

Aplicación de técnicas de array para el estudio de la sismicidad asociada a la actividad del volcán Etna en agosto de 2012

José Manuel Muñoz Hermosilla

Trabajo de Fin de Máster

GeoMet 2013-2014

Abstract

El propósito de este trabajo es el estudio de la sismicidad asociada al volcán Etna (Sicilia, Italia) durante el mes de agosto de 2012. Para ello se han utilizado registros sísmicos recogidos mediante un array de corta apertura cercano al volcán (aproximadamente 1 km al SO) correspondientes al período entre el 1 y el 15 de agosto de 2012. El estudio de la sismicidad se ha llevado a cabo a través de la determinación del vector lentitud aparente para el rango de frecuencias entre 0.1 y 12 Hz, utilizando para ello el método de la correlación cruzada promedio para frente de onda plano. Por debajo de 1 Hz no se tiene suficiente resolución angular, por lo que sólo se puede hablar de una fuente volcánica en la dirección de los cráteres principales. Por encima de 5 Hz no se tiene suficiente resolución espacial para determinar las características los eventos VT con suficiencia. Los resultados más interesantes se muestran entre 1 y 5 Hz, encontrándose soluciones que muestran dos fuentes que apuntan a cráteres diferentes y que presentan un comportamiento tal que se puede aventurar la hipótesis de que ambas fuentes están relacionadas. Dicha relación podría encontrarse en estudios futuros con la utilización de un mayor volumen de datos para el estudio, usando métodos de cálculo del vector lentitud aparente que permitan resolver fuentes simultáneas (MUSIC) o con la inclusión de otro array simultáneo que posibilite la localización de las fuentes.

1. Introducción

El volcán Etna se localiza en la zona de colisión entre la placa Africana (Montes Ibleos) y la placa Euro-Asiática (cadena Apeninico-Magrebí), tal y como puede verse en la Figura 1. El desarrollo del vulcanismo en esta zona de colisión continental está relacionado con la presencia de una tectónica extensional que afecta el borde oriental de Sicilia, lo que permite el ascenso de magma desde el manto terrestre (*Bousquet & Lanzafranco, 2004; Branca et al., 2011a*). Se trata del volcán más grande y con mayor altitud del territorio físico europeo, ocupando una superficie aproximada de 1200 km² y alcanzando 3330 metros en su punto más alto (el Teide, en las Islas Canarias, tiene una altitud de 3718 m, por lo que si se considera el territorio político europeo, el Etna pasaría a ser el segundo en altitud). Se trata de un estratovolcán de naturaleza basáltica y es además uno de los volcanes más activos en el mundo, caracterizándose tanto por erupciones en la cumbre como erupciones en los flancos a través de fisuras laterales.

El Etna presenta una intensa actividad sísmica y gran parte de esta actividad está relacionada con procesos volcánicos. Las señales que se registran incluyen eventos volcano-tectónicos (VT), de frecuencias en general por encima de 4-5 Hz, así como procesos relacionados con el movimiento de fluido, ya sea en forma de tremor volcánico, eventos de largo período (VP) asociados a fenómenos de desfasificación o tremor-burst (TB) asociados a eventos explosivos (*Patanè et al., 2004*).

Durante el período de estudio se ha registrado una continua actividad stromboliana en el volcán, así como procesos de desgasificación en los cráteres Bocca Nuova, Noreste y Sureste y algún fenómeno de eyección de ceniza (*INGV-Sezione di Catania*).

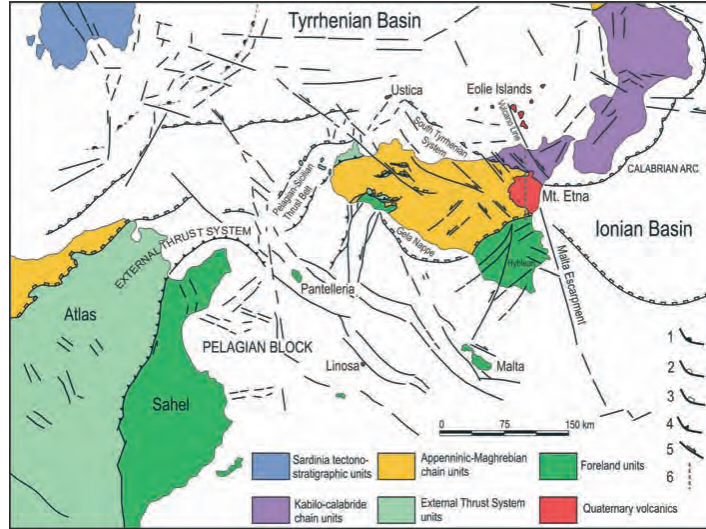


Figura 1: Contexto estructural del Mediterráneo central (*Branca et al., 2011a*).

