

El vulcanismo y su potencial geotérmico: perspectiva geológica

The geothermal interest of volcanism: a geological perspective

MARCELIANO LAGO, TOMÁS SANZ Y URBEZ MAJARENA

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12. 50009 Zaragoza. E-mail: mlago@unizar.es; tomassanzserrano@gmail.com; urbezmajarena@hotmail.com

Resumen La energía geotérmica es una de las aplicaciones del vulcanismo que, muy ligada a la geología aplicada, presenta un progresivo desarrollo. Se exponen, desde una perspectiva geológica, los aspectos más básicos y comunes sobre el diseño de un proyecto geotérmico en áreas volcánicas. Su desarrollo multidisciplinar implica una maduración de los contenidos en vulcanología a la vez que una adecuada integración con los procedentes de otras especialidades geológicas.

Palabras clave: Diseño de un proyecto, geotermia, vulcanología.

Abstract *Geothermal energy is a renewable energy closely related to volcanism. The most basic and common aspects of the design of a geothermal project in volcanic fields are laid out from a geological perspective. The design and development of geothermal projects require a deep understanding of the volcanic system and the successful integration of data from other geological disciplines.*

Keywords: *Project design, geothermal energy, volcanology.*

INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es una de las aportaciones geológicas más beneficiosa, en términos económicos, a la crisis energética. Su desarrollo, actual y futuro, involucra cuatro visiones distintas pero relacionadas:

- la investigación propiamente geológica, que es el objetivo aquí desarrollado,
- los temas ingenieriles sobre sus técnicas extractivas,
- el amplio espectro de su utilización, y/o optimización que –comprendiendo los anteriores– tienen efectos económicos (empresariales y sociales),
- las políticas sobre eficiencia energética para el impulso de la geotermia, bien en países donde la geotermia es su fuente energética prioritaria, o como una alternativa energética competitiva respecto a otras fuentes energéticas en uso (Malloy, 2011; Hirschberg *et al.*, 2014; Edwards, 2014; Glassey, 2015; Rybach y Stegna, 2014; Stober y Bucher, 2013; Yang, 2013).

La geotermia está muy vinculada, en primer lugar, a un contexto geodinámico concreto delimitado por los bordes de placa (convergentes y divergentes en sus diversas modalidades, continental, oceánica

y sus combinaciones), la proximidad a puntos calientes y la actividad térmica (remanente o residual) de los orógenos.

Una segunda consideración muy importante resulta de las modernas investigaciones sobre las fuentes internas, a escala de la Tierra como sistema termal, y los mecanismos de propagación de dicho calor (conducción, convección y radiación), cuya efectividad difiere en los dominios geodinámicos.

El tercer aspecto es definir los yacimientos geotérmicos (actuales y futuros) con base a modernos criterios geológicos. Como consecuencia, expondremos los rasgos básicos de los diversos yacimientos señalando que cada campo geotérmico es singular.

Y, como consecuencia lógica, destacaremos – con mayor extensión– el cometido de un geólogo:

- identificar yacimientos con potencialidad geotérmica,
- evaluar sus recursos según escalas diversas,
- enumerar y evaluar las distintas metodologías con la aplicación secuencial de sus técnicas integrantes de un proyecto,
- colaborar en las etapas extractivas (p.e., sondeos de explotación que siguen a los de explotación anteriores).

LA TIERRA COMO “GRAN CALEFACTOR”

Es conocido que la distribución de la Tierra en capas concéntricas se traduce en que la energía está asociada a las condiciones de composición, temperatura y su profundidad y a sus propiedades físicas, con una astenosfera plástica y una litosfera rígida. La convección en el manto es consecuencia de su baja viscosidad ligada a su composición y temperatura. El movimiento de sus celdas convectivas internas transmite el calor hacia las placas litosféricas al mismo tiempo que condiciona su desplazamiento.

El espesor de la litosfera es muy variable, alcanzando los 100-150 km en zonas continentales y 70-100 km en las oceánicas, en función de engrosamientos o adelgazamientos ligados a regímenes compresivos o extensionales. De esta manera, el valor sugerido de 1300°C para la isoterma de la base de la litosfera, es meramente teórico y su valor real debe establecerse en cada contexto geodinámico valorando además la composición de los materiales que la integran, cuya respuesta térmica es clave.

ORIGEN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Conviene distinguir entre fuentes propias intrínsecas al conjunto de la Tierra y otras ligadas a sus procesos. Las primeras son básicamente cuatro:

- a) **La desintegración de isótopos radiactivos de vida larga (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K)** cuyas estimaciones se sitúan en el orden del 50% del flujo total de calor. Aunque estos isótopos alcancen una elevada concentración en la corteza actual, el mayor volumen del manto –aunque con inferior concentración en estos isótopos– supone su fuente prioritaria. También, las plumas mantélicas, que implican un flujo anómalo, son muy relevantes en la generación de los campos geotérmicos.
- b) **El calor inicial de la Tierra** cuya energía sigue siendo motor de los procesos convectivos en distintos niveles sub- y superficiales de la Tierra.
- c) **Los movimientos diferenciales entre las distintas capas internas de la Tierra** (p.e., núcleo y manto) implican una liberación energética hacia su exterior (corteza y atmósfera) que, a gran escala, ha implicado la disminución de la velocidad de rotación (por su enfriamiento) aunque, en sentido opuesto.
- d) **El calor latente** por la cristalización del núcleo externo fluido (líquido) es una fuente energética hacia la corteza (Pasquale y Verdoya, 2013).

Los procesos de propagación del calor (conducción, convección y radiación) son ampliamente conocidos. El mecanismo de conducción es más efectivo en el núcleo interno y en la litosfera de la Tierra. Por el contrario, en el núcleo externo y en el manto terrestre el calor se transmite principalmente por convección lo que, como veremos, tiene una expresión geotérmica de primer orden en las plumas mantélicas.

El régimen térmico en una zona y la distribución de sus temperaturas es el balance entre el calor que entra en la base de la litosfera, procedente de su interior, el calor generado y absorbido en la propia litosfera y el irradiado hacia el exterior. Por esta razón, los métodos geofísicos nos permiten conocer el espesor de la litosfera en los diversos contextos

geodinámicos, pues su adelgazamiento facilita el ascenso del magma fundido hacia niveles superficiales. Además, la tectónica extensional es un excelente liberador energético. Estos dos parámetros deben ser identificados y cuantificados, por ejemplo, con criterios geofísicos y estructurales.

