



## XVIII Congreso Peruano de Geología

# ESTIMACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO CO-SÍSMICO ASOCIADO AL SISMO DE ACARÍ DEL 25 DE SETIEMBRE DE 2013 (Mw=7.0) Y DEFORMACIÓN INTERSÍSMICA (2012-2013) EN EL SUR DEL PERÚ USANDO GEODESIA ESPACIAL

Wendy Quiroz Sifuentes<sup>1</sup>, Anne Socquet<sup>2</sup>, Nathalie Cotte<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú, Calle Calatrava 216, Urb. Camino Real, La Molina, Perú (wendy.quiroz@igp.gob.pe)

<sup>2</sup> ISTerre Institute of Earth Sciences, dirección, 1381 Rue de la Piscine, 38610 Gières, Francia (anne.socquet@univ-grenoble-alpes.fr, nathalie.cotte@univ-grenoble-alpes.fr)

**Resumen:** El sur del Perú se encuentra en una zona de gran actividad sísmica y a lo largo de su historia se ha visto afectada por grandes terremotos y tsunamis. El último mega-evento importante (Mw 8.2) ocurrió frente a la localidad de Atico el 23 de junio de 2001 generando un desplazamiento horizontal hacia el oeste que alcanzó un máximo de ~1.1m en Camaná [Pritchard 2007] y longitud de ruptura de 300km aproximadamente dentro del área de ruptura del terremoto (Mw 9) de Tacna-Arica 1868 [Comte et al, 1991]. Este estudio muestra el actual campo de velocidades intersísmico en esta región basado en información obtenida de una red de estaciones GPS de campaña, así como estaciones permanentes instaladas mediante convenio de cooperación científica entre el IGP y el Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) de Grenoble-Francia, entre 2010 y 2013. Se muestra también el movimiento cosísmico producido por un terremoto de magnitud Mw 7 ocurrido el 25 de setiembre de 2013 y cuyo epicentro fue localizado cerca a la localidad de Acarí (15.839°S, 74.511°W). Los resultados muestran que el campo de desplazamiento en las estaciones costeras en la zona epicentral es pequeño y particularmente el movimiento cosísmico en la estación BASU medido es de 1.6mm para la componente este-oeste y de 5.7mm para la componente norte-sur.

## 1. Introducción

Los grandes terremotos son eventos extremos recurrentes en el tiempo y pueden ocurrir en intervalos que varían de décadas a cientos de años, como consecuencia de un proceso continuo de acumulación y liberación de esfuerzos, al que se denomina ciclo sísmico. Este proceso de carga y descarga de esfuerzos fue postulado por Reid(1910), en su teoría de rebote elástico y está basado en observaciones de campo tomadas después del terremoto de San Francisco en 1906. En la actualidad, gracias al desarrollo de la geodesia espacial es posible identificar y cuantificar las fases del ciclo sísmico.

Los grandes terremotos ocurren en zonas de subducción como la que forma la convergencia de las placas Nazca y

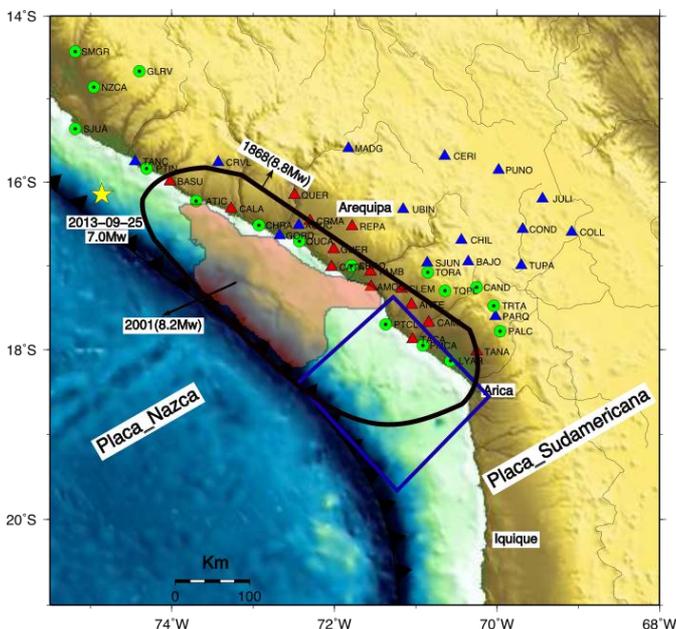
Sudamérica frente a las costas del Perú. Esto hace indispensable estudiar el ciclo sísmico asociado a dichos eventos con la finalidad de evaluar su potencial sísmico (magnitud del próximo evento) y la amenaza que representan para la población. En este contexto, el sur del Perú ha sido escenario de grandes terremotos como el sucedido en Agosto de 1868 que alcanzó una magnitud de 8.8 Mw con epicentro aproximado frente al puerto de Arica y extensión de ruptura de 500 kilómetros [Dorbath et al., 1990; Bejar et al., 2010]. Desde entonces sólo el terremoto de Arequipa 2001 [Tavera, 2002] de magnitud Mw 8.2, ha ocurrido en la región, la longitud de ruptura de este evento de aproximadamente ~300km (Pritchard et al., 2007), cubriendo parcialmente el área de ruptura del gran terremoto de 1868, por lo que se considera que el segmento de la zona de subducción entre Ilo y Arica está en un período de silencio sísmico.

