

RESULTADOS PRELIMINARES DE UN EXPERIMENTO DE TOMOGRAFÍA SÍSMICA DE LA ZONA VOLCÁNICA DEL SUR DEL PERÚ

Macedo Orlando⁽¹⁾, Valette Bernard⁽²⁾, Monteiller Vadim⁽³⁾, Taipe Edu⁽¹⁾

(1) Instituto Geofísico del Perú, Sede Regional IGP-Arequipa, orlando.macedo@igp.gob.pe

(2) Bernard Valette, Institut de Recherche pour le Développement (IRD) & Institut des Sciences de la Terre (ISTerre), Université de Savoie, Le Bourget-du-Lac, France

(3) Vadim Monteiller, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), Observatoire Midi Pyrénées, Toulouse, France

INTRODUCCIÓN

Se presentan resultados preliminares de un experimento de tomografía sísmica realizada desde 2006 en el segmento peruano de la ZVC de los Andes en el marco de una colaboración entre el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD-Francia). No obstante que el segmento de esta parte de la subducción está caracterizada por un aumento de la pendiente de la placa subducida, la topología de esta placa y de sus contorsiones al nivel del codo de Arica permanecen mal descritas a pesar de los pocos estudios anteriores (Hasegawa & Sacks, 1981; Grange et al., 1984; Schneider & Sacks, 1987; Dorbath, 1997). Por otro lado, las estructuras de alimentación del arco desde la placa subducida hasta los reservorios de almacenamiento magmático permanecen totalmente desconocidas. El objetivo de este estudio es aportar algunos elementos de respuesta a estas preguntas aportando entre otros un primer modelo topográfico de la esquina mantélica continental al nivel de esta zona.

REDES SÍSMICAS Y DATOS

Los datos provienen, por una parte, de una campaña de monitoreo sísmico de 6 meses realizado en 2006 en la región de Arequipa mediante veinte estaciones Titan del parque francés de instrumentos geofísicos LITHOSCOPE y, por otra parte, de una red de quince estaciones de periodo corto o de banda ancha, Titan y Guralp que ha sido regularmente desplazada y mantenida desde principios de 2008 en todo el segmento del arco volcánico sur peruano (ver figura 1). Estos han sido completados parcialmente (ver figura 1) por datos de la zona sur de la Red Sísmica Nacional (RSN) del IGP, a los que se le suma datos provenientes de las redes chilenas de Arica y IPOC (Integrated Plate Observatory in Chile, CNRS-INSU francés y GFZ alemán). Los datos utilizados en el presente estudio son los del 2006, 2008 y 2009. Corresponden a 43978 y 30597 picados de tiempos de arribo de fases P y S, respectivamente, para 5740 eventos sísmicos registrados por más de 4 estaciones.

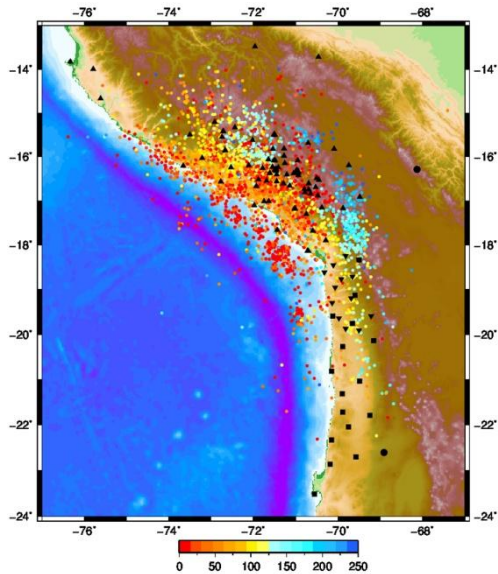


Figura 1. Mapa de sismicidad (2006,208-2009) y de redes sísmicas. Sólo se han plotado los sismos (círculos coloreados según su profundidad en km) mejor localizados luego de una inversión conjunta con el modelo. Las estaciones sísmicas están representadas por símbolos negros : ▲= red IGP-ISTerre utilizado en este estudio, ▼= red de Arica, ■= red IPOC, ●= red IRIS

EL MÉTODO DE INVERSIÓN TOMOGRÁFICA

Para determinar la velocidad V_p de las ondas sísmicas, así como la relación V_p/V_s y la posición de los sismos por inversión de datos de tiempo de arribo de ondas P y S, se ha utilizado una aproximación por mínimos cuadrados generalizados, basado en una descripción estocástica de datos y del modelo (Tarantola & Valette, 1982). El modelo de estructura está constituido por el conjunto de valores V_p y V_p/V_s sobre la cima de una grilla 3D regular, donde los valores en todo punto de espacio son obtenidos por interpolación lineal en cada dirección, en el manto o la corteza. El núcleo de correlación para cada uno de estos dos campos es el tipo Lapace en la corteza y el manto, es decir, es el exponencial del opuesto de la distancia entre los dos puntos considerados ponderado por diferentes longitudes de suavizado en cada dirección, pues la corteza es distinta al manto.