LA TECTÓNICA DE PLACAS COMO “ORGANIZADORA” ENERGÉTICA

La figura 1 expresa la ubicación actual de volcanes activos en relación directa a las placas tectónicas donde se desarrollan campos geotérmicos. La distribución de dichos campos está ligada a los escenarios geodinámicos básicos ya invocados en otros temas que involucran el magmatismo (ver López-Ruiz y Cebriá, 2015, en este mismo volumen).

El caso de Islandia, entre las placas euroasiática y norteamericana, es paradigmático a nivel geológico (Fig. 2). Como pauta general cabe considerar que el flujo geotérmico en el centro de la dorsal

Fig. 1. Volcanes activos y principales placas tectónicas. Fuente: USGS.

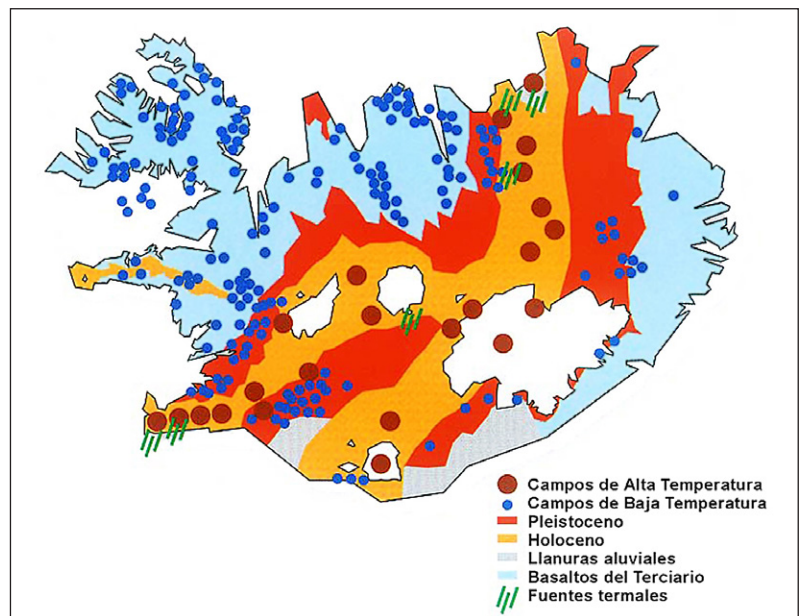
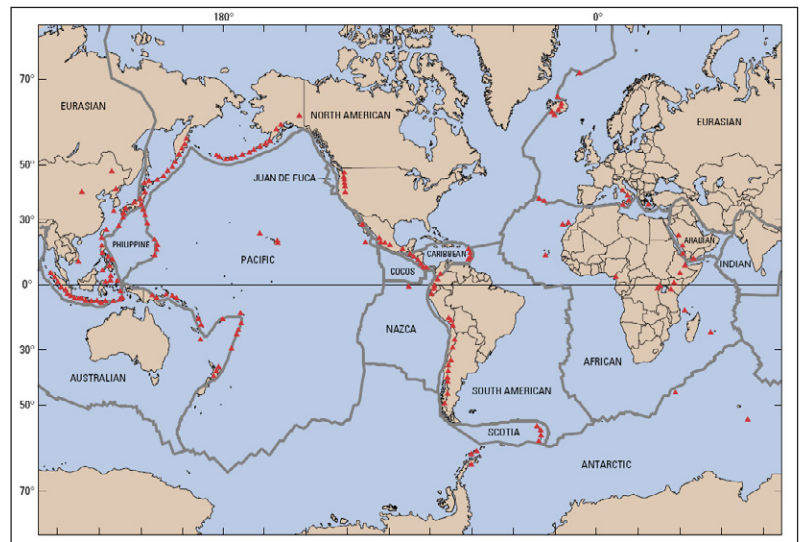


Fig. 2. Distribución de las zonas geotérmicas activas en Islandia. Fuente: Orkuveita Reykjavíkur (2005).

alcanza su pico geotérmico en rangos del orden de 300 mW/m² (milivatios/metro cuadrado) tendiendo a decrecer con el aumento de la distancia al eje de la dorsal. Debido a que el diapiro caliente (pluma) alcanza una velocidad de ascenso relativamente elevada, facilitado por un espesor de corteza oceánica reducida, la temperatura global tiende a mantenerse constante. Por este motivo, la fusión es capaz de progresar bajo condiciones de sucesiva menor presión y se desarrollan incipientes islotes volcánicos por acreción final. El modelo alternativo, de índole estructural, de Savry y Cañón-Tapia (2014) aporta precisiones al potencial campo geotérmico de esta isla.

En Islandia los basaltos terciarios presentan rangos de gradiente geotérmico de 86-47°C/km (frente al promedio de 30°C/km en corteza terrestre) y alcanzan su pico máximo de 300°C/km en el centro de su rift volcánico. En detalle, hay una zonación del centro a la periferia con dos ámbitos geotérmicos bien diferenciados (ver figura 2): de alta y baja intensidad.

El dominio de alta intensidad consta de 23 campos situados a lo largo del rift y próximos a reservorios magmáticos en los que el agua, a una profundidad de 1 km, supera los 200°C. Las aguas ácidas procedentes del lixiviado de rocas más profundas transportan un alto contenido de mineralizaciones, cuya precipitación superficial es responsable de la ausencia de vegetación en sus inmediaciones tal y como se observa en las imágenes por satélite.

El dominio de baja intensidad, caracterizado por temperaturas del agua a 1 km de profundidad inferiores a 150°C, se ubica fundamentalmente al Oeste y consta de unos 250 campos. Destaca su escaso contenido en gases y minerales (p.e., escaso S) por lo que pueden ser empleados como piscinas termales o para agua caliente en hogares y tras una desmineralización pueden llegar incluso a ser potables. En las décadas de los 70 y 80 del siglo pasado, al uso como calefacción y agua caliente se añadió la generación de electricidad en centrales geotérmicas. Esas centrales aprovechan el vapor de agua para activar un sistema de turbinas cuya producción representa un 25% de su consumo eléctrico (con rango entre 47 a 120 megavatios –MW-), junto a otras fuentes energéticas (p.e., hidráulica, solar y eólica).

