



Técnicas de vigilancia volcánica

1	Introducción	2
2	Sismología	3
3	Geodesia	9
4	Geoquímica	16
5	Gravimetría	22
6	Geomagnetismo y Geoelectricidad	26
7	Geología	30
8	ANEXO: Comunicaciones	34

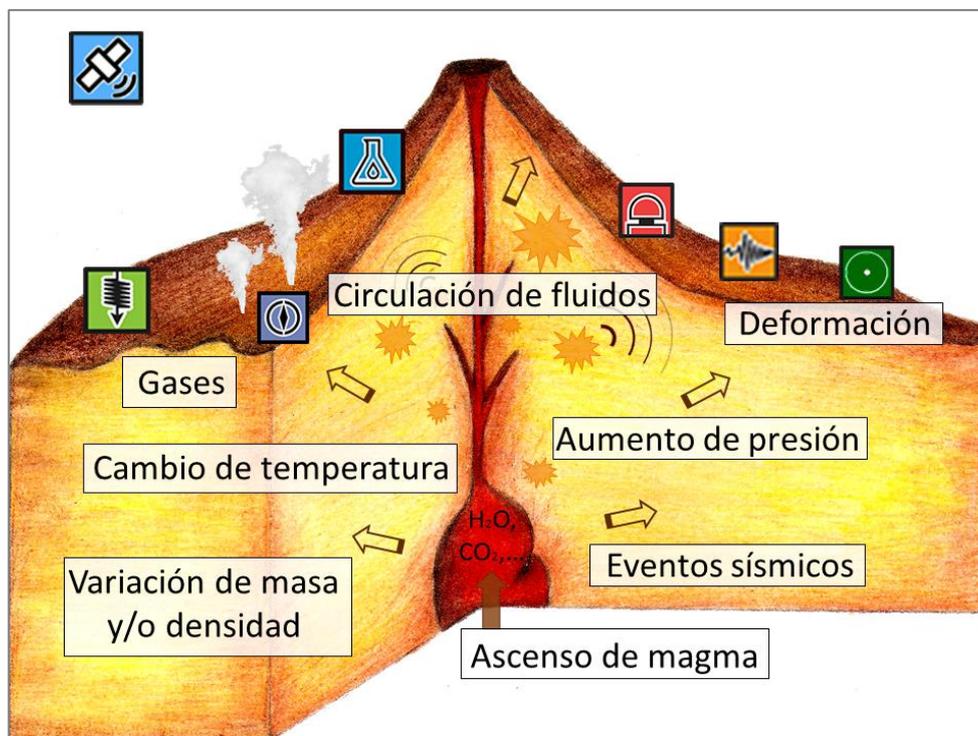


Teneguía 1971 (La Palma)

1 Introducción

Las erupciones volcánicas normalmente van precedidas de señales anómalas que pueden indicar su próxima ocurrencia y que se denominan precursores. La única manera de detectarlas es realizar una vigilancia volcánica adecuada empleando técnicas diferentes y realizando un análisis conjunto de los datos obtenidos. Este trabajo coordinado ayuda a mejorar los pronósticos de cómo, dónde y cuándo tendrá lugar la próxima erupción volcánica.

Tal como se ve en el esquema inferior, el ascenso de magma a través del manto y la corteza terrestres puede provocar distintos tipos de procesos relacionados entre sí: aumento de presión en la roca encajante, eventos sísmicos producidos por la fracturación de las rocas, deformación de la superficie terrestre, cambios fuertes de temperatura en el medio, emisión de gases magmáticos que pueden alterar la composición química y el estado de las fumarolas o las aguas subterráneas, cambios en el patrón de circulación de los fluidos subterráneos, cambios en la densidad del medio y en su señal gravimétrica, cambios en los campos eléctrico y magnético a escala local, etc. Cada uno de estos procesos se puede monitorizar mediante diferentes técnicas geofísicas, geodésicas y geoquímicas, por lo que es necesario un enfoque pluridisciplinar para obtener una imagen lo más completa posible de la evolución del sistema volcánico.



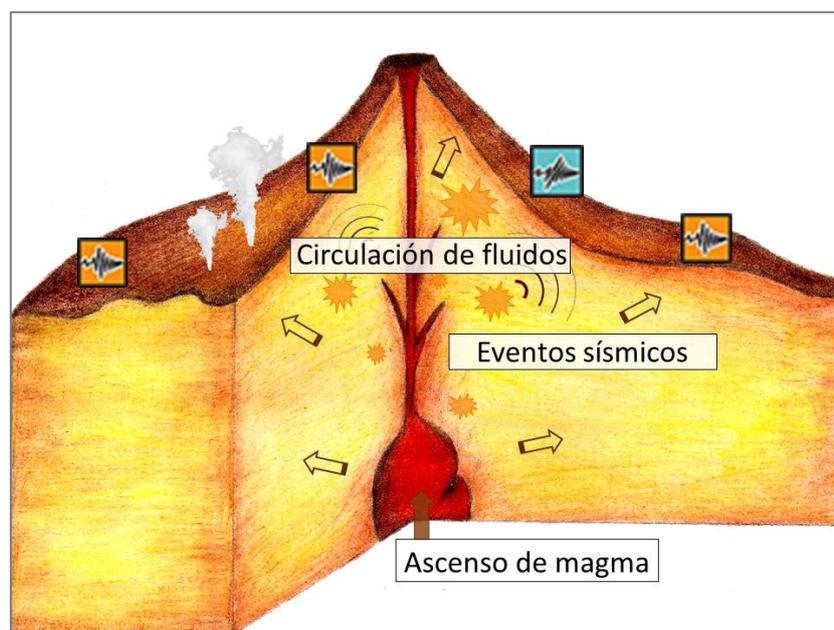
Esquema general

2 Sismología

La sismología (del griego, seísmos=terremoto, logos=estudio) es la parte de la geofísica que se dedica al estudio de terremotos y otros eventos generadores de ondas sísmicas. Una onda sísmica es una onda mecánica que se transmite por el interior de la tierra.

La sismología es una de las técnicas más antiguas que permiten conocer el estado de un volcán. Mediante el análisis de las distintas señales sísmicas asociadas a la actividad volcánica se puede obtener información de posibles intrusiones magmáticas, alteraciones de una cámara magmática pre-existente, ascenso de magma ante una inminente erupción y un largo etcétera.

Prácticamente todas las erupciones volcánicas vienen precedidas de señales sísmicas días, meses o años antes de producirse. Además, tanto éstas como otro tipo de señales pueden persistir durante y después de las erupciones.

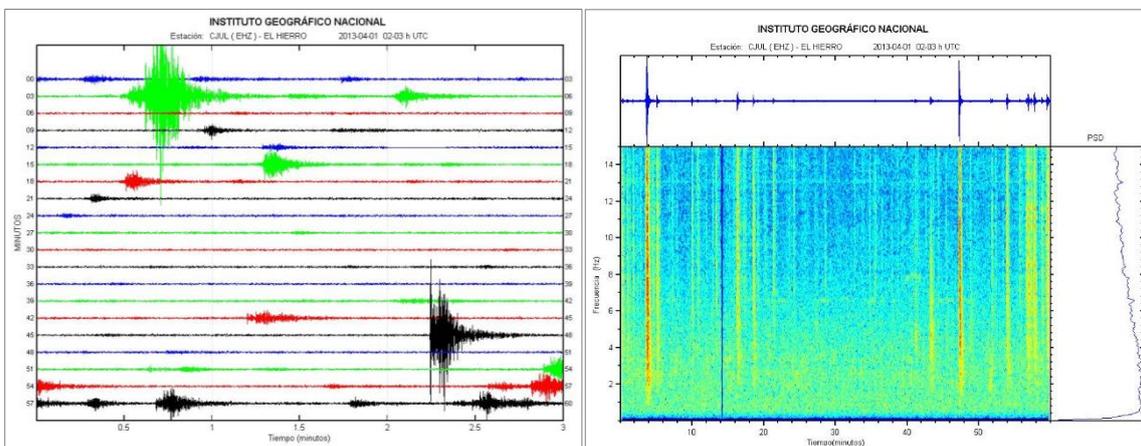


Hay varios tipos de señales sísmicas propias de entornos volcánicos:

- **Terremotos volcano-tectónicos (VT)**

Son eventos producidos por roturas en la corteza debido al empuje del magma sobre esta o por apertura de un conducto. En general son indistinguibles de los terremotos tectónicos excepto por su distribución de magnitudes y su localización, ya que no es esperable, por ejemplo, una importante sismicidad tectónica en las Islas Canarias al encontrarse alejado de las grandes fallas. Cuando se produce una intrusión magmática

