



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Deformación de la corteza terrestre en el borde occidental del Perú y determinación del acoplamiento sísmico la zona de subducción del Perú a partir de mediciones GPS/GNSS

Juan Carlos Villegas Lanza^{1*}, Oscar Balladares Purizaga¹, Franco Saavedra Pari¹, Eliana Mantilla Calisaya¹, Wendy Quiroz Sifuentes¹, Rocio Parillo Saico¹, Mohamed Chlieh², Jean-Mathieu Nocquet², y José Chire³

¹ Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz 169 Urb. Mayorazgo IV Etapa, Ate, Lima, Perú (jvillegas@igp.gob.pe) *

² Institut de Recherche pour le Developpement, Calle 17 Urb Corpac, San Isidro, Lima, Perú

³ Instituto Geográfico Nacional, Av. Aramburú 1184, Surquillo, Lima, Perú (wsulla@igp.gob.pe; ybernal@igp.gob.pe)

Resumen

En las últimas dos décadas las herramientas de geodesia espacial, en particular el Sistema Global de Posicionamiento por Satélite (GNSS) ha contribuido a mejorar el conocimiento de los procesos geofísicos asociados a la deformación de la corteza terrestre y al ciclo sísmico de los grandes terremotos. Hoy en día las mediciones con GPS permiten cuantificar el desplazamiento de un punto sobre la superficie de la Tierra con un alto nivel de precisión (milimétrico). En los últimos años mediante el financiamiento de proyectos nacionales y de cooperación internacional se ha venido efectuando la instalación de instrumentos de monitoreo permanente y la densificación y medición de puntos de control geodésicos temporales. En este estudio se presentan resultados del análisis de datos GPS adquiridos en los últimos años en el borde occidental del Perú. Los resultados del campo de velocidad GPS evidencian diferentes patrones de deformación que principalmente son resultado de dos procesos: i) deformación elástica inducida por la acumulación de esfuerzos en la zona de subducción y ii) deformación de largo plazo inducida por el movimiento de un nuevo bloque tectónico en el margen occidental del Perú. El modelado numérico de los desplazamientos GPS ha permitido estimar el acoplamiento sísmico en la interfaz de subducción. Los resultados indican que al menos tres áreas a lo largo del margen de subducción del Perú (Lima, Nasca, Moquegua-Tacna), presentan actualmente alto nivel de acoplamiento sísmico, cuyo potencial para generar terremotos de gran magnitud ($M > 8.0$) en los próximos años es muy alto.

Palabras Clave: Zona de Subducción, deformación cortical, GPS, ciclo sísmico, terremotos,

Perú.

Abstract

In the last two decades the space geodesy tools, in particular the Global Navigation Satellite System (GNSS), contributed to improve the comprehension and knowledge of several geophysical processes including the deformation of the Earth's crust and the earthquake cycle. Nowadays GPS geodetic measurements allow us to quantify the displacement of a given site on the Earth's surface with a millimetric level of precision. During the last decade we have installed some permanent GPS stations and performed several campaign GPS measurements with support of national funding and international cooperation. In this study we present the results of the analysis of GPS data in the Peruvian subduction zone. The GPS velocity field shows different deformation patterns that are result of two main processes: i) elastic deformation induced by the stress accumulation along the plate interface, and ii) long-term deformation induced by the movement of a new tectonic block located on the western margin of Peru. The modeling of GPS displacements allowed us to estimate the inter-seismic coupling along the subduction plate interface. Our results show that at least 3 areas along the subduction margin of Peru (Lima, Nasca, Moquegua-Tacna) have a high inter-seismic coupling, whose potential to generate large to great magnitude earthquakes ($M > 8.0$) in the next few years is very high.

Keywords: Subduction zone, crustal deformation, GPS, Earthquake cycle, Peru.

1. Introducción

El Perú se encuentra ubicado en una zona de

convergencia de placas, también conocida como zona de subducción, en donde la Placa oceánica de Nazca con un frente de más de 6000 km de longitud desde Colombia (latitud 6°N) hasta Chile (latitud 46°S), se introduce por debajo de la Placa continental Sudamericana a una velocidad relativa de 6 a 7 cm/año (Norabuena et al., 1998; Kendrick et al., 2003). Esta zona de subducción es una de regiones sísmicas más activas de la Tierra, grandes terremotos de magnitud $M \geq 8.0$, generadores de tsunamis devastadores, ocurren con relativa frecuencia cada ~15-20 años.

