

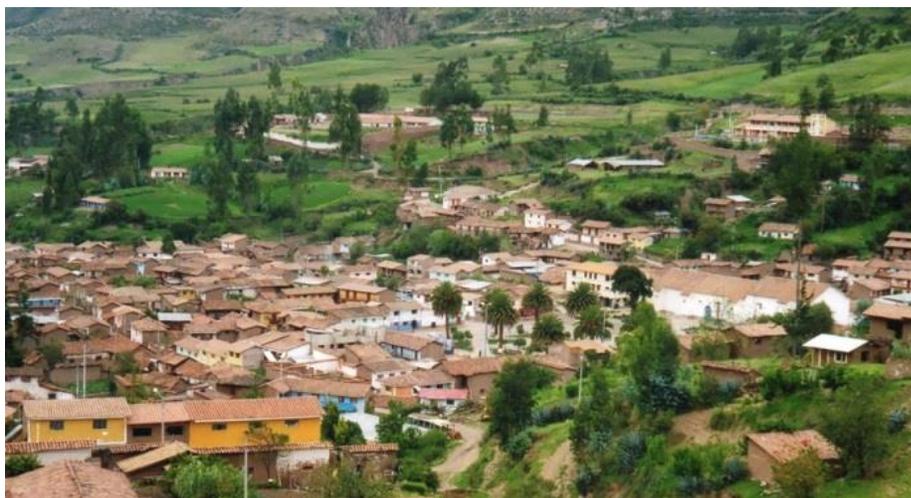


PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
de Sismología



Sismo de Paruro (Cusco)
del 27 de Setiembre, 2014 (5.1ML)

ASPECTOS SISMOLOGICOS

Por:

Hernando Tavera
Cristhian Flores
Efraín Fernandez
Patricia Guardia

Informe Técnico N° 03-2014

Lima-Perú
Setiembre, 2014

ÍNDICE

- 1.- INTRODUCCIÓN
 - 2.- TECTÓNICA LOCAL
 - 3.- SISMO DE PARURO
 - 3.1.- Parámetros Hipocentrales
 - 3.2.- Intensidades Sísmicas
 - 3.3.- Orientación de la Fuente
 - 3.4.- Análisis Espectral
 - 4.- PRECURSORES Y RÉPLICAS
 - 5.- DAÑOS Y EFECTOS SECUNDARIOS
 - 6.- DISCUSIÓN
 - 7.- CONCLUSIONES
- AGRADECIMIENTOS
- BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCION

En el borde occidental de Perú se desarrolla el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana con una velocidad promedio del orden de 7-8 cm/año (DeMets et al, 1980; Norabuena et al, 1999), siendo el mismo responsable de la actual geodinámica y geomorfología presente sobre todo el territorio peruano. En general, este proceso es la causa de ocurrencia de sismos de diversa magnitud y focos ubicados a variadas profundidades, todos asociados a la fricción de placas (oceánica y continental), deformación interna de la placa oceánica por debajo de la cordillera y deformación cortical a niveles superficiales.

Dentro de este contexto (Figura 1), en el Perú la ocurrencia de sismos es continua en el tiempo y cada año, se registra y se reporta un promedio de 150-170 sismos percibidos por la población con intensidades mínimas de II-III (MM) y magnitudes $ML \geq 4.5$. Los sismos con magnitud mayor ($M \geq 7.0$), son menos frecuentes y cuando tienen su origen en el proceso de fricción de placas, producen importantes daños en áreas relativamente grandes, tal como sucedió en la región Sur de Perú el 23 de Junio de 2001 ($M_w=8.2$) y en Pisco, el 15 de Agosto de 2007 ($M_w=7.9$). A niveles más profundos, estos sismos pocas veces producen daños en razón que la energía emitida se atenúa rápidamente antes de llegar a la superficie; sin embargo, es frecuente observar efectos secundarios como licuación de suelos y deslizamientos de piedras en zonas de alta pendiente.

Los sismos con origen en los procesos de deformación de la corteza a niveles superficiales son menos frecuentes, pero cuando ocurren, producen daños de consideración en áreas relativamente pequeñas, por ejemplo los sismos del Alto Mayo (San Martín) del 30 de Mayo de 1990 (6.0ML) y 5 de Abril de 1991 (6.5ML). En la región del Cusco, el último evento importante ocurrió el 5 de abril de 1986 con una magnitud de 5.7 M_w y origen en la falla de Qoricocha ubicado a aproximadamente 20 km de la ciudad del Cusco en donde se evaluaron intensidades de VII (MM). El sismo produjo importantes daños en estructuras de adobe con la muerte de 7 personas y el colapso de 30 viviendas; además de importantes procesos de deslizamientos y hundimientos en suelos poco compactados.