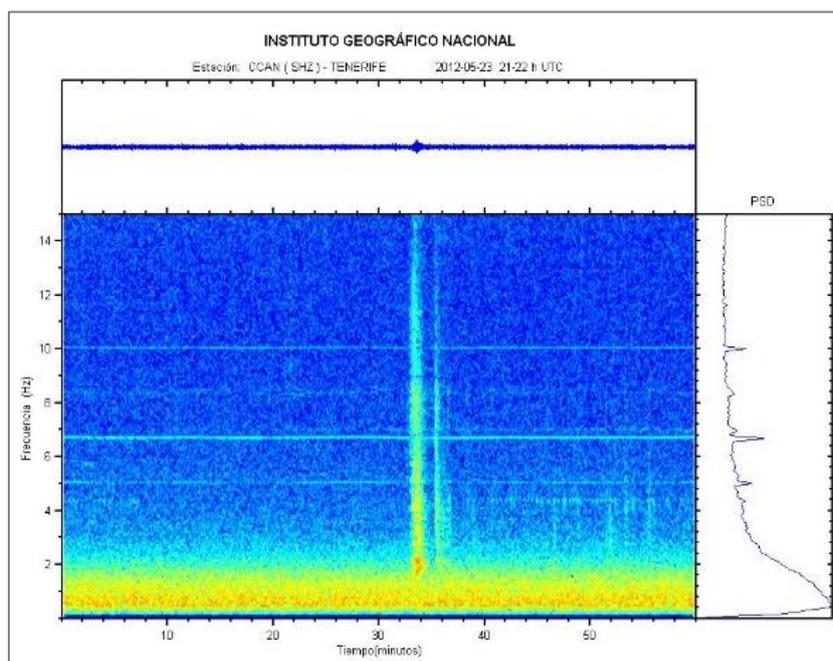
suelen aparecer enjambres de numerosos terremotos VT de relativamente baja magnitud, independientemente de si esta intrusión genera alguna erupción (como en el Hierro en 2011) o no (como en Tenerife en 2004). Estos sismos tienen una duración dependiente de su tamaño de entre pocos segundos y algunos minutos y además suelen presentar fases sísmicas definidas, lo que permite localizarlos fácilmente.



Enjambre de eventos volcano-tectónicos (VT) en la fase pre-eruptiva de El Hierro 2011-2012

- **Eventos de largo período (LP)**

Son sismos caracterizados por producir vibraciones de mayor período y, por tanto, de menor frecuencia que los terremotos VT. Las vibraciones suelen tener frecuencias entre 1 y 5 Hz. Estos eventos no suelen presentar fases claras excepto en ocasiones una primera llegada impulsiva, lo cual dificulta su localización. Para explicar el origen de estas señales hay varios modelos, pero el más aceptado sugiere que se producen

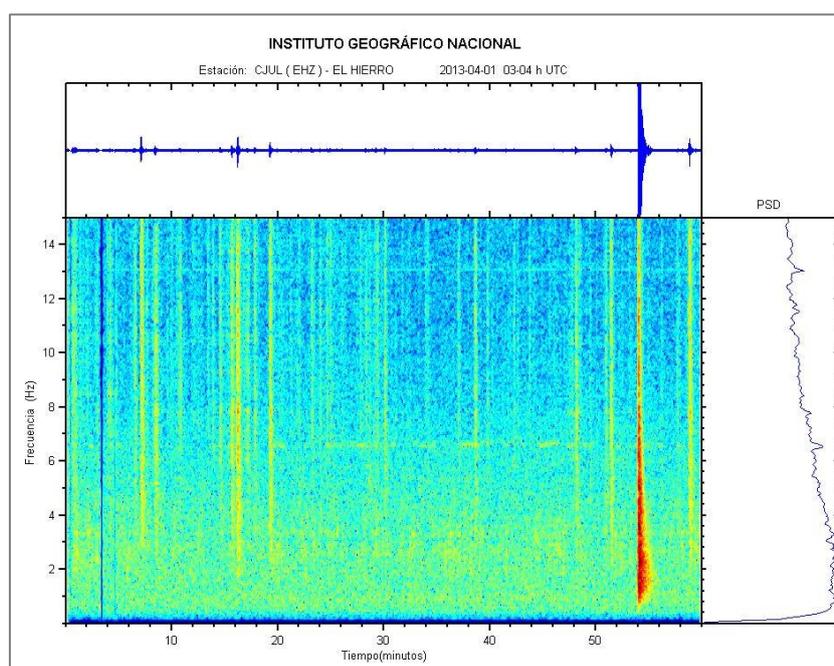


Evento de largo periodo (LP) registrada en Tenerife

debido a resonancias en fracturas cerradas en sus extremos y rellenas de fluidos volcánicos con cierto contenido de gas. La frecuencia y anchura de la señal dependerán del tamaño de la fractura resonante y del tipo de fluido encerrado en ella. Son comunes en volcanes que presentan erupciones de magmas evolucionados, con presencia de cámaras magmáticas. Esto se debe a que estas cámaras suelen estar situadas a profundidades someras. Las erupciones de magmas primarios que ascienden de gran profundidad no suelen estar precedidas de estas señales: sirva como ejemplo que, antes y durante la erupción de El Hierro, no se produjeron estos eventos.

- **Terremotos híbridos**

Estos eventos presentan características tanto de los terremotos VT como de los eventos LP. Tienen un inicio de altas frecuencias con fases definidas y un final de baja frecuencias. Para explicar su origen se usa una combinación del modelo de origen de ambos tipos de señales. Se produce una ruptura en una fractura sometida a la presión de fluidos volcánicos, generando un primer terremoto, después la fractura se rellena del fluido y la subsecuente resonancia del mismo origina la señal de baja frecuencia equivalente a un LP.

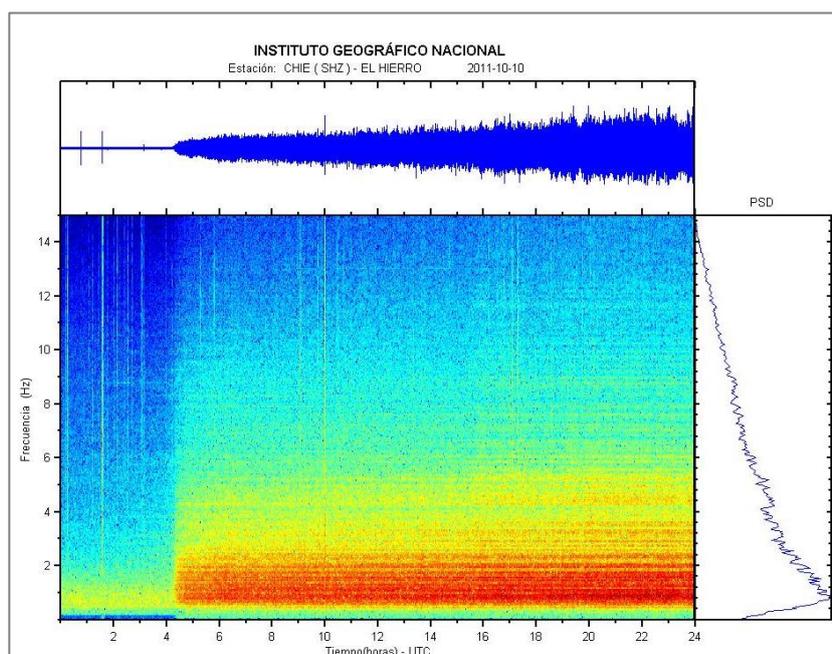


Evento híbrido de intrusión en la isla de El Hierro

- **Tremor volcánico**

Es una señal sísmica caracterizada por mantener una amplitud relativamente constante durante un período de tiempo que puede ir desde minutos a meses. Hay gran variedad de tremores, pudiendo diferenciarse por su contenido espectral con rangos de frecuencia menor de 1 Hz, de 1 a 6 Hz o mayores de 6 Hz. También se distinguen los monocromáticos (vibrando a una frecuencia única), los armónicos (vibrando en varias bandas estrechas de frecuencia) y los de amplio espectro (vibrando

en un amplio rango de frecuencias). El tremor puede tener muy distintos orígenes debido a la variedad de sus manifestaciones. En ocasiones es considerado una suma continua de eventos LP y se explicarían como la resonancia en un determinado conducto relleno de magma. También se ha asociado a la salida del magma a superficie, siendo su origen la interacción del magma con la roca circundante. Durante la erupción de El Hierro se observó una señal de tremor continua vibrando en una rango amplio de frecuencias, pero dominada por una señal en torno a 1 Hz.



Tremor volcánico registrado en la isla de El Hierro

- **Explosiones**

Suelen acompañar a la señal de tremor y se las identifica como un aumento brusco en la amplitud de la señal y un incremento de las frecuencias de vibración. Suele distinguirse una primera llegada asociada a ondas internas (sísmicas) y otra a la onda de choque por el aire (acústica). Como su nombre indica, estas señales están asociadas a la actividad explosiva durante una erupción en la que se emiten a la atmósfera una mezcla de gases y piroclastos de muy diversos tamaños.

Análisis

La vigilancia volcánica requiere de un análisis de datos en tiempo real para una correcta toma de decisiones. La localización de terremotos se puede obtener en escasos minutos, por lo que es importante contar con un sistema de comunicaciones robusto que permita obtener los datos sísmicos en tiempo real.

Instrumentación

El IGN utiliza sismómetros, arrays sísmicos y acelerómetros.