2. Metodología

La metodología utilizada en este estudio ha consistido en la aplicación del método de la correlación cruzada promedio para frente de onda plano con el propósito de calcular el vector lentitud aparente (*Almendros, 1999*). El vector lentitud aparente va a permitir determinar la lentitud aparente y la dirección de la que provienen las señales registradas (back-azimut). Para ello se ha utilizado un array sísmico de corta apertura cercano al volcán (aproximadamente 1 km al SO) formado por seis estaciones de banda ancha.

Tras el análisis de los datos, se ha establecido una división en tres bandas de frecuencia motivada por el tipo de actividad que se ha detectado en cada uno de ellos: de 0.1 a 1 Hz, donde se ha detectado energía de forma continua en los espectrogramas correspondientes a los registros; de 1 a 5 Hz donde se han encontrado eventos LP y TB sobre un tremor de fondo continuo; de 5 a 12 Hz donde se han encontrado eventos VT.

Una vez identificadas las tres bandas de frecuencia, se ha utilizado el programa *cc8mr_sei* (*Almendros, 1999*) para la estimación del vector lentitud aparente en cada una de ellas. Los archivos de salida que proporciona este programa se han tratado con la ayuda de varios scripts, de forma que sólo se han tenido en cuenta los resultados con una correlación mayor de $2/3$ del valor máximo de correlación obtenido para cada banda con objeto de mejorar la calidad de las soluciones.

3. Resultados

Los resultados se han presentado divididos en las tres bandas de frecuencias estudiadas por separado:

3.1. Banda de 0.1 a 1 Hz

En esta banda se ha encontrado que los resultados del cálculo del vector lentitud aparente presentan soluciones estables tanto en lentitud aparente (0.69 s/km) como en back-azimut (48°). En la Figura 2 se presenta la proyección de estas soluciones en el plano de lentitud aparente.

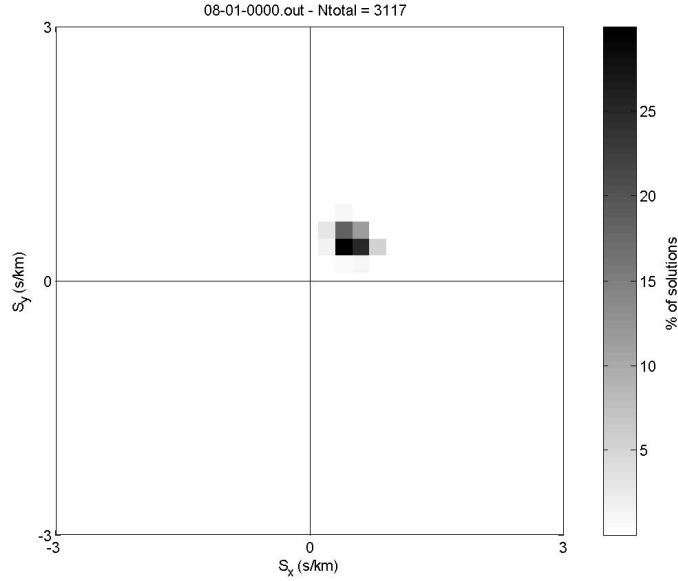


Figura 2: Proyección en dos dimensiones de las soluciones obtenidas para el vector lentitud aparente el 1-08-2012 a las 00. N indica el número total de soluciones, y la escala el porcentaje de esas soluciones que se encuentran en una posición determinada. Recuérdese que el 'cero' del back-azimut coincide con el norte y los valores son ascendentes en sentido horario.

Para medir la actividad se ha representado el número de soluciones que provienen de esa dirección a lo largo del período de estudio (Figura 3). En general se muestra que la actividad en este rango de frecuencias presenta valores estables, con alguna fluctuación fuerte aislada (el día 6 de agosto en particular).