Los escenarios geodinámicos conocidos comprenden zonas con preferente interés de flujos geotérmicos (ver figura 1): dorsales oceánicas, zonas de subducción con vulcanismo activo en los últimos 80 millones de años, orógenos Cenozoicos, zonas intraplaca con vulcanismo intenso y flujos geotérmicos anómalos (puntos calientes) y zonas con un adelgazamiento cortical y ascenso derivado del manto ligado a un alto régimen extensional. Los

puntos calientes o *hot spots*, tienen un especial interés geotérmico por el extraordinario flujo térmico que son capaces de aportar.

RASGOS DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS DE ALTA A MEDIA ENTALPÍA

La clasificación de recursos geotérmicos (Tabla I) requiere un contexto práctico y unas matizaciones.

Desde un punto de vista teórico, las condiciones geológicas básicas necesarias para que exista un recurso geotérmico son un flujo de calor elevado y un sistema acuífero con una formación impermeable suprayacente que impida su evacuación. El flujo de calor debe estar ubicado en la corteza superior (< 10 km) y suele estar ligado a un magmatismo activo o residual. También es necesario la existencia de un acuífero a una profundidad inferior a 2 km, que facilite la acumulación y circulación de agua y/o vapor. El agua puede proceder de niveles sub-superficiales o directamente de lluvia (aguas meteóricas) que se infiltra en el terreno según su porosidad y/o fracturación, en este segundo caso debe superar un tiempo de residencia suficiente (Fig. 3 y 4).

La experiencia actual en una gran variedad de yacimientos geotermales dicta matizaciones importantes a la teoría, de manera que alguno de los requisitos pueden ser minimizados o incluso faltar. Si el acuífero no es adecuado (incluso escaso) se puede generar una fracturación artificial de la roca para facilitar la circulación del agua, o bien, inyectar agua

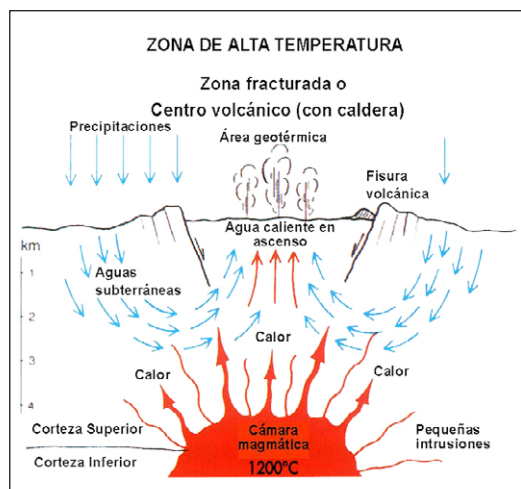


Fig. 3. Esquema sencillo del funcionamiento de un campo geotérmico de alta temperatura en una caldera volcánica. Fuente: Central Geotérmica de Nesjavellir, en la zona volcánica de Hengill (Islandia).

TIPO	TIPO DE TERRENO	TEMPERATURA	USO PRINCIPAL
Alta entalpía		> 150°C	Electricidad
Media entalpía		150-100°C	Electricidad, ciclos binarios
Baja entalpía	Sedimentos profundos	< 100°C	Calor de distrito
	Zonas volcánicas		
	Aguas termales	50-22°C	Balnearios
Muy baja entalpía	Aguas subterráneas	22-10°C	Climatización
	Subsuelo con o sin agua	25-5°C	

Tabla I. Clasificación de yacimientos geotérmicos según entalpías decrecientes.

TIPO	FLUIDOS NATURALES	SUBTIPO	TEMPERATURA	USO	
				ACTUAL	POTENCIAL
Convectivo (Hidrotermal)	SI	Continental	A, I, B	Eléctrica, usos directos	
		Submarino	A	Ninguna	Eléctrico
Conductivo	NO	Somero (<400 m)	B	Directos (y GHP)	
		Roca seca caliente (EGS)	A, I	Prototipos	Eléctrico, directos
		Reservorios de magma	A	En desarrollo	Eléctricos
Acuíferos profundos	SI	Acuíferos hidrostáticos	A, I, B	Directos	Eléctrico, directos
		Geopresurizados			

Tabla II.-Tipos de recursos geotérmicos: Temperaturas (A: alta, >180°C; I: Intermedia, 180-100°C y B: Baja <100°C); EGS: Sistemas geotérmicos estimulados; GHP: Bombas de calor geotérmico.

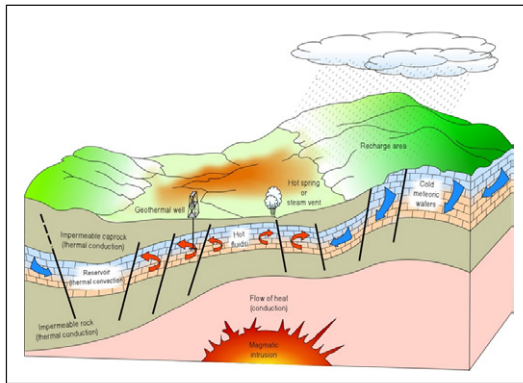


Fig. 4. Esquema conceptual de un campo geotérmico. Destacar el área de descarga, nivel de agua termalizada confinada entre los materiales impermeables que, por efecto de fracturas, determinan reservorios termales accesibles a la extracción. Fuente: Dickson y Fanelli (2004).

fría desde la superficie y extraerla para su aprovechamiento energético una vez se caliente en profundidad. También es posible que en ausencia de una fuente magmática exista un flujo térmico suficiente para extraer agua a la temperatura necesaria.

Sin entrar en aspectos muy pormenorizados, los 5 tipos de yacimientos más relevantes se indican en la Tabla II.

DISEÑO GEOLÓGICO DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO

Los elementos clave del desarrollo en un proyecto geotérmico se basan en la existencia de un potencial geotérmico explotable en un área. Ade-

más se deben considerar otros aspectos como la disponibilidad de datos precisos sobre los recursos geotérmicos, nuevas metodologías que optimicen los recursos ya disponibles, el diseño de las etapas adecuadas para minimizar costes y aumentar la rentabilidad, la evaluación de la vida útil de la explotación, la versatilidad de los servicios ofertados y los beneficios económicos.