- **Sismómetros**

Es un instrumento capaz de medir las vibraciones del suelo, ya sean de origen sísmico o de origen antropogénico, meteorológico, etc. Su funcionamiento se basa en una masa sujeta mediante un sistema elástico (por ej., un muelle) a una estructura fijada al suelo. Al vibrar el suelo debido a un terremoto, la masa se queda quieta y la estructura se mueve, y este movimiento relativo es transformado en corriente eléctrica, la cual puede ser registrada en un papel, o digitalizada a un ordenador. Existen distintas clasificaciones de sismómetros pero básicamente se distinguen entre los de corto período y de banda ancha. Los de corto período pueden detectar vibraciones en frecuencias de 1 a 100 Hz, llegando a ampliarse hasta 0.2 Hz. Los sismómetros de banda ancha pueden llegar a medir vibraciones de 100 s de período (0.01 Hz) e incluso mayor.



Estación sísmica en Las Cañadas del Teide y en galería subterránea, Tenerife.

- **Array sísmico (antena)**

El array utilizado en la vigilancia volcánica es un conjunto de sismómetros situados en forma de red a distancias de pocas decenas o cientos de metros entre ellos. Están perfectamente sincronizados y su uso en conjunto permite conocer la localización de terremotos y otras señales sísmicas como eventos LP y tremores, mediante la obtención del azimut de la fuente de origen y de la velocidad aparente de las ondas.

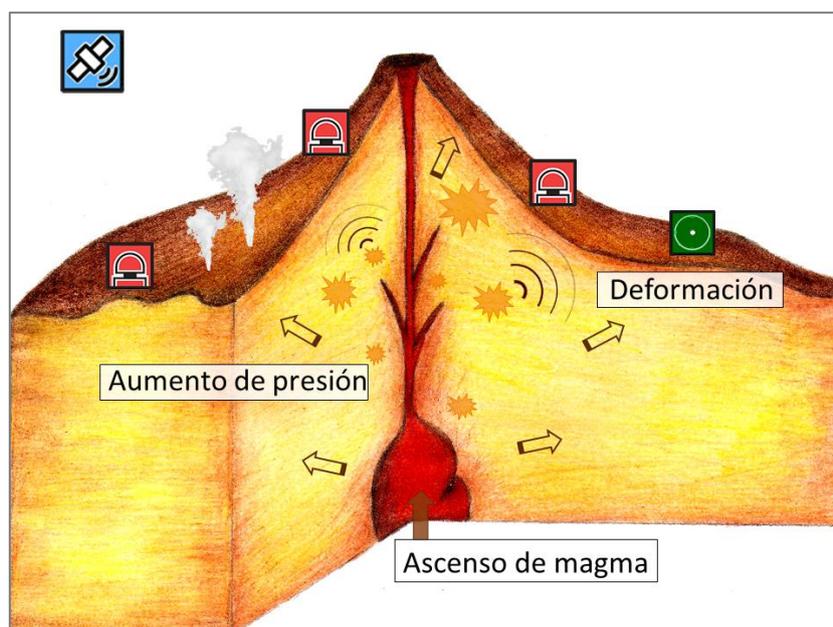
- **Acelerómetros**

El acelerómetro se basa en el mismo principio que el sismómetro, pero está pensado para el análisis de movimientos fuertes. Ahí donde un sismómetro se saturaría si el temblor fuera moderadamente fuerte, el acelerómetro debe ser capaz de registrar las aceleraciones producidas en el terreno por cualquier terremoto sin importar su tamaño. Estos aparatos tienen un rango dinámico adaptado a tal fin, no siendo útil para analizar pequeños terremotos. Los acelerómetros pueden estar situados en campo libre o en estructuras en emplazamientos de interés. Por ejemplo, hay un acelerómetro en las subdelegaciones del gobierno de Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas.

3 Geodesia

La geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra, lo que incluye la determinación del campo gravitatorio externo así como sus variaciones en el tiempo.

En este contexto el principal objetivo de la geodesia aplicada al volcanismo es el control de posibles deformaciones en un complejo volcánico y sus inmediaciones, a diferentes escalas de espacio y tiempo. Estas deformaciones, que se miden en la superficie terrestre, se producen cuando la presión interna ejercida por el magma cambia, por lo que son el reflejo de un cambio de la actividad volcánica. De esta forma la detección de deformaciones y su cuantificación puede dar una información muy útil sobre qué es lo que está ocurriendo en el interior.



La aplicación de modelos teóricos permite determinar parámetros básicos de la fuente de deformación, como por ejemplo en el caso de una cámara magmática la profundidad a la que se encuentra o el volumen de magma intruido.

El desarrollo de redes y técnicas para el control de deformaciones asociadas a la actividad volcánica ha recibido un gran impulso en los últimos años y en la actualidad son muchas las áreas volcánicas activas que cuentan con redes geodésicas u otro tipo de instrumentación para este fin. El control de deformaciones para la vigilancia volcánica puede realizarse mediante un gran número de técnicas geodésicas, entre las que se encuentran el **GPS**, **inclinómetros** o **InSAR**.

GPS

Las técnicas de posicionamiento por satélite, como es el GPS (Global Positioning System) o de forma más general GNSS (Global Navigation Satellite System) son frecuentemente usadas para el control de deformaciones en áreas volcánicas. La constelación de satélites GPS provee a cualquier usuario del número mínimo de satélites a la vista para determinar su posición, siempre y cuando tengan un horizonte despejado. De esta forma con un receptor GPS se puede obtener la posición de un punto de forma muy rápida con una precisión por debajo del metro. Pero en el caso de los volcanes, la precisión necesaria para detectar la deformación ocasionada por el cambio del estado del volcán debe ser muy superior, debiendo ser capaz de detectar deformaciones por debajo del centímetro.

- **Instrumentación**

Para conseguir la precisión necesaria en este tipo de aplicaciones se usan equipos geodésicos formados por un receptor y antena de alta precisión y que estén instalados de forma adecuada con una monumentación estable, para poder descartar en caso de detectar deformaciones, que estas sean causadas por inestabilidad de la propia estación.

Otra forma de eliminar errores y conseguir una mayor precisión del posicionamiento es instalar varios equipos en los alrededores del área que se desea controlar, de forma que diferenciando los datos de estaciones cercanas se pueden eliminar errores comunes a dos estaciones, como los orbitales, desfase de los relojes o disminuir aquellos causados por el medio de propagación de la señal. Por eso comúnmente se habla de redes GPS en las áreas de estudio.



Estación permanente GPS para el control de deformaciones en la isla de El Hierro

- **Tipos de datos**

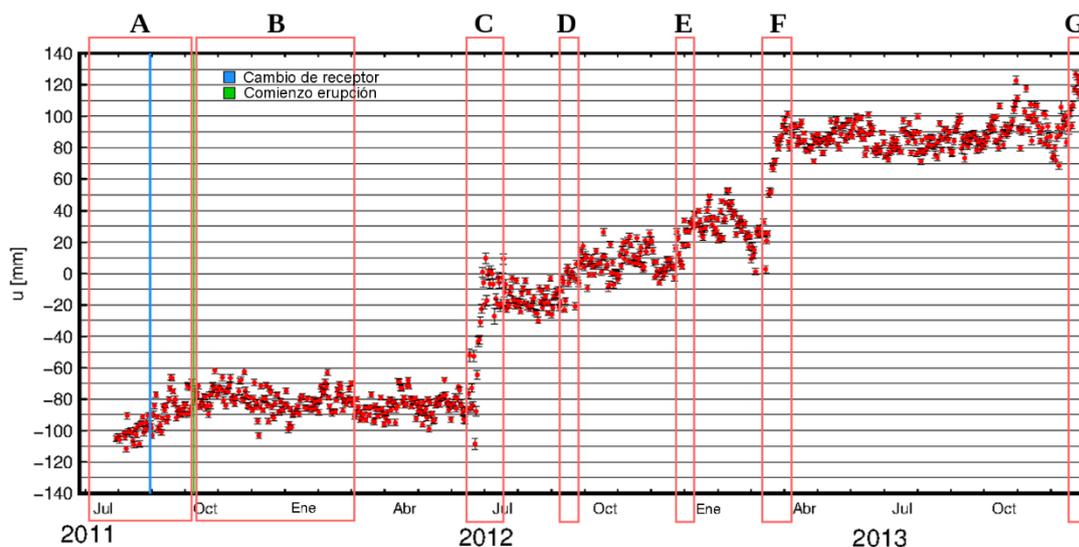
En los últimos años las redes GPS para el control de deformaciones en áreas volcánicas suelen estar formadas por lo que se denominan estaciones permanentes o de registro continuo, que en el caso de Canarias envían los datos a las oficinas del IGN donde estos son procesados para obtener la posición de cada estación y controlar si esta varía con el tiempo, lo que permite detectar un movimiento inusual que pudiera ocurrir como resultado de un cambio en el estado del volcán.

Además de las estaciones permanentes también se realizan campañas de observaciones GPS para completar algunas áreas donde la monitorización continua no es posible o densificar el número de puntos donde se registran las deformaciones.

- **Análisis**

Los datos registrados por las redes GPS que se reciben en el IGN son procesados para la obtención de las coordenadas con la precisión necesaria de menos de 1 cm. Para ello se trabaja con datos de entre 8 y 24 horas para con todos los datos registrados durante esas sesiones calcular unas coordenadas y estudiar si estas presentan variaciones inusuales a lo largo del tiempo.