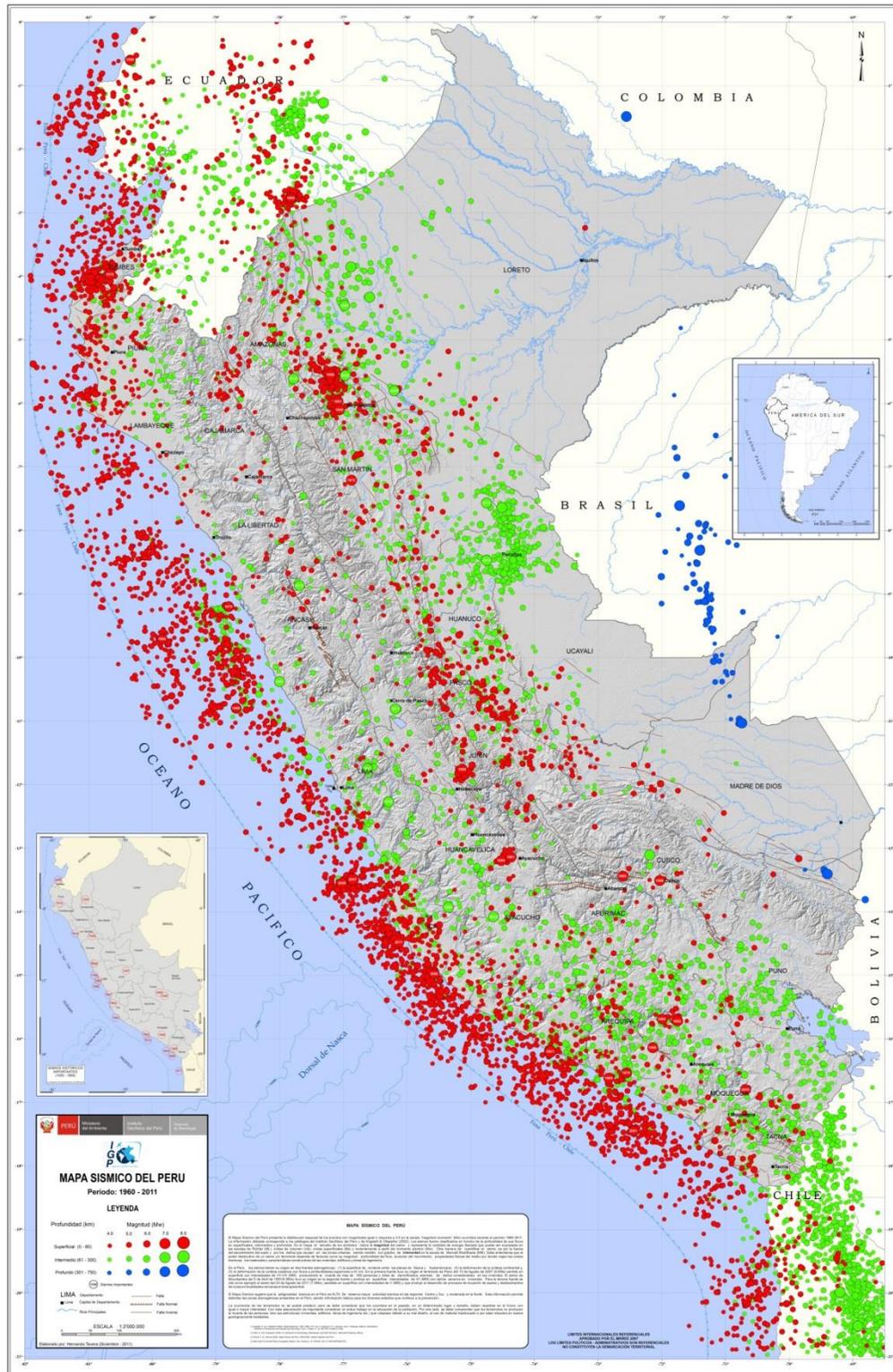


Figura 1.- Mapa Sísmico del Perú para el periodo 1960 y 2011. La magnitud de los sismos es diferenciado por el tamaño de los círculos y la profundidad de sus focos por el color de los mismos. Los círculos con número inscrito en su interior indican la ubicación y año de ocurrencia de los grandes sismos.

En la región sur del Perú, el día 27 de setiembre del 2014 ocurre un sismo de tipo cortical con una magnitud moderada de 5.1 ML (5.0 Mw) y con epicentro ubicado a 4 km al oeste de la localidad de Paruro (Cusco). El sismo ocurrió a una profundidad de 6 km (foco superficial) y en general, presento un área de percepción con radio del orden de 70 km ($I_{max}=II$), siendo mayor su intensidad ($I_{max}=VII$) en la localidad de Misca (Paruro - Cusco). En este informe se presenta y se describe los parámetros hipocentrales del sismo, intensidades evaluadas, orientación de la fuente, eventos precursoros y réplicas, así como su interpretación sismotectónica.

3.- TECTÓNICA LOCAL

La deformación cortical, presente en el interior del territorio peruano, tiene su origen en el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, dando como resultados la presencia de un gran número de sistemas de fallas activas en los bordes y sobre la Cordillera de los Andes. Los sistemas mayores, por ejemplo, se ubican en el borde Oeste de la Cordillera Blanca (departamento de Ancash) con trazas de variada longitud pero que en conjunto se extienden sobre 200 km (Sebrier et al, 1982; Bonnot y Sebrier, 1985). Del mismo modo, en la región del Cusco se encuentra otro de los sistemas más importantes conformada por las fallas de Zurite, Qoricocha, Chimcheros, Tamboray, Tambomachay, Pachatusan, Urcos, Ccata, Paruro, entre otras (Figura 2).