Los estudios de geodesia espacial en esta región son pocos, Norabuena et al (1998), efectuó las primeras estimaciones del campo de velocidades intersísmicos 1994-1999, y estimó los efectos cosísmicos del terremoto de Arequipa del 2001 [Norabuena et al., 2004]. Estudios mas recientes muestran resultados preliminares de campo de velocidades para el sur del Perú y norte de Chile [Ortega 2013] utilizando estaciones GPS permanentes. Esto ha generado la necesidad de densificar el monitoreo geodésico de esta región instalando puntos de control con observaciones temporales bi-anales a modo campaña.

Este trabajo presenta el campo de velocidad intersísmico para la región sur del Perú obtenidos a partir del procesamiento de las observaciones geodésicas efectuadas entre el 2012 y 2013 utilizando puntos de control y estaciones permanentes. Asimismo, se presentan resultados del desplazamiento co-sísmico producido por el sismo de Acarí del 2013 de magnitud 7.0Mw y se comparan estos resultados con los modelos teóricos.

## 2. Datos, procesamiento y análisis

Para el desarrollo de este trabajo se analizaron los datos GPS de las campañas de junio 2012, junio 2013 y octubre 2013, realizadas por el Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP), a lo largo de los departamentos de Moquegua, Tacna, Arequipa y Puno. En el año 2012 fueron instalados y medidos 32 marcadores geodésicos y en el año 2013 un subconjunto de solo 14 sitios fueron reocupados a fin de obtener una segunda medición, para los cuales se ha podido estimar cambios espaciales. A fin de conseguir el mejoramiento en el ajuste y estabilización de los resultados se incluyeron algunas estaciones GNSS de la red del International (IGS). Las cuales fueron seleccionadas en base a varios criterios como: estabilidad, disponibilidad de series de observación continua, calidad de los datos, disponibilidad de posiciones y velocidades ITRF2008, así como la forma geométrica de la red. Las estaciones utilizadas en este estudio se muestran en la Figura 1.

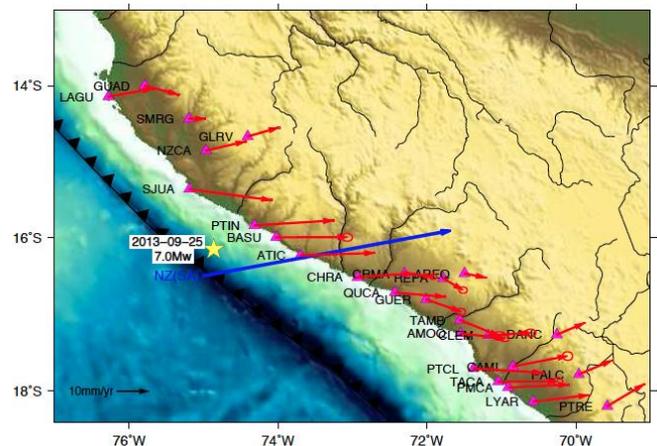


Los datos GPS fueron procesados utilizando el software GAMIT/GLOBK desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Herring et al., 2010), con el cual se obtuvieron series de tiempo para cada punto GPS que permitieron calcular el campo de velocidad intersísmico y el desplazamiento cosísmico en las estaciones más cercanas al epicentro del sismo de Acarí.