Este postproceso requiere de una serie de datos externos, como son las órbitas o efemérides de los satélites, calibración de antenas, modelos atmosféricos, de precesión, nutación, etc., que hace que se requiera de un pequeño periodo de tiempo para su cálculo y se obtengan como resultados las coordenadas que permiten realizar la detección de deformaciones en tres dimensiones con la precisión necesaria.



Deformaciones verticales en una de las estaciones de registro continuo GPS de El Hierro (HI03) obtenidas en el periodo de la pre-erupción (A), durante la erupción (B) y las posteriores reactivaciones del 2012 al 2013 (C, D, E, F y G) en donde la actividad volcánica causó tanto deformaciones como sismicidad, pero ninguna de ellas finalizó en erupción.

Inclinómetro

Los inclinómetros son instrumentos utilizados para medir la inclinación de un plano respecto de la horizontal mostrando así muy diversos campos de aplicación (ingeniería civil, prospecciones petrolíferas, astronomía, nivelación, industria aeroespacial, volcanología, etc...).

En el estudio de volcanes activos, los Inclinómetros permiten la monitorización del cambio de forma antes, durante y después de los periodos eruptivos y complementan la información proporcionada por otras técnicas geodésicas.

Las magnitudes de las inclinaciones de las superficies pueden ser muy pequeñas y se requieren equipos muy precisos llegando a alcanzar resoluciones de hasta 5 nano radianes.

- **Instrumentación**

Los inclinómetros o sensores de inclinación están pensados para la conversión de una magnitud física en una señal eléctrica. Se utilizan habitualmente en vigilancia volcánica los denominados de plataforma, que se colocan en la superficie; los de pozo de perforación también pueden ser utilizados en vigilancia pero su instalación es mucho más laboriosa y tienen mayor coste. A su vez, dependiendo de las direcciones que midan, pueden ser de uno o dos ejes perpendiculares entre sí. Los inclinómetros más empleados en la vigilancia volcánica son los inclinómetros de plataforma de dos ejes. En cualquier caso, precisan de una monumentación estable.



Inclinómetro de superficie de dos ejes con colector de datos

- **Tipos de Datos**

Las redes de inclinómetros para el control de deformaciones en áreas volcánicas son estaciones constituidas por un inclinómetro, un sistema de registro continuo y un sistema de comunicación. Los datos son registrados y enviados al IGN, donde son tratados, analizados y almacenados. A partir de ellos y junto a otras técnicas geodésicas, se pueden detectar cambios en el estado del volcán.

- **Análisis**

Los inclinómetros de superficie tienen una alta sensibilidad a la temperatura, debido a sus componentes. Por lo tanto, se debe estudiar la relación entre la temperatura y los ejes X e Y, e intentar minimizarla y estudiar como varían ambas componentes en el tiempo.

InSAR

La técnica InSAR (Interferometría Radar de Apertura Sintética) utiliza imágenes, captadas por sensores a bordo de satélites artificiales, para detectar deformaciones del terreno sobre la superficie terrestre. Constituye una herramienta de monitorización complementaria a inclinómetros y GPS puesto que estos detectan deformaciones puntuales con precisiones altas, mientras que la técnica InSAR trabaja sobre amplias zonas aunque con precisiones más bajas. Debido a la creciente disponibilidad de imágenes a bajos precios y la ausencia de requerimiento de instalación de sensores en campo, su uso para la vigilancia volcánica va en aumento.

- **Instrumentación**

Las técnicas InSAR no requieren de instrumentación alguna en campo. Sin embargo, en ocasiones, se utilizan reflectores para aumentar la intensidad de la señal en lugares de baja reflectividad como zonas vegetadas o suelos húmedos. El uso de estos reflectores suele conllevar un aumento en la precisión de la medida en ese punto.

- **Tipos de datos**

Los procesados InSAR hacen uso de imágenes radar capturadas por satélites artificiales. Las bandas más utilizadas son la X (12 - 8 GHz), C (8 - 4 GHz) y L (1.5 – 0.5 GHz). Las características del terreno, la atmósfera y tipo de deformación limitan el uso de unas bandas a favor de otras. Por ejemplo en terrenos de alta vegetación es preferible el uso de la banda L puesto que presenta mayor penetración, sin embargo la magnitud de las deformaciones detectables es menor de la que se obtendría utilizando banda X o C.

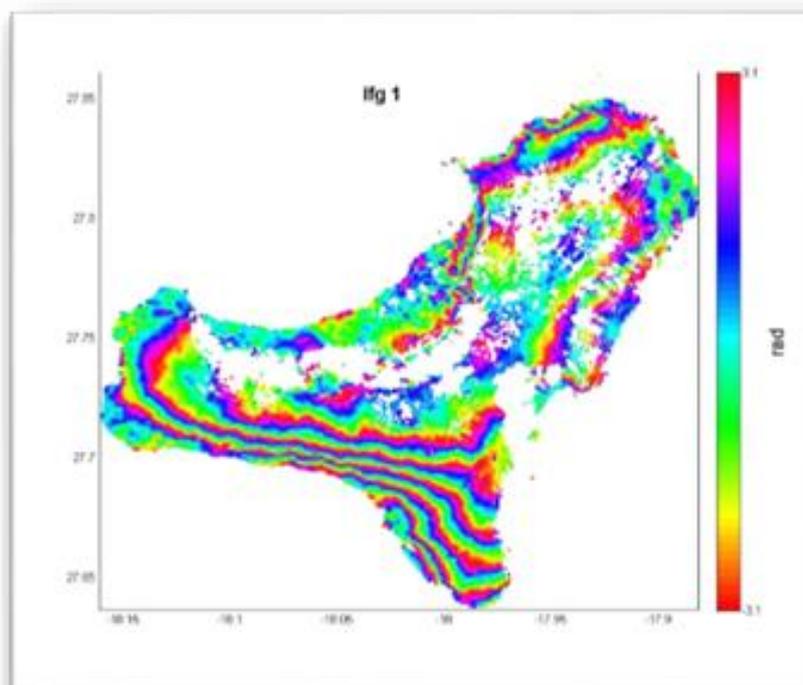
El tipo de dato viene determinado también por la disponibilidad de imágenes para un lugar y una fecha concreta. Esta disponibilidad suele ser gestionada por las agencias

espaciales que operan los satélites. La tendencia actual es adquirir en base a las necesidades de los usuarios y proporcionar imágenes gratuitas o a bajo coste.

- **Análisis**

El análisis InSAR básico requiere de dos imágenes radar compatibles (misma banda, polarización, geometría, ángulo de inclinación...) adquiridas en fechas distintas. Partiendo de dichas imágenes, se realiza una serie de tratamientos para poder llegar a comparar sus fases y determinar las deformaciones.

El resultado del análisis se denomina interferograma. Los interferogramas proporcionan información sobre el cambio de distancia satélite-tierra entre dos fechas. Como la posición del satélite ha sido corregida usando datos orbitales permaneciendo fija en ambas adquisiciones, las diferencias de fase que se obtienen son el resultado de deformaciones de la superficie terrestre y/o variaciones atmosféricas entre las fechas. De cara a la vigilancia volcánica estamos interesados en aislar la señal de deformación.



Interferograma que muestra las deformaciones en la isla de El Hierro previas a la erupción de octubre de 2011. Cada franja de color se corresponde aproximadamente con 1.5 cm de deformación.

Para ello es fundamental la estimación de las componentes atmosféricas, las cuales pueden constituir un importante factor limitante de la técnica si no son bien resueltas. Si por el contrario se quiere realizar un estudio de tipo atmosférico se estará



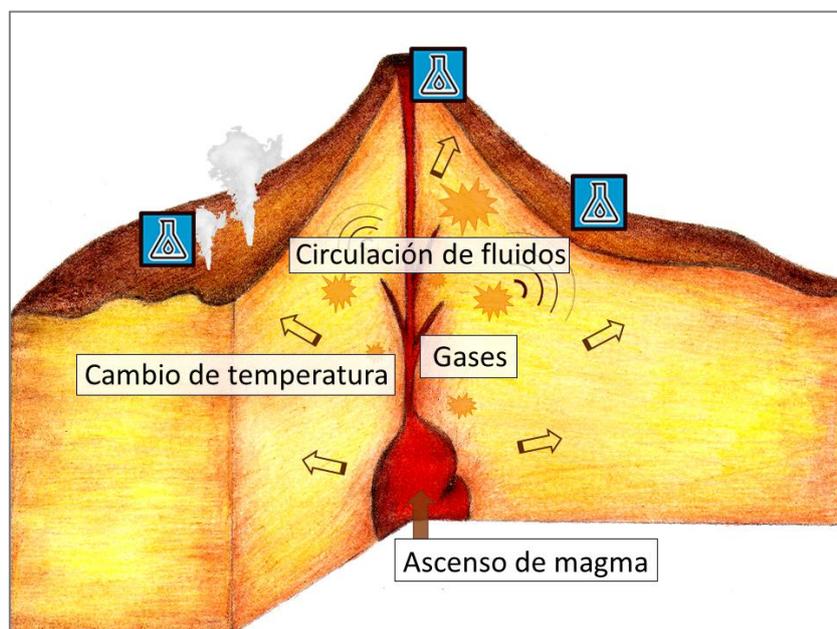
interesado en eliminar la parte de la fase relativa a las deformaciones, si es que existen. También pueden determinarse ambas señales al mismo tiempo, de deformación y atmosféricas, haciendo uso de diferentes metodologías y datos externos.