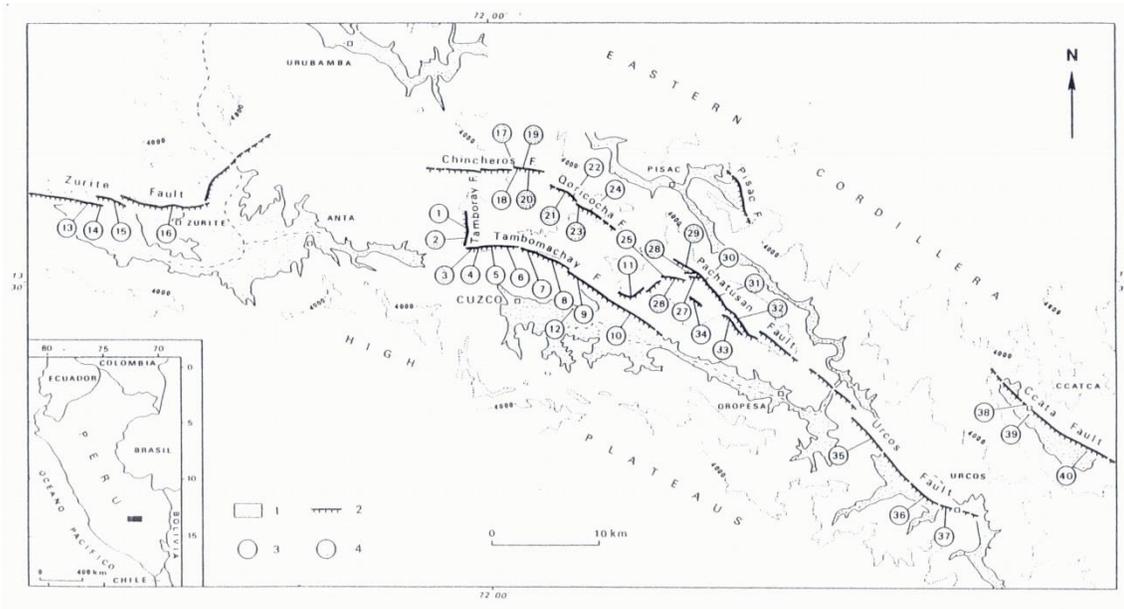


Figura 2: Principales sistemas de fallas presentes en la región del Cusco (Cabrera, 1988)

Según Cabrera (1988), las fallas presentes en la región del Cusco (sistema de fallas del Cusco) son parte de un gran sistema de más de 250 km de longitud con una orientación de EO dentro de la Deflexión de Abancay, para luego continuar en dirección NO a SE hasta la frontera con el departamento de Puno. Estudios detallados utilizando imágenes satelitales y trabajos de campo, han permitido a Cabrera (1988) identificar las trazas de estas fallas, así como proponer sus geometrías y estimar el tamaño de los posibles sismos que pudieron darles origen en el

pasado. Trabajos recientes realizados por Carlotto et al (2011) y Benavente et al (2013), han permitido disponer de mayor información sobre la presencia de nuevas trazas de fallas secundarias, así como definir con mayor precisión la geometría de todo el sistema de fallas presente en la región del Cusco.

La historia sísmica de la región del Cusco indica la ocurrencia de sismos destructores, pero debido a la falta de información detallada no es posible asociarlos con la posible reactivación de alguna traza de falla en superficie (Silgado, 1978). En la región, el sismo más reciente se produjo el 5 de Abril de 1986 con magnitud de 5.7 Mw, foco superficial e intensidades del orden de VII en un área pequeña que considera a la ciudad del Cusco por su cercanía a la zona epicentral. Estudios de campo sugieren la reactivación del sistema de fallas de Qoricocha con levantamientos del orden de 0.5 metros y la presencia de importantes evidencias visibles en superficie, como la formación de fisuras en suelos poco compactados. Posterior a este sismo y en otras áreas de la región, ocurrieron sismos de magnitud menor que no mostraron desplazamientos sobre las trazas de falla, pero si importantes daños en algunas localidades como Andahuaylillas y Lucre. En general, el origen de los grandes sismos en la región del Cusco no es bien conocido debido a que no se han realizado estudios detallados sobre la dinámica del gran número de fallas presentes en la región.

3.- SISMO DE PARURO

3.1.- Parámetros hipocentrales

Los parámetros hipocentrales del sismo del 27 septiembre del 2014, mejor conocido como “Sismo de Paruro”, fueron obtenidos utilizando información de algunas estaciones de la Red Sísmica Nacional y la proveniente de la red sísmica que funciona cerca del volcán Sabancaya como parte de los proyectos que lidera el Dr. O. Macedo. Los parámetros hipocentrales del sismo de Paruro son (Figura 3):

| | |
|--------------------|--|
| Tiempo Origen: | 02h 35min del día 28 de setiembre, 2014 (Hora Universal) 21h 35min del día 27 de setiembre, 2014 (Hora Local) |
| Latitud Sur: | -13.784° |
| Longitud Oeste: | -71.877° |
| Profundidad: | 6 km |
| Magnitud: | 5.1 ML |
| Epicentro: | A 4 km al oeste de la localidad de Paruro (Cusco) |
| Intensidad Máxima: | VII en la escala MM en la localidad de Misca (Paruro) |
| Momento Sísmico: | 5.2E+23 dina-cm |
| Magnitud Momento: | 5.0 Mw |

En la Figura 3, se presenta el epicentro del sismo y la distribución de la actividad sísmica de la región correspondiente al periodo 1960 - 2011. Obsérvese que en la zona epicentral se tiene la ocurrencia de un menor número de sismos con origen en la deformación superficial (círculos rojos, presencia de fallas geológicas) y mayor número de sismos debidos a la deformación interna de la placa oceánica por debajo del continente (círculos verdes).