En este sentido, el geólogo debe conocer algunos aspectos ajenos a la propia ciencia geológica. En primer lugar, los proyectos de energía geotérmica se desarrollan mejor en escalones de 30 a 60 MW, con el fin de reducir la concentración de riesgo de recursos y minimizar el riesgo de explotación no sostenible del yacimiento geotérmico. Por otra parte, los costos de inversión pueden variar desde 2,8 a 5,5 millones de dólares por MW instalado, para una planta promedio de 50 MW, en lo cual tendrá incidencia el coste total resultante de los estudios geológicos y la calidad de medios de infraestructura que pueda disponer en estos estudios. Finalmente, puesto que la energía geotérmica debe ser competitiva, deberá considerar otras fuentes geotérmicas complementarias a un único yacimiento y prever la exploración de recursos (p.e., con menor entalpía) que contribuyan a la rentabilidad a largo plazo (Quijano León, 2007).

En la Tabla III se indican, de manera concisa, las pautas básicas (IDAE-IGME, 2008) que todo geólogo debe considerar para comprender y estructurar sus conocimientos, como científico ligado a las etapas de ingeniería, producción y la implementación de otros recursos térmicos que sean necesarios.

Las pautas básicas a efectuar por un equipo de geólogos, toda vez se dispone de una amplia información previa, comprende las *escalas regional y de detalle*.

Tabla III. Investigación geológica en las diferentes etapas de desarrollo de un recurso geotérmico (Fuente: IDAE-IGME).

ETAPAS	FASES	OBJETIVOS	ÁREA	DURACIÓN (AÑOS)	
Investigación	Reconocimiento	Caracterización general regiones geotérmicas; modelo general de funcionamiento; priorización, y propuesta de actuaciones	Nacional 100.000-10.000 Km ²	3-4	9-12
	Prefactibilidad	Selección zonas y áreas; estimación potencial; modelo de campo, y delimitación puntos de interés	Regional 2.000-500 Km ²	4-5	
	Factibilidad	Confirmación y adecuación modelo campo; evaluación del yacimiento; diseño modelo explotación; valoración económica detallada	Yacimiento 100-10 Km ²	2-3	
Aprovechamiento	Desarrollo y explotación	Actualización de información y evaluación precisa del modelo	Local	25-30	
	Renovación, desmantelamiento	Retorno a fase de explotación o restauración de los terrenos	Local	2-3	

La *regional* tiene una escala de 50-100 mil km² y, excepto en países concretos, las etapas de información geológica básica (p.e., cartografía, datos geohidrológicos y geoquímicos) son suficientes para estimar los recursos geotérmicos potenciales.

La de *detalle*, con escala inferior a 50 km², comprende las etapas:

- a) estudios de superficie,
- b) medición de la descarga natural de calor y
- c) pozos exploratorios.

La primera etapa consiste en disponer de una cartografía muy precisa del vulcanismo y/o plutonismo, estudios estructurales y estratigráficos así como los geo-hidrológicos, incluyendo la geoquímica de agua, en gases y minerales de alteración, acerca de la resistividad del subsuelo, la gravimetría y magnetometría junto con estudios de sismica pasiva y, en ocasiones aisladas, sobre emanación de radón y otros gases como mercurio, etc. Un estudio petrológico detallado (incluyendo si es posible las edades, por ejemplo, isotópicas en concentrados minerales o trazas de fisión, etc.) facilita mucho la comprensión del reservorio en profundidad.

Los estudios geológicos en geotermia han experimentado un avance muy importante con la incorporación de técnicas multidisciplinarias que, en bastantes casos, suponen una notable interrelación de los estudios en vulcanología académica y los derivados del ámbito aplicado. La revista *Geothermics* representa, en este sentido, un punto de encuentro cuyas aportaciones recogen la experiencia ofertada en los manuales de geotermia y, de otra parte, las más comunes del ámbito de la vulcanología académica. En este contexto, hacemos un especial hincapié, dentro de este apartado, a los rasgos e, incluso, líneas nuevas que merecen ser llamadas de atención en el escenario habitual del trabajo geológico común y cuya realidad es más destacada en el ámbito de la geotermia. Un resumen de los conocimientos se indica en la Tabla IV.

Los *estudios vulcanológicos* son prioritarios y, así, deben expresarse los edificios y rasgos volcánicos que aporten información sobre las etapas volcánicas activas más recientes. Los reservorios geotérmicos de alta T están asociados a volcanes, o sus agrupaciones en un área, y, más en detalle, a las calderas recientes (200-50 mil años). Entre otros aspectos reseñables, las *ignimbritas* aportan información muy útil sobre el tamaño y la composición de la cámara magmática en sus eventos recientes. Está bien testificado que un estudio volcano-estratigráfico detallado facilita, en muchas áreas volcánicas, la localización de los centros emisores y permite evaluar el volumen de las erupciones cartografiables.

Una mención importante son los *estudios geofísicos*, en especial, durante las primeras etapas donde no se dispone de pozos de exploración profunda. En geotermia son muy útiles, y frecuentes, los de *resistividad del subsuelo*, los *gravimétricos* y *magnetométricos* así como los *sismológicos* debiendo recordarse los *termométricos* y los de *flujo de calor* porque son estos los que se relacionan directamente con el tipo de anomalías que deseamos conocer.

En Quijano (2007) se expone la tipología y metodologías prácticas en el uso de estas técnicas al igual que deben mencionarse las técnicas *gravimétricas*, *magnetotélúricas*, *magnetométricas* y las *sismológi-*

cas en su amplia diversidad (ver Tabla IV). Cada problema es tan singular como único de manera que la elección de una u otra técnica estará condicionada por la complejidad, o no, de cada campo geotérmico.

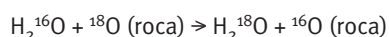
Dentro de esta enumeración de actividades de trabajo merecen señalarse los *estudios geoquímicos* puesto que los sistemas geotermiales son claramente abiertos. Una modalidad común consiste en determinar las propiedades químicas de las manifestaciones geotérmicas (p.e., manantiales, fumarolas, pozas ácidas y, por extensión, los productos –o precipitados- de alteración hidrotermal). Otra estrategia de trabajo consiste en determinar, considerando un área relativamente grande, la presencia de algún elemento traza, un gas -o compuesto volátil- en el suelo. El área de estudio se divide en mallas y se establecen detectores en sus nodos. Sea una u otra modalidad, o ambas, el objetivo consiste en tomar muestras de las fases presentes (líquido, gas, material producto de alteración). Al muestrear se debe medir la T, la conductividad eléctrica, el pH y el volumen muestreado será analizado (elementos mayores y sus trazas) pudiendo, en ocasiones, comprender determinados isótopos así como, cuando proceda, análisis por difracción de rayos X (DRX) en precipitados minerales. El protocolo metodológico y analítico está indicado en: *Laboratory Procedures for the Chemical Analysis of Geothermal Water Samples; Isotope Hydrology Section, IAEA, Vienna, (2003)*. La información en geoquímica elemental e isotópica tiene como finalidad determinar el origen del fluido, las temperaturas probables del reservorio y las características de los líquidos para dar precipitados (p.e., rellenos de calcita que por precipitación taponan segmentos basales del tubo de sondeo durante la extracción). Los estudios geoquímicos más modernos comprenden líneas amplias en torno a establecer el origen de los fluidos, estimaciones de T (geotermómetros) en fases líquidas e, incluso, en gases tales como N₂, H₂, Ar, etc. cuya tipología requiere un amplio número de condicionantes que aseguren su validez y exactitud (ver Tabla IV) y, entre otros aspectos, el estudio de procesos de interacción agua-roca.