Actualmente los satélites Sentinel de la ESA proporcionan imágenes radar de toda España cada 6 o 12 días de forma gratuita, facilitando un análisis sistemático y regular de las deformaciones.

4 Geoquímica

La mayoría de las erupciones volcánicas vienen precedidas por cambios geofísicos y/o geoquímicos. Estos cambios pueden ser detectados y medidos con exactitud mediante técnicas de monitoreo, utilizando la instrumentación y tecnología adecuadas.

El estudio por métodos químicos de la composición de los productos volcánicos, así como los efectos de la interacción de estos productos con el medio ambiente, constituyen una herramienta valiosa para obtener información referente a las distintas etapas de la actividad volcánica.



Para el monitoreo de un volcán activo se estudian los cambios en el tiempo de los distintos parámetros. Los niveles base muestran las características del sistema volcánico y con repetidas mediciones se pueden identificar fluctuaciones y en ocasiones pronosticar la actividad eruptiva. Para observar los cambios geoquímicos se efectúan muestreos y análisis químicos e isotópicos periódicos de fumarolas, gases del suelo y cuerpos de agua emplazados en zonas volcánicas.

Más del 90% del gas emitido en las emanaciones volcánicas es vapor de agua, la mayoría de la cual es agua subterránea calentada. Le siguen en abundancia CO_2 , SO_2 y, en menor proporción, HCl , H_2 , H_2S , HF , CO , N_2 , COS , CH_4 , B, Li, halógenos, hidrocarburos, metales y gases raros. Los gases procedentes del magma circulan por el sistema de fracturas interactuando con los acuíferos y las rocas encajantes, saliendo a superficie en forma de fumarolas, emisiones difusas o fuentes termales. Dado que la composición química de los gases presentes en las emisiones de un volcán es un reflejo

de su actividad, las variaciones en las tasas de emisión pueden indicarnos una modificación en el orden del sistema.

Con el fin de realizar una correcta y adecuada vigilancia volcánica desde el punto de vista geoquímico de los diferentes sistemas volcánicos presentes en Canarias, la Unidad de Vigilancia Volcánica del Instituto Geográfico Nacional combina toma de muestras de gases y aguas subterráneas, técnicas de medida *in situ*, estaciones de medida permanentes y campañas de medida discretas de varios parámetros de interés.

Fumarolas y gases del suelo

Son una de las principales manifestaciones de la actividad volcánica y conforman una ventana de observación directa al estado de actividad.

El IGN lleva a cabo periódicamente la toma de muestras de gases del suelo y fumarolas en el área sumital del Teide para su posterior análisis composicional. Variaciones tanto en la composición total de los gases como en la relación isotópica de algunos elementos pueden reflejar un cambio de estado en el sistema volcánico y servir así de señales de alerta temprana de una futura erupción.



Toma de muestras de la fumarola del Teide

Emisión difusa de CO₂

Atendiendo a la composición general de los gases volcánicos emitidos, el dióxido de carbono es el segundo gas mayoritario. La emisión difusa de CO₂ (gas muy poco soluble en el magma) ha cobrado durante los últimos años una gran relevancia como parámetro fundamental en el seguimiento de la actividad volcánica. Las emisiones

volcánicas de CO₂ se producen de diversas maneras: a través de fumarolas, penachos y columnas eruptivas, pero también de manera difusa a través del suelo en terrenos porosos que permiten su ascenso.

En este sentido, y para complementar el control geoquímico de este parámetro, el IGN ha desplegado dos estaciones para la medida en continuo del flujo difuso de CO₂ en las islas de Tenerife y El Hierro. Asimismo, se realizan campañas discretas de medida de flujo difuso de CO₂ del suelo en varias zonas de Tenerife, El Hierro, La Palma y Lanzarote.



Estación de medida en continuo de CO₂ difuso en el Teide



Campañas de medida de CO₂ difuso en el cráter del Teide



Estación de medida en continuo de CO₂ difuso en El Hierro

Emisión de gas radón

El radón es un gas noble radiactivo, inodoro e incoloro con una vida media de 3.8 días. Su uso como trazador de la actividad volcánica está ampliamente descrito en la bibliografía científica y empleado en este sentido por diferentes observatorios volcanológicos.

El IGN cuenta con varios equipos de medida de gas radón instalados en galerías, pozos y en superficie en las islas de Tenerife y El Hierro.



Estación de medida en continuo de gas radón en Tenerife

Concentración de CO₂ y Rn en galerías

Las galerías drenantes existentes en las islas pueden atravesar diferentes estructuras geológicas, como son las fracturas y diques, que facilitan el ascenso de los gases magmáticos a la superficie. Debido a esto, muchas galerías presentan una concentración anómala de gases, principalmente CO₂. Las variaciones de las concentraciones de CO₂ y Radón en la atmósfera de dichas galerías, así como la temperatura ambiente y de suelo, pueden ser indicativos de cambios en el estado de actividad del sistema volcánico.

El IGN cuenta con varias estaciones multiparamétricas de medida de gases (CO₂, Rn, temperatura ambiente, temperatura de suelo) situadas en diversas galerías de Tenerife y El Hierro.



Galería de la isla de Tenerife

Monitoreo de aguas subterráneas

En las Islas Canarias existen numerosas obras de captación de aguas subterráneas (pozos y galerías) excavadas con el fin de explotar los recursos hídricos presentes en las islas. Estas masas de agua subterránea están sometidas a la interacción con los gases liberados por el magma, de manera que variaciones en los parámetros físico-químicos o en la composición de los elementos disueltos en ellas pueden ser indicativas de cambios en el estado de actividad volcánica.

El IGN realiza periódicamente la toma de muestras de agua para su posterior análisis en laboratorio y la medida de parámetros físico-químicos *in situ* en diferentes galerías en las islas de Tenerife, El Hierro y La Palma como parte del control geoquímico de las aguas subterráneas.



Toma de muestras de agua subterránea y determinación de parámetros in situ



Termometría

El calor emitido por un volcán es también un parámetro fundamental en el monitoreo geoquímico. Una de las principales manifestaciones de la liberación de dicha energía térmica son las áreas fumarólicas.

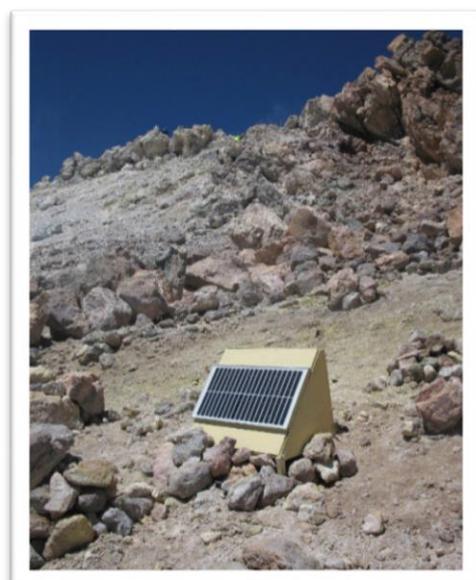
El IGN dispone de varias estaciones de monitoreo de la temperatura del suelo a distintas profundidades en la zona sumital del Teide.



Instalación de perfil vertical de temperatura



Medida de la temperatura del suelo



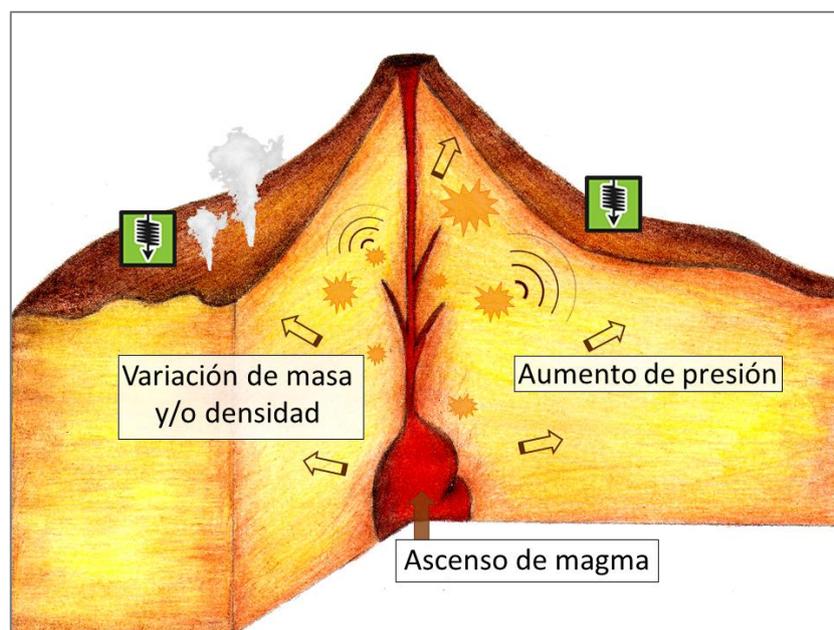
Estaciones termométricas: perfiles verticales de temperatura del suelo a 4 profundidades

5 Gravimetría

La Gravimetría se encarga del estudio de las fuerzas de atracción entre cuerpos, sus causas y consecuencias. Dichas fuerzas están relacionadas directamente con la masa y/o densidad de estos cuerpos y de manera inversa con la distancia que separa los mismos. Su manifestación física se traduce en una aceleración de unas masas hacia otras.

