

Caracterización sísmica del entorno de Mina Ratones en el granito de Albalá

D. Martí¹, R. Carbonell¹, J. Escuder-Viruete² y A. Pérez-Estaún¹

¹ Dpto. de Geofísica y Tectónica, Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera"-CSIC, c/Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona. dmarti@ija.csic.es

² Dpto. de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense, 28040 Madrid.

ABSTRACT

A detailed characterization of the physical properties of a granitic pluton, as well as a three dimensional reconstruction of the fractures network and its surrounding are obtained by high resolution seismic tomography. The input travel times were picked from offset and azimuth variable seismic profile (OVSP) acquired in a 500 m deep vertical borehole. The three-component seismic data sets recorded allowed to test the methodology for P- and S-waves and to compare the velocity models derived from the first arrivals tomographic inversion of the two different kind of seismic waves. Furthermore, the combination of the two velocity models (P- and S-waves) provides a 3D Poisson's ratio diagram of the rock massif. This coefficient allows to differentiate volumes of fractured and altered granite from fresh rock. Poisson's ratios close to 0.3 mean fractured areas and correlate with fracture index (FI) and sonic logs, otherwise Poisson's ratio close to 0.25 is related to unaltered and unfractured rock.

Key words: first arrivals, seismic tomography, Poisson's ratio, sonic log, velocity anomaly.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de conocimiento del subsuelo profundo y poco profundo ha permitido el desarrollo de numerosas técnicas geofísicas no destructivas que permiten su caracterización detallada. Entre ellas, cabe destacar la tomografía sísmica que se ha revelado como una de las metodologías más resolutiva para la determinación de la estructura interna de la Tierra. La tomografía sísmica pasiva (terremotos) proporciona, invirtiendo fases P y S, precisas relocalizaciones hipocentrales de terremotos, así como, detallados modelos de velocidades que caracterizan el subsuelo profundo (Benz *et al.*, 1996; Hawley *et al.*, 1981; Tryggvason *et al.*, 2002). Por su parte, el uso de la tomografía sísmica activa (fuentes artificiales) para estudios superficiales de alta resolución, se ha limitado al uso de la primeras llegadas de ondas P y, en general, para la caracterización de reservorios (Milligan y Rector, 2000), estructuras geológicas (paleocanales, fallas, etc.) (Morey y Schuster, 1999) o para la localización de cavidades. Sin embargo, el uso de ondas S se limita al estudio de anisotropía, aplicado a la caracterización de zonas de fractura asociadas a reservorios.

Este proyecto forma parte de un programa de restauración de antiguas minas de uranio llevado a cabo por ENRESA. En él se incluyen diferentes estudios geológicos y geofísicos para la caracterización de un plutón granítico (Escuder-Viruete *et al.*, 2003; Martí *et al.*, 2002b). La caracterización geofísica incluyó perfiles de sísmica vertical (VSP), y medidas de propiedades físicas como el índice de

fracturación (IF), velocidades sísmicas y coeficientes de Poisson, realizadas en sondeo. Estos datos permitieron determinar la estructura 3D del macizo granítico, correlacionando las anomalías de velocidad con fallas cartografiadas en superficie (fallas 5-220 y N-20) y testificadas mediante geofísica de sondeos (fallas 5-140, 5-220, 5-320 y 5-460, nombrada según la profundidad a la que se encuentran). Así mismo, la adquisición de datos de tres componentes ha permitido validar el algoritmo de inversión tomográfica para ondas P y S, y obtener diagramas tridimensionales del coeficiente de Poisson para el macizo rocoso.

TOMOGRAFÍA SÍSMICA DE ONDAS P Y S

El experimento de tomografía sísmica de alta resolución se desarrolló en un área limitada de dimensiones 450 x 300 x 570 m del plutón granítico de Albalá. La geometría de adquisición consistió en dos semicírculos de 75 y 150 m respectivamente, donde se situaron cada 45° los puntos de disparo (Fig. 1). La fuente utilizada fue un camión vibrador (Vibro-seis) de 22 toneladas, que en cada punto de disparo generó dos *sweeps* con un contenido en frecuencias entre 15 y 150 Hz. En el centro de los semicírculos se situaba el sondeo vertical SR5 de 500 m de profundidad, dentro del cual se situó cada 10 m el geófono de tres componentes que registró la energía generada por el camión vibrador. Los datos resultantes consistieron en perfiles sísmicos verticales para diferentes acimuts y distancias epicentrales alrededor de SR5.