La geoquímica de isótopos estables (O, H, C, S, He) es tan común como eficaz en sus fases gaseosas. Las propiedades físico-químicas de los isótopos de un mismo elemento son muy semejantes pero, debido a la diferencia de masa atómica, la energía vibracional de las moléculas es un poco diferente para cada isótopo, siendo ligeramente mayor para el isótopo de menor masa (p.e., el ¹⁶O posee una energía vibracional mayor que el ¹⁸O) y como consecuencia, las propiedades físico-químicas varían ligeramente entre los isótopos de un mismo elemento. Así, durante el proceso de evaporación, los isótopos ligeros (¹H y ¹⁶O) cambian a la fase vapor con una tasa proporcionalmente mayor que en los pesados (²H –Deuterio, D- y ¹⁸O), dando por resultado que, en la fase vapor, habrá una proporción mayor de isótopos ligeros que en la fase líquida remanente (fraccionamiento isotópico). Pues bien, los cambios de fase, las reacciones de precipitación y disolución (que son reacciones de intercambio molecular) y las de oxidación y reducción, son los principales procesos naturales en los que ocurre el fraccionamiento isotópico. Es decir, la proporción original de isótopos ligeros y pesados de un mismo elemento varía en los productos resultantes del proceso, ya sea que

TÉCNICAS GEOLÓGICAS (FASE DE EXPLORACIÓN)		
Teledetección	Fotos satélite y aéreas de detalle	Modelo geológico: materiales infrayacentes, fracturas con circulación de fluidos en zonas permeables, P y T del reservorio
Tectónica	Fallas y régimen de fracturación	
Neotectónica	Sismicidad actual y fallas activas	
Estratigrafía	Perfiles detallados	
Petrología	Materiales encajantes	
Mineralizaciones	Rellenos de fracturas e inclusiones fluidas	
Vulcanología	Litología y composición	Posibles reservorios magmáticos
	Geoquímica gases	
	Geotermobarometría	
Hidrogeología	Geometría y localización de posibles acuíferos	
	Recargas de acuíferos	
	Balance hídrico del sector	Pluviometría, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, parámetros hidráulicos
Técnicas geoquímicas		Muestreo; análisis de aguas y gases; identificar procesos de mezcla de aguas; identificar posible origen común o no
Aguas subterráneas	Análisis fisicoquímicos	pH (rango común 5.0-8.6)
	Análisis químicos	Composición. Potencial efecto corrosivo o incrustaciones en tuberías de explotación
	Elementos volátiles	volátiles: B, F, Ar, Hg y su distribución que oriente anomalías geotérmicas
	Isotópicos	³ H (tiempo residencia del agua); mezcla de agua
Gases no condensables	CO ₂ , SO ₃ , metano, N ₂ , H ₂ , otros	
Geotermometría química en aguas		
Termómetros Empleados:	Concentración de sílice aumenta con la T ^a	
	Relaciones Na/K y Ca/Na CaCO ₃ , MgCO ₃ y CaSO ₄ aumentan su solubilidad con el descenso en T ^a Metano, H, CO ₂ y SH ₂ : sus concentraciones dependen de la T ^a interna	
Técnicas geofísicas	Eléctricos	Identificación de capas, contenido de sales
	Electromagnéticos	Resistividad de rocas mediante radiación electromagnética
	Gravimétricos	Distribución de cámaras magmáticas y/o precipitados en agua termal
	Sísmicos	Identificar niveles litológicos
	Termométricos	Gradiente de T ^a y flujo de calor
Sondeos de exploración (confirmar datos previos y evaluar el yacimiento geotérmico)	T ^a y gradiente acuífero, quimismo del agua, T ^a agua/roca, nivel hidráulico, verificar termómetros químicos, piezómetro.	
Sondeos de Explotación	Técnicas extractivas clásicas	

se incremente la proporción de isótopo pesado o la del ligero. Toda vez que se ha establecido que el factor de fraccionamiento isotópico (p.e., ¹⁸O/¹⁶O) varía inversamente con la temperatura, etc.) la medición (MS) en una muestra de un enriquecimiento en isótopos pesados (o viceversa) permite determinar su procedencia (fuente) e, incluso, el aporte de otras aguas superficiales evaporadas (mezcla), como puede ser un lago natural o artificial, a la recarga de un acuífero. Pues bien, el *agua geotérmica* se origina, en última instancia, del agua meteórica que se infiltra (área de recarga) y una proporción mezclada con agua "magmática". Este hecho confiere al agua termal extraída de una "firma" isotópica característica que permite identificar la fuente o ambiente del magma (p.e., basáltico, andesítico, etc., según su

ámbito de generación) respecto al agua meteórica que se incorpora al reservorio geotérmico y, como resultado, modifica su composición inicial (¹⁸O) mediante un proceso de intercambio isotópico con el agua "huésped" (magmática) facilitada por las altas temperaturas. Como las rocas ígneas y las rocas sedimentarias están enriquecidas en ¹⁸O con respecto al agua de mar y a las aguas meteóricas, resulta posible, aplicando cálculos geoquímicos, obtener información precisa sobre la fuente termal y el proceso operado según la siguiente ecuación:



Y, al igual que para las aguas, es posible establecer y aplicar *geotermómetros isotópicos* puesto

Tabla IV. Técnicas geológicas empleadas durante la fase de exploración.

que si dos sustancias, o dos fases, de una misma sustancia están en equilibrio isotópico, es posible determinar el valor del fraccionamiento isotópico y, en consecuencia, la temperatura del equilibrio final. Los termómetros más empleados, en nuestro caso, son tres: a) fraccionamiento del deuterio o del ^{18}O entre agua en estado de vapor y en estado líquido, b) fraccionamiento del ^{18}O entre los sulfatos disueltos en agua y el agua misma y, c) fraccionamiento del deuterio entre el hidrógeno gas y el vapor de agua. El geotermómetro del ^{18}O es muy útil en las etapas de exploración pues existen manantiales clorurados sódicos de alta T que son descarga directa de los reservorios. Según que:

$$10^3 \ln \alpha = \delta^{18}\text{O}_{\text{sulfato}} \text{‰} - \delta^{18}\text{O}_{\text{agua}} \text{‰}$$

Y una vez conocido $10^3 \ln \alpha$ se puede calcular la T (empleando calibrados “ad hoc”).