Todo elemento que se encuentre rotando solidariamente con la Tierra, se verá sometido a la atracción de ésta. Esta atracción no se ejerce de manera homogénea. Depende tanto de la estructura del interior de la Tierra como de fenómenos externos. Midiendo la aceleración experimentada por un cuerpo al caer y comparándola con la que predicen los modelos, seremos capaces mediante distintas técnicas, de obtener información del interior de la Tierra.

Las áreas volcánicas están caracterizadas por fuertes contrastes de masa y/o densidad. Además, en periodos de actividad volcánica, es usual encontrar variaciones espacio-temporales del valor de la gravedad, originadas por los distintos procesos magmáticos, que en general involucran cambios de densidad. Por lo tanto es común el uso de esta técnica como un complemento al estudio de estos fenómenos volcánicos.



Instrumentación

La medida de la aceleración de la gravedad se realiza mediante gravímetros, siendo estos, instrumentos en los que una masa de prueba se deja acelerar por acción de la gravedad.

La forma de medir dicha aceleración depende del tipo de gravímetro:

- **Gravímetros absolutos**

Los primeros, que estaban basados en métodos pendulares, se han ido sustituyendo principalmente por gravímetros de caída libre. En estos últimos, una masa se deja caer libremente en el vacío. Midiendo pares de distancia y tiempo de manera muy precisa durante la caída, podemos derivar el valor de la aceleración de la gravedad utilizando las clásicas ecuaciones de movimiento de un cuerpo en el vacío.

En la actualidad, éstos instrumentos proporcionan valores absolutos de gravedad con gran precisión ($\sim\mu\text{Gal}$; $1\ \mu\text{Gal} = 10^{-8}\ \text{m/s}^2$).



Gravímetro absoluto A10

- **Gravímetros relativos**

Están basados en sistemas de compensación de la fuerza de la gravedad mediante otro tipo de fuerzas que se pueden controlar y conocer con precisión. Aunque hay varios sistemas, el más empleado es el compuesto de una masa suspendida de un muelle. Midiendo la fuerza elástica ejercida por el muelle para compensar la fuerza de la gravedad, podemos determinar el valor de la aceleración.

Este tipo de gravímetros proporcionan diferencias de gravedad entre un punto y otro, pero no un valor absoluto. Su tamaño y robustez hacen que sean elegidos de manera común para realizar trabajo de campo, por lo que son los más comúnmente empleados en volcanología.



Gravímetro relativo L&R

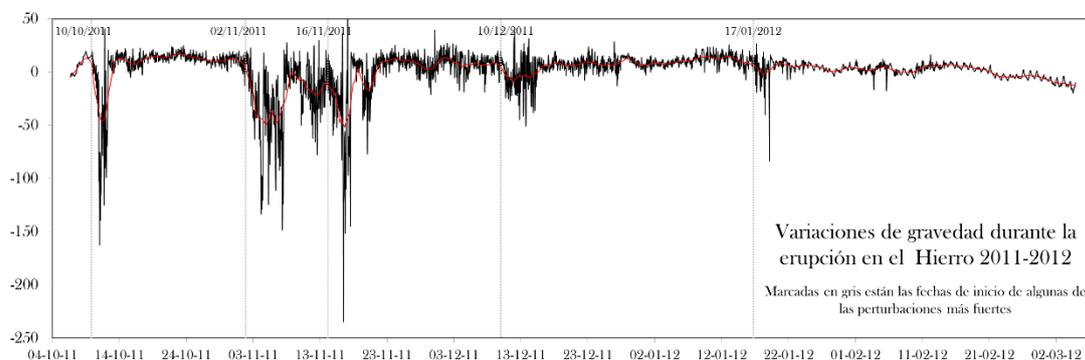
Datos

En volcanología, el uso tradicional de los valores de gravedad ha sido el enfocado a la obtención de Mapas de Anomalías de Bouguer, orientados al conocimiento de la estructura del subsuelo. Ésta técnica se ha visto complementada en la actualidad por otras que buscan el conocimiento de la evolución espacio-temporal del valor de la gravedad, por estar relacionado con la evolución del sistema volcánico. Para ello se emplean dos tipos de técnicas de forma habitual:

Microgravimetría: Se mide el valor de gravedad y de posición en puntos bien establecidos del entorno volcánico de manera muy precisa. Se determina la diferencia de gravedad en estos puntos respecto a una estación de referencia que se considera estable fuera de mencionado entorno. Estas medidas se repiten a lo largo del tiempo intentando que tengan una periodicidad determinada. Mediante esta técnica somos capaces de hacer un análisis de la evolución espacio-temporal del sistema volcánico.

Gravimetría de registro continuo: En este caso, se coloca uno o varios gravímetros registrando en modo continuo. Se instalan en estaciones bien controladas dentro del

área de actividad. Del mismo modo que el caso anterior las variaciones observadas aportan información del sistema volcánico pero ahora de manera continua.



Variaciones de gravedad durante la erupción en el Hierro 2011-2012. Marcadas en gris están las fechas de inicio de algunas de las perturbaciones más fuertes

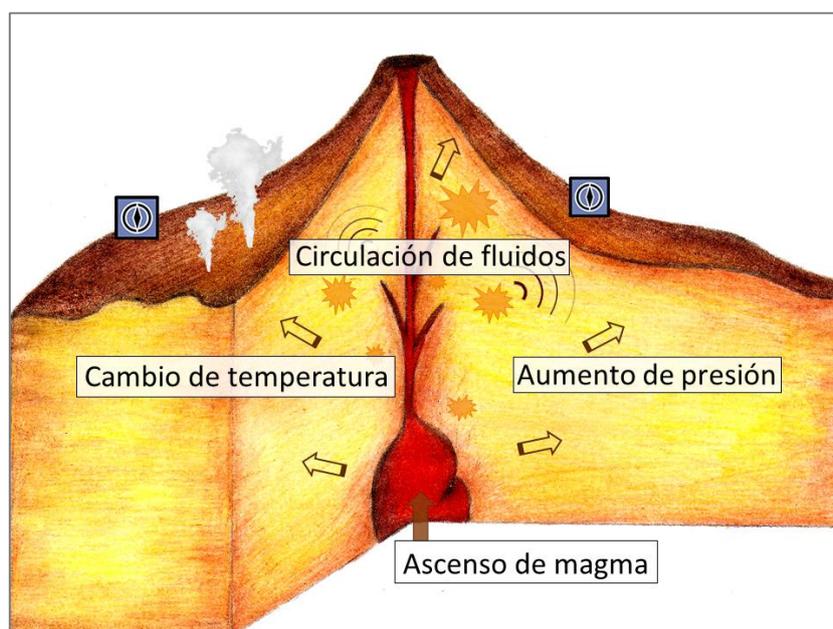
Análisis

Con los datos obtenidos se realizan distintos procesados, ninguno de ellos en tiempo real, en función de la aplicación final del dato. Dichos procesados consisten principalmente en la eliminación de efectos conocidos de la señal registrada, tales como efectos de marea terrestre, carga oceánica y presión atmosférica entre otros, para quedarnos únicamente con la señal con sentido volcanológico. Los productos finales de dicho análisis son:

- Mapas de Anomalías de Bouguer
- Mapas de variación espacio-temporal de la gravedad.
- Gráficas de registro continuo de anomalía gravimétrica en el tiempo.

6 Geomagnetismo y Geoelectricidad

El estudio de los campos magnéticos y eléctricos y sus variaciones temporales en los entornos volcánicos proporciona información muy importante acerca de su estructura y su estado de actividad. En este contexto, la Unidad de Vigilancia Volcánica del IGN desarrolla varias líneas de investigación: análisis y seguimiento del campo geomagnético (Geomagnetismo); y campañas de prospección geoelectrónica y medición de parámetros geoelectrónicos en tiempo continuo (Geoelectricidad). Ambas técnicas (Geomagnetismo y Geoelectricidad), aunque son independientes, están íntimamente relacionadas entre sí debido a que los campos eléctrico y magnético son distintas caras de un mismo campo físico: el campo electromagnético. Así, la variación temporal de un campo magnético crea corrientes eléctricas y las corrientes eléctricas crean campos magnéticos.



Geomagnetismo

Una de las técnicas utilizadas para detectar variaciones en el estado y la actividad de los sistemas volcánicos es la medida del campo magnético terrestre (campo geomagnético). Para ello se deben emplear magnetómetros permanentes de medida continua situados en y alrededor del sistema volcánico. Estas medidas deben contrastarse con los valores del campo geomagnético medidos en una estación más alejada del sistema, que sirve de referencia. En las áreas volcánicas, diversos fenómenos físicos pueden hacer variar el campo magnético a escala local: variaciones en el estado de esfuerzos de los materiales de la corteza, que pueden ser causadas tectónicamente o por la intrusión de nuevos cuerpos magmáticos en el sistema (efecto piezomagnético); emplazamiento y enfriamiento de cuerpos magmáticos, que adquieren imanaciones remanentes e inducidas que afectan al campo magnético local

(efecto termomagnético); modificaciones del flujo térmico y del sistema hidrotermal, que hacen variar las anomalías eléctricas del sistema, afectando a los valores de campo magnético (efecto electrocinético); etc. Todos estos fenómenos pueden proporcionar información muy importante para determinar el estado del sistema y por tanto para la vigilancia volcánica.