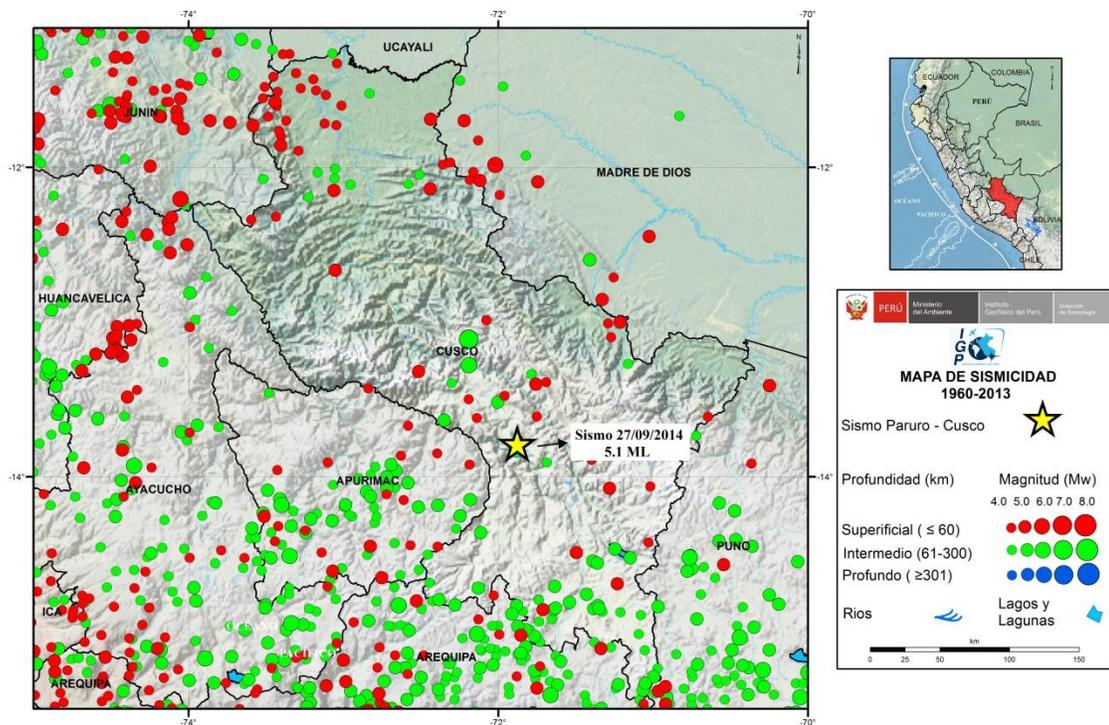


Figura 3: Distribución espacial de la actividad sísmica presente en la región del Cusco entre los años 2011 y 2013. La estrella indica el epicentro del sismo de Paruro.

3.2.- Intensidades Sísmicas

Después de haberse producido el sismo de Paruro (Cusco), se procedió a realizar la evaluación del radio de percepción y niveles de sacudimiento del suelo a fin de conocer de manera indirecta los efectos y daños causados en la zona epicentral y región del Cusco. Las evaluaciones fueron realizadas por el personal del Servicio Sismológico Nacional de la Dirección de Sismología (IGP) mediante encuestas vía línea telefónica a dos o tres personas de las localidades mayores de la región. La información obtenida fue interpretada utilizando la escala de Mercalli Modificada (Figura 4) y de ella, la descripción más resaltante se detalla a continuación:

Localidad de Misca: Movimiento sentido muy fuerte por todos. Las personas salieron apresuradas a las calles (pánico total). Se reportó daños en 60 viviendas de adobe y el colapso de otras 45 que produjeron la muerte de 8 personas. Asimismo, se evidencio la ocurrencia de derrumbes de rocas en el tramo de la carretera Cochapampa a Misca. Del mismo modo, se produjo el corte del fluido eléctrico. En esta localidad la intensidad evaluada fue de VII en la escala de Mercalli Modificada.

Localidades de Cusibamba, Tory y Moyoc: Sentido fuerte por todos, muchas personas salieron de sus casas. El movimiento del suelo afectó a 70 viviendas de adobe en Cusibamba, 7 en Moyoc y 3 en Toroy, quedando la mayoría con fisuras e inhabitables. Hubo caída de piedras en carreteras y el corte del fluido eléctrico. En estas localidades la intensidad evaluada fue de VI en la escala de Mercalli Modificada.

