



UGR

Universidad
de Granada

Resumen TFM: Análisis de terremotos volcánicos de la Isla Decepción (Antártida) con técnicas de array.

Débora Díaz Gato.

Master en Geofísica y Meteorología, Universidad de Granada.

Tutor: Enrique Carmona.

Septiembre 2016.

Resumen: Isla Decepción es un volcán activo situado en el estrecho de Bransfield, entre las islas Shetland del Sur y la Península Antártica. Desde 1994 el Instituto Andaluz de Geofísica de la Universidad de Granada (UGR) ha participado en las campañas Antárticas con el fin de estudiar la actividad sísmica y volcánica de la zona. Para ello en la última década se ha utilizado una red sísmica desplegada por toda la isla junto con un array sísmico, muy útil para el estudio de los eventos de carácter volcánico y para entender la dinámica interna del volcán. El objetivo es realizar un análisis de la actividad sísmica a bajas frecuencias obtenidos por el array situado en las proximidades de Bahía Fumarolas, durante la campaña Antártica 2012-2013, mediante el método de correlación cruzada promedio. Los resultados obtenidos nos han mostrado la existencia de tres posibles fuentes que están actuando en la zona durante la campaña, una situada a 270° , apuntando a la zona de la cresta de Stonethrow, con una lentitud aparente de 1,21 s/km, indicando que está fuente está situada en profundidad; otra situada a 206° más superficial, procedente de la zona de Cerro Caliente, con una lentitud aparente de 2,2s/km y por último una tercera fuente muy puntual situada a 133° , apuntando a la zona de costa cercana a la Base Argentina. Dos de estas fuentes (270° y 206°) ya habían sido localizadas en campañas anteriores, como en 1998-1999, 2003-2004 y 2009-2010, y su actividad se asoció a la circulación de fluidos calientes a través de grietas y fisuras dentro de un medio altamente fracturado. Tras observar la evolución temporal de las

fuentes observamos que la actividad procedente de la fuente de Stonethrown podría estar asociada al movimiento de fluidos volcánicos a través del sistema de fallas que se prolonga hacia el Norte hasta el lugar donde se producen las erupciones de 1967. La actividad procedente de Cerro Caliente (206°) se asocia a la dinámica de fluidos debido a la actividad hidrotermal existente en esa zona. La tercera fuente obtenida en este trabajo (133°) procede de la costa bien podría relacionarse con la actividad hidrotermal. El hecho de que se trate de una fuente superficial podría relacionarse con la salida de gases, aunque no se tiene constancia de ello. Por último hemos localizado 21 LP distribuidos temporalmente y los hemos relacionado con nuestras fuentes. Los resultados podrían estar indicando que toda la actividad asociada a la interacción de fluidos volcánicos tiene origen en la fuente 270°, pero para confirmarlo debería hacerse un estudio más detallado.

Abstract: Deception Island is an active volcano in the Bransfield strait, between South Shetland Islands and the Antarctic peninsula. Since 1994 the Andalusian Institute of Geology of the University of Granada (UGR) has been involved in the Antarctic campaigns in order to study the seismic and volcanic activity of the area. To do so, in the last decade, it has been used a seismic net displayed in the whole island along with a seismic array, very useful for the study of the volcanic events and to understand internal dynamics of the volcano. The goal is to analyse the seismic activity at low frequencies obtained the array located near Fumarole Bay, during the Antarctic campaign 2012-2013, using a cross-correlation method. The results lead us to three possible sources that may be acting in the area during the campaign, one located at 270 °, pointing at the Stonethrow Ridge area, with a slowness of 1'21 s/km, meaning this source is located in depth; another one located at 206 °, more superficial, coming from Cerro Caliente, with a slowness of 2'2 s/km; and finally, a third one very point located at 133 °, pointing at the Argentinian coast base area. Two of the sources (270° and 206°) were already found in previous campaigns: 1998-1999, 2003-2004 and 2009-2010. Their activity was associated to hot fluids flowing through cracks and fissures inside a highly fractured environment. After observing the time evolution of the sources, we noticed that the activity of the Stonethrown source could be linked to volcanic fluids movement through the fault system that goes to the North to the place where the eruptions occurred in 1967. The activity that comes from Cerro Caliente (206°) is associated to fluids dynamics due to the hydrothermal activity that exists in that area. The third source found in this research (133°) comes from the coast line and could be related to hydrothermal activity. The fact that the source is superficial could be related with the gas outlet; though this is something we are not aware of. Lastly, we have located 21 LP displayed temporary and we have linked our sources. The results may be pointing to the fact that the whole activity related to the volcanic fluids interaction may have its origin in the 270 ° source, but in order to prove this a more detailed study would be needed.