El campo de velocidad GPS para el sur de Perú obtenido en este estudio es la primera aproximación para obtener una distribución actualizada y mas densa de la deformación intersísmica en la región, lo cual permitirá en futuros estudios iluminar la distribución de desplazamientos en el plano de falla y estimación del tamaño del terremoto que podría producirse en esta región, lo cual es fundamental para la evaluación de riesgos. No obstante en este trabajo solo se han obtenido las velocidades intersísmicas para 14 estaciones con un intervalo de tiempo mínimo (un año) y cuyos resultados se muestran en la Figura 2.

## 2.2. Resultados

El campo de velocidad GPS para el sur de Perú obtenido en este estudio es la primera aproximación para obtener una distribución actualizada y mas densa de la deformación intersísmica en la región, lo cual permitirá en futuros estudios iluminar la distribución de desplazamientos en el plano de falla y estimación del tamaño del terremoto que podría producirse en esta región, lo cual es fundamental para la evaluación de riesgos. No obstante en este trabajo solo se han obtenido las velocidades intersísmicas para 14 estaciones con un intervalo de tiempo mínimo (un año) y cuyos resultados se muestran en la Figura 2.



La dirección del campo de velocidades GPS resultante sigue la dirección de la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana N 81° E. Esta dirección aproximada Oeste-Este de los vectores se debería sobre todo a que la zona de contacto esta "acoplada" y producto de este acoplamiento se observa el empuje y deformación en el

sentido de la convergencia. Por ejemplo, la velocidad estimada para la estación LYAR a unos pocos kilómetros de la costa, es de aproximadamente 17mm/año; mientras que para la estación de PALC que se encuentra a varios kilómetros al este, es de 11mm/año en ambos casos el movimiento es casi en la dirección de convergencia.

### 3. Desplazamiento cosísmico GPS asociado al terremoto de Acarí, 25 de setiembre 2013 y modelo directo de dislocación elástica

El 25 de setiembre a las 16h42 UTC un terremoto de magnitud 7.0Mw sacudió la región de Caravelí, en el sur del Perú. El evento fue sentido con una intensidad de VI en la escala de Modificada de Mercalli en las localidades de Yauca, Chala, Atiquipa y Acarí [Tavera et al, 2013]. A pocos días después del terremoto se efectuaron observaciones GPS en las estaciones de TANA, BASU y CRVL. El propósito de estas mediciones fue estimar los desplazamientos asociados con el terremoto; es decir, el movimiento cosísmico.

Para el análisis del campo de deformaciones, se realizó un modelado directo siguiendo la metodología propuesta por Okada, (1992) y Savage (1983), el cual se basa en la dislocación elástica dentro de un semiespacio elástico. En este estudio se sigue el criterio de que los terremotos son modelados por un desplazamiento (slip) en el plano de falla, que se encuentra dentro de un semiespacio elástico, del cual tenemos información a priori sobre las características del plano de falla que están dados por los parámetros hipocentrales y el mecanismo focal dado por el USGS (Strike 302°, Dip 39°, Rake 75°). Finalmente, los resultados obtenidos con el modelado se comparan con los obtenidos utilizando GAMIT/GLOBK.

Para obtener los desplazamientos superficiales teóricos en la región de estudio, el plano de la falla es discretizado en una grilla de 120km por 120km con la localización del epicentro del terremoto en el centro de la grilla. Para esto se utilizó la función meshgrid de Matlab y el código Okada85 desarrollado por Beaducei (2009) en Matlab. El campo de desplazamiento se presenta en la Figura 3.

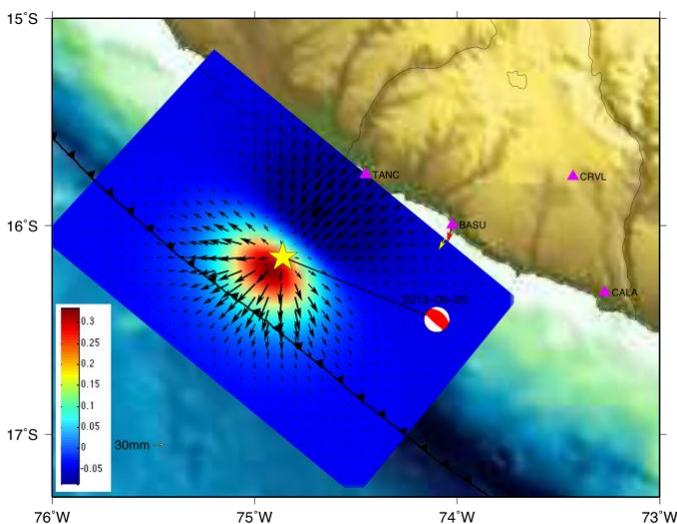


Figura 3. Desplazamientos cosísmicos teóricos (vectores de color negro) calculados usando el modelo de dislocación elástica de Okada(1985) para el terremoto de Acarí (25/09/2013). Los

triángulos corresponden a las estaciones GPS medidas y la estrella amarilla es el epicentro del terremoto.