Para tomar en cuenta la gran disparidad en la calidad de medida y la posibilidad de errores groseros, se ha supuesto que los datos tienen densidades de probabilidad en secante hiperbólica ($1/ch$). Ello impone la introducción de un cambio de variable de modo a llegar a datos auxiliares gaussianos, tal como se impone en el uso de mínimos cuadrados, con valores de desviación estándar que van de 0.2 s a 0.6 s según la calidad de la medida.

Según Monteiller et al. (2005), en cada iteración del algoritmo de mínimos cuadrados, el sistema lineal implicado es resuelto mediante LSQR (Paige & Saunders, 1982). El cálculo directo de los tiempos de recorrido es efectuado por integración de la lentitud de los rayos cuyas trayectorias son determinadas a partir de un primer cálculo de los tiempos de propagación efectuada gracias al programa de Podvin & Lecomte (1991).

ESTRATEGIA DE INVERSIÓN Y RESULTADOS

En la práctica, la inversión se hace en dos etapas. En una etapa inicial se determinan valores a-priori para las posiciones y los tiempos iniciales de los sismos, partiendo de un modelo inicial de la corteza y del manto superior efectuando una búsqueda sistemática del máximo parecido en una grilla relativamente amplia (5 km de espaciado). El modelo de velocidad V_p a-priori es de 1D, creciente continuamente desde 4.5 km/s en superficie, hasta cerca de 7 km/s hacia la base de la corteza, siguiendo el modelo AK135 continental (Kennett et al., 1995) en el manto superior. El valor adoptado a-priori para V_p/V_s de 1.71 corresponde a la pendiente del diagrama de Wadatti de los datos. La

profundidad del Moho, que varía mucho a través de la cadena, es fijada en toda la inversión, y corresponde en esta zona a aquella de Tassara et al. (2006).

La figura 2a presenta el histograma de los ajustes de tiempo de arribo de las ondas P y S al cabo de la primera etapa, con un RMS de 4.53

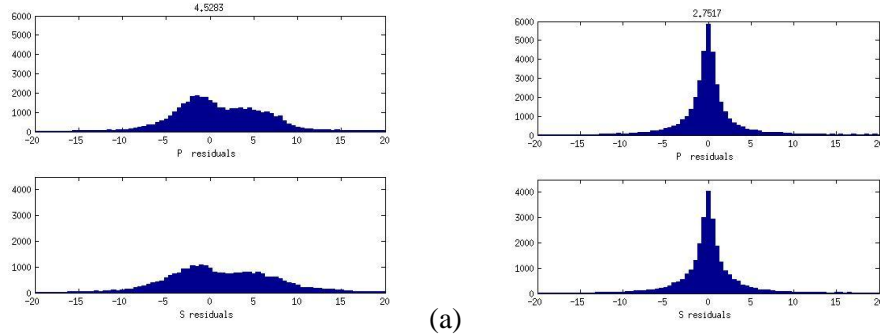


Figura 2. a) Histograma de residuos normalizados del tiempo recorrido, después de determinación de posiciones a-priori, de sismos por búsqueda en grilla amplia. Arriba: ondas P. Abajo: ondas S. En abscisa la desviación estándar de los residuos; en ordenadas el número de picado de fases. El valor en la parte superior es el RMS. **2.b)** Idem que 2.a) después de la segunda etapa de inversión conjunta con el modelo.

En una segunda etapa, partiendo del modelo a-priori de velocidades y de Moho así como de posiciones y tiempos de llegada de los sismos obtenidos en la primera etapa, se hace la re-inversión de los datos por algoritmo de mínimos cuadrados a fin de determinar las estructuras de V_p y V_p/V_s y, conjuntamente, mejorar la determinación de la posición de los sismos.

La figura 2b presenta el nuevo histograma de ajuste de los tiempos de P y S después de esta nueva etapa en donde esta vez se tiene un RMS de 2.75.

La disposición de sismos profundos entre los eventos mejor localizados que se presentan en la figura 1, confirma la continuidad de la placa subducida (identificada gracias a la zona de Wadati-Benioff) a través del codo de Arica. También confirma y detalla los resultados de Grange et al. (1984) que muestra que la inclinación de la placa de Nazca, la cual se hunde bajo la placa de Sudamérica según una dirección $N80^\circ$ a partir de la fosa, decrece hacia el norte. Igualmente, podemos observar un hueco en la sismicidad por debajo de los 120 km de profundidad al nivel del grupo de volcanes UHTVG (Ubinas-Huaynaputina-Ticsani Volcanic Group) y del Chachani Misti, que constituyen el conjunto de volcanes más activos del sur del Perú.

Los modelos de velocidad preliminares obtenidos muestran bajas velocidades para las ondas P bajo el arco volcánico en contraste a altos valores bajo el batolito costero (ver figura 3, a 20 km de profundidad).