Contexto Geológico.

La Isla Decepción es uno de los tres volcanes emergidos situado en el Rift de Bransfield formando parte del archipiélago de las islas Shetland del Sur. Es una zona geodinámicamente muy compleja, donde convergen la placa Sudamericana, la placa Antártica, la placa de Drake, la de Scotia y la placa South Shetland. El Rift de Bransfield está formado por tres cuencas extensionales activas con tendencia NE-SW y es el principal motivo del volcanismo y de las fallas normales presentes de la zona. Isla

Decepción es un estratovolcán en forma de herradura con una bahía en el interior llamada Puerto Foster. En 2005 se llevo a cabo un detallado estudio mediante tomografía sísmica de alta resolución de la velocidad de las ondas P en el interior de la isla y se descubrió la presencia de una cámara magmática situada en profundidad bajo una cuenca de relleno sedimentario. Los estudios acerca de gases demostraron que a partir de las últimas erupciones se formaron zonas con elevada actividad geotérmica y que hay una relación directa entre los cambios de actividad geoquímica y el aumento en la actividad sísmica.

Actividad sísmica.

Los terremotos que se generan en las regiones volcánicas tienen características diferentes a los terremotos tectónicos, ya que se generan por mecanismos diferentes. En las regiones volcánicas se producen eventos relacionados con la dinámica de fluidos y los medios donde se producen son muy heterogéneos. Por lo que estas señales nos dan información sobre las características del medio y los parámetros de la fuente. Los principales tipos de terremotos que se pueden encontrar en una zona volcánica son los siguientes:

- Terremotos volcano-tectónicos: son generados por un mecanismo de doble par, como los terremotos tectónicos pero se originan en una zona volcánicamente activa. Poseen fases P y S distinguibles y la energía se distribuye en una amplia banda de frecuencias. Estos terremotos están asociados a procesos de fracturación del medio debido a movimientos de los fluidos volcánicos, cambios de presión interna, etc..
- Terremotos de largo periodo: se caracterizan por tener un inicio emergente sin presencia de fases, es decir, es una señal monocromática donde la envolvente tiene forma de uso. La energía se concentra en una estrecha banda de frecuencias y duran entre unos segundos y un minuto. Se generan por mecanismos relacionados con la interacción de fluidos volcánicos, como la resonancia de cavidades rellenas de fluidos o la apertura de grietas. Normalmente se presentan en forma de enjambres sísmicos, con un elevado número de eventos por hora muy similares entre ellos.
- Eventos Híbridos: Son eventos que comparten características de los terremotos volcano-tectónicos y los eventos de largo periodo. Comienzan con una llegada muy energética en alta frecuencia donde se puede identificar la llegada de las ondas P y S, que es el resultado de una fractura, seguida de una señal de baja frecuencia muy similar a un evento de largo periodo, que se produce por la ascensión de fluidos volcánicos por la fractura generada inicialmente.
- Explosiones: Normalmente las explosiones se generan por variaciones de presión y temperatura de los fluidos, emisión de gases u otros materiales volcánicos a través de conductos abiertos, cambios bruscos de fase dentro del volcán, etc...
- Tremor volcánico: Es la señal más compleja que generan los volcanes y a la vez la más característica para predecir una erupción. Son muy similares a los eventos de largo periodo pero se caracterizan por su larga duración, que oscila entre pocos minutos a varios días. Tiene un contenido espectral en bandas de frecuencia estrechas.

Sismicidad en Isla Decepción.

Los eventos VT en Decepción son muy comunes, se presentan agrupados en enjambres que se distribuyen a lo largo de las fallas principales con un mecanismo focal de falla normal casi vertical. Se caracterizan por tener tiempos de llegada entre las ondas P-S menores a 4 segundos y un contenido espectral en una amplia banda de frecuencias. Los LP son los eventos más frecuentes en Isla Decepción desde de comenzó a monitorizarse. Tienen un contenido espectral en bajas frecuencias, menores de 5 Hz, normalmente entre 1Hz-3Hz y duran apenas una decena de segundos. Se ha sugerido que se relacionan con la presencia de acuíferos superficiales que interactúan con rocas a alta temperatura. El tremor es una señal típica también en Isla Decepción, caracterizándose por que el incremento de amplitud al comienzo y su disminución al final se produce en un periodo de pocos segundos, independientemente de la duración del evento que normalmente suele ser de varias horas. En Isla Decepción los eventos híbridos no son tan comunes, pero también están presentes. Este tipo de eventos parece que están producidos por la resonancia de grietas rellenas de fluido y que lubrica las fallas existentes, produciendo un incremento de la actividad VT de la zona. También se relacionan con ruido producido en las chimeneas en superficie del sistema de fumarolas.