La zona de subducción en el Perú, en función de sus características geomorfológicas y de la recurrencia de grandes terremotos, se divide en 3 segmentos: Sur, Centro y Norte (delimitados por la dorsal de Nazca y la fractura de Mendaña, ver Figura 2 y 3). La historia sísmica de los segmentos Sur y Centro indica que en estas regiones han ocurrido periódicamente terremotos de gran magnitud acompañados de tsunamis, con periodos de recurrencia de 150 a 200 años (Dorbath et al., 1990), siendo los más recientes los ocurridos en Nasca 1996 (Mw7.7), Arequipa 2001 (Mw8.4) y Pisco 2007 (Mw8.0). Por el contrario, el segmento Norte se caracteriza por la ausencia de sismos de gran magnitud ($M \geq 8.0$), al menos así lo evidencian los reportes históricos desde el siglo XVI (Silgado, 1978; Seiner, 2009). No obstante, eventos de magnitud moderada como los ocurridos en Piura 1960 (Mw7.6) y Chimbote 1996 (Mw7.5), que produjeron tsunamis locales parecen ser característicos de esta región (Villegas-Lanza, 2014, 2016). Por otro lado, en el interior del continente también ocurren sismos de magnitud moderada ($M < 7.0$), que son producto de la interacción de las fallas corticales, y que al ocurrir cerca de la superficie (< 30 km) suelen ser perjudiciales.

2. El ciclo sísmico y medición de la deformación cortical utilizando datos GPS/GNSS

2.1. El ciclo sísmico

Los grandes terremotos de subducción en el Perú y el mundo se originan en la interfaz o zona de contacto de placas. Los avances logrados por la sismología y la geodesia en diferentes regiones del mundo han permitido caracterizar esta zona como un conjunto de áreas o asperezas distribuidas de manera heterogénea, las cuales impiden el continuo deslizamiento de placas, ocasionando bloqueo mecánico, acumulación de esfuerzos en la interfaz de contacto y deformación elástica en la placa superior. A este proceso que se da con periodos de tiempo de decenas a cientos de años se le conoce como *fase inter-sísmica* (Figura 1a). Cuando los esfuerzos acumulados en el tiempo sobrepasan cierto umbral, estos se liberan súbitamente dan-

do lugar a un sismo. A este proceso de ruptura se le denomina *fase co-sísmica* y suele durar desde algunos segundos hasta varios minutos, dependiendo del tamaño del sismo (Figura 1b). Luego de la ruptura le sigue un periodo de estabilización caracterizado por la ocurrencia de réplicas, deslizamiento asísmico y la respuesta viscoelástica de la parte inferior de la litósfera. A este último proceso se le conoce como *fase post-sísmica* y puede durar desde algunos meses hasta varias decenas de años dependiendo del tamaño del sismo. Estas tres fases principales, que se repiten de manera sistemática entre un sismo y otro de similares características, son las que definen el ciclo de los grandes terremotos.

2.2. Medición de la deformación de la corteza terrestre mediante técnicas de Geodesia Espacial GPS/GNSS

En las últimas décadas las técnicas de geodesia espacial han contribuido a un mejor conocimiento y comprensión de los procesos físicos asociados a la generación de los grandes terremotos. Hoy en día la comunidad científica, en particular los geofísicos, utilizamos las herramientas como el GPS para detectar y cuantificar con alto nivel de precisión (1 mm), cualquier cambio de posición de un punto sobre la superficie de la Tierra y así estudiar cada una de las etapas del ciclo sísmico. Para el estudio y monitoreo de puntos geodésicos se utilizan dos tipos de mediciones: 1) mediciones temporales o de campaña, es decir se instalan monumentos geodésicos que son medidos con instrumentos GPS cada 1 o 2 años durante sesiones de registro de 48 horas o más, y 2) mediciones continuas o permanentes, para lo cual se establecen redes geodésicas compuestas por estaciones de monitoreo continuo con tasas de registro de 30 a 1 segundo o menos. Esta información resulta de mucha utilidad para cuantificar los desplazamientos e identificar las áreas de mayor deformación asociada a la acumulación de energía sísmica, permitiendo así identificar las áreas de mayor potencial sísmico en donde ocurrirán los próximos terremotos y tsunamis de gran magnitud. Por otro lado, otros países ubicados en zonas de subducción, como Japón, Chile Ecuador, vienen implementando este tipo de instrumentación con la finalidad de complementar y mejorar los sistemas de alerta temprana en caso de sismo y tsunami.