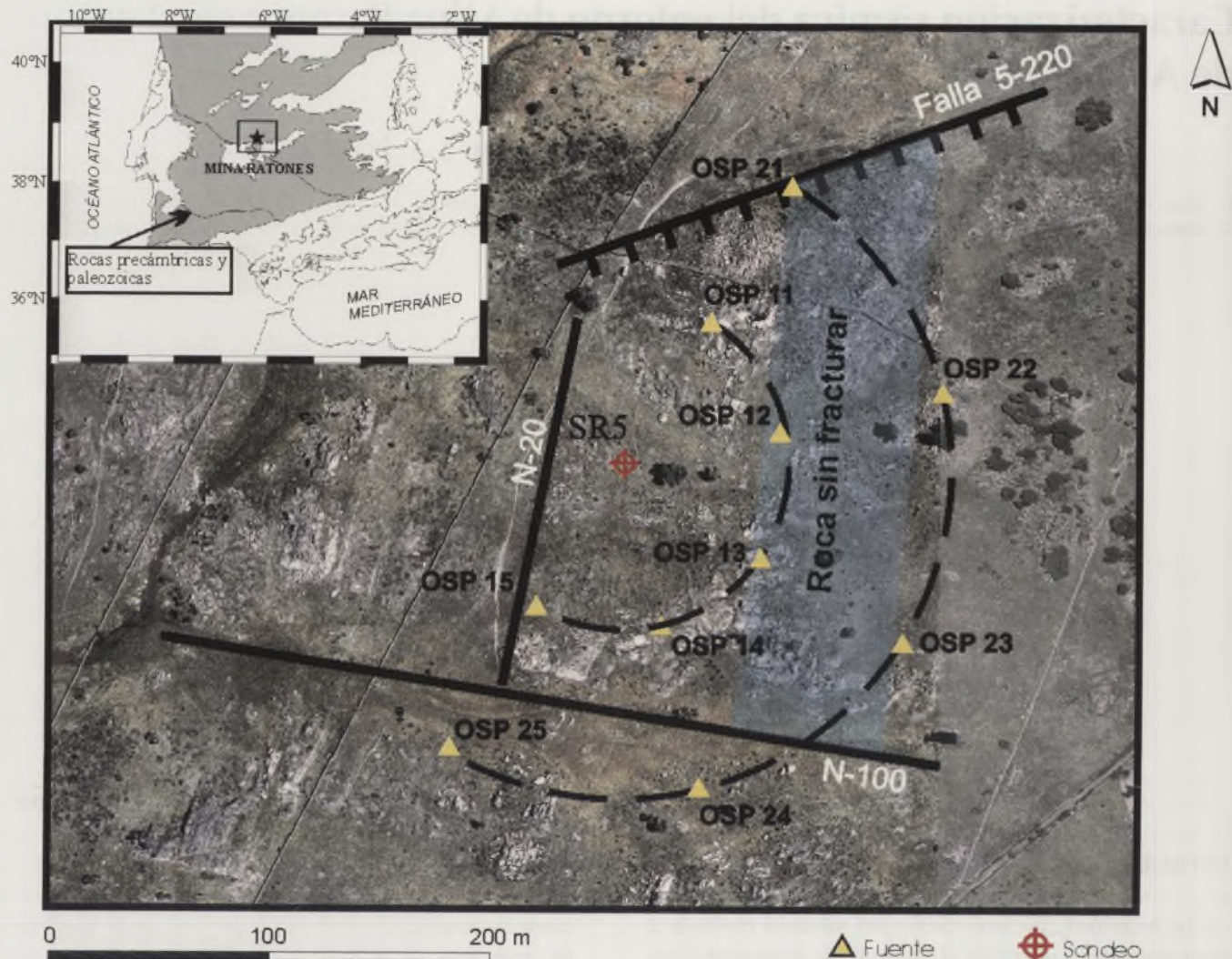


FIGURA 1. Foto aérea de la zona de estudio (Mina Ratonés) mostrando la geometría de adquisición de los perfiles de sismica vertical con distancia acimutal y epicentral variable (OSP). Las principales fallas cartografiadas en la zona son la falla 5-220 (que intersecta el sondeo a 220 m según los resultados de la tomografía), la falla N-20 y N-100. También se puede distinguir una franja que corresponde a la intersección en superficie de un volumen de roca poco alterada que ha podido ser caracterizado mediante la tomografía sísmica.