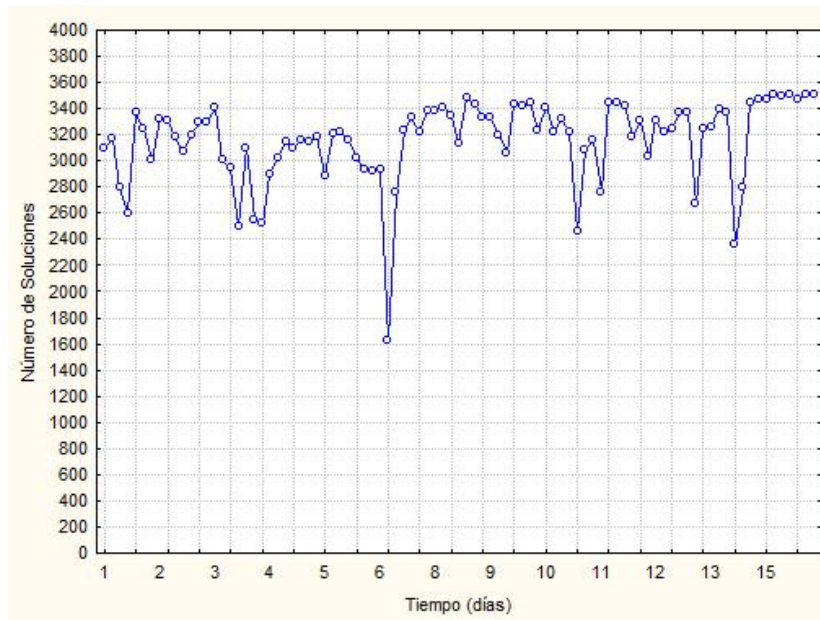


Figura 3: Número de soluciones a lo largo del período de estudio para la banda de frecuencias entre 0.1 y 1 Hz.

3.2. Banda de 1 a 5 Hz

En esta banda las soluciones se han concentrado en dos sectores, ambos al noreste del array, pero separados suficiente como para ser considerados fuentes diferentes. Ambos responden a valores de lentitud aparente en un rango similar, en torno a 1 s/km. En cuanto a su back-azimut, una zona se encuentra a unos 30° , back-azimut que comparten los eventos TB (Figura 4), mientras que la otra se encuentra a unos 65° , back-azimut que comparten los eventos LP (Figura 5).

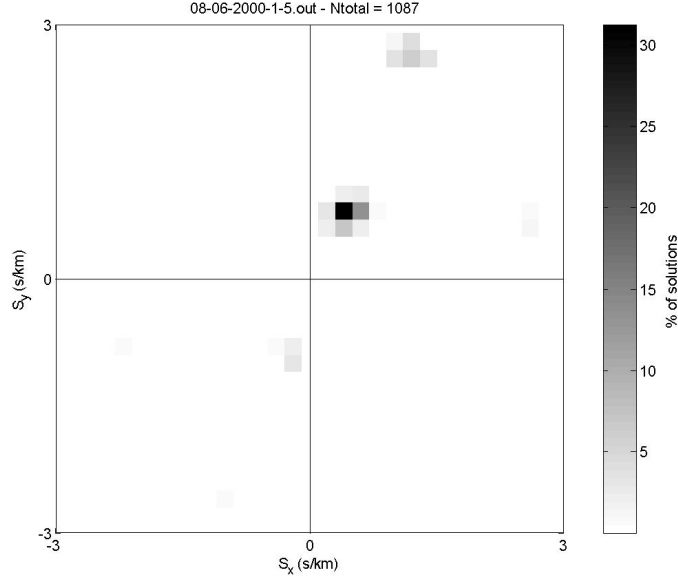


Figura 4: Proyección en dos dimensiones de las soluciones obtenidas para el vector lentitud aparente el 6-08-2012 a las 20 horas. N indica el número total de soluciones, y la escala el porcentaje de esas soluciones que se encuentran en una posición determinada. Recuérdese que el 'cero' del back-azimut coincide con el norte y los valores son ascendentes en sentido horario.