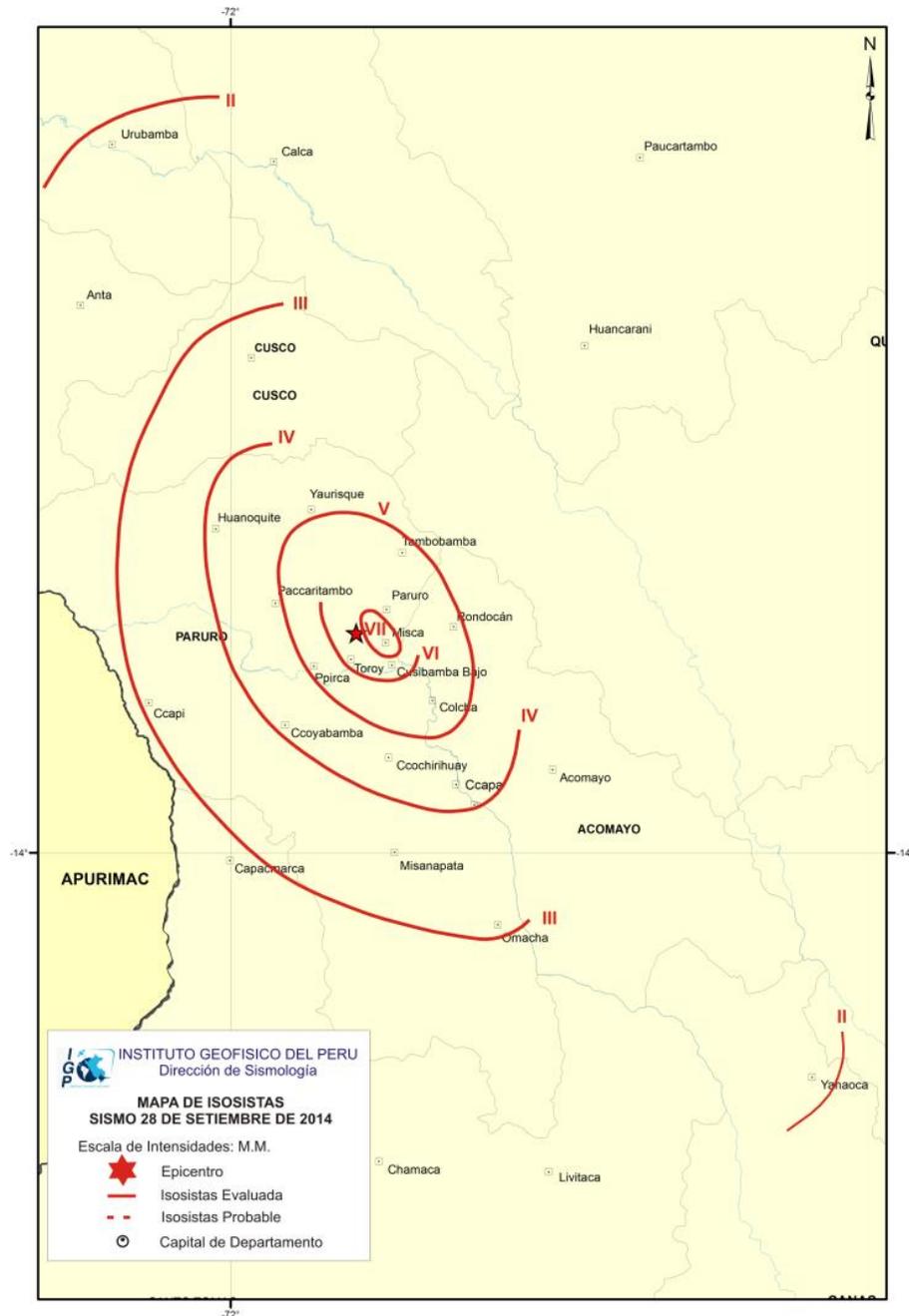


Figura 4: Mapa de intensidades sísmicas correspondientes al sismo de Paruro (5.1ML).

Localidades de Rondocan, Paruro, Colcha y Ppirca: Sentido relativamente fuerte, llegando las personas a salir a las calles. Se produjo la caída de tejados en algunas viviendas de adobe, así como la presencia de fisuras en las paredes. Hubo desprendimiento de piedras en carreteras. En estas localidades la intensidad evaluada fue de V en la escala de Mercalli Modificada.

En las localidades de Paccaritambo y Ccochirihuay la intensidad fue de IV (MM), en Yaurisque, Huanquite y Misapapata de III-IV (MM), en Cusco y Omacha de III (MM) y en Calca, Urubamba, Anta, Yanaoca y Huancari de II (MM). El sismo tuvo un radio de percepción de 70 km.

3.3.- Orientación de la Fuente

La orientación preliminar para la fuente del sismo de Paruro fue obtenido utilizando la distribución espacial de la polaridades de la onda P leídas en los registros de la componente vertical de las estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú. La solución obtenida corresponde a un mecanismo de fractura de tipo normal con componente de desgarre y planos nodales orientados en dirección ONO-ESE y ENE-OSO, con buzamientos de 57° en dirección SO y de 42° en dirección NNO (Figura 5).

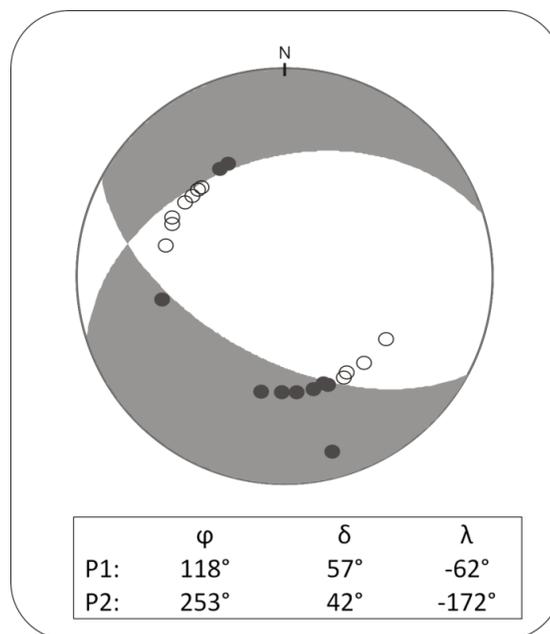


Figura 5: Mecanismo focal obtenido para el sismo de Paruro utilizando la polaridad de la onda P correspondiente a registros de la Red Sísmica Nacional a cargo del IGP.

3.4.- Análisis espectral

El momento sísmico (M_0) y la magnitud momento (M_w) para el sismo de Paruro fueron obtenidos a partir de las características del espectro de amplitud del desplazamiento del suelo registrado en la estación de Huancayo (HUA) ubicada a una distancia de 412 km desde el epicentro. De acuerdo a la Figura 6, en los espectros de amplitud de la onda S correspondiente a las componentes horizontales (NS y EO), la parte plana identificada con la letra “ Ω ”, permite estimar el momento sísmico (M_0) y la magnitud momento (M_w) siguiendo la metodología propuesta por Brune (1970) y Hanks y Kanamori (1979).