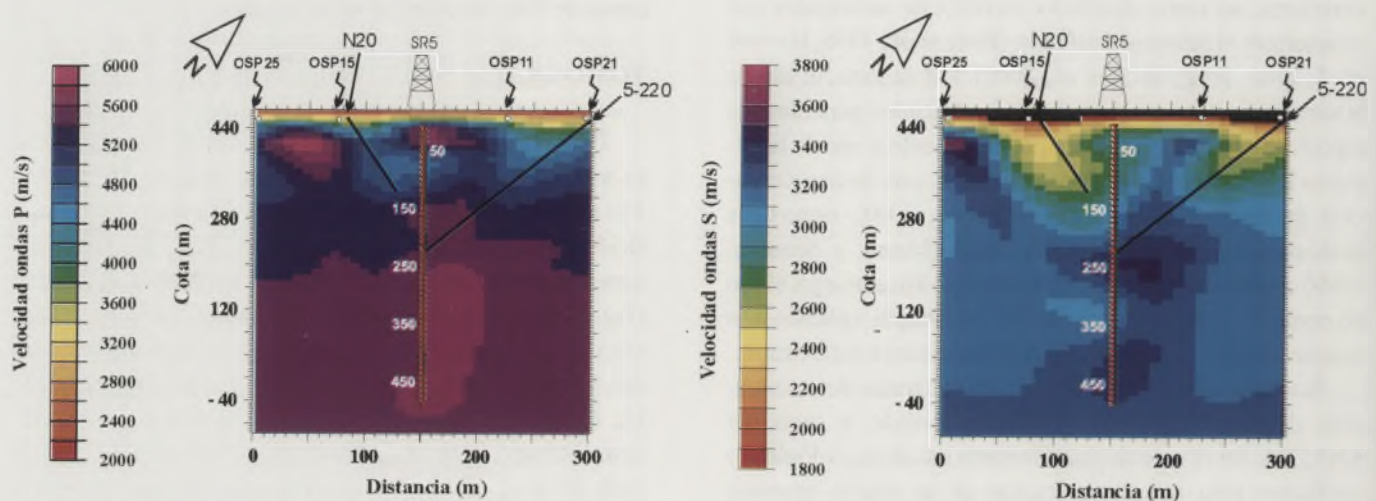


FIGURA 2. a) Sección vertical del modelo tomográfico de velocidades de ondas P y S desde el punto OSP 21 a OSP25. Las fallas 5-220 y N20 se correlacionan con anomalías de baja velocidad. El volumen de roca sin fracturar se caracteriza por una anomalía de alta velocidad que se localiza desde la superficie hasta la intersección con el sondeo entre 220 y 460 m.