Instalación de magnetómetro

Basándose tanto en estimaciones teóricas como en observaciones experimentales, en general se espera que los efectos volcanomagnéticos anteriores produzcan variaciones pequeñas en la intensidad del campo geomagnético local, de unos pocos nanoteslas (nT) o a lo sumo pocas decenas de nT. Estos valores son muy inferiores al valor medio del campo magnético terrestre en superficie, que es de aproximadamente 38000 nT en las Islas Canarias y 44000 nT en el centro de la Península Ibérica, y son también mucho menores que las variaciones debidas a fenómenos no volcánicos (ionosféricos y magnetosféricos), que pueden alcanzar hasta varios cientos de nT. El efecto volcanomagnético esperado es, por tanto, muy pequeño. Esto, junto con la pluralidad de fenómenos que potencialmente pueden afectar al campo magnético local, hace que la interpretación de las señales volcanomagnéticas conlleve un alto grado de dificultad e incertidumbre. Esta incertidumbre se reduce durante el tratamiento de los datos al comparar las medidas obtenidas en las estaciones situadas en el sistema volcánico bajo estudio con una estación de referencia alejada del mismo. Adicionalmente, la correcta interpretación de los datos volcanomagnéticos requiere comparar los resultados con los proporcionados por el resto de técnicas de vigilancia volcánica, especialmente los datos geoelectrónicos, sísmicos y de deformación del terreno (GPS, inclinómetros, INSAR, etc.).

Como estación de referencia de alta calidad, en Canarias el IGN dispone del Observatorio Geomagnético de Güímar (en la vertiente nororiental de Tenerife), operativo desde 1993 y que en su día sustituyó al Observatorio Geomagnético de Las Mesas (operativo entre 1961 y 1992). En el Observatorio se realiza un registro continuo del campo geomagnético en tiempo real, tanto de su intensidad total como de sus componentes direccionales. Estos datos, además de ser de acceso público (<http://www.ign.es/web/ign/portal/gmt-datos-preliminares>), se envían regularmente a INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org/>), organismo internacional que aglutina y coordina las actividades de un gran número de Observatorios Geomagnéticos distribuidos por todo el planeta, con unos criterios metodológicos y de calidad de los datos armonizados. Además, la Red de Vigilancia Volcánica del IGN cuenta con varios magnetómetros Overhauser de medida continua de la intensidad total del campo geomagnético distribuidos en distintos puntos de las diferentes islas del archipiélago canario. Estas estaciones registran, típicamente, un dato por minuto, lo que permite seguir las variaciones de la intensidad total del campo geomagnético en distintas localizaciones.

Geoelectricidad

Dentro de la Geofísica, las técnicas geoeléctricas se encargan de medir distintos parámetros eléctricos de los materiales de la corteza terrestre, permitiendo la caracterización de dichos materiales y la obtención de información sobre su distribución en el subsuelo, la presencia de distintas capas, fallas, límites estructurales, etc. En el caso de las áreas volcánicas, este tipo de información resulta indispensable para la correcta caracterización estructural de los edificios volcánicos y de su situación de estabilidad o inestabilidad, así como para el estudio de los sistemas hidrotermales asociados al flujo de calor que emana desde el interior de los sistemas volcánicos.

Desde el punto de vista de la vigilancia volcánica, una repetición sistemática de las campañas geoeléctricas puede permitir la detección de cambios en los parámetros que definen la estructura volcánica, así como cambios en el comportamiento o la extensión de los sistemas hidrotermales asociados. Estos cambios pueden deberse a reajustes en la situación de estabilidad/inestabilidad de los edificios volcánicos o a la reactivación o intensificación de los sistemas magmáticos. Ambos casos son de gran importancia para la vigilancia volcánica y la estimación de los peligros asociados. Además, es posible diseñar e instalar equipos de medida continua de diferentes parámetros geoeléctricos, lo que permite un seguimiento continuo de la variación temporal de los mismos en puntos escogidos por su interés.

Algunas técnicas geoeléctricas son la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT, Electrical Resistivity Tomography), en la que se inyecta una corriente artificial en el subsuelo y se recoge la respuesta de los materiales del mismo, o el Potencial Espontáneo (SP, Self-Potential), en la que se miden las corrientes eléctricas naturales presentes en el subsuelo, debidas principalmente a la circulación de fluidos

subterráneos a través de los materiales de la corteza. La primera técnica está especialmente indicada para obtener información estructural, mientras que la segunda es especialmente adecuada para estudiar los sistemas hidrotermales de las zonas volcánicas y su evolución temporal.

La Unidad de Vigilancia Volcánica del Instituto Geográfico Nacional realiza campañas reiterativas de medida del Potencial Espontáneo. Esta técnica geoelectrica consiste en la medida del potencial o voltaje eléctrico natural en la superficie del terreno. La aparición de anomalías eléctricas en superficie puede deberse a distintos fenómenos físicos: la existencia de menas metálicas en el subsuelo (efecto electroquímico); la existencia de anomalías térmicas (efecto termoeléctrico); o la circulación de fluidos, como agua cargada de minerales disueltos, a través de los poros y fisuras del terreno (efecto electrocinético). En el caso de las áreas volcánicas, se comprueba que los mecanismos más importantes son los dos últimos, en especial la circulación de fluidos en el medio poroso. Así, la medida del potencial espontáneo, complementada con medidas de temperatura y CO₂, permite la caracterización de los sistemas hidrotermales volcánicos.

En este sentido, las campañas que realiza el IGN han permitido la cartografía de las anomalías eléctricas en diferentes áreas, especialmente en Tenerife. Esta cartografía permite conocer la extensión de los sistemas hidrotermales volcánicos y obtener importante información estructural. Además, ha conducido a la identificación de las zonas con anomalías más sensibles, que pueden ser usadas como indicadores del estado de actividad volcánica, bien mediante reobservaciones periódicas, bien mediante instalación de líneas de medida continua de SP. Ambas estrategias (reobservación y líneas de medida continua) se están aplicando actualmente en distintos puntos de las Islas Canarias.

7 Geología

La geología (del griego “geo”, tierra, y “logos”, razonamiento o discurso) es la ciencia que tiene como objeto el estudio de la composición, estructura, dinámica e historia de la Tierra, incluyendo tanto sus recursos naturales (energía, minerales, agua...) como los procesos que tienen lugar en ella.

Dada la amplitud de campos que conciernen a la geología, esta se ha dividido tradicionalmente en dos amplias áreas: (1) la geología física, enfocada al estudio de los materiales que componen la Tierra y a los procesos que actúan bajo la superficie terrestre y sobre ella y, (2) la geología histórica, centrada en el estudio y comprensión del origen de la Tierra y su evolución a lo largo del tiempo.



El Volcán Chinyero, última erupción registrada en la isla de Tenerife, 1909

La geología es una ciencia multidisciplinar que se basa y apoya en los principios de la física, la química y la biología, entre otras. Y aunque en “sensu stricto” no se trata de una técnica de vigilancia volcánica, proporciona información muy valiosa sobre cómo es el sistema, cómo se comporta y cómo debe ser interpretado.

Dicha información es posible obtenerla a través del estudio detallado de la historia eruptiva de los volcanes, de la tipología de los materiales expulsados y de los depósitos generados, que en su conjunto, son la clave para poder comprender e interpretar correctamente el sistema volcánico en cuestión. Asimismo, los estudios geológicos permiten delimitar las áreas que presentan una mayor probabilidad de ser afectadas por un nuevo fenómeno eruptivo (coladas de lava, caída de piroclastos, lahares, etc), y con ello, definir el riesgo volcánico asociado, en función de los bienes personales y materiales susceptibles de sufrir daños. Por todo ello, la geología es una herramienta indispensable para la gestión e instalación de una red de vigilancia volcánica, ya que permite estimar los escenarios eruptivos más probables esperados.

Una investigación exhaustiva de cualquier volcán debe incluir también la cartografía detallada y sistemática de la naturaleza, volumen y distribución de los productos eruptivos, así como la determinación de sus edades mediante métodos de datación. Conocer la historia eruptiva de un sistema volcánico, así como sus rasgos estructurales y composicionales, ofrece una base de datos que permite realizar estimaciones más precisas de los intervalos de recurrencia entre periodos activos y de reposo, algo esencial para la gestión de áreas volcánicamente activas como las Islas Canarias.



Depósitos intercalados de erupciones basálticas y fonolíticas en el área del Teide (Tenerife)

En el seguimiento y vigilancia de una erupción, como en el caso de la erupción submarina de la isla de El Hierro (2011-2012), la evaluación de cada fase eruptiva y el análisis de sus productos aporta información esencial sobre su posible evolución y desarrollo, permitiendo identificar patrones del comportamiento del volcán.