Para el sismo de Paruro se obtiene un momento sísmico de $M_0 = 5.2E+23$ dina-cm, equivalente a una magnitud momento de $M_w = 5.0$

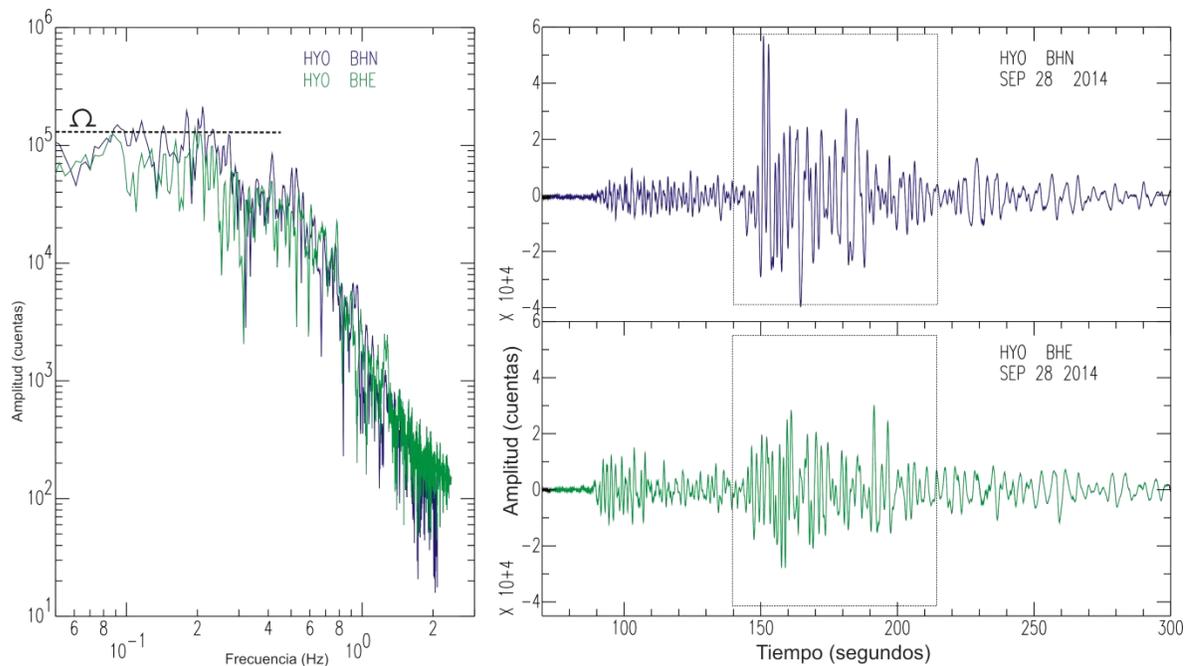


Figura 6: Espectro de amplitud de la onda S para el sismo de Paruro obtenido utilizando información de la estación Huancayo (HUA). El símbolo Ω corresponde a la parte plana del espectro.

4.- PRECURSORES Y RÉPLICAS

El análisis del sismograma correspondiente a la estación sísmica del Cusco (CUS) ha permitido identificar que el sismo de Paruro fue precedido por un evento precursor ocurrido minutos antes y en las siguientes 3 horas, se habrían producido hasta 4 réplicas (Figura 7), dos de ellas presentaron magnitudes del orden de 3.6 ML, además de ser percibidos por la población de Misca con intensidades de III (MM), sin producir daños. Los parámetros hipocentrales de estas dos réplicas son presentados en la Tabla 1.

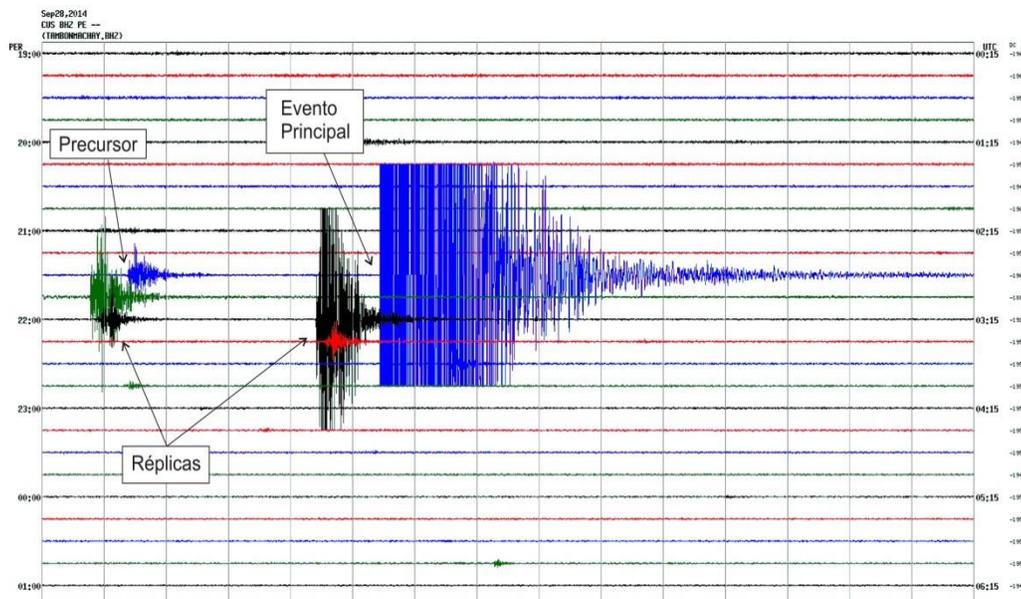


Figura 7: Sismograma correspondiente a la estación CUS (Cusco) en la cual se observa el registro de un evento precursor y réplicas del sismo de Paruro (comparar amplitudes de la señal correspondiente a cada evento).