En la Figura 3 se observa los desplazamientos teóricos alrededor de la estación TANA, la más cercana al epicentro de el terremoto es del orden de 5cm; mientras que en la estación BASU, son del orden de 1cm. Estos desplazamientos son representados en flechas amarillas exageradas para su mejor visualización.

### 4. Conclusiones

Aunque los terremotos de Atico de magnitud Mw 8.2 en 2001 y el de Yauca-Acari Mw 7.0, 2013 afectaron el patrón de deformación de la región, estos resultados demuestran que el campo de desplazamientos en las estaciones costeras de la zona epicentral del sismo de Acarí es pequeño y particularmente, en el movimiento cosísmico medido en la estación BASU, la más cercana al epicentro, donde alcanzó valores de 1,6 mm para la componente este-oeste y 5.7mm para la componente norte-sur.

Si bien los resultados presentados en este estudio tienen algunas limitaciones que corresponden a la extensión temporal de las observaciones (un año), los valores para el campo de velocidades intersísmicas, son consistentes al primer orden con las observaciones de estudios anteriores y constituyen un indicador del potencial sísmico de la región sur del Perú. Futuras mediciones que actualmente, están en curso permitirán obtener una mejor precisión de las velocidades.

### Agradecimientos

Mi agradecimiento al Instituto Geofísico del Perú (IGP) y al Institut des Sciences de la Terre (Isterre), por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Y agradecer de manera muy al Dr. Juan Carlos Villegas y al Dr. Edmundo Norabuena, por sus correcciones y sugerencias.

### Referencias

- Bejar M., D. Carrizo, A. Socquet, R. Armijo, S. Barrientos, F. Bondoux, S. Bonvalot, J. Campos, D. Comte, J.B. de Chavalier, O. Charade, A. Delorme, G. Gabalda, J. Galetzka, J. Genrich, A. Necessian, M. Olcay, F. Ortega, I. Ortega, D. Remy, J.C. Ruegg, M. Simons, C. Valderas and C. Vigny., 2010, *Geophys. J. Int.*, 390-406, doi:1111/j.1365-246X.2010.04748.x
- Dorbath L., A. Cisternas, C. Dorbath, 1990, *Assesment of the Seize of Large and Great Historical Earthquakes in Peru*, *Bull. Seis. Soc. of Am.*, 80,551-576.
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I.S, Ocola., and Ellis, M. 1998. *Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence Across the Central Andes*. *Science* 279: 358-362.
- Norabuena, E. (2004) *Space geodetic studies of crustal deformation in subduction zones: The central Andes and Costa Rica*, Ph.D. thesis, Univ. of Miami, Miami.
- Okada Y., 1985, *Surface deformation to shear and tensile faults in a half space*, *Bull. Seism. Soc. Am.*,75, 1135-1154.

- Pritchard, E.O., Norabuena, E., Boroschek, R., Comte, D., Simons, M., Dixon, T. and Rosen, P. 2007. Geodetic, teleseismic, and strong motion constraints on slip from recent southern Peru subduction zone earthquakes, JGR Vol. 112, B03307, doi:10.1029/2006JB004294
- Savage J., 1983, A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone, J. of Geophys. Res. 88, 4984-4996. 30
- Silgado E., 1974, Historia de los sismos mas notables ocurridos en el Peru, 1513-1974,
- Tavera H., E. Fernandez, P. Guardia, J.C. Villegas, M. Chlie, L. Arredondo, C. Flores, J. Martínez, 2013, Sismo de Yauca-Acarí del 25 de Septiembre del 2013 (7.0 Mw) – Arequipa, Aspectos Sismológicos, Reporte Interno Inst. Geofísico del Peru.
- Tavera H., 2002, The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001, Reporte Interno IGP.