La actividad se presenta de forma constante en ambas fuentes, si bien en períodos en los que una domina sobre la otra. En la Figura 6 se puede ver la actividad de cada uno de los sectores. Se observa que en general el sector 1 (color azul) presenta una actividad menor con fuertes aumentos de la misma en períodos concretos. Dichos períodos concretos de aumento en la intensidad en el sector 1 coinciden con los períodos en los que el sector 2 (color rojo) presenta valores mínimos de actividad. Es por ello plausible pensar que entre estos dos sectores debe existir algún tipo relación. Las hipótesis que se plantean son, por un lado, que en esos períodos una fuente estuviera enmascarando a la otra, provocando que sus valores fuesen más bajos; y por otro lado podría tratarse de un mecanismo que desvía el magma a un sector u otro, provocando que la actividad se traslade entre ellos. Esto explicaría por ejemplo por qué los valores máximos y mínimos de cada sector tienen valores similares (excepto algún período concreto, como entre los días 3 y 4, donde el valor de la actividad del sector 1 se dispara un poco).

3.3. Banda de 5 a 12 Hz

En esta banda la determinación del vector lentitud aparente ha resultado complicada debido a la baja resolución espacial. Pese a ello, se ha conseguido determinar para una serie de eventos VT, entre los cuales se incluye el ejemplo de la figura 7.

La determinación del vector lentitud aparente se ha llevado a cabo para 10 eventos VT. En la Figura 8 puede verse la distribución de back-azimut de los mismos. Es interesante notar que la última

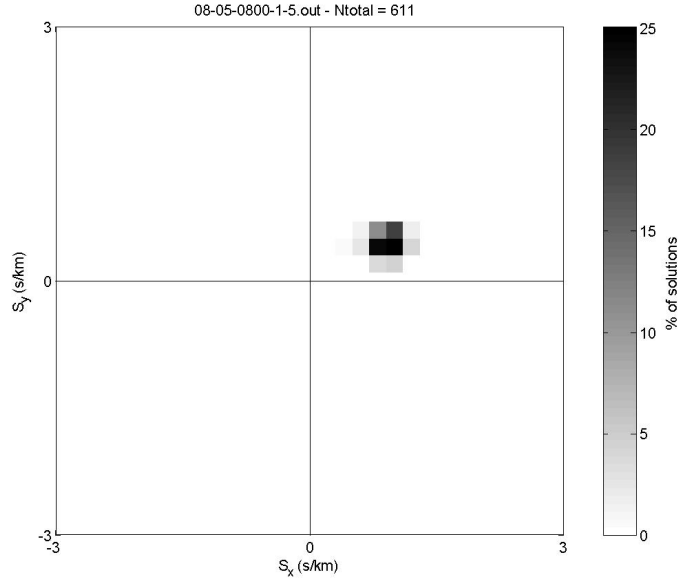


Figura 5: Proyección en dos dimensiones de las soluciones obtenidas para el vector lentitud aparente el 5-08-2012 a las 08 horas. N indica el número total de soluciones, y la escala el porcentaje de esas soluciones que se encuentran en una posición determinada. Recuerdese que el 'cero' del back-azimut coincide con el norte y los valores son ascendentes en sentido horario.