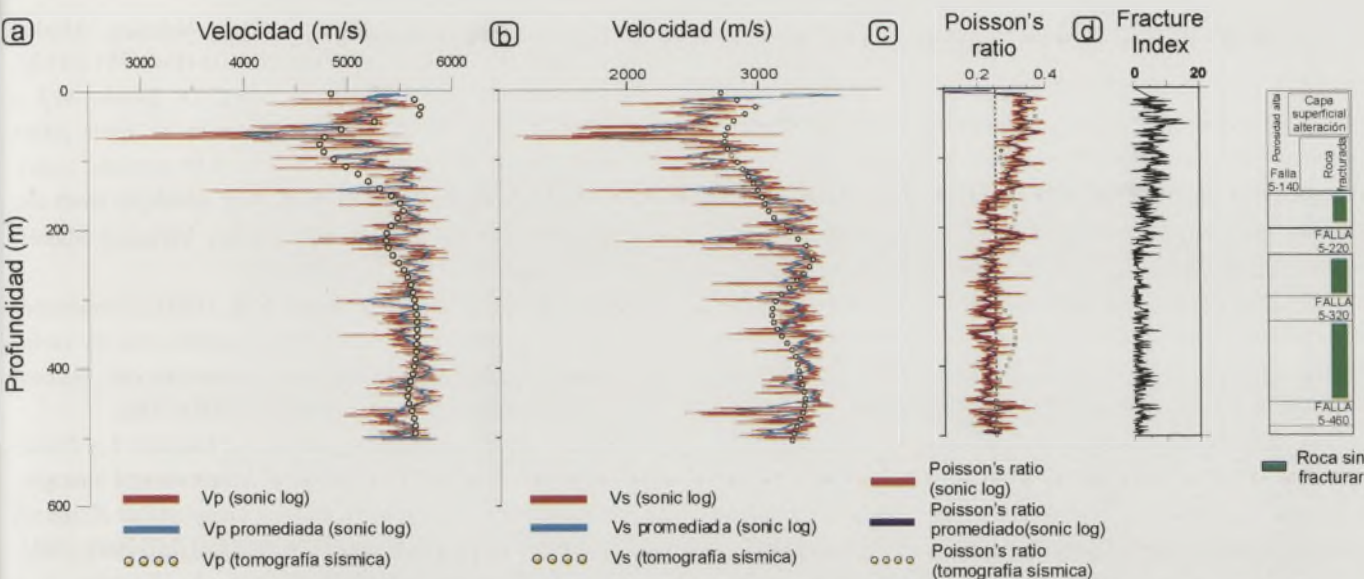


FIGURA 3. a) Perfiles de velocidades de ondas P. La diagragfia adquirida en SR5 y su promedio se representan en rojo y azul respectivamente. En puntos amarillos, el perfil de velocidades obtenido a partir de la tomografía sísmica. b) Los mismos resultados para las velocidades de onda S. c) Comparación entre los coeficientes de Poisson obtenidos a partir de las diagragfias (línea continua) y de la tomografía (línea de puntos). d) Índice de fracturación medido en SR5 y su interpretación cualitativa.

La tomografía sísmica permite obtener un modelo discreto de velocidades sísmicas de una determinada región, utilizando como parámetros de entrada las coordenadas de fuentes y receptores y las primeras llegadas de las correspondientes ondas sísmicas. El estudio de los diagramas de cobertura de rayos y los análisis de resolución (*checkerboard test*) permiten estimar la fiabilidad de los modelos finales, acotando aquellas parte del modelo que se encuentran mejor resueltas.

La adquisición de las diagragfias sónicas y de los índices de fracturación en el SR5 proporcionan una información adicional para la interpretación y calibración de los modelos de velocidades obtenidos a partir de la tomografía sísmica.

RESULTADOS

Los resultados de la tomografía sísmica muestra una serie de anomalías de baja velocidad que se concentran, principalmente, en la parte más superficial del sondeo (Fig. 2). Esta capa superficial se puede interpretar como una capa de alteración superficial o "capa de lehm". Además, se puede observar la presencia de otras dos anomalías de baja velocidad situadas a ambos lados del sondeo. La primera de ellas (entre el OSP21 y OSP11) ha podido correlacionarse con la falla 5-220, mientras que en el punto de disparo OSP15 y orientada hacia el norte, se observa la traza de la falla N20. Ambas fallas han sido cartografiadas en superficie. También cabe destacar la presencia de una anomalía de alta velocidad localizada entre 220 y 420 m y que corresponde a un volumen de granito sin fracturar que aflora en superficie entre los puntos de disparo OSP12, 13 y 14 (Fig. 1) (Martí *et al.*, 2002a).

La correlación entre anomalías de velocidad sísmica y fracturación en la que se basa la interpretación de los resultados de la tomografía sísmica se puede obtener a partir de las diagragfias, los coeficientes de Poisson y el índice de fracturación. De la observación directa se puede establecer que zonas con mayor porosidad (coeficientes de Poisson con $s > 0,25$) corresponden a zonas donde el índice de fracturación es alto y presentan velocidades sísmicas bajas. Así pues, zonas donde el granito se encuentra sin fracturar el coeficiente de Poisson disminuye hasta valores $s \leq 0,25$, disminuyendo también el índice de fracturación y obteniendo valores altos para las velocidades sísmicas. A partir de estas relaciones se pueden establecer las interpretaciones a los modelos velocidades derivados de la inversión tomográfica.