A modo de resumen, el conjunto de las etapas geológicas indicadas, en su secuencia lógica desde la cartografía geológica hasta los estudios más específicos (ver Tabla IV), nos permite obtener de un primer modelo conceptual del campo geotérmico con el objetivo de ubicar los pozos exploratorios y establecer una estrategia para disponer de nuevos datos respecto a la profundidad y dimensiones más detalladas del campo geotérmico. El modelo obtenido, con aportaciones de la geología a escalas regional y local, procede de datos de vulcanología y petrología ígnea, geología estructural, estudios estratigráficos, descarga natural de calor, así como de metodologías geoelectrónica, magnetométrica y gravimétrica junto a las propias de la hidrogeología y la geoquímica (elemental y/o isotópica) obtenida en las manifestaciones termales superficiales. En este sentido, La integración de la información de cada etapa se realiza mediante sistemas de información geográfica.

Así, disponemos de la localización del reservorio en sus valores de geometría y profundidad (modelo 3D), las características de los materiales suprae infrayacentes al reservorio termal, el régimen de fracturación y, una amplia información sobre las características físicas, químicas y de temperatura de sus aguas termales.

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Al igual que es común en todas las investigaciones (científicas y técnicas), el geólogo dispone de bases de datos diversas que facilitan y optimizan su

trabajo: organismos científicos y/o gubernamentales (p.e., el Instituto Geológico y Minero de España –IGME-), centros de investigación en geotermia, empresas y laboratorios especializados, departamentos universitarios, etc.

Las modernas tecnologías de teledetección, GIS y GPS son de ayuda imprescindible en el propio diseño del pre-proyecto y se mantendrán en las posteriores etapas. Existen diferentes aspectos a abordar en un proyecto, adaptados a las propias fases del trabajo como son: a) las bases y programas de tratamiento de imágenes, b) modelización de datos estructurales, c) tratamiento de datos en geoquímica elemental (mayores y sus trazas) e isotópica, d) programas específicos en geotermometría (elemental e isotópica), e) modelización hidrogeoquímica y más en detalle los relativos a f) Relaciones temperatura vs profundidad y acerca de las técnicas geofísicas.

Las empresas especializadas en geotermia ofertan programas bastante más elaborados en estudios dirigidos a su temática propia (p.e., en entalpías alta, media y baja). El lector interesado dispone de acceso a monografías recientes, como son la de Pous y Jutglar (2004), Malloy (2011) y Glassey (2015).

LA GEOTERMIA EN ESPAÑA

La Unión Europea (UE) tiene como objetivo prioritario promover la electricidad generada por fuentes renovables (p.e., geotermia). El sistema de apoyo al precio de estas energías adoptado es el RIFT (*Renewable Energy Fedd-in Tariffs*) que, en síntesis, supone una prima con valor diferente según sea el tipo de su fuente renovable. Desde 1970 hasta la actualidad el IGME desarrolla estudios sobre la potencialidad geotérmica cuya selección se indica en la Tabla V.

CONSIDERACIONES FINALES

El diseño de un proyecto de Geotermia es una actividad geológica multidisciplinar, muy ligada a la vulcanología y la geología aplicada, con participación habitual de otras especialidades geológicas (geología estructural, geofísica, hidrogeología, etc.). Las etapas básicas más comunes en proyectos de Geotermia de alta temperatura son las propues-

Baja Temperatura (<100°C)	Almacenes sedimentarios profundos	Cuenca del Tajo: Madrid Cuenca del Duero: León, Burgos y Valladolid Área Prebética e Ibérica: Albacete y Cuenca
	Zonas intramontañosas y volcánicas	Galicia: Orense y Pontevedra Depresiones catalanas: Vallés, Penedés, La Sela y Ampurdán Depresiones internas de las Béticas: Granada, Guadalix, Baza, Cartagena, Mula, Mallorca. Canarias: Isla de Gran Canaria
Media Temperatura (100°C<T<150°C)		Cordilleras Béticas: Murcia, Almería, Granada Cataluña: Vallés, Penedés, La Selva y Olot. Galicia: áreas de Orense y Pontevedra Pirineo: cuenca de Jaca-Sabiñánigo
Alta Temperatura (T>150°C)		Islas Canarias: Tenerife, Lanzarote y La Palma

Tabla V. Potenciales zonas de interés geotérmico en España (Fuente: IGME).

tas, según los diversos autores referenciados, en zonas de vulcanismo activo reciente que, en gran parte, pueden ser interpoladas a vulcanismos más antiguos con las necesarias adaptaciones.

Cualquier estudio sobre exploración en recursos geotérmicos debe considerar tanto la singularidad del vulcanismo en el área (y/o dominio) geológico como la naturaleza claramente abierta, y muchas veces recurrente en el tiempo, de los procesos volcánicos (o ígneos *s.l.*). La formación geológica y la subsiguiente especialización en energía geotérmica son condición necesaria para el diseño de un proyecto de esta naturaleza. El futuro geólogo especialista en geotermia debe tener acceso, en consecuencia, a un marco de estudios regulados (p.e., Máster en Geotermia) que le facilite localizar un recurso geotérmico y establecer las condiciones idóneas a su posterior explotación en la amplia complejidad de dominios ígneos. Países pioneros en Geotermia, como Chile, México, Japón, etc., desarrollan estos estudios con relación directa, pero no subordinada, a los específicos en las etapas de explotación y producción de la energía geotérmica.