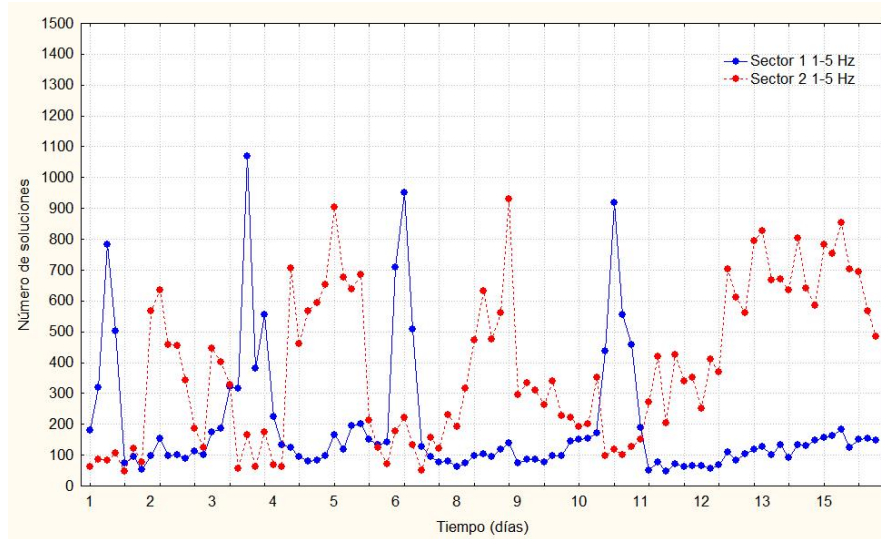


Figura 6: Número de soluciones a lo largo del período de estudio para las bandas de frecuencias 0.1-1 Hz y 1-5 Hz . El color azul representa el rango de soluciones para el sector 1, el color rojo representa el rango de soluciones para el sector 2, mientras que que el color verde representa el rango de soluciones para la banda de 0.1-1 Hz.

parte, los eventos de los días 13 y 14 presentan unas características de back-azimut similares. Esos 4 eventos presentan además valores de lentitud aparente relativamente cercanos. En esa dirección, aparte de los cráteres Bocca Nuova y Voragine, también se encuentra el sistema de fallas Pizzi Deneri, así como el Rift del Noreste. Ambos podrían ser los causantes de este tipo de eventos, aunque si bien las características que comparten parecen indicar que provienen de una misma fuente, con la información

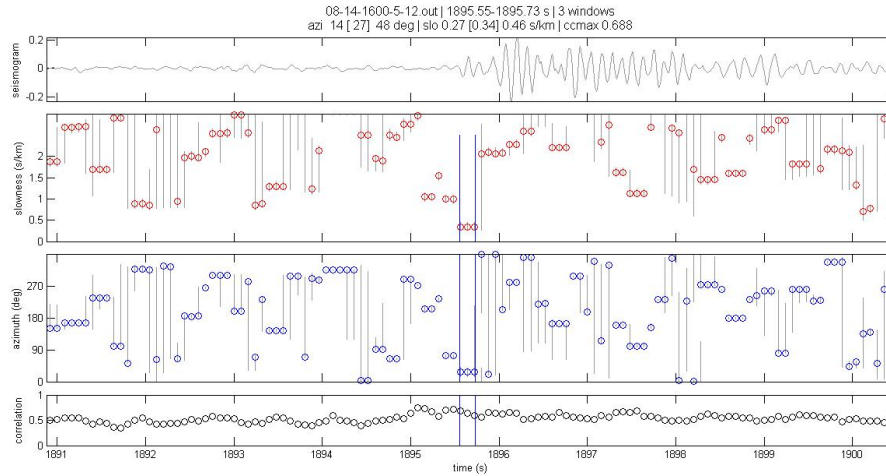


Figura 7: Determinación del vector lentitud aparente de la onda P de un terremoto volcano-tectónico. En la parte superior puede verse el sismograma; a continuación se observan los valores de lentitud aparente, back-azimut y correlación respectivamente. Se busca un que la llegada coincida con un máximo de correlación y con una zona estable de azimut y lentitud aparente.

obtenida no es posible asegurar nada al respecto.