Campo de fumarolas en el pico del Teide (Tenerife)

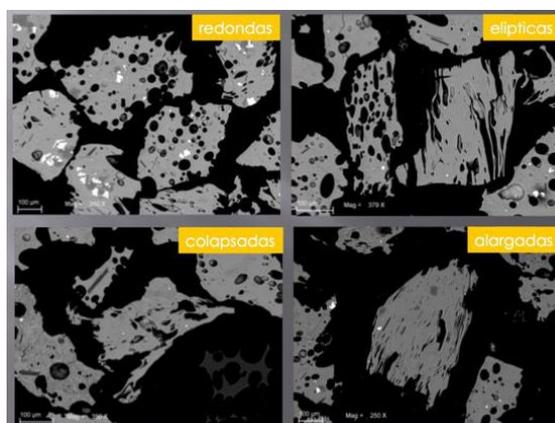
Técnicas de análisis

Una de las disciplinas más importantes para entender los procesos volcanológicos es la petrología, que permite conocer dónde y cómo se generó el magma y su evolución hasta dar lugar a las rocas volcánicas que afloran en superficie. Dicha disciplina está basada en el estudio de las rocas desde un punto de vista genético y sus relaciones con otras rocas. En concreto, consiste en el análisis de las propiedades físicas, químicas, mineralógicas, espaciales y cronológicas de las asociaciones rocosas, así como de los procesos y condiciones responsables de su formación. Dentro de este contexto, existen diversos métodos de análisis.

Entre ellos, el IGN dispone de un Microscopio Petrográfico (MP) que permite, a partir de una lámina delgada obtener información mineralógica y textural de la muestra, o el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) o la Microsonda Electrónica (ME) que nos permiten la realización de análisis químicos cuantitativos y cualitativos de las muestras obtenidas.



Microscopio Nikon E200POL



Morfología de las vesículas en muestras de cenizas durante diferentes fases eruptivas

Con las muestras de productos piroclásticos sin cohesión, como son los depósitos de caída, se hacen estudios granulométricos (separando el material con el uso de tamices específicos) y como resultado se obtienen los mapas de la distribución espacial del material, pudiendo estimar el volumen, el punto de salida del material y sobre todo la violencia de una erupción.

Durante una erupción, además de los análisis mencionados, se toman muestras del material recién emitido (lava o material piroclástico) para determinar sus características físicas y químicas generando un registro paralelo a los de las demás técnicas.



Tamizadora Electromagnética RP-200N.

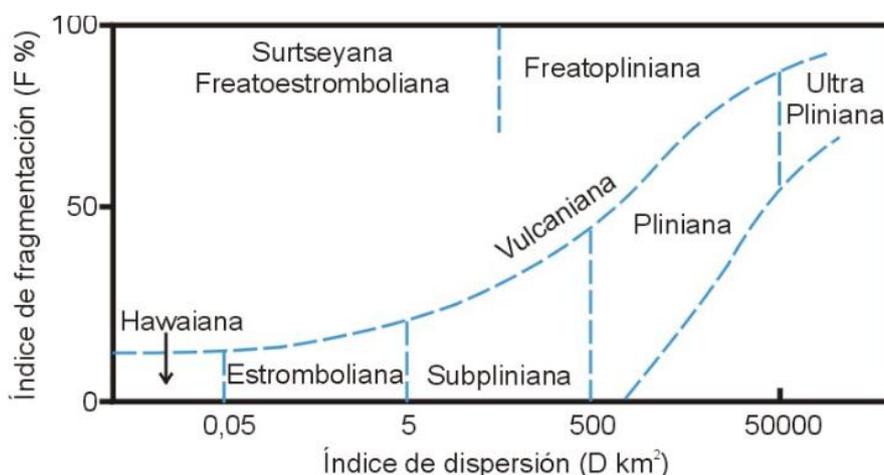


Diagrama para la clasificación de erupciones que producen piroclastos (Walker 1973)

8 ANEXO: Comunicaciones

El conjunto de técnicas de vigilancia volcánica que están en marcha en el Instituto Geográfico Nacional, proporcionan una visión completa y actualizada del nivel de actividad.

Para que todos los datos de las diferentes técnicas lleguen a los centros de datos lo antes posible y una vez allí puedan ser analizados, se necesita trabajar con diferentes, e incluso a veces opuestas, técnicas de comunicaciones. Por regla general, la mayoría de las técnicas están automatizadas y los datos que se necesitan para la vigilancia volcánica se reciben en los centros del IGN. Sin embargo, hay datos, como las muestras físico-químicas que se toman regularmente, que deben ser recogidas de forma manual, sin existir ningún tipo de telecomunicación aplicable.

Las comunicaciones se diseñan de la forma más robusta posible. Esto implica que no se puede dejar en manos de un solo tipo de comunicación la transmisión de los datos de las estaciones que hay diseminadas por todas las islas. De esta forma, al usar distintos tipos de comunicaciones, en el caso de que uno de ellos fallara, sí que se recibirían los datos que se transmitieran por los otros tipos, y así garantizamos la robustez necesaria para que siempre sea posible realizar la vigilancia volcánica.

Así por ejemplo, en el ámbito de la sismología, existen estaciones sísmicas que transmiten datos en tiempo real mediante comunicaciones vía satélite con tecnología VSAT. En esta tecnología se utiliza el satélite Hispasat 1E. Esta comunicación presenta una gran robustez y por ello se dispone de una estación vía satélite de este tipo en cada una de las Islas Canarias. Pero además tenemos estaciones que se comunican por cable (ADSL) y por vía telefonía móvil con tecnología 3G, UMTS e incluso HSDPA. Hemos de tener en cuenta que en la mayoría de las ocasiones, especialmente las estaciones sísmicas, salvo para medidas de aceleración, es necesario que estén aisladas de ruidos provocados por el ser humano (antrópicos) y por ello se sitúan en zonas alejadas de núcleos de población, lo que dificulta, no solo su acceso si no también la forma de proporcionarles alimentación y comunicación. Por ello, en algunas



Antena de conexión vía satélite de la estación de Morro de la Arena (Tenerife)

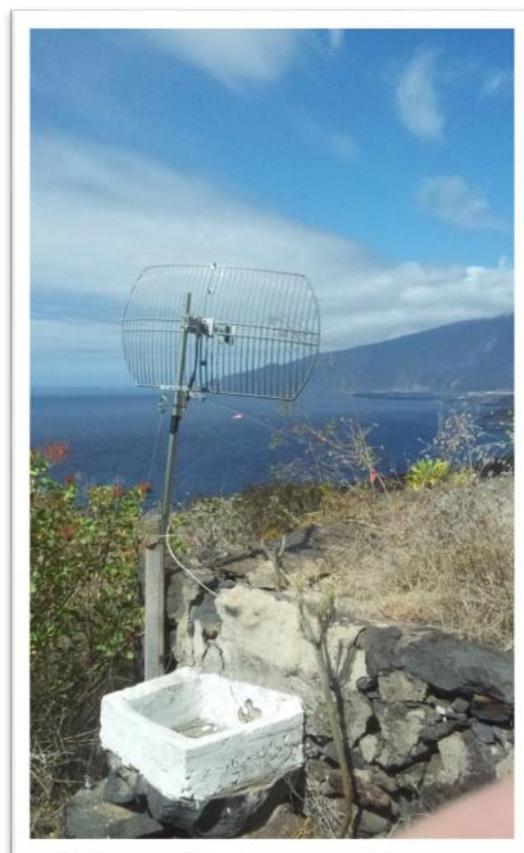


Estación sísmica en Las Cañadas del Teide (Tenerife) vía radioenlace

ocasiones también se utilizan comunicaciones vía inalámbrica con tecnología Wi Fi para poder llegar a un punto donde se disponga de cobertura 3G o algún otro tipo de comunicación. En otras ocasiones se utilizan enlaces de radiofrecuencia para comunicar dos puntos con visibilidad directa y de ahí crear un centro nodal donde se recogen varios tipos de datos. Una vez en estos centros, los datos se envían por ADSL, móvil o incluso satélite a las instalaciones del IGN.

Las estaciones de vigilancia volcánica, por regla general, son autónomas. En algunos casos, la necesidad de que estén en zonas poco accesibles, dificultad no sólo la comunicación, si no que imposibilita que tengan suministro de energía eléctrica convencional, quedando este reducida a algunas estaciones de medidas de deformación, gravimétricas o de aceleración del suelo. Por ello, las estaciones constan de paneles solares que les proporcionan la energía suficiente para poder mantenerse de forma totalmente independiente durante años y conseguir la potencia necesaria para la extracción de los datos, su digitalización y su posterior transmisión a los centros nodales de información.

Se reciben los datos en formatos propios de cada técnica y/o fabricante, y una vez allí se introducen en los sistemas de adquisición primero, y de procesamiento a continuación, para poder obtener los parámetros necesarios y conseguir una óptima vigilancia que sea capaz de detectar cualquier alteración. En la actualidad hay procesos automáticos que proporcionan unas soluciones primarias que posteriormente son supervisadas por el personal del IGN, de forma que se desechan las soluciones incorrectas, así como se verifican las correctas, y se mejoran.



Estación sísmica en Frontera (El Hierro) de transmisión vía Wi Fi