Los informes internacionales más recientes sobre la potencialidad del uso de los recursos geotérmicos apuntan en dos direcciones. Primero, optimizar –con empleo de nuevas técnicas geológicas– las potenciales áreas pre-seleccionadas (y todavía no explotadas) así como mejorar el rendimiento en las productivas para este recurso. Y, en segundo lugar, mejorar el marco de conocimientos científicos y técnicos para explotar nuevos recursos geotérmicos ubicados en sectores con una acentuada complejidad geológica (p.e., zonas intracorticales en África, China, India, etc.). Las revistas internacionales (*Geothermics*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *Geothermal Energy*, *Geotermia* –México–, etc.), las vigorosas sociedades científicas, los nuevos centros de investigación y la oferta de numerosos proyectos de investigación, constatan la importancia concedida a esta prometedora línea de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Francisco José Pérez-Torrado (Universidad de Las Palmas, Gran Canarias) y al Dr. Carlos Galé Bor-

nao (Universidad de Zaragoza) por las ideas y sugerencias que han facilitado mejorar las ideas sobre este tema.

BIBLIOGRAFÍA

Dickson, M.H. y Fanelly, M. (2004). *What is geothermal energy?* http://www.geothermal-energy.org/what_is_geothermal_energy.html. Consulta: 29 de junio de 2015.

Edwards, L. (Ed.) (2014). *Geothermal Exploration and Development Policy*. Ed. Nova Science Publishers Inc., 162 p.

Glasse, W.E. (2015). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*. Ed. CRC Press, 423 p.

Hirschberg, S., Wiemer, S. y Burgherr, P. (eds.) (2014). *Energy from the Earth: Deep Geothermal as a Resource for the Future?* Ed. vdf Hochschulverlag AG, an der ETH Zurich, 524 p.

IDEA-IGME (2008). *Manual de Geotermia*. Ed. IGME, 187 p.

López-Ruiz, J. y Cebriá, J.M. (2015). Volcanismo y Tectónica de Placas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.1, 12-23.

Malloy, Ch.T. (2011). *Geothermal Energy (Energy Science, Engineering and Technology)*. Nova Science Publishers Inc., 275 p.

Pasquale, V. y Verdoya, M. (2013). *Geothermics: Heat Flow in the Lithosphere*. Ed. Springer, 132 p.

Pous, J. y Jutglar, LL. (2004). *Energía Geotérmica*. Ed. CEAC, 273 p.

Quijano León, J.L. (2007). *Manual de Geotermia*. Ed. Universidad de Mexico, 109 p.

Rybach, L. y Stegna, L. (2014). *Geothermics and Geothermal Energy*. Ed. Springer, 348 p.

Savry, C. y Cañón-Tapia, E. (2014). Iceland structure and volcanism: An alternative vision based on the model of volcanic systems. *Tectonophysics*, 636, 201-215.

Stober, I. y Bucher, K. (2013). *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*. Ed. Springer, 304 p.

Yang, J. (2013). *Geothermal Energy, Technology and Geology*. Ed. Nova Science Publishers Inc., 269 p. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 4 de septiembre de 2014 y aceptado definitivamente para su publicación el 27 de febrero de 2015.

Recursos naturales y volcanismo: Turismo volcánico

Natural resources and volcanism: Volcanic tourism

JUAN CARLOS CARRACEDO Y FRANCISCO JOSÉ PÉREZ-TORRADO

Dpto. de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. jcarracedo@proyinves.ulpgc.es; franciscojose.perez@ulpgc.es

Resumen Yellowstone (Estados Unidos), una espectacular caldera volcánica, alberga el primer Parque Nacional creado en el mundo en 1872. Esta relación volcanismo-turismo es bien patente en muchas regiones volcánicas del mundo, especialmente en las islas oceánicas volcánicas. Estas islas, como Canarias o Hawaii, cuentan con numerosos factores que propician ese turismo en masa, especialmente el clima, las playas y los paisajes. Pues bien, todos esos factores están íntimamente ligados en Canarias con la geología de cada isla, de forma que el estadio evolutivo de cada una de ellas condiciona su zonificación climática, existencia o no de playas arenosas y sus diferentes paisajes.

Palabras clave: Canarias, Hawaii, paisajes, turismo volcánico.

Abstract *Yellowstone (USA), a giant volcanic caldera, was the first National Park created in the world in 1872. Volcanism and tourism go hand in hand in many volcanic areas of the world, especially in volcanic oceanic islands. These islands, including Canary Islands or Hawaii, have many factors favouring mass tourism, especially the weather, beaches and landscapes. All these factors are closely linked in the Canaries with the geology of each island, so its evolutionary stages determine its climatic zoning, and the presence of sandy beaches and landscape diversity.*

Keywords: *Canary Islands, Hawaiian Islands, landscapes, volcanic tourism.*

INTRODUCCIÓN

Desde las civilizaciones más antiguas la población ha mostrado una tendencia a concentrarse en zonas volcánicas activas. La abundancia de suelos fértiles, la belleza paisajística y otros factores han contribuido a este proceso (ver figura 8 de Carracedo y Pérez Torrado, 2015, en este mismo volumen). Sin embargo, en épocas más recientes, especialmente a partir de la Revolución Industrial, se ha buscado especialmente la abundancia de agua y de recursos minerales (carbón, petróleo, etc.), de los que las zonas volcánicas en gran parte carecen. En el caso de las islas oceánicas estos recursos minerales y combustibles fósiles no existen, y en particular las que aquí analizaremos, las Canarias, son muy deficitarias en agua ¿Cuáles son los recursos que han permitido que islas como las Hawaii o Canarias estén densamente pobladas y con economías sostenidas? Mientras que estas islas vivían fundamentalmente de recursos primarios, como la pesca, la agricultura, la ganadería, etc., su capacidad de carga era escasa y la población muy limitada. Sin embargo, a partir del desarrollo de las comunicaciones, unido a las cualidades climáticas y la situación estratégica de Canarias como escala en las expediciones a las Américas, promocionaron un turismo temprano que

sentaría las bases para el posterior desarrollo del turismo masivo.

En consecuencia, la contestación a la anterior pregunta es, en efecto, el turismo. La capacidad de carga de estas islas depende de tal manera del turismo, que si éste dejara de afluir por alguna causa la población de las islas tendría dificultades graves para mantenerse en los niveles actuales.