Tabla 1: Parámetros hipocentrales para las réplicas del sismo de Paruro

| | Fecha | Hora Origen | Latitud Sur | Longitud Oeste | Prof. (km) | Magnitud (ML) | Intensidad (MM) |
|------------------|-------|-------------|-------------|----------------|------------|---------------|-----------------|
| Réplica 1 | 28/09 | 03h 04min | 13.809 | 71.897 | 6.2 | 3.6 | II-III |
| Réplica 2 | 30/09 | 11h 39min | 13.825 | 71.812 | 6.2 | 3.3 | |

5.- DAÑOS Y EFECTOS SECUNDARIOS

Los sismos que generen altos niveles de sacudimiento del suelo en zonas continentales, producen gran variedad de efectos secundarios entorno a la zona epicentral. De estos efectos, los más comunes son los deslizamientos de tierra y piedras en superficies con pendiente (derrumbes), licuación de suelos y daños en viviendas cuyo grado va a depender del tipo de suelo, calidad de los materiales y de su antigüedad.

Daños en Viviendas: En la zona epicentral, la localidad más afectada fue la de Misca, produciéndose el colapso de 45 viviendas construidas con material de adobe, muchas de ellas dañadas por el paso del tiempo y porque se encuentran sobre suelo poco compacto, lo cual amplifica a las ondas sísmicas (Figura 8).



Figura 8. Viviendas afectadas por el sismo de Paruro en la localidad de Misca. Obsérvese el tipo de material utilizado y la calidad de deterioro de las viviendas de adobe.

Otros tipos de daños corresponden a la caída de paredes de adobe, el colapso de techos de paja y tejas, y fisuras en diversa geometría en un gran número de viviendas (Figura 9).



Figura 9. Viviendas afectadas por el sismo de Paruro. Obsérvese el tipo de material utilizado en zonas andinas como la localidad de Misca.

5.2.- Presencia de Deslizamientos

Los principales escenarios de deslizamientos (derrumbes) de tierra y piedras se presentaron en carreteras que une a las localidades de Cochapampa, Cusibamba, Toroy y Moyoc con Misca y Paruro (Figura 10).



Figura 10: Principales deslizamientos de tierra y piedras en varios tramos de las carreteras de acceso a Misca y Paruro.

6.- DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, la ubicación del epicentro del sismo de Paruro sugiere que este tuvo su origen en la reactivación de la Falla Paruro, lo cual explicaría los altos niveles de sacudimiento del suelo en las localidades de Misca y Paruro, ambas cercanas al epicentro del sismo. De acuerdo a la solución obtenida para el mecanismo focal, el plano con orientación ONO-ESE y buzamiento en dirección SO con un ángulo de 57° correspondería al plano de falla en razón que este se correlaciona con la traza de la falla Paruro observada en campo y detallada por Carlotto et al (2011), Figura 11.

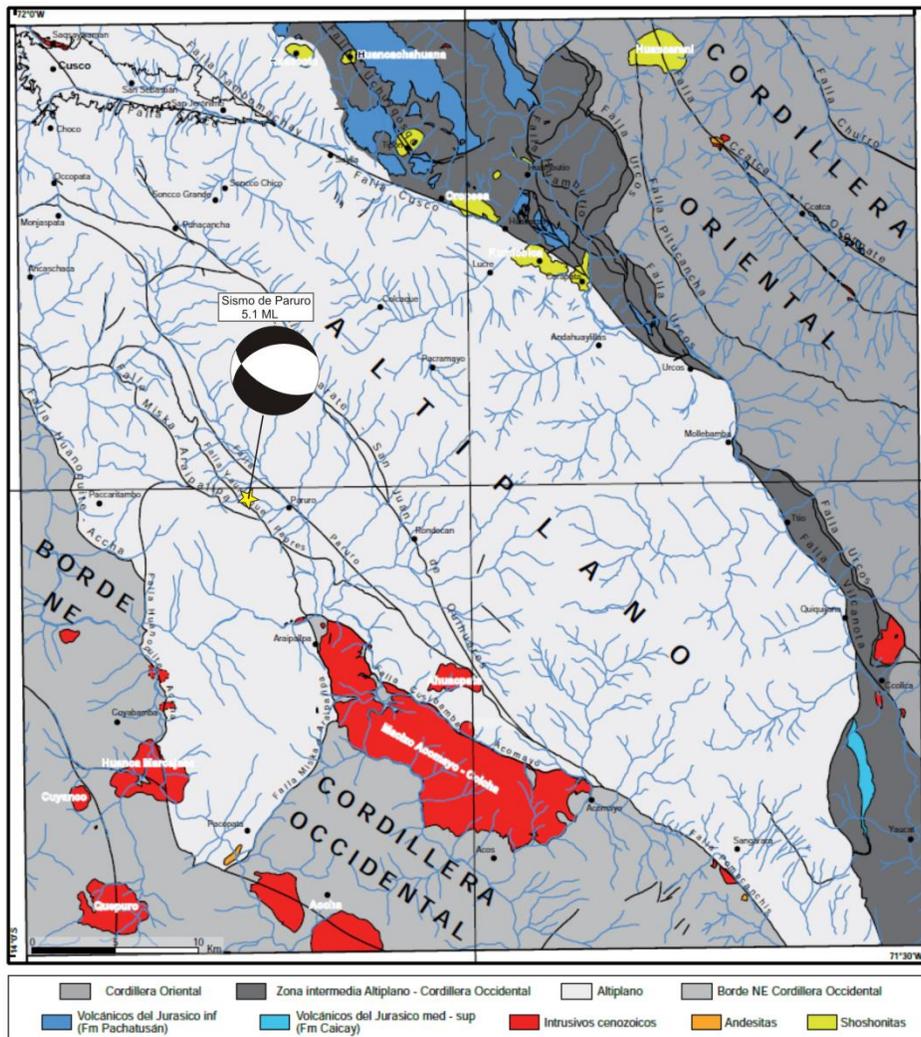


Figura 16. Mapa de afloramientos de rocas ígneas y principales trazas de fallas entorno a la localidad de Paruro. La estrella indica la ubicación del epicentro del sismo de Paruro y la esfera el mecanismo focal de tipo normal.