Para establecer correlaciones directas entre los diferentes valores obtenidos para las propiedades físicas del macizo granítico, y evaluar el algoritmo de inversión tomográfica, se ha obtenido los perfiles de velocidades (ondas P y S) derivados de la tomografía según la vertical del sondeo SR5 (Fig. 3). Para las ondas P, se observa una buena coincidencia entre el comportamiento observado en las diagragfias y las derivadas de la tomografía. Así, la capa superficial de alteración y las zonas de fractura 5-220 y 5-460 se presentan como zonas caracterizadas por valores bajos de ambas velocidades. El contenido frecuencial de las ondas P, probablemente no permite resolver la zona de fractura situada en 300 m identificada en las diagragfias y el índice de fracturación. Por su parte, las ondas S determinadas a partir de la tomografía, permiten caracterizar las fracturas 5-320, 5-460 y la capa superficial de alteración. La falla 5-220 sólo puede ser intuida por un cambio en el gradiente del perfil de velocidades.

CONCLUSIONES

La adquisición de perfiles de sismica vertical con acimut y distancia epicentral variable en SR5 ha permitido obtener modelos tridimensionales de velocidades sísmicas y de coeficientes de Poisson de un macizo granítico. La cartografía llevada a cabo en la zona de estudio, así como la base de datos geofísicos adquiridos en el sondeo (diagrafías sónicas, índice de fracturación, entre otros) ha proporcionado la clave para la correcta interpretación de los resultados de la tomografía. Las anomalías de baja velocidad observadas para ondas P y S han podido ser correlacionadas con zonas de fractura cartografiadas en superficie o en el interior del sondeo. Los mapas de distribución de los coeficientes de Poisson, ha permitido claramente diferenciar las zonas de fractura ($s > 0,25$) de las zonas sin alterar y con escasa fracturación ($s < 0,25$). Así pues, la tomografía sísmica ha permitido obtener una detallada caracterización de las propiedades físicas de un plutón granítico, incluyendo una reconstrucción de la red de fracturas dominante alrededor del SR5.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por ENRESA. También parte de la financiación ha sido proporcionada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (becas BTE 2000-0583-C02-01, REN 2001-4230) y la Generalitat de Catalunya (beca 2001-SGR-00339).

REFERENCIAS

- Benz, H.M., Chouet, P.B., Dawson, P.B., Lahr, J.C., Page, R.A. y Hole, J.A. (1996): Three-dimensional P and S wave velocity structure of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B4): 8111-8128.
- Escuder-Virue, J., Carbonell, R., Martí, D., Jurado, M.J. y Pérez-Estaún, A. (2003): Architecture of fault zones determined from outcrop, cores, 3-D seismic tomography and geostatistical modeling: example from the Albala Granitic Pluton, SW Iberian Variscan Massif. *Tectonophysics*, 361(1-2): 97-120.
- Hawley, B.W., Zandt, G. y Smith, R.B. (1981): Simultaneous inversion for hypocenters and lateral velocity variations: an iterative solution with a layered model. *Journal of Geophysical Research*, 86 (B8): 7073-7086.
- Martí, D., Carbonell, R., Tryggvason, A., Escuder, J. y Pérez-Estaún, A. (2002a): Calibration of 3 dimensional tomographic images of a granitic pluton. *Geophysical Research Letters*, 29(17), 1834, doi:10.1029/2001GL012942, 2002
- Martí, D., Carbonell, R., Tryggvason, A., Escuder, J. y Pérez-Estaún, A. (2002b): Mapping brittle fracture zones in 3 dimensions: high resolution travel time seismic tomography in a granitic pluton. *Geophysical Journal International*, 149: 95-105.
- Milligan, P.A. y Rector, J.W. (2000): 3-D velocity imaging in the shallow subsurface using multi-well, multi-offset, VSP data: a case study from the Lawrence Livermore National Laboratory site. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 5(1): 27-37.
- Morey, D. y Schuster, G.T. (1999): Palaeoseismicity of the Oquirrh fault, Utah from shallow seismic tomography. *Geophysical Journal International*, 138: 25-35.
- Tryggvason, A., Rögnvaldsson, S. y Flóvenz, O.G. (2002): Three-dimensional imaging of the P- and S-wave velocity structure and earthquake locations beneath Southwest Iceland. *Geophysical Journal International*, 151: 848-866.