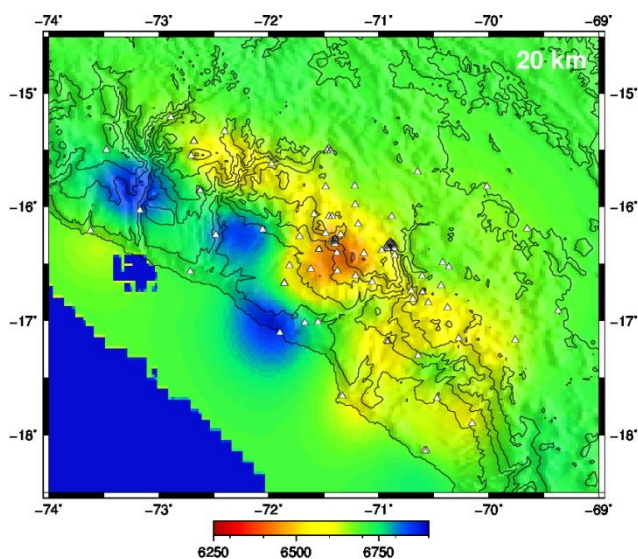


Figura 3. Velocidad de ondas P a 20 km de profundidad. Los triángulos blancos indican la posición de las estaciones sísmicas. Se puede observar la traza del Moho hacia el suroeste, así como las bajas velocidades bajo el arco en contraste con los valores altos bajo el batolito costero.

En cuanto a la relación V_p/V_s se puede observar, por ejemplo a los 30 km de profundidad (figura 4), valores altos bajo los volcanes del UHTVG o del Coropuna. Estos resultados son compatibles con la hipótesis de un reservorio magmático profundo de gran extensión bajo el Huaynaputina, dado por Lavallée et al. (2006, 2009) en base a datos petrológicos y geoquímicos.

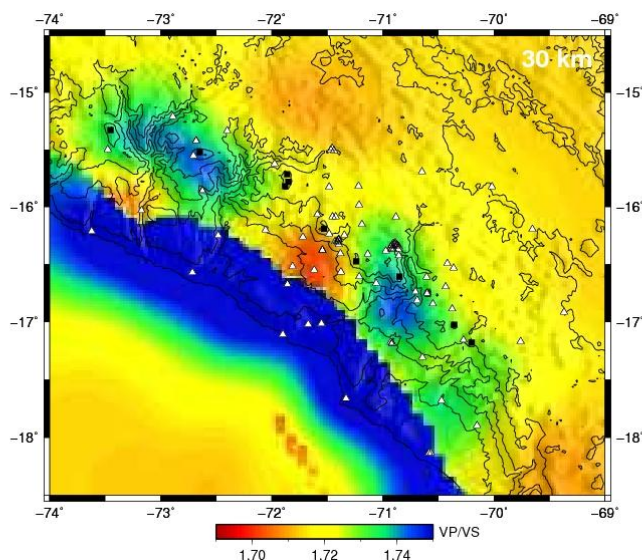


Figura 4. Relación V_p/V_s a 30 km de profundidad. Los triángulos blancos indican la posición de las estaciones sísmicas. Se puede observar la traza del Moho hacia el suroeste, así como los altos valores de V_p/V_s bajo el UHTVG y el Coropuna.

Referencias

- Dorbath, C., 1997, Mapping the continuity of the Nazca Plate through its aseismic part in the Arica Elbow (Central Andes), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 101, 163-173.
- Grange F., Cumming P., Gagnepain J., Hatzfeld D., Molnar P., Ocola L., Rodriguez A., Roecker S. Stock J. et Suarez G., 1984, The configuration of the seismic zone and the downgoing slab in southern Peru, *Geophys. Res. Lett.*, 11(1), 38-41
- Hasegawa A. & Sacks S., 1981, Subduction of Nazca plate beneath Peru as determined by seismic observations, *J. Geophys. Res.*, 86, 4971-4980.
- Kennett, B.L.N. Engdahl, E.R. & Buland R., 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times, *Geophys J Int*, 122, 108-124
- Lavallée, Y., de Silva, S.L., Salas, G., Byrnes, J.M., 2006. Explosive volcanism (VEI 6) without caldera formation: insight from Huaynaputina volcano, southern Peru. *Bulletin of Volcanology* 68 (4), 333-348.
- Lavallée, Y., de Silva, S.L., Salas, G., and Byrnes, J.M., 2009. Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 186, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.07.003, 253-264.
- Monteiller V., Got J.-L., Virieux J. & P.G. Okubo, 2005, An efficient algorithm for double-difference tomography and location in heterogeneous media, with an application to Kilauea volcano, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 110, B12306, doi:10.1029/2004BJ003466
- Paige, C.C., & M.A. Saunders, 1982, LSQR – an algorithm for sparse linear equations and sparse least-squares, *Trans. Math. Software*, 8, 43-71.
- Podvin, P. & I. Lecomte, Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models—a massively parallel approach and its associate tools, *Geophys. J. Int*, 105, 271-284, 1991.
- Schneider, J., & I. Sacks, 1987, Stress in the contorted Nazca plate beneath southern Peru from local earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 92, 13,887-13,902.
- Tarantola A. & B. Valette, 1982, Generalized non-linear inverse problems solved using the least square criterion, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 2, 219-232.
- Tassara A., H-J Götz, S. Schmidt, and R. Hackney, 2006, Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin, *J. Geophys. Res.*, 111, B09404.