Según Benavente et al (2013), la falla de Paruro de tipo normal se encuentra ubicada a 34 km de la localidad del mismo nombre, se extiende con orientación N150°E y buzamiento de 65°-70° hacia el oeste a lo largo de 11 km, características similares a las propuestas con el mecanismo focal obtenido en este estudio. Actualmente, la escarpa de falla sugiere la ocurrencia de sismo en el pasado que acumularon saltos verticales de hasta 2 metros. Según estudios y análisis microtectónico, la traza de la falla Paruro presenta rupturas superficiales de hasta 1 metro que describen el desarrollo de rupturas recientes del tipo normal con componente de rumbo sinistral.



Figura 12. Vista panorámica de un segmento de la traza de la falla Paruro en donde se puede observar el desnivel generado en la superficie producto de la actividad tectónica.

7.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del presente informe técnico son:

1.- La región del Cusco alberga uno de los más importantes sistemas de fallas de tipo normal en Sudamérica. Las diferentes trazas de estas fallas, en su mayoría, se encuentran cerca de ciudades como el Cusco (falla de Tambomachay), Zurite y Anta (falla Zurite). Pisac (falla Pisac), Oropesa y Urcos (Fallas Pachatusan y Urcos), Ccata (falla Ccatac), Paruro (falla Paruro), entre otras.

2.- De acuerdo a las escarpas identificadas, en cada una de las trazas de falla, se acepta que ellas fueron generadas por importantes sismos ocurridos en el pasado. El último sismo que afectó la región del Cusco fue el ocurrido en el año 1986, con magnitud de 5.7 Mw que produjo daños en viviendas en la ciudad del Cusco. Este sismo tuvo su origen en la falla Qoricocha.

3.- El sismo ocurrido el 27 de setiembre de 2014 (hora local), presentó una magnitud de 5.1 ML y produjo en la localidad de Misca intensidades del orden de VII (MM) produciendo la muerte de 8 personas debido al colapso de aproximadamente 45 viviendas, todas construidas con material de adobe. El sismo tuvo un radio de percepción de 70 km.

4.- El mecanismo focal sugiere un proceso de ruptura de tipo extensional asociado a la falla de Paruro con el plano de falla con orientación y ángulo de buzamiento similar al propuesto para dicha falla por Carlotto et al. (2011) y Benavente et al. (2013).

5.- El análisis espectral de ondas S, sugiere que el sismo de Paruro presentó un momento sísmico de $5.2E+23$ dina-cm equivalente a una magnitud momento de 5.0 Mw

6.- Los daños en viviendas de Misca fueron debidos a la precariedad y el tipo de material utilizado en sus construcciones, sumados a la poca compactación de los suelos.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al Dr. O. Macedo por proporcionarnos datos de las estaciones de la red sísmica temporal del proyecto Volcanes. Al Ing. David Portugal y al personal de Redes Geofísicas por el esfuerzo y responsabilidad para mantener operativa la Red Sísmica Nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Benavente, C., Delgado, F., Taipe, E. (2013). Neotectónica y Peligro Sísmico en la región del Cusco. Boletín N°55, Serie C, INGEMMET, 202 pag.
- Bonnot, D., Sebrier, M. (1985). Análisis cinemático y sismogénico de un sistema de fallas normales activas: ejemplo de la Cordillera Blanca. Congreso Geológico Venezolano. Memoria Sociedad Venezolana de Geólogos, vol. 6, 2378-2396.
- Brune, J., (1970). Tectonics strain and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* **75**, 4997-5009.
- Cabrera, J. (1988). Neotectonique et sismotectonique dans la Cordillere Andine au niveau du changement de geometrie de la subducción: la región de Cusco, Perou. These Docteur 3eme cycle, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, 275 pag.
- Carlotto, V., Roque, J., Carlier, G. (2013). Geología del cuadrángulo del Cusco, Hoja 28-5. Boletín N° 138, Serie A, INGEMMET, 166 pag.
- De Mets, C., Gordon, R., Aarhus, A., y Stein, S. (1980). Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- Dorbath, L., A. Cisternas, y Dorbath C. (1990). Assesment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, *Bull.Seims.Soc.Am.*, Vol. 80, N° 3, pp. 551-576.
- Kanamori, H., Anderson, D., (1977). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seism. Soc. Am.* **65**, 1073-1095.
- Norabuena, E., Dixon, T., Stein S. y Harrison, C. (1999). Decelerating Nazca_south America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 26, 3405-3408.
- Sebrier, M., Huaman, D., Macharé, J. (1982). Observaciones acerca de la neotectónica del Perú. Proyecto SISRA, Grupo peruano de Neotectónica, Instituto Geofísico del Perú 107 pag.
- Silgado, E. "Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974)", Bol. 3, Serie C, Instituto de Geología y Minería, Lima-Perú, 133 pp., 1978
- Tavera, H. y Buforn, E. (2001). Source mechanism of earthquakes in Perú. *Journal of Seismology*, 5, 519-540.

Instituto Geofísico del Perú

Dirección de Sismología

Calle Badajos 169 – Urb. Mayorazgo IV Etapa - Ate

Teléfono 3172300-140 Fax 3172309-141

Web: <http://www.igp.gob.pe>