Kelvin y el pobre conocimiento en matemáticas y física que biólogos y geólogos poseían en aquella época y que les impedía rebatir las ideas del gran Kelvin. Además, los físicos de la época tenían en muy baja estima los métodos y mediciones realizadas por los geólogos. Era una lucha de David contra Goliat.



Fig. 2. Fotografías de algunos ilustres científicos que participaron en el cálculo de la edad de la Tierra: Darwin (a), Kelvin (b), Perry (c), Rutherford (d), Becquerel (e) y el matrimonio Curie (f).

La primera seria objeción a la teoría de Kelvin vino de un antiguo estudiante suyo, John Perry, que postuló que la edad supuesta de la Tierra podría ser en realidad mucho mayor si no se considerase que el interior del planeta es homogéneo y si se considerase que podría haber cierto grado de fluidez en algunas capas del interior de la Tierra. La existencia de un fluido implicaría que el transporte de calor podría llevarse a cabo mediante convección, lo que supondría que el planeta tardaría muchísimo más tiempo de enfriarse y por lo tanto sería mas viejo (2.000 a 3.000 millones de años). Kelvin veía a la Tierra como un pan sacado del horno y Perry como una botella de cristal (la capa rígida) llena de líquido caliente. Inicialmente tanto el pan como el agua caliente estarían a la misma temperatura, pero la botella de Perry tardaría más tiempo en enfriarse que el pan de Kelvin. Ahora sabemos que Perry estaba en lo cierto, sin embargo, no quiso retar a su querido maestro y no insistió más en el tema.

A principios del siglo XX, los trabajos sobre radiactividad del matrimonio Curie, de Becquerel o Rutherford demostraron que elementos como el radio pueden emitir grandes cantidades de calor por tiempo indefinido y sin enfriarse. Este descubrimiento suponía que una nueva fuente de calor debía introducirse en los cálculos de Kelvin y que su teoría inicial quedaba ya desbancada, pero ¿cómo decírselo al todopoderoso Kelvin? Esa tarea le tocó en 1904 a un humilde hijo de granjeros, Ernest Rutherford; y así lo cuenta:

“Entré en la sala y entre los asistentes descubrí enseguida a Lord Kelvin, y me di cuenta de que me esperaban problemas al final de la conferencia, en la que debía hablar de la edad de la Tierra, tema en el que mis puntos de vista diferían profundamente de los suyos. Me quedé tranquilo porque Kelvin dormía profundamente, pero cuando llegó al punto clave se enderezó, abrió un ojo y me lanzó una mirada siniestra. Por fortuna sentí una repentina inspiración y dije que Lord Kelvin había puesto un límite a la edad de la Tierra ¡siempre que no se descubriera otra fuente de calor!, por lo que sus planteamientos habían sido verdaderamente proféticos. El anciano me miró radiante. Supe que había ganado.”

Cuando las hojas no dejan ver el bosque

En cualquier rama de la ciencia es importante ver el bosque en su conjunto antes de mirar las hojas de los árboles, o sea, es necesario tener una idea global del objeto a estudio y de los procesos relacionados con él, antes de meterse a estudiar particularidades del objeto en cuestión. Nuestro

objeto de estudio es Tenerife, una isla volcánica situada en el océano Atlántico, muy cerca de la costa del continente africano. ¿Qué hacen ahí esta isla y el resto de las Canarias?, ¿cómo se explica la existencia de estas islas en el marco de la dinámica global del planeta? La Física, o mejor dicho, la Física y la aplicación de las leyes físicas al desarrollo de instrumental científico han ayudado a mejorar sustancialmente nuestro conocimiento del planeta y su dinámica.

La figura 3 nos da una primera imagen global de la actividad del planeta, en particular en los alrededores de Tenerife. La edad del suelo oceánico sobre el que se asienta la isla supera los 100 millones de años, edad que decrece conforme nos alejamos del continente africano y nos dirigimos a la dorsal oceánica, en medio del Atlántico. Para calcular la edad se han usado dos hechos físicos. Por una parte, cuando la temperatura de un material supera un cierto límite (la temperatura de Curie), este pierde sus propiedades magnéticas. Cuando la temperatura vuelve a bajar el límite de la temperatura de Curie, los átomos del material se alinean con el campo magnético. El segundo hecho físico es que la Tierra posee un campo magnético muy intenso que cambia de polaridad (el polo norte pasa a ser polo sur y viceversa) cada cierta cantidad de tiempo. La aplicación de estas propiedades magnéticas como reloj geológico son evidentes: la lava está inicialmente a una temperatura muy superior a la de Curie, por lo que está desmagnetizada; cuando se enfría sus átomos se alinean siguiendo la polaridad del campo magnético terrestre en ese momento. O sea, en una secuencia muy larga de emisiones de lava, como las de la dorsal oceánica, encontraremos un registro temporal de las variaciones de polaridad del campo magnético terrestre, en definitiva un archivo de fechas.

El panel central de la figura 3 indica la velocidad de desplazamiento de la corteza terrestre, que en los alrededores de Canarias es de las más lentas del planeta. Por último, el panel inferior de la figura 3 corresponde al mapa del flujo de calor medido en la corteza terrestre. Curiosamente, aunque Canarias sea una zona volcánica, el flujo de calor es muy bajo en sus alrededores, consecuencia directa de encontrarnos sobre corteza relativamente vieja y distante de la dorsal oceánica atlántica, donde el flujo de calor es intenso, al igual que en el resto de dorsales.

La figura 4 (panel superior) corresponde a una imagen de Google-Earth del Océano Atlántico de tal modo que Canarias y Azores quedan en el borde superior de la imagen. Las zonas de mayor ocurrencia de terremotos y actividad volcánica no están distribuidas aleatoriamente, sino que siguen patrones muy claros, concordando algunas veces las zonas de mayor sismicidad con las de mayor actividad volcánica, como es el caso de la costa oeste de América del Sur.

Las figuras 3 y 4 nos están mostrando instantáneas de la dinámica de la corteza terrestre. Como propuso Wegener, meteorólogo alemán en 1913, la