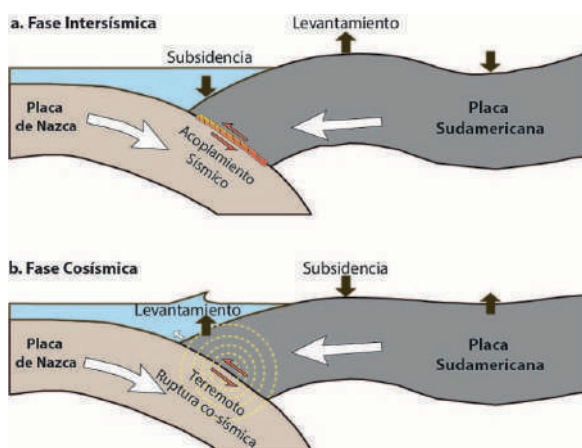


Figura 1. Esquema de las principales fases del Ciclo Sísmico en una zona de subducción. a) En la fase inter-sísmica se produce acoplamiento sísmico y acumulación de energía. b) En la fase co-sísmica los esfuerzos acumulados se liberan y se produce el sismo y tsunami.

3. Datos y procesamiento

En este estudio se analizaron datos geodésicos de más de 100 puntos de control geodésicos temporales y permanentes ubicados en el Perú recolectados durante un periodo de 8 años a partir del 2008. Los datos corresponden a las estaciones de las redes geodésicas instaladas por el IGP, IRD, IGN e IGS (para esta última red se incluyeron estaciones ubicadas en la placa Sudamericana y de Nazca). Asimismo se utilizaron las tablas de corrección de mareas y datos de efemérides y de orbitas de los satélites proporcionados por el IGS para efectuar las correcciones correspondientes. El procesamiento y análisis de datos se llevó a cabo utilizando el software Gamit/Globk (Herring, et al 2010), el cual permite obtener soluciones de posiciones diarias con un alto nivel de precisión dentro de un marco de referencia determinado. En este estudio se utilizó el marco de referencia del ITRF2008.

4. Resultados

4.1. Campo de velocidad GPS y deformación actual de la corteza terrestre en el Perú

En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos del campo de velocidad GPS. Las velocidades, expresadas en milímetros por año en el marco de referencia de Sudamérica estable, muestran distintos patrones de deformación que varían a lo largo del margen peruano: (1) En el noroeste del Perú las velocidades GPS muestran un desplazamiento casi-constante de 5-6 mm/año en dirección sureste; comportamiento que es consistente con la hipótesis del movimiento rígido de un bloque tectónico que comprendería la zona de ante-arco desde la fosa hasta la cordillera occidental extendiéndose hacia el sur del Perú. Dicha hipóte-

sis ha sido puesta en evidencia y discutida ampliamente en los estudios de Nocquet et al., (2014) y Villegas-Lanza, (2014, 2016). (2) En la región central de Perú se observan altas velocidades GPS con dirección noreste-este, similar al sentido de la convergencia. Estas velocidades que alcanzan tasas de hasta ~21 mm/año en la costa, disminuyen sistemáticamente hacia los Andes y el interior del continente, observándose además variaciones laterales al norte y sur de Lima, lo cual refleja cambios laterales de un fuerte acoplamiento sísmico en la interfaz de subducción de dicha región. (3) En el sur del Perú, a partir de la dorsal de Nazca, se observan un comportamiento heterogéneo, con áreas que tienen altos valores de velocidades GPS entre 12 y 18 mm/año en la costa, lo cual sugiere que el acoplamiento sísmico en esta región es alto, mientras que otras áreas como la ubicada frente al área de ruptura del sismo del 2001 (Mw8.4) presentan un acoplamiento menor. En general, el campo de velocidad observado refleja el efecto superpuesto de dos contribuciones principales: (i) el fuerte acoplamiento heterogéneo a lo largo de la interfaz de subducción, y (ii) deformación tectónica de largo plazo inducida por el bloque tectónico y el acortamiento cortical en la placa continental.