Desde que comenzó a monitorearse la Isla en el año 1986, la actividad sísmica fue baja, hasta que en enero-febrero de 1992 se produjo una crisis sísmica. Las anomalías magnéticas, los cambios en las emisiones de las fumarolas e irregularidades que se detectaron en observaciones gravimétricas sugirieron que esta crisis sísmica se produjo a raíz de una inyección de magma que no llegó a la superficie. El nivel de actividad se redujo hasta volver a los valores observados antes de la crisis y se mantuvo así hasta 1998-1999, cuando se volvió producir una crisis sísmica llegando a registrarse 3634 eventos, 2072 eventos VT, 1556 eventos LP y 15 eventos HY. Los estudios sobre esta crisis permitieron identificar dos regiones de origen de la actividad, una relacionada con la actividad VT y HY y otra con la actividad LP. Finalmente esta crisis se relacionó con la elevación correspondiente a la zona de Puerto Foster debido a una inyección magmática en profundidad que pudo ser causada por un aumento en la presión dentro del depósito del magma o por el desplazamiento ascendente del magma que perturbó el campo de esfuerzos en dicha región. Tras la crisis sísmica de 1999 se produjo una disminución significativa de la actividad sísmica en toda la Isla. Diversos estudios de deformación sugirieron un cambio en el movimiento relativo de la Isla, de extensión y elevación a compresión con subsidencia. En los años siguientes, los eventos registrados en la isla son principalmente VY y LP, y en muy pequeña cantidad HY, siendo los LP el tipo de sismicidad dominante en la zona. En la campaña del año 2003-2004 se registro un alto número de LP y un bajo número de VT, confirmando la teoría de que estos eventos tienen fuentes diferentes y pueden relacionarse entre si debido al sellado de las pequeñas fracturas en las áreas de acuíferos. Comparando los resultados obtenidos en la campaña 2012-2013 con los de las campañas anteriores, se observa que este año se produjo un incremento importante de la actividad sísmica después de un periodo de calma.

Actividad Sísmica durante la campaña 2012-2013.

En la campaña 2012-2013 se instaló una red de vigilancia a lo largo de la isla junto con un array sísmico.

- La red sísmica constaba de cuatro estaciones situadas alrededor de la Bahía Puerto Foster, dos de corto período (1Hz) “OBS” , “CHI”, y otras dos de media banda (5s) “BASE” y “C70”. Tiene como objetivo cubrir la mayor parte de la Isla para registrar la actividad sísmica local y regional.
- El array sísmico utilizado en la campaña 2012-2013 consta de 12 canales y se instaló en la zona de bahía Fumarolas, cercano a la Base Antártica Argentina. Los sismómetros que formaban el array eran 9 sensores verticales y una estación de 3 componentes de corto periodo. El sistema de adquisición de datos tiene un convertidor A/D de 24 bit con tiempo GPS y registro a 100 muestras por segundo en los 12 canales.

Los arrays sísmicos se han convertido en una de las técnicas más utilizadas para el estudio de las fuentes sismo-volcánicas, ya que estos instrumentos pueden utilizarse para localizar señales volcánicas de cualquier tipo, incluso las que no tienen fases, como los eventos de largo periodo (LP) o los tremores volcánicos. El análisis del array nos proporciona el azimut (dirección de la que provienen la señales) y la velocidad aparente en función del tiempo, pero para obtener la distancia a la fuente, su extensión espacial y su profundidad necesitamos utilizar métodos indirectos.

Durante la campaña sísmica 2012-2013 se registraron un total de 3802 eventos LP y 667 VT. Los días de mayor actividad sísmica en la isla fueron el 10, 12 y 19 de Enero. Se localizaron los VT ocurridos en Isla y se calculó su magnitud, indicando que estos terremotos procedían del interior de Bahía Puerto Foster indicando actividad tectónica asociada a fracturas.

Metodología.

Existen diversos métodos para localizar eventos mediante datos obtenidos por array sísmicos. La mayoría de los métodos de localización permiten resolver dos cuestiones muy importantes: cuándo existe una señal, y de donde procede. Además nos dan estimaciones de dos parámetros muy importantes:

- “Back azimuth”: es la dirección en grados desde la cual procede la señal, midiéndose desde el Norte hacia el Este.
- “Velocidad aparente”: corresponde a la velocidad con la que los frentes de onda se propagan a través del array.