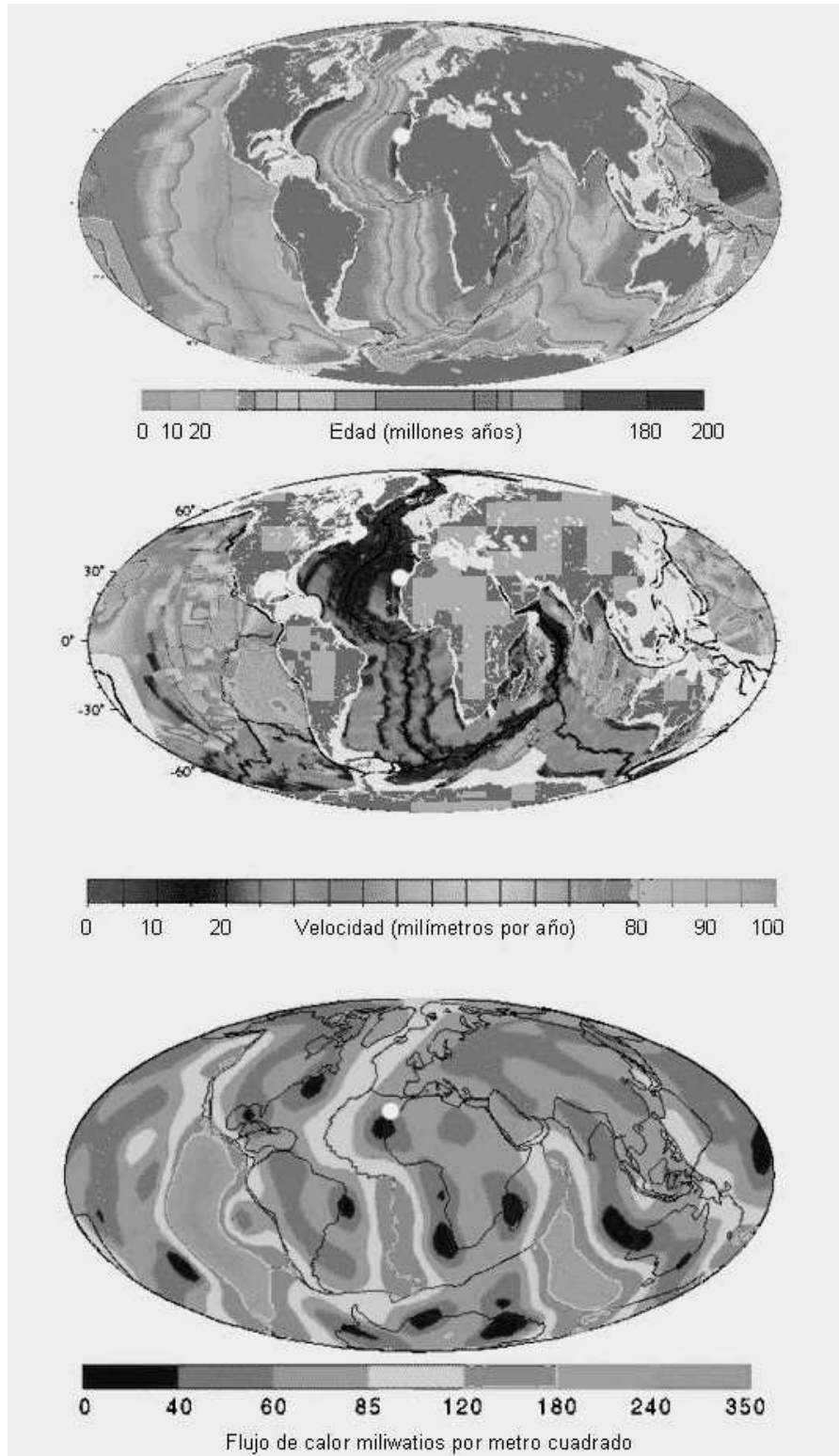


Fig. 3. Mapas que muestran la edad del fondo oceánico (panel superior), velocidad de expansión de la corteza oceánica (panel central) y el flujo de calor (panel inferior). La localización de las islas Canarias se indica con un círculo blanco. Datos obtenidos de (1) Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006 y de (2) <http://www.heatflow.und.edu/index2.html>

corteza se halla dividida en una serie de placas que se mueven unas con respecto a otras. Curiosamente, su idea de la deriva de placas se le había ocurrido navegando por el Ártico, asomado a la borda del barco, mirando cómo los trozos de hielo se rompían y se separaban. Se genera placa en la dorsales oceánicas, mientras que se destruye placa en zonas como la costa oeste de América del Sur, donde la placa oceánica (Pacífica) de Nazca se hunde bajo la placa Suramericana. Conociendo el ritmo de movimiento actual de las placas, y complementando estos datos con otros geológicos y biológicos, podemos dar marcha atrás a la moviola y ver cómo era el entorno de Tenerife hace decenas de millones de años, tal y como se muestra en la figura 5. Es realmente espectacular ver como hace 150 millones de años, el lugar que hoy ocupa Canarias estaba en medio del continente africano, muy cerca de la costa de América del Sur.

Pero, ¿quién es el motor de todos estos cambios? La respuesta es el calor, en particular el calor interno del planeta y la forma que este es transportado a la superficie del planeta. El interior del planeta está muy caliente debido, entre otras cosas, a que cuando se formó era una inmensa bola de material fundido y parte de este calor primordial se conservó en el núcleo planetario. Además, el planeta genera bastante calor por la desintegración de elementos radiactivos como el uranio, el radio o el potasio. Como había descubierto Perry, la convección es el mecanismo que se asocia al transporte de calor desde el interior planetario. Muy simplídicamente, cuando un fluido es calentado por debajo, su temperatura aumenta, la densidad disminuye y tiende a flotar y elevarse en el medio circundante más frío. Es como cuando se le escapa a un niño un globo de feria, se eleva porque está lleno de un gas menos denso que el aire. Pues bien, el fluido caliente asciende, libera calor, se enfría y desciende. Una vez calentado de nuevo desde el fondo, inicia su periplo de ascenso, liberación de calor y descenso. Eso ocurre en un cazo de agua hirviendo: el borboteo del agua no es más que material caliente que asciende del fondo para liberar calor. En el interior de nuestro planeta, este movimiento de ascensión, liberación de calor y descenso que ocurre en escalas de decenas de millones de años, se pensó que era el responsable de la rotura y movimiento de la corteza, que era un elemento pasivo en este sistema, como corcho flotando en agua hirviendo.

Lamentablemente, la Física es implacable y nos revela que este proceso dudosamente se daría en nuestro planeta. La Tierra no es un caldero que se calienta desde abajo, se calienta desde dentro. Gran parte del calor se genera por desintegración radiactiva dentro del propio fluido, por lo que la convección tal y como la explica el modelo del caldero con agua hirviendo no vale. Además, el fluido del que está compuesto el interior terrestre (a escalas de millones de años) varía sus propiedades (presión, temperatura, propiedades químicas, viscosidad) con la profundidad. Es como si en vez de

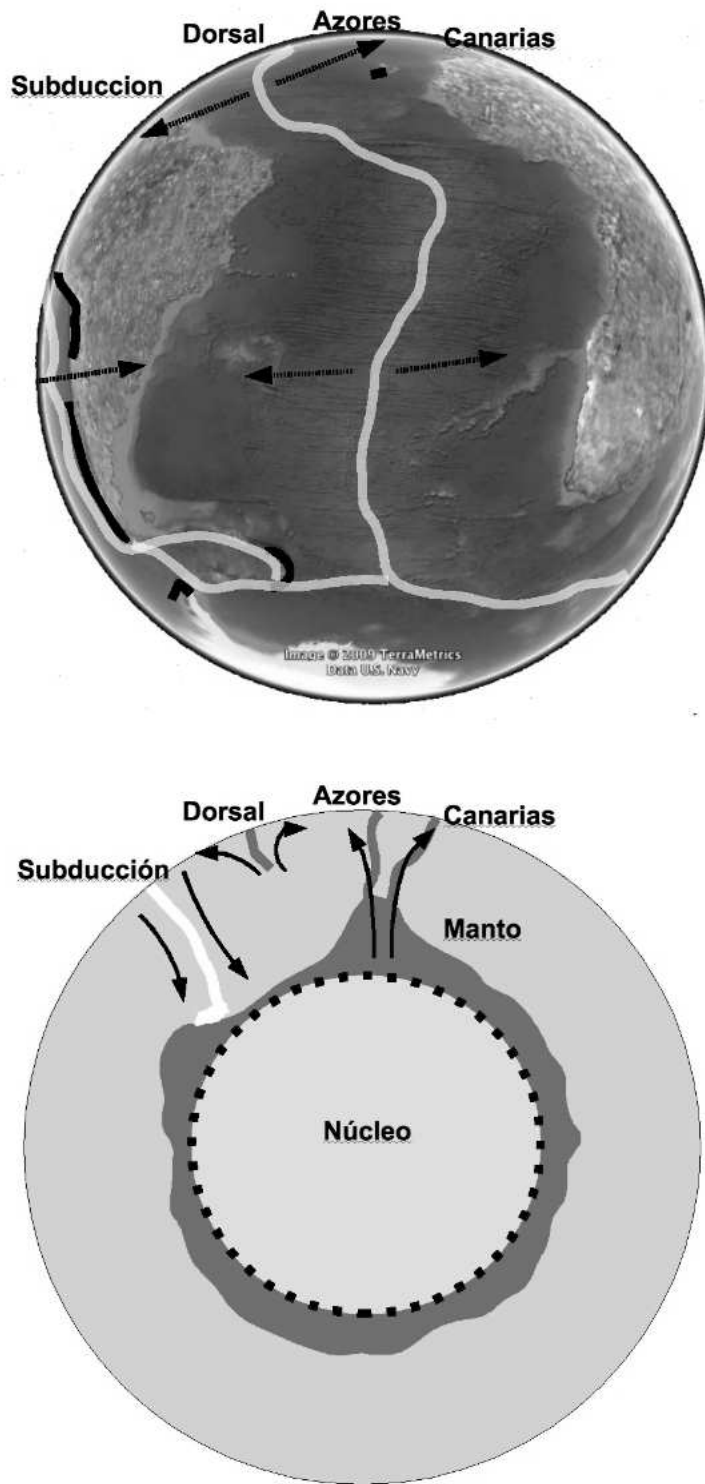


Fig. 4. El panel superior muestra una imagen de Google-Earth del Océano Atlántico, dejando Canarias, Azores y la costa Oeste de América del Sur al borde de la imagen. Las líneas blancas muestran la localización preferente de terremotos, mientras que las negras muestran la localización de volcanes activos. El panel inferior muestra un corte imaginario de la Tierra para mostrar el modelo geodinámico que se explica en el texto.

agua hirviendo, tuviéramos una mezcla de agua, aceite, miel y sirope. Los movimientos convectivos que parecen tener lugar en el interior del planeta están dominados por el ascenso de gigantescas columnas calientes de fluido (plumas) ancladas a unos 2900 kilómetros de profundidad. Una de estas columnas está asociada al desarrollo de los archipiélagos de Canarias, Madeira, Cabo Verde y Azores (ver panel inferior de la figura 4). Las placas que se hunden o subducen al contacto con otras, como la de Nazca descienden 'frías' hasta la frontera entre el núcleo y el manto donde son recicladas y vuelven a ascender a través de nuevas plumas en periodos de tiempo de cientos de millones de años. La formación de las dorsales se debe