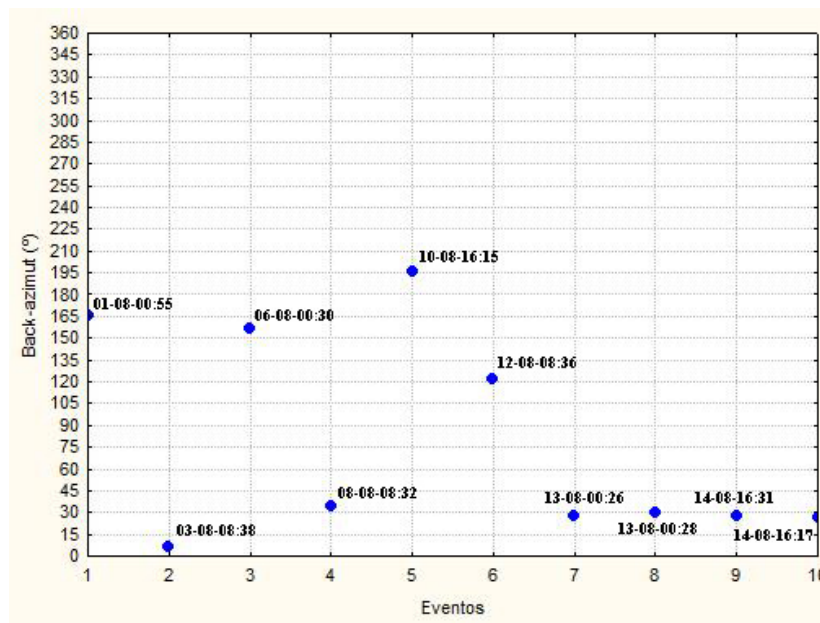


Figura 8: En este gráfico se representa el back-azimut de los eventos VT que se han localizado. Junto a los puntos que representan los eventos se indica la fecha en la que se han registrado.

4. Conclusiones

La realización de este estudio pone de manifiesto la complejidad de un volcán como el Etna. En los registros se encuentra una gran variedad de señales, con un rango espectral desde 0.1 hasta por encima de 12 Hz. Esto ha motivado que se divida el trabajo en tres partes, cada una de las cuales ha aportado información interesante:

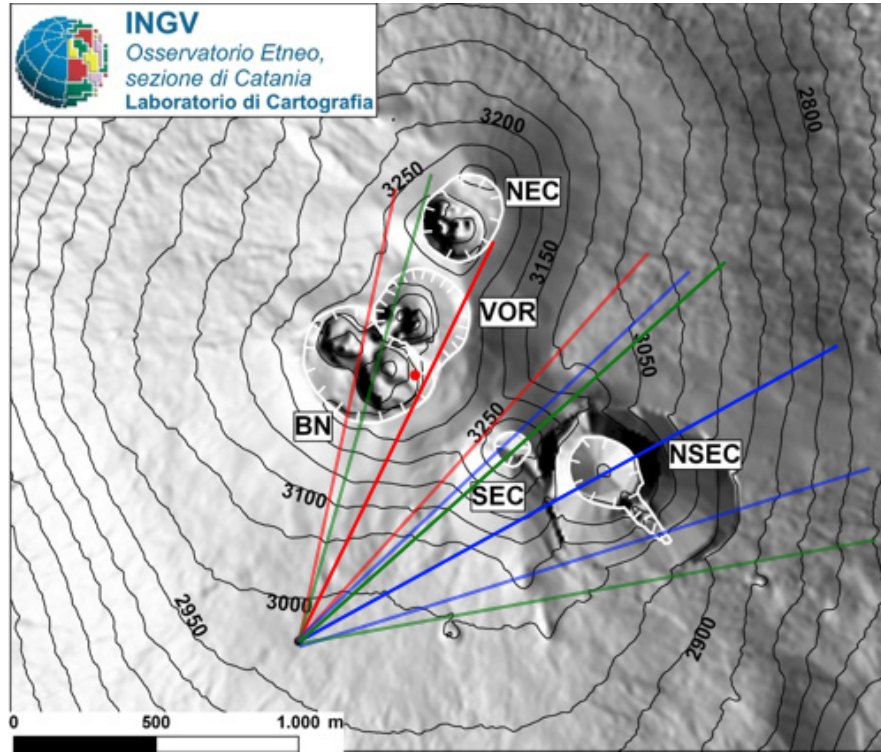


Figura 9: Dirección de la solución con respecto al array para la banda entre 1 y 5 Hz. La línea azul más fuerte representa la dirección principal a la que se localiza la fuente correspondiente al sector 1, mientras que las dos líneas azules más nítidas representan la resolución angular para este rango de frecuencias. Análogamente, el color rojo representa lo mismo para el sector 2. Los cráteres principales vienen marcados por sus iniciales: Bocca Nuova (BN), Voragine (VOR), Noreste (NEC), Sureste (SEC) y Nuevo Sureste (NSEC).