Las técnicas de localización mediante array sísmico usan la forma de onda completa de la señal. Determinan la dirección por la que se propagan las ondas suponiendo que se trata de frentes de onda plano, estimando la velocidad aparente.

Debido a que en la campaña 2012-2013 solo se instaló un array sísmico en isla Decepción, nosotros vamos a utilizar el método de correlación cruzada promedio máxima para proceder a la localización.

El método de la correlación cruzada de retraso cero se basa en evaluar la correlación cruzada entre parejas de estaciones. Las propiedades espaciales y temporales de un frente de onda plano se pueden caracterizar con dos parámetros independientes: el azimut de la fuente y la velocidad aparente, o bien, las dos componentes del vector lentitud aparente, pero siempre un par de parámetros que sean independientes. Si el frente presenta una geometría más complicada, el número de parámetros que vamos a considerar también aumentará.

Procesado de datos.

Los datos que se han utilizado en este trabajo son los registros del array durante la campaña 2012-2013. Los datos están contenidos en un fichero que genera el sistema por cada hora de registro. Para poder localizar los eventos antes debemos realizar un procesado de datos.

- Visualización de los datos: Para comenzar, realizamos una revisión de la operatividad y los fallos que se produjeron en cada uno de los doce canales del array. Lo haremos de forma visual mediante el programa SEISAN(grupo de programas ligados a una misma base de datos que se utilizan para analizar terremotos con datos tanto analógicos como digitales), que nos va a permitir observar las señales registradas cada hora en cada uno de los canales. Los datos obtenidos mediante el estudio visual los deberemos tener en cuenta a la hora de tratar os ficheros.
- Desmultiplexado de datos: A partir de una base de datos que hemos creado con todos los ficheros registrados por los doce canales para poder trabajar con ellos, se ha realizado un desmultiplexado de la ficheros con el objetivo de separar las señales, ya que es necesario para aplicar el método de correlación cruzada promedio.
- Respuesta del array: La distribución del array es un factor que tiene un efecto directo sobre la señal, así que hay que tenerla en cuenta para que no afecte a nuestros resultados. Para determinar su efecto utilizamos una aplicación llamada “respuesta-array2D” la cual examina la respuesta del array a una determinada frecuencia. Tras examinar la respuesta observamos que el comportamiento del array para localizar señales a bajas frecuencias (2Hz-3Hz) es óptimo con una solución del vector “slowness” ancha y sin apenas soluciones no deseadas.
- Aplicación del método: localización mediante técnicas de array. Para aplicar el método usamos el programa “cc8mre_sei”(Almendros, 1999), un software informático con el que filtraremos las señales y haremos el cálculo de correlación cruzada promedio entre las estaciones. El fichero de entrada contiene los parámetros para el análisis, que nosotros modificaremos en función de las observaciones realizadas en el análisis visual, el filtro escogido para la señal y la duración del fichero. Del procesado de datos mediante la aplicación cc8mre obtendremos un fichero de salida con los datos de correlación que hay entre las distintas señales, resultados de azimut y resultados de la lentitud aparente (“slowness”).

Para completar el análisis hemos realizado una búsqueda visual de los LP más importantes. Hemos seleccionado 21 LP distribuidos temporalmente, los hemos extraído y los hemos localizado para poder compararlos con las fuentes.

Resultados.

Para mostrar e interpretar los resultados obtenidos mediante las técnicas de localización con el array sísmico, es necesario establecer un valor umbral a partir del cual consideramos una buena correlación. Para ello se ha calculado la media del nivel de ruido existente en nuestras señales, y se considera buena correlación a partir del doble del ruido presente en las señales. En nuestro caso hemos considerado buena correlación a partir de 0.6.

Para gestionar tanta información de los ficheros de salida con las localizaciones del vector lentitud aparente para cada hora representamos los resultados mediante dos programas en Matlab. Analizando la información de los ficheros observamos la existencia de varias fuentes con sus direcciones y lentitudes aparentes. Para comparar nuestros resultados con estudios de campañas anteriores, unimos los ficheros de una hora en ficheros de un día y los representamos. Los resultados muestran como evoluciona la dirección de procedencia de la actividad registrada cada día desde el 3 Enero 2013 hasta el 14 febrero 2013, e indican la presencia de tres posibles fuentes que están actuando en la zona: una localizada a 270° , de donde procede la mayor parte de la actividad sísmica registrada, con una lentitud aparente media de $1,21\text{s/km}$, por lo que estaría situada en una zona profunda; localizamos una segunda fuente más local situada a 206° más superficial que la anterior, con una lentitud aparente media de $2,2\text{s/km}$; por último localizamos una tercera fuente situada a 133° con muy poca actividad y muy superficial.