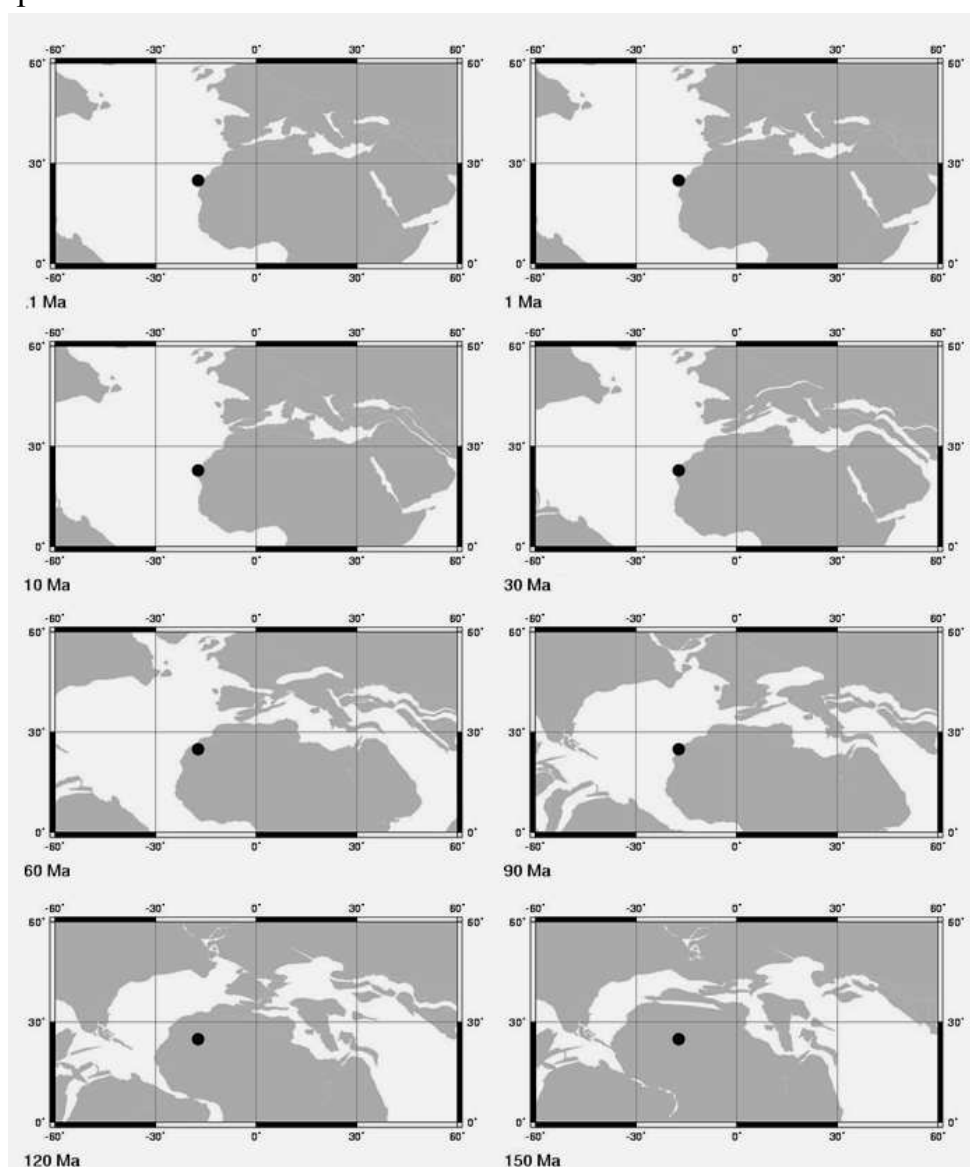


Fig. 5. Evolución en el tiempo de la posición de las placas tectónicas desde hace 150 millones de años hasta el presente (<http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/globaltext2.html>). La posición actual de las islas Canarias se indica con un círculo negro.

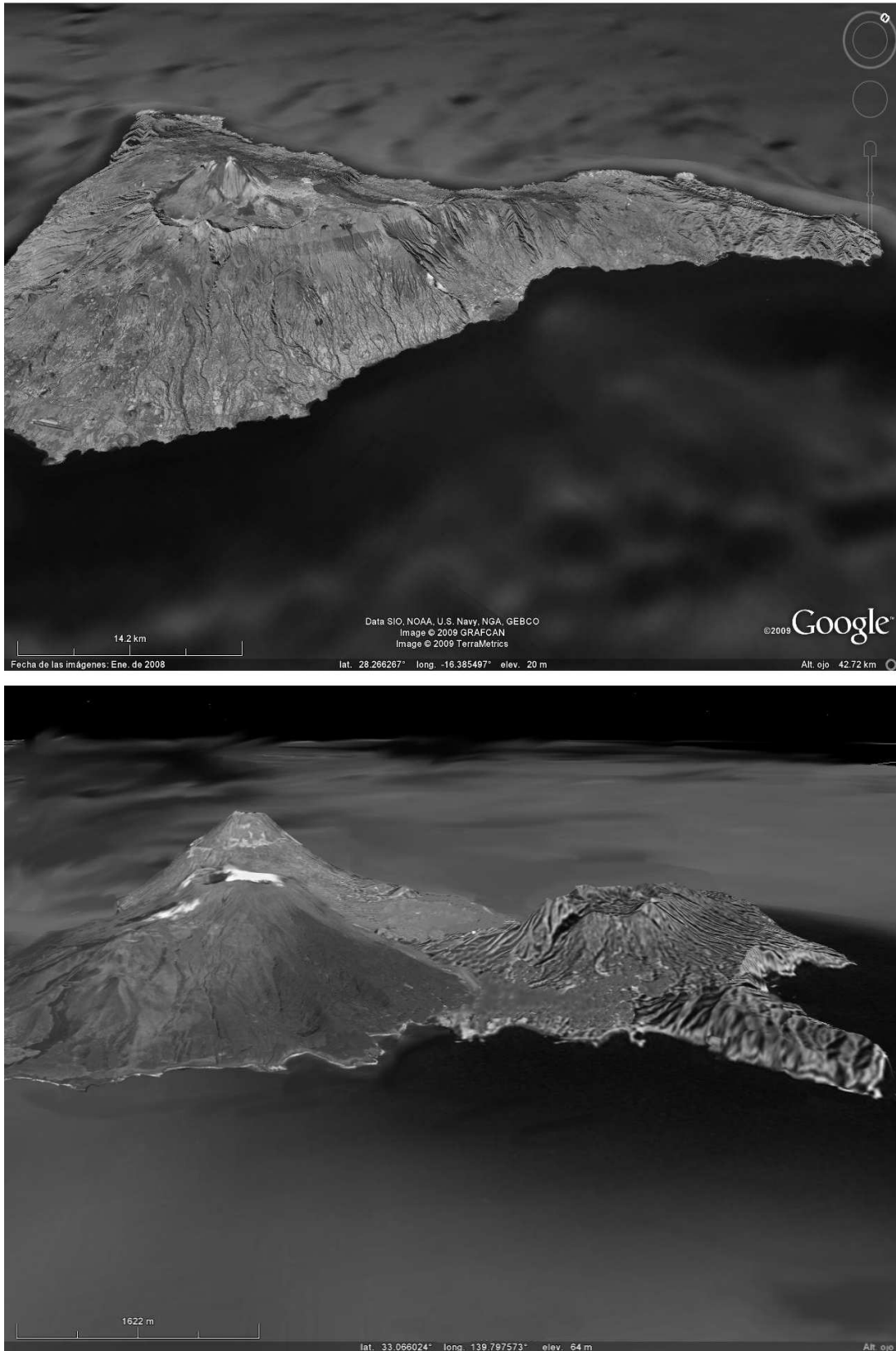


Fig. 6. El panel superior muestra una imagen actual de la isla de Tenerife tomada de Google-Earth, mientras que el panel inferior muestra un modelo infográfico de como pudo ser Tenerife hace unos 6 millones de años.



Fig. 7. El panel superior muestra una fotografía aérea actual de la parte central de Tenerife, con El Teide como rasgo más predominante, mientras que el panel inferior muestra un modelo infográfico de como pudo ser una erupción explosiva en la zona central de Tenerife hace unos 300.000 años.