- Entre 0.1 y 1 Hz se ha detectado una señal continua asociada al tremor volcánico. Dicha señal se estima que proviene de la zona donde se encuentran los cráteres principales, abarcando prácticamente la totalidad de la misma debido a que se dispone de poca resolución angular (Figura 9). Este límite intrínseco no permite hacer un análisis más detallado sobre la fuente, más allá de que tiene una actividad que persiste durante todo el período de estudio. Sin embargo no puede aventurarse si se trata de una o más fuentes, o acotar unos límites razonables para la posición desde la que están llegando estas señales.
- Entre 1 y 5 Hz se detectan señales típicas de largo período (LP) y señales características explosiones (TB), ambas enmascaradas por un tremor de fondo que aparece de forma prácticamente continua también en esta banda de frecuencias. Aquí se han obtenido los resultados más interesantes, con dos sectores de soluciones separados apuntando en dirección hacia los cráteres BN y SEC (y NSEC) (Figura 9) que en principio podrían deberse a dos fuentes interrelacionadas, si bien sólo han podido establecerse hipótesis al respecto. En general las soluciones en este rango espectral están relacionadas con los procesos que se están dando en el volcán en el período de

estudio, actividad Stromboliana (TB) y desgasificación (LP), así como la persistente actividad magmática del Etna.

- Finalmente entre 5 y 12 Hz se han detectado múltiples eventos VT, si bien sólo se ha podido estudiar con detalle un número muy bajo de ellos por falta de resolución espacial. Se trata en general de eventos de poca magnitud y escasa duración, frente a otros eventos de características similares que ocurren en las zonas de fallas circundantes que presentan magnitudes y duraciones más altas.

Este estudio denota el interés y la utilidad de trabajar con un array sísmico. Las fuentes 1 y 2 puede que estén separadas menos de 1 km. Habría que tener una red sísmica muy densa y con estaciones muy cercanas para poder distinguirlas. Sin embargo con el uso del array ha resultado algo muy evidente.

Un estudio más detallado incluyendo datos de un intervalo temporal mayor del que se ha usado en este estudio podría arrojar claridad sobre algunos de los interrogantes que no se han resuelto. Por ejemplo, podrían estudiarse con más detalle las fases en las que se reactiva la fuente del sector 1, o si la alternancia entre las fuentes de los sectores 1 y 2 se mantiene.

La utilización de otro método para determinar el vector lentitud aparente, en concreto el método MUSIC, (*Schmidt, 1986, Goldstein & Archuleta, 1987*) podría ser interesante pues la ventaja de este método es que permite detectar y resolver fuentes simultáneas, lo cual podría ser de mucho interés para entender la relación entre las dos fuentes detectadas en la banda de 1 a 5 Hz.

La utilización de un segundo array simultáneo permitiría aplicar métodos de localización conjunta.

Finalmente, también sería de interés comparar los resultados de este periodo con otros periodos de mayor actividad eruptiva, para ver cómo cambia el sistema de alimentación magmática cuando el flujo de productos se acelera para producir una erupción.

Referencias

- [1] Almendros J. Análisis de señales sismo-volcánicas mediante técnicas de array [tesis doctoral]. Granada: Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada; **1999**.
- [2] Bousquet JC, Lanzafame G. The Tectonics and Geodynamics of Mt. Etna: Synthesis and Interpretation of Geological and Geophysical Data. In: Etna Volcano Laboratory, Bonaccorso, Calvari, Coltelli, Del Negro, Falsaperla (Eds). AGU (Geophysical monograph). **2004**, Vol. 143, pp. 29-47.
- [3] Branca S, Coltelli M, Gropelli G, Lentini F. Geological map of Etna volcano, 1:50000 scale. Ital.J.Geosci. (Boll.Soc.Geol.It.). **2011a**. Vol. 130(3), pp. 265-291.
- [4] Goldstein P, Archuleta RJ. Array analysis of seismic signals. Geophys. Res. Lett. **1987**. Vol. 14, pp. 13-16. doi:10.1029/GL014i001p00013
- [5] INGV Sezione di Catania: Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología, sección de Catania (Sicilia, Italia)[internet]. Disponible en: <http://www.ct.ingv.it/en/>
- [6] Patanè D, Cocina O, Falsaperla S, Privitera E, Spampinato S. Mt. Etna Volcano: A Seismological Framework. In: Etna Volcano Laboratory, Bonaccorso, Calvari, Coltelli, Del Negro, Falsaperla (Eds). AGU (Geophysical monograph). **2004**. Vol. 143, pp. 147-165.
- [7] Schmidt, R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. IEEE Trans. Ant. Prop. **1986**. Vol. 34, pp. 276-280. doi:10.1109/TAP.1986.1143830