Los resultados de la localización de los 21 LP que hemos extraído indica que todos estos eventos proceden de la fuente 270° con una lentitud aparente muy variable, lo que indica que la profundidad de la que proceden las señales varía desde muy superficial, con vectores lentitud aparente de $2,802$ hasta zonas más profundas con vectores lentitud aparente de $0,680$.

Discusión.

El análisis de la actividad sísmica en bajas frecuencias con las técnicas de array han puesto de manifiesto la presencia de tres fuentes de donde procede la actividad sísmica durante la campaña antártica 20012-2013.

La primera fuente situada en dirección $270^\circ(246^\circ\text{-}320^\circ)$ procede de una zona de la Isla llamada cresta de Stonethrown. La lentitud aparente de esta fuente es de aproximadamente de $1,21\text{s/km}$, lo que indicaría un origen profundo. Esta fuente tiene en conjunto el mayor número de soluciones respecto a las otras dos fuentes y por tanto es la más activa durante toda la campaña. La segunda fuente tiene una dirección entorno a 206° (205° y 208°) y procede de la zona de Cerro Caliente. Es una fuente muy puntual y su lentitud aparente de $2,22\text{ s/km}$ indica que tiene un origen superficial. La tercera fuente apunta a una dirección de 133° ($125^\circ\text{-}142^\circ$) que corresponde con la zona de la costa cercana a la Base Argentina. Es una fuente muy superficial ($2,4\text{ s/km}$ de lentitud aparente), con muy pocas soluciones que aparece en determinados periodos de tiempo.

Dos de estas fuentes (270° y 206°) ya habían sido localizadas en campañas anteriores, como en 1998-1999, 2003-2004 y 2009-2010, y su actividad se asoció a la circulación de fluidos calientes a través de grietas y fisuras dentro de un medio altamente fracturado. Tras observar la evolución temporal de las fuentes observamos que la actividad procedente de la fuente de Stonethrown podría estar asociada al movimiento de fluidos volcánicos a través del sistema de fallas que se prolonga hacia el Norte hasta el lugar donde se producen las erupciones de 1967. La actividad procedente de Cerro Caliente (206°) se asocia a la dinámica de fluidos debido a la actividad hidrotermal existente en esa zona. La tercera fuente obtenida en este trabajo (133°) procede de la costa bien podría relacionarse con la actividad hidrotermal. El hecho de que se trate de una fuente superficial podría relacionarse con la salida de gases, aunque de esto no se tiene constancia de ello.

Por último hemos localizado 21 LP distribuidos temporalmente y los hemos relacionado

con nuestras fuentes. Los resultados podrían estar indicando que toda la actividad asociada a la interacción de fluidos volcánicos tiene origen en la fuente 270°, pero para confirmarlo debería hacerse un estudio más detallado.

Conclusiones.

En este trabajo hemos analizado la actividad de bajas frecuencias utilizando técnicas de localización de array sísmico durante la campaña antártica 2012-2013. Mediante el método de correlación cruzada promedio hemos obtenido las direcciones de back azimuth y lentitud aparente de tres fuentes de procedencia de la actividad de eventos de largo periodo registrados por el array sísmico. La fuente que ha obtenido un mayor número de soluciones ha sido la procedente de la cresta de Stonethrown (270°) con una lentitud aparente baja y que indicaría lo profunda de su origen. Esta fuente ya había sido localizada en campañas anteriores y se asocia a movimientos de fluidos volcánicos a través del sistema de fallas existente en esa zona. Una segunda fuente procedente de Cerro Caliente (206°), más puntual y superficial también localizada ya en otras campañas y que se asocia a la actividad hidrotermal de la zona. Por último hemos localizado una fuente a 133°, superficial situada cerca de la costa y con una ocurrencia en días esporádicos.

Los resultados de los 21 LP que hemos localizado indican tener su origen en la fuente procedente de 270°, sin embargo no es concluyente puesto que se tendría que haber analizado un mayor número de eventos de LP.

Tras los resultados obtenidos podemos confirmar que la localización mediante técnicas de array es una aplicación muy útil para los estudios de terremotos volcánicos. Esta técnica nos permite localizar eventos que no se pueden localizar con las redes sísmicas convencionales, como los eventos de bajas frecuencias ocurridos en zonas muy heterogéneas como son las zonas volcánicas. Es un gran desarrollo para el estudio de los volcanes y prevención de erupciones.