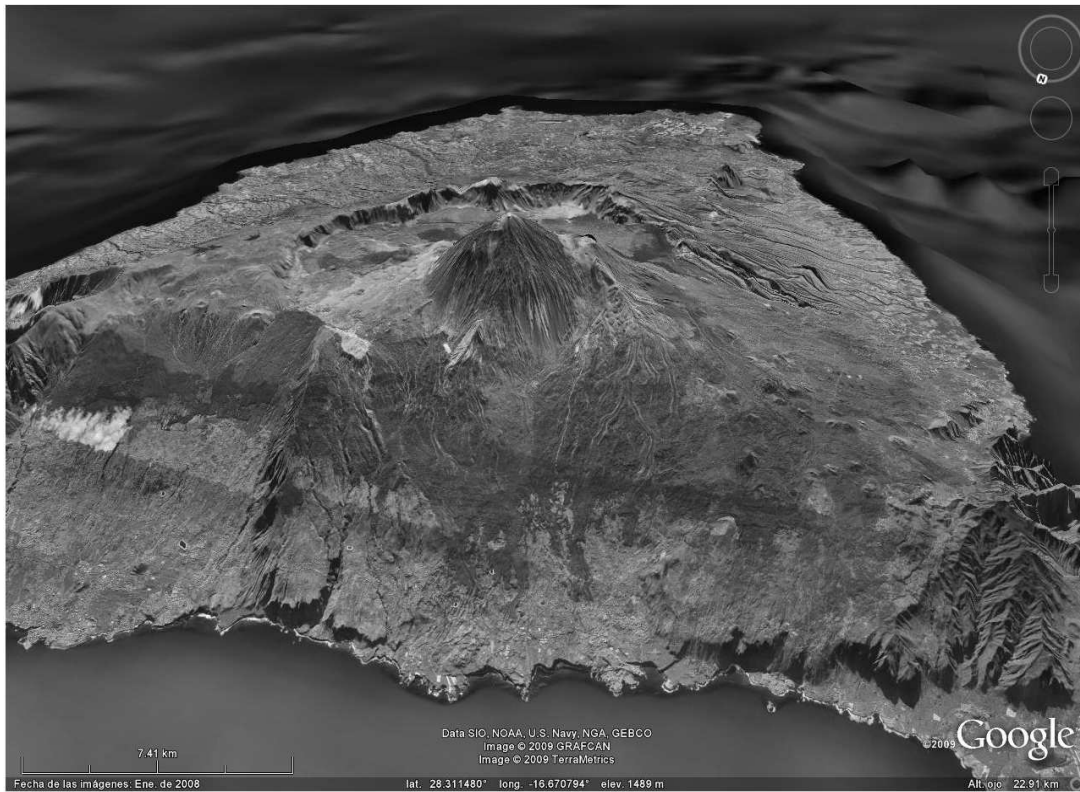


Fig. 8. El panel superior muestra una imagen actual de la isla de Tenerife tomada de Google-Earth, mientras que el panel inferior muestra un modelo infográfico de como pudo ser la depresión en que culminó el extinto Edificio Cañadas hace unos 180.000 años.

a la separación de dos placas, que descomprimen el magma bajo ellas que fluye a la superficie. En este sentido, el magma asociado a las dorsales es local y no se genera a grandes profundidades. Vemos que las placas dejan de ser elementos pasivos y son parte del sistema convectivo. Esta teoría sobre la dinámica planetaria, complementada con mediciones sísmicas, sitúa bajo Canarias y a casi 3.000 kilómetros de profundidad una de las columnas ascendente más grandes del planeta.

Hemos visto la importancia de Tenerife y Canarias en el conocimiento de los procesos dinámicos que afectan al conjunto del planeta. Sin embargo, el dinamismo de Tenerife va más allá, como demuestra la complejidad de su orografía. Tenerife emerge del océano hace sólo unos 15 millones de años y durante los siguiente millones de años crecerán y se solaparán al menos tres enormes volcanes en escudo de los que hoy quedan los erosionados macizos de Anaga, Teno y algunos vestigios en el suroeste de la isla (ver Figura 6). Este solapamiento de volcanes en escudo también se da en otras islas, como Hawai. Sin embargo, en Tenerife (o Gran Canaria) ocurre algo extraordinario y atípico: uno de estos volcanes, al que se denomina Edificio Cañadas, empieza a desarrollar, hace unos 4 millones de años, un volcanismo más explosivo y diferenciado en la parte central de la isla (ver figura 7). El Edificio Cañadas culmina con la formación de una gigantesca depresión (ver figura 8) hace unos 150.000 años que será rellenada con los materiales emitidos por el Complejo Teide-Pico Viejo hasta conformar el actual valle de Icod. En definitiva Tenerife es una isla que guarda cicatrices de una vida llena de sobresaltos.

Tenerife vibra

Una onda corresponde a la propagación en el espacio y en el tiempo de una perturbación que sufre un determinado cuerpo. Así, cuando tiramos una piedra a un estanque, perturbamos el estado de reposo del agua y esta irradia el exceso de energía inyectado por la piedra en forma de las características ondas. Un cuerpo sólido también puede responder a una perturbación generando ondas: por ejemplo, la rotura de una falla puede generar ondas sísmicas, al igual que una erupción volcánica o el encontronazo entre las grandes placas en que se encuentra dividida la corteza de nuestro planeta.

Tenerife es un cuerpo sólido que genera y por el que se propagan ondas sísmicas. La detección y el análisis de estas ondas pueden proporcionar información valiosísima sobre las condiciones físicas del invisible interior de la isla. El movimiento o vibración del terreno que se produce al paso de las ondas sísmicas se puede registrar mediante unos instrumentos denominados sismógrafos. De los datos recogidos por los sismógrafos es posible calcular el tiempo que ha tardado el movimiento sísmico en viajar

desde el lugar del terremoto hasta el sismógrafo. De la física más elemental sabemos que la velocidad se define como el espacio recorrido en un determinado tiempo, por lo que conociendo la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, podemos conocer el lugar donde ocurrió un determinado terremoto. Si solamente disponemos de un sismógrafo, podremos conocer la distancia aproximada hasta el epicentro del terremoto (proyección en superficie del lugar donde se generó el terremoto), pero no de que dirección proviene. De esta forma, es posible dibujar un círculo centrado en el sismógrafo cuyo radio define la distancia a la que se encuentra el epicentro del terremoto. Si en vez de un sólo sismógrafo, disponemos de varios, podremos dibujar tantos círculos como sismógrafos haya; además, el punto donde se solapan todos los círculos corresponderá a la posición más probable del epicentro.

Esta metodología de localización la hemos adaptado al caso de Tenerife (usando cuatro hipotéticos sismógrafos), como se ilustra en el panel superior de la figura 9. Desafortunadamente, en el mundo real las cosas no son tan sencillas, y los perfectos círculos de localización de epicentros se deforman (panel central de la figura 9) debido a la dependencia de la velocidad de propagación de las ondas del material que atraviesen. Además, hay que considerar la presencia de un elevado ruido sísmico de fondo, consecuencia en gran parte de la actividad humana presente en la superpoblada Tenerife. La diferencia en la localización del hipotético epicentro es ya notable entre los paneles superior y central de la figura 9. Tal diferencia aumenta si tenemos en cuenta que dos de los sismógrafos están ubicados en el mar y que, aunque existe la tecnología para instalar sismógrafos en el fondo del océano, es tan cara que las posibilidades de tener estas instalaciones son prácticamente nulas, en especial en este país nuestro tan poco dado a las inversiones en ciencia. Por ello, debemos de eliminar dos de los cuatro sismógrafos que hemos utilizado en este experimento y como consecuencia, el error en la localización del epicentro aumenta significativamente (panel inferior de la Figura 9).

El ejemplo que hemos usado está basado en hechos reales, ya que la mayoría de los terremotos que ocurren en las cercanías de Tenerife tienen lugar entre esta isla y la vecina Gran Canaria (ver la figura 10), por lo que la falta de sismógrafos en el fondo marino nos niega la posibilidad de poder localizar correctamente la mayoría de los sismos que ocurren en Tenerife. Hay que recordar que hemos debido esperar hasta prácticamente entrado el siglo XXI para empezar a contar con una red sismológica apropiada, que durante muchos años consistió en un único sismógrafo instalado en Santa Cruz de Tenerife. Claramente, un sólo sismógrafo era del todo insuficiente para poder aventurarse a calcular cualquier parámetro