El inicio del turismo moderno en Canarias comenzó en el Valle de La Orotava, fundamentalmente relacionado con la salud, creando hoteles-sanatorio donde acudían miles de turistas-enfermos “invalids”, especialmente de tuberculosis, reuma y enfermedades respiratorias. Los hoteles Taoro, en Tenerife, y Santa Catalina, en Las Palmas de Gran Canaria, iniciaron a finales del siglo XIX el turismo en Canarias (Fig. 1). El gran salto del turismo de élite al turismo de masas se da a partir de los años sesenta y setenta del pasado siglo XX por el crecimiento económico y las facilidades de comunicación (González Lemus, 2007).

En la actualidad, el sector turístico representa el 31.2% del Producto Interior Bruto (PIB) de Canarias, aporta el 35.2% de los empleos de las islas y proporciona a la comunidad autónoma el 33.4% de sus ingresos tributarios (informe IMPACTUR, 2013). El número de turistas que visitan Canarias ha expe-



Fig.1. Hotel Taoro, La Orotava, Tenerife, 1893 (izquierda) y hotel Santa Catalina, Las Palmas de Gran Canaria, en 1893 (derecha). Fotos tomadas de la web www.fotosantiguascanarias.org.

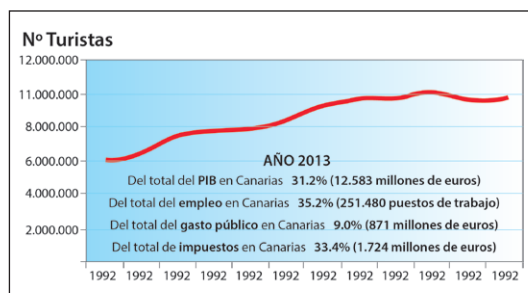


Fig.2. Aumento del número de turistas en Canarias e impacto del turismo en la economía y el empleo en las islas (en IMPACTUR, 2013)

rimentado notable incrementos, aunque se ha estabilizado en unos 11 millones en los últimos años (Fig. 2).

TURISMO VOLCÁNICO

Las islas volcánicas son zonas de gran atractivo turístico, propiciado por varios factores entre los que destacaremos el clima, los paisajes y las playas, factores muy influenciados por la especial geología de estas islas¹. A título de ejemplo analizaremos los recursos turísticos y su origen geológico de las Islas Canarias, el archipiélago oceánico, junto con las Islas Hawaii, de mayor importancia turística del planeta.

El clima

El clima es un factor primordial del atractivo turístico de las islas oceánicas. El simple hecho de ser islas, generalmente localizadas en el interior de los océanos, modera significativamente las oscilaciones térmicas, confiriéndoles veranos suaves, y especialmente, inviernos mucho más templados que en ambientes continentales.

El inicio del turismo en Canarias se basó fundamentalmente en el clima y sus cualidades saludables, como destacaba en la época la publicidad de los primeros hoteles y sanatorios (Fig. 3). El clima actual de las Canarias, desde un punto de vista geológico, tiene un origen relativamente reciente, que está relacionado con el cambio en las corrientes

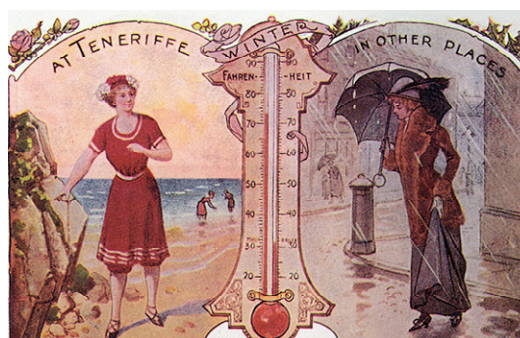


Fig.3. El clima de las Islas Canarias, de veranos suaves e inviernos templados, fue el recurso fundamental para el inicio del turismo en las islas (tomado de González Lemus, 2007).

oceánicas causado por la unión de América del Sur y América del Norte con la formación del Istmo de Panamá (Fig. 4). Las Canarias, que habían tenido un clima tropical hasta el cierre del Istmo de Panamá hace unos 5 millones de años, se vieron afectadas por el cambio climático originado al cerrarse el paso de las aguas del Atlántico al Pacífico y la consiguiente desviación de las aguas cálidas hacia el Atlántico Norte creando la Corriente del Golfo. El ascenso hacia bajas latitudes devolvía aguas frías y profundas

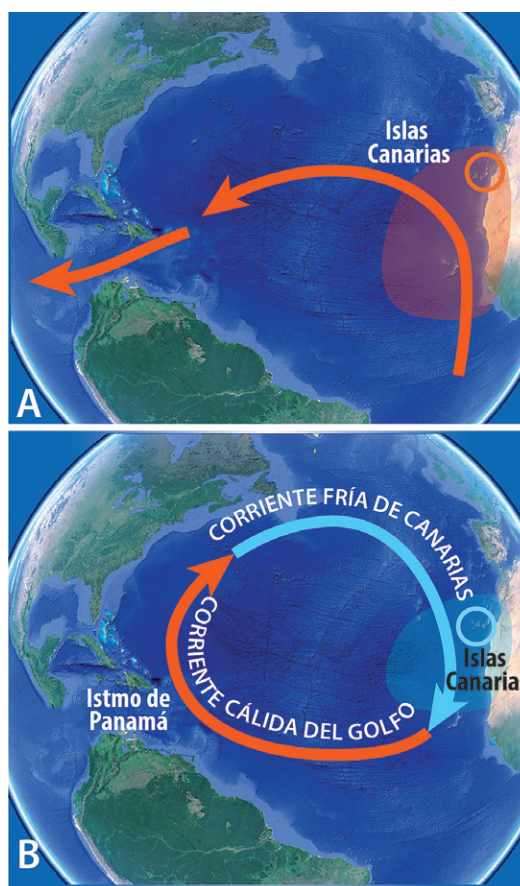


Fig.4. Modificación del Clima en Canarias. A) Antes de la formación del istmo de Panamá las corrientes pasaban del Atlántico al Pacífico favoreciendo un clima tropical en las Canarias. B) Al cerrarse el paso con la formación del Istmo de Panamá, las corrientes cambiaron, generándose una corriente cálida (de El Golfo) y una fría (de Canarias), con el consiguiente cambio climático.

¹ Detalles sobre la evolución geológica de las islas volcánicas intraplaca (como son las Islas Canarias) y cómo el estadio evolutivo en el que se encuentren cada una de ellas condiciona muchos factores, como el clima, los paisajes, etc. se encuentran en Carracedo et al. (2007)