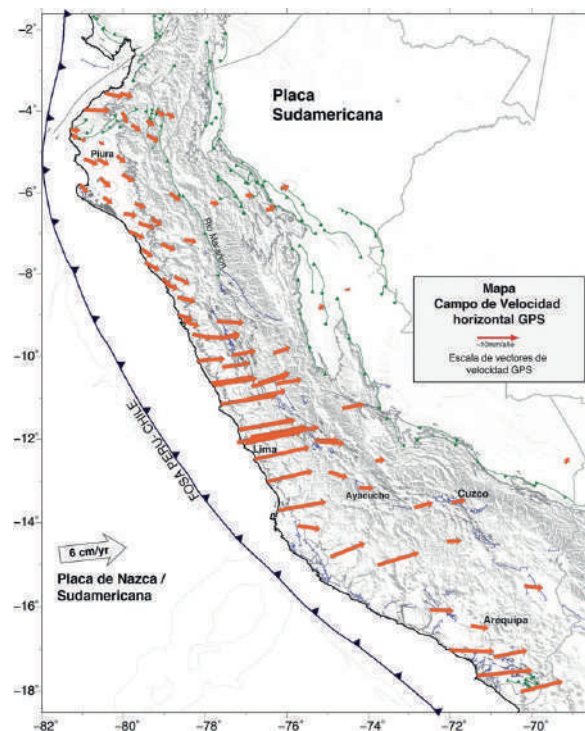


Figura 2. Se muestra el campo de velocidad GPS en el borde occidental del Perú expresado en el marco de referencia de Sudamérica estable. Los vectores representan la velocidad de deformación o desplazamiento de la corteza terrestre en milímetros por año. En general se observa que los vectores presentan desplazamientos hacia el NEE consistentes con la dirección de conver-

gencia de placas, lo cual refleja acoplamiento en la interfaz de placas. Se observa que las tasas más altas de deformación están en las regiones el centro y sur mientras que en el norte del Perú son mas bajas.

4.2. Acoplamiento inter-sísmico en la interfaz de contacto de la zona de subducción del Perú

Para reproducir el efecto de la convergencia en la interfaz de subducción, es necesario corregir el campo de velocidad de la contribución del movimiento del bloque tectónico (Nocquet et al 2014, Villegas-Lanza, 2014, 2016), de modo que se pueda modelar únicamente el acoplamiento sísmico. Para el modelado del acoplamiento sísmico se llevó a cabo la inversión de los desplazamientos GPS utilizando la metodología de Okada (1985). Los resultados del modelado han permitido identificar tres importantes áreas que actualmente presentan alto acoplamiento sísmico. Estas áreas están fuertemente acopladas acumulando energía desde hace muchos años e incrementando su potencial para generar sismos de gran magnitud ($M > 8.0$). Estas áreas, de norte a sur, son: (1) la región central de Perú, que abarca el segmento desde Barranca hasta Pisco (> 350 km de longitud), (2) el segmento frente a las ciudades de Nasca y Chala (~ 150 km), y (3) la región sur de Perú, que abarca desde la provincia de Ilo, Tacna hasta el Norte de Chile (> 150 km).

5. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos son consistentes con la historia sísmica del margen peruano. En las áreas con mayor acoplamiento sísmico, desde hace varias décadas a cientos de años no se ha producido un terremoto de gran magnitud, por tanto, la acumulación de esfuerzos en dichas áreas se sigue incrementando, lo que eleva el peligro sísmico en la costa peruana. Otro resultado interesante de este estudio indica que el segmento de subducción del norte del país presenta un nivel de acoplamiento sísmico débil a moderado, lo que sugiere que la convergencia de placas en este sector se daría de manera asísmica, es decir sin que se produzca importante acumulación de energía como para generar terremotos de gran magnitud ($M > 8.5$). No obstante, dado que se han registrado sismos de magnitud moderada como los ocurridos en 1996 y 1960 ($M \approx 7.5$) es posible que este tipo de eventos puedan ocurrir nuevamente.

6. Conclusiones

En las últimas décadas las observaciones geodésicas en zonas de alta actividad sísmica han contribuido a mejorar el conocimiento sobre los procesos geofísicos asociados a la deformación cortical y al ciclo sísmico de los grandes terremo-

tos.

En este estudio se obtuvieron dos importantes resultados: (1) El campo de velocidad GPS a escala nacional, que muestra los actuales patrones de deformación de la corteza terrestre, los cuales son producto de la deformación elástica inducida por la acumulación de esfuerzos en la interfaz de subducción y deformación tectónica de largo plazo; y (2) El acoplamiento sísmico a lo largo de la interfaz o zona de subducción del Perú, el cual permite identificar tres importantes áreas en donde el acoplamiento sísmico es alto, y en donde desde hace muchos años no ocurre sismos importantes, lo que incrementa el potencial para generar terremotos de gran magnitud ($M > 8.0$) en los próximos años. Estas áreas, de norte a sur, son: la región central de Perú, que abarca el segmento desde Barranca hasta Pisco, el segmento frente a las ciudades de Nasca y Chala, y la región sur de Perú, que abarca desde la provincia de Ilo, Tacna hasta el Norte de Chile.

Finalmente, estos resultados constituyen nuevo conocimiento científico que permite caracterizar mejor las áreas de mayor peligro sísmico a lo largo del margen de subducción del Perú, y también sirve de base para la toma de acciones dentro del ámbito de la Gestión de Riesgo de Desastres, ya que permite priorizar zonas de intervención para estimar el riesgo y tomar acciones de reducción de la vulnerabilidad y de preparación ante