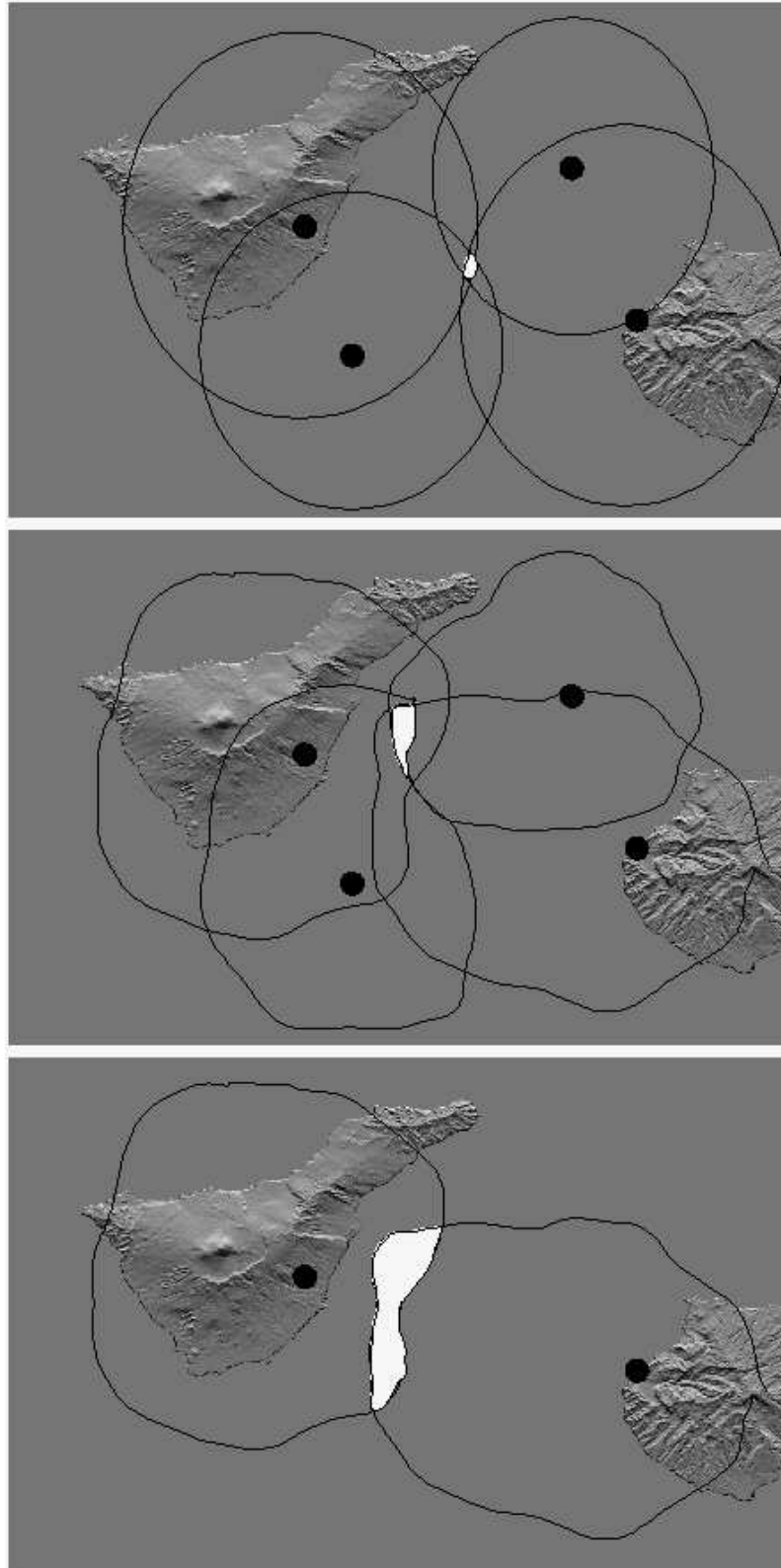


Fig. 9. Explicación de la metodología de localización de epicentros sísmicos. Los círculos negros representan sismógrafos, mientras que las áreas blancas representan las regiones donde la metodología de detección sitúa los epicentros (ver texto principal para más detalles).

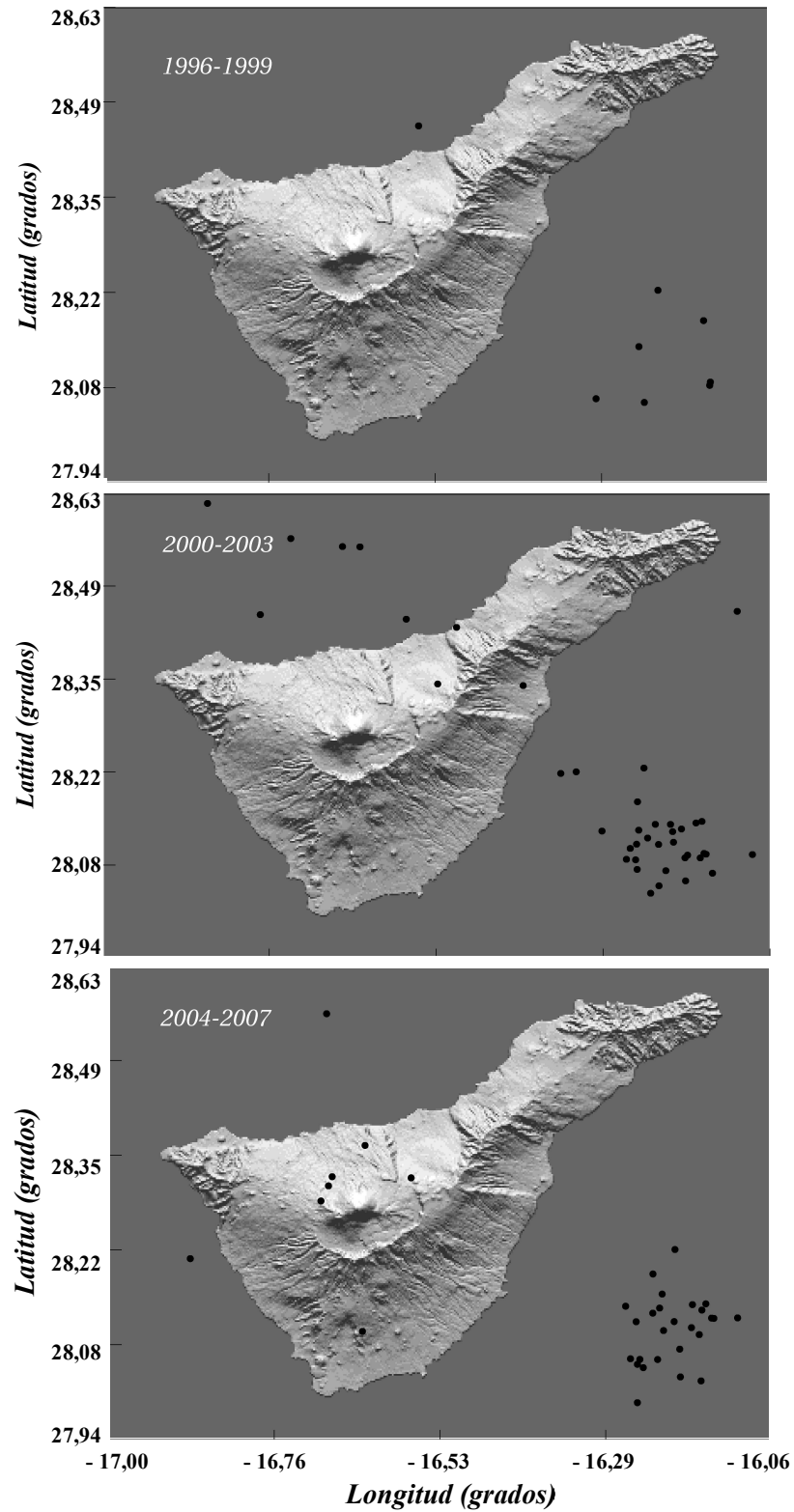


Fig. 10. Localización de los epicentros de los terremotos de magnitud superior a 2,5 ocurridos en los alrededores de Tenerife desde 1996 a 2007. Datos calculados por el Instituto Geográfico Nacional.



Fig. 11. El Teide es un cuerpo físico que puede vibrar de una forma análoga a como lo harían los tubos del órgano de una iglesia.

sísmico (epicentro y/o hipocentro, procesos iniciadores del terremoto, etc ...).

La perfecta localización de un terremoto es esencial a la hora de analizar qué proceso geológico lo ha iniciado. En una isla como Tenerife, el seguimiento espacial y temporal de los hipocentros asociados a una reactivación volcánica nos permitirían estudiar qué tipo de actividad es esperable (erupción de la cámara central de El Teide, erupción como las ocurridas en tiempos históricos asociadas a intrusiones de diques, ...) y donde puede ocurrir.

La piedra en el estanque no es el único símil que podemos encontrar para explicar el fenómeno de la propagación de ondas en Tenerife; un órgano de iglesia nos puede servir para entender otro interesante fenómeno asociado a la actividad volcánica: los tremores volcánicos. Los tubos de un órgano suenan porque vibran en respuesta a las ondas generadas al introducir aire en ellos. Este aire induce diferencias de presión que son las responsables de la propagación de ondas que a su vez hacen resonar los tubos. En un volcán, se generan enormes diferencias de presión en los fluidos (gases, magma, agua, ...) asociados la reactivación de las cámaras magmáticas. Los conductos o tubos que conectan la cámara magmática con el cráter resuenan al paso de las ondas generadas por las diferencias de presiones y emiten tonos como lo harían los tubos de los órganos. Los tonos o tremores volcánicos no podemos oírlos, pero si detectarlos mediante sismógrafos. En definitiva, un volcán como el Teide es una especie de gigantesco órgano (ver la figura 11) del que no esperamos que toque ninguna melodía, pues eso podría significar el preludio de una erupción.

Agua y fuego

Al contrario que en otras islas volcánicas del mundo, en Tenerife no llueve mucho, no hay cursos permanentes de agua y no hay lagos. Sin embargo, la isla es capaz de dar de beber a una población que supera el millón de habitantes (contando con los turistas que la visitan) y además riega superficies importantes de plataneras y tomateros, cultivos que exigen mucha agua. Casi toda esta cantidad de agua, unos 150 hectómetros cúbicos al año, proviene del subsuelo de la isla, o sea, es agua subterránea.

¿Cómo es posible que en una isla donde llueve relativamente poco se puedan extraer tales cantidades de agua subterránea? Esta pregunta ya se la hacían los antiguos griegos, que se asombraban en ver la enorme cantidad de agua que brotaba de algunos manantiales y que no estaba en consonancia con la poca cantidad de agua que llovía. Tales de Mileto (aproximadamente 650 AC) propuso que las aguas subterráneas provenían del océano y que de allí pasaban al interior de la tierra desde la que ascendían hacia los

manantiales por la presión de las rocas. Aristóteles, discípulo de Platón, propuso la existencia de un vapor interior que asciende, se condensa y brota en los manantiales. Aristóteles es además el primero en sugerir que parte del agua de los manantiales procede de la filtración del agua de lluvia. Ya en el siglo I AC, el arquitecto romano Marco Vitrubio describió por primera vez el ciclo hidrológico, el papel de la vegetación en dicho ciclo (menciona incluso plantas aptas para la captación de agua) y refirió técnicas para buscar aguas subterráneas. El pensamiento griego del origen marino de las aguas subterráneas se mantuvo hasta finales del siglo XVI, cuando Bernard Palissy, apoyado en observaciones y experimentos retomó las ideas de Vitrubio y situó a la infiltración del agua de lluvia como el origen del agua subterránea. Ya a finales del siglo XVII y durante el XVIII, numerosos experimentos, como los llevados a cabo en el parisino río Sena por Mariotte y Perrault (hermano del famoso escritor de fábulas), confirmaron el origen meteórico (lluvia y nieve) de las aguas subterráneas.

Sin embargo, la controversia sobre el origen del agua subterránea en las islas Canarias duró hasta bien entrado el siglo XX. Esta es ciertamente una curiosa historia que nace en 1890 cuando el ingeniero de caminos Eugenio Suárez Galván inspeccionaba en el municipio tinerfeño de Arafo una galería que se estaba construyendo para aumentar el caudal de un manantial. Este ingeniero quedó maravillado al ver que el agua brotaba del suelo de la galería. Unos años más tarde, en 1903, este mismo ingeniero trabajaba en un proyecto para llevar agua desde el centro de la isla de Gran Canaria a la ciudad de Las Palmas. Notó que la cantidad de agua subterránea que se extraía era muy grande en relación a la pluviosidad de esa zona y a la cuenca de infiltración. Algo parecido describió en 1913 durante la ejecución de un túnel de conducción de agua hacia la ciudad de Santa Cruz de Tenerife. La cantidad de agua que se encontró en dicho túnel era muy grande respecto a la superficie de infiltración. El señor Suárez propuso la teoría de las ‘Aguas Ascendentes de Canarias’ según la cual, entre la corteza terrestre y el manto, hay una capa de agua y vapores a presión que puede ascender por conductos y fracturas como los existentes en terrenos volcánicos como las islas Canarias. En cierta medida, esta teoría continúa con las que proponían los antiguos griegos. La teoría del señor Suárez supone que una isla como Tenerife no es capaz de almacenar grandes cantidades de agua, sin embargo esto ha sido probado que no es cierto y que la condición volcánica de la isla propicia la capacidad de contener grandes reservas de agua.

Si queremos almacenar agua, necesitamos que el suelo o basamento de la isla sea impermeable y que la superficie insular sea porosa y permeable para facilitar la infiltración de aguas de lluvia y nieve. Estas condiciones se dan en Tenerife, ya que por lo general, la permeabilidad desciende con la profundidad, debido sobre todo a la compactación del material y a procesos

hidrotermales. Llegados a una determinada profundidad, se puede considerar que el terreno es impermeable. En algunas zonas de la isla, la capa impermeable no se alcanza de un modo gradual, sino que aparece de súbito una capa arcillosa conocida localmente como ‘mortalón’ y que corresponde al material triturado que quedaba tras producirse deslizamientos de tierra, que en Tenerife alcanzaron proporciones colosales, como los deslizamientos que dieron lugar a la formación de los valles de Güímar, La Orotava e Icod. Tenemos ya un basamento impermeable sobre el que puede ir almacenándose agua en poros y grietas durante miles de años.

El ciclo del agua subterránea en Tenerife es simple cuestión de equilibrio entre el agua que entra en el acuífero y la que sale por extracción humana o por pérdidas naturales hacia el mar (ver figura 12). En este sentido, un porcentaje del agua (quizás hasta un 40%) que cae en forma de lluvia o nieve se infiltra en el terreno y recarga el acuífero. De forma natural, parte del agua de los acuíferos, un porcentaje parecido al agua recargada, fluye pendiente abajo y se pierde en el mar. Sin embargo este equilibrio es roto por la existencia de una enorme red de pozos y galerías de agua que extraen desde hace tiempo incluso el agua subterránea de reserva.

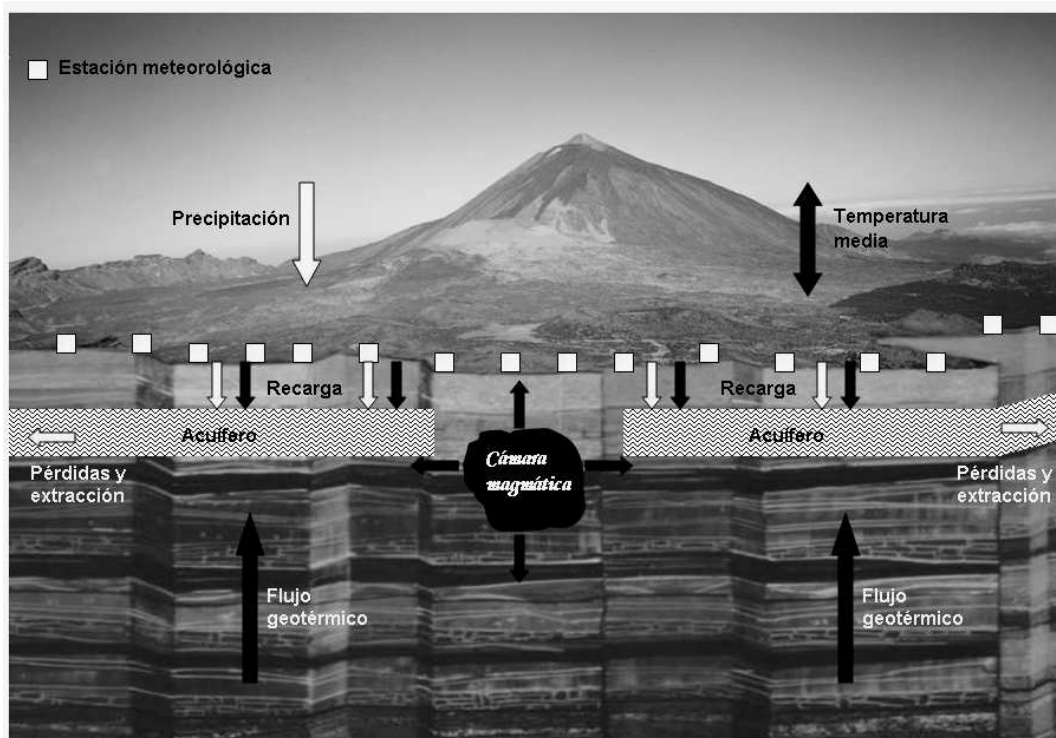


Fig. 12. Esquema simplificado de los procesos físicos involucrados en la dinámica del agua subterránea en la isla de Tenerife.

Hasta mediados del siglo XIX, toda el agua que se consumía en Tenerife provenía de nacientes, manantiales y agua captada en los barrancos. Esta agua se vio que era insuficiente para las demandas agrícolas, sobretodo de las exigentes plantaciones de plataneras y tomateros, por lo que aparecieron las llamadas Sociedades de Investigación, Explotación y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas. Durante la segunda mitad del siglo XIX la búsqueda de agua subterránea se centró en la perforación de galerías donde había nacientes naturales para aumentar su producción. En general estos nacientes se alimentaban de acuíferos colgados que no llegaban a los acuíferos principales de la isla, mucho más profundos. La necesidad de más agua hizo que se empezaran a perforar galerías más profundas ubicadas en un principio en barrancos, aunque con el paso del tiempo se perforaron a lo largo de toda la geografía insular. Estas galerías empezaron siendo de varios cientos de metros de profundidad (hasta que se encontraban con el nivel saturado de agua), aunque con el tiempo alcanzaron kilómetros de profundidad, conforme el acuífero retrocedía debido a la sobreexplotación. También se daba el caso de galerías que avanzaban kilómetros sin encontrar su primera agua.

A mediados de la década de 1960 se había abierto el 90% de las galerías existentes en la actualidad y que correspondía a más de 1.200 kilómetros de túneles perforados. En la actualidad esta cifra se eleva a unos 1.800 kilómetros. El máximo de producción de agua se alcanzó en 1965 con unas 50.000 pipas/horas, unidad de medida local que equivale a 7.000 litros/segundo, mientras que en el año 2005 la producción no llegó a los 4.000 litros/segundo debido a la merma de los acuíferos. Las galerías o minas de agua no son un invento isleño, ya que persas y egipcios utilizaban ya hace más de 2.500 años el sistema de los 'kanats', túneles de varios kilómetros horadados en roca blanda para recoger el agua de infiltración. En el caso de Tenerife, las primeras galerías se perforaron a pico y pala, pero con el paso del tiempo la dinamita, los martillos neumáticos y últimamente las excavadoras facilitaron el trabajo.

Ya que nuestra intención es usar Tenerife como un laboratorio para experimentos de Física, vamos a utilizar la temperatura del agua subterránea para estudiar cómo ésta se infiltra y fluye por el subsuelo de la isla. A esto los físicos lo llamamos estudio del transporte de masas y calor. Lo primero que necesitamos es tener una idea general de la distribución del agua subterránea y su temperatura. El Consejo Insular de Aguas del Cabildo de Tenerife posee una enorme base de datos donde está registrada la posición y temperatura de los manantiales de agua en el interior de las galerías bajo su control administrativo. Los mapas con la distribución espacial del acuífero (o acuíferos) de Tenerife y sus respectivas temperaturas y contenidos en bicarbonatos se muestran en las figuras 13 y 14, respectivamente.

En general, la vertiente sur del acuífero está más caliente que la norte; además, cuanto más al este nos movamos, más fría está el agua. La acumulación de bicarbonatos en el agua subterránea está íntimamente relacionada con la actividad volcánica, como queda de manifiesto en la figura 14, donde se aprecia que el agua de mayor calidad (menor concentración de bicarbonatos, o sea de 'cal') se encuentra hacia el este de la isla, donde la actividad volcánica cesó hace muchísimo tiempo. Una vez más, la vertiente sur del acuífero contiene aguas con mayor presencia de cal, al igual que aquellas aguas que rodean la caldera de Las Cañadas. Estas últimas están claramente influenciadas por la actividad volcánica del complejo Teide-Pico Viejo.

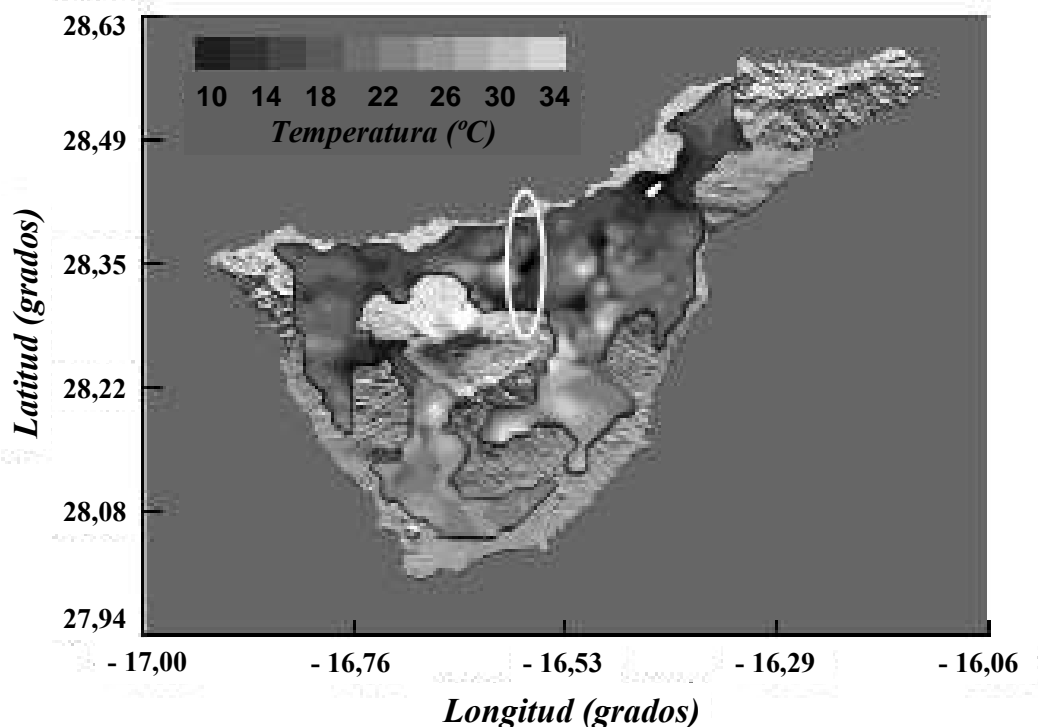


Fig. 13. Mapa que muestra la distribución de temperaturas de las aguas subterráneas de Tenerife. La elipse marca la zona oriental del valle de la Orotava a estudio.

Pese a que todo esto es muy interesante, vamos a fijarnos en la región enmarcada por las elipses en las figuras 13 y 14. Corresponde a la zona oriental del Valle de la Orotava que linda con el Macizo de Tigaiga. El agua subterránea de esa zona es significativamente más fría y contiene más cal que la de sus alrededores. Parece que esa zona se comporta de manera distinta que la de sus alrededores, ¿por qué? La figura 15 muestra una

ampliación de esta zona y un corte transversal muy simplificado de lo ocurre ahí abajo. La importancia científica de las galerías de agua queda de manifiesto en el panel inferior de esta última figura, pues podemos observar cómo estas infraestructuras permiten visualizar las condiciones geológicas imperantes en la zona que atraviesan. En el área que estamos estudiando confluyen 4 estructuras distintas; por una parte los materiales que rellenaron el Valle de la Orotava (1) tras el o los deslizamientos del edificio anterior (2). La frontera entre los materiales (1) y (2) lo conforma el mortalón, impermeable desde el punto de vista hidrológico y sobre el que fluye el agua hacia el mar. En la cabecera de esta porción del valle se encuentran los materiales basálticos y diferenciados de relleno de la Caldera de Las Cañadas (3), limitadas al oeste por los materiales basálticos de la dorsal noreste de Tenerife (4).

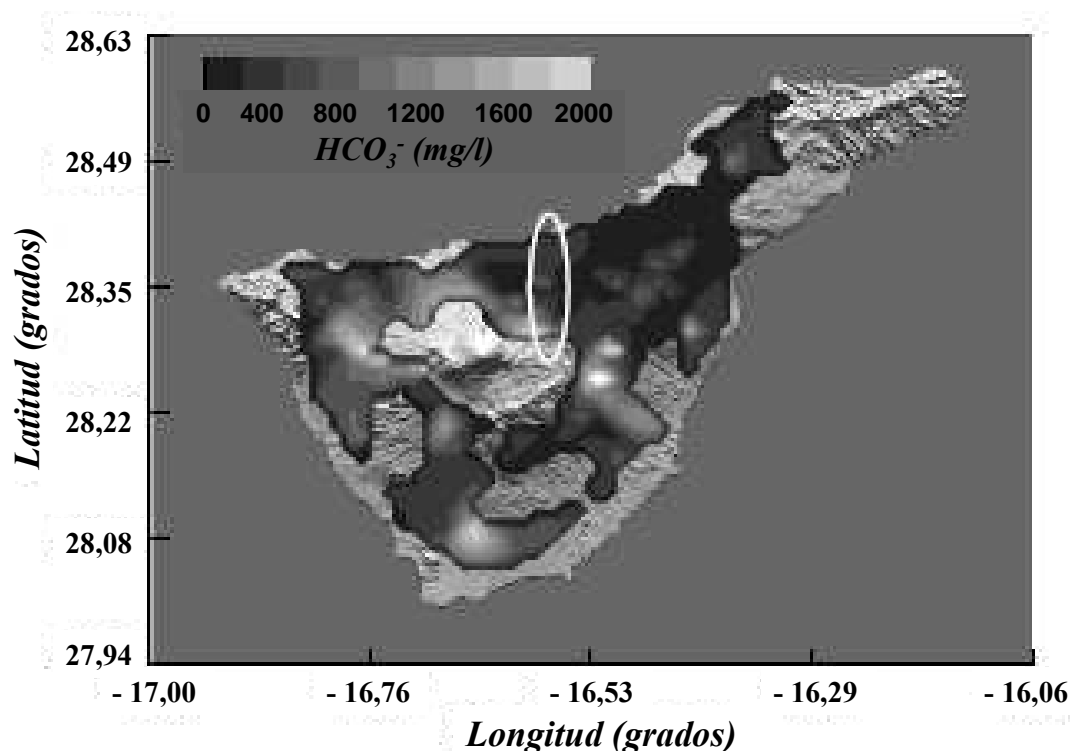


Fig. 14. Mapa que muestra la concentración de bicarbonatos en las aguas subterráneas de Tenerife. La elipse marca la zona oriental del valle de la Orotava a estudio.

Recogiendo toda la información que se resume en las figuras 12 a 15 podemos construir un modelo físico del movimiento de las aguas subterráneas y su interacción con posibles fuentes de calor en esta zona de la isla. El agua entra en este sistema en forma de lluvia y/o de nieve a una

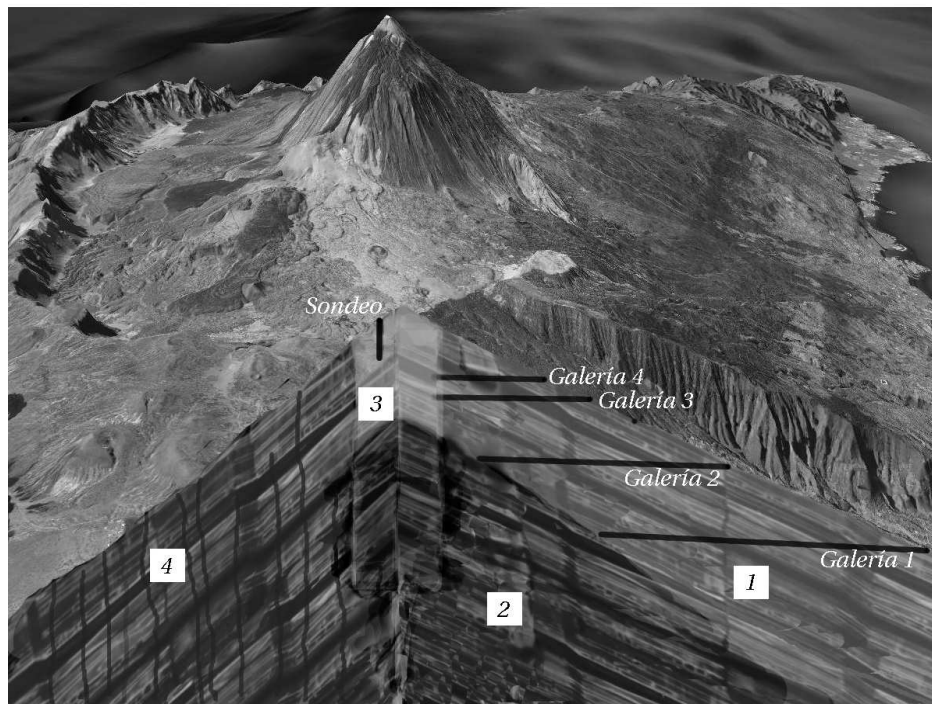
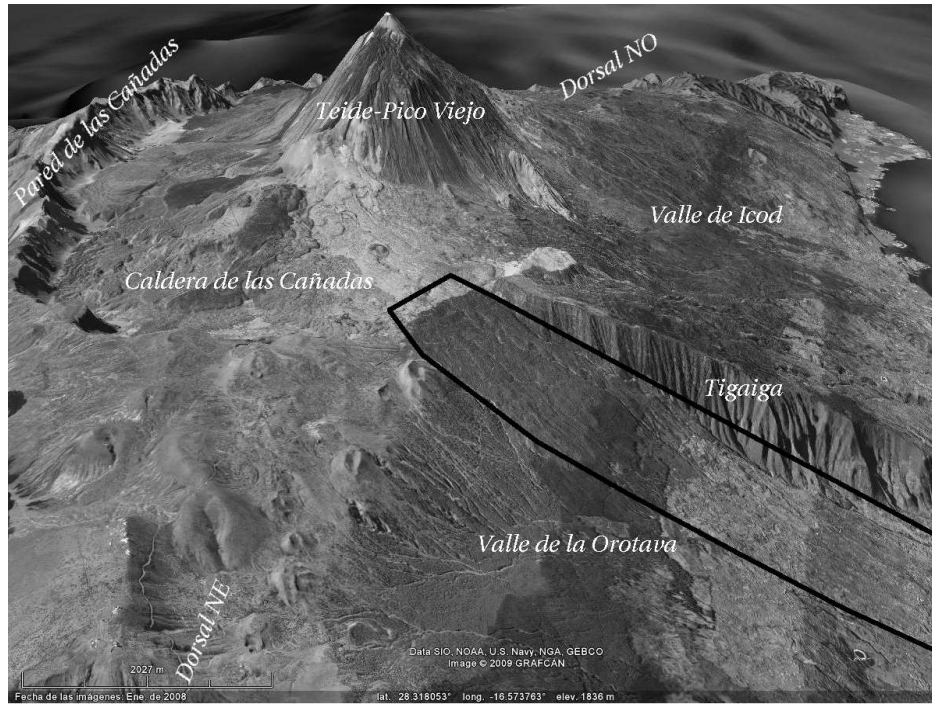


Fig. 15. El panel superior muestra una imagen de Google-Earth de la zona central de Tenerife y el valle de La Orotava. El área a estudio se encuentra delimitada por unas líneas continuas de color negro. El panel inferior muestra un corte transversal de la zona oriental del valle de La Orotava, dejando expuestas las diferentes unidades estratigráficas presentes en la zona: por una parte los materiales que rellenaron el valle de La Orotava (1) tras el o los deslizamientos del edificio anterior (2), y por otras parte los materiales basálticos y diferenciados de relleno de la caldera de Las Cañadas (3), limitadas al oeste por los materiales basálticos de la dorsal noreste de Tenerife (4).

temperatura de unos 6 grados centígrados. De los cálculos existentes, aproximadamente un 40% de ese agua se infiltra y recarga el acuífero localizado en el interior de la Caldera de las Cañadas. La actividad volcánica residual y/o la interacción con el material donde reside el agua, la carga de bicarbonatos (de cal). El agua relativamente fría y cargada de bicarbonatos podría descender a través en la zona oriental de la cabecera del Valle de la Orotava hacia el mar, explicando la presencia de aguas frías y de mala calidad en esta zona del valle.

Este es el modelo o hipótesis de partida, pero esto hay que probarlo y para ello hacemos uso de las ecuaciones (modificadas) que mostramos en la figura 1 y las metemos en un ordenador y esperamos a ver que resultados obtenemos. Los resultados son ciertamente interesantes. Si el agua subterránea proviene de la infiltración de agua muy fría, la temperatura de la roca desde prácticamente la superficie de la caldera hasta el nivel freático (casi 400 metros bajo la superficie) debería ser aproximadamente 6 grados. Pedimos permiso al Consejo Insular de Aguas para usar uno de sus pozos de control del nivel de agua en Las Cañadas y encontramos que la temperatura de la roca era de ... ¡6 grados centígrados! Resulta curioso que a menos de 6 kilómetros de un volcán gigantesco, la temperatura del subsuelo sea tan baja. La temperatura del agua en el pozo mencionado era de unos 14.5 grados centígrados.

Este parece un mal dato si quisiéramos buscar recursos geotérmicos en la parte central de Tenerife. Pero, ¿es en verdad tan malo ese dato? Pues no, todo lo contrario. Nuestro modelo matemático predice que es necesario que el flujo de calor (que calienta el agua desde abajo) sea al menos 4 veces el flujo medio del planeta para que la temperatura del agua sea de 14 grados y no menor. Ese aporte extra de flujo puede provenir de la cámara magmática del Teide o de una anomalía térmica en profundidad (eufemismo muy utilizado en ciencia que significa que no sabemos). Si la caldera de Las Cañadas estuviese a nivel del mar, la temperatura del agua subterránea superaría ¡los 40 grados centígrados! Esto es lo bonito que tiene la Física: te permite intentar explicar cómo funcionan las cosas, pero también te permite jugar a '¿y qué pasaría si ...?'

Epílogo

Pese a que la Física y la Geología no tuvieron unos inicios en común muy prometedores, con el tiempo, los físicos aprendieron a respetar y aceptar los métodos de trabajo empleados en Geología y los geólogos adquirieron mejores habilidades matemáticas y con ello nació la Geofísica.

En este ensayo hemos utilizado Tenerife como banco de pruebas de una serie de leyes físicas que nos han permitido estudiar aspectos como la

propagación de ondas, el flujo de calor, el transporte de masas, el campo magnético, etc... Hemos visto además lo interesante que es Tenerife como parte del engranaje dinámico del planeta y por sí misma como laboratorio volcanológico ideal debido a los complejos procesos que han tenido lugar durante su corta vida (por supuesto en términos geológicos). Y, no menos importante, espero que este humilde trabajo les haya permitido apreciar la Física como una hermosa herramienta que nos permite interpretar los fenómenos naturales bajo el lenguaje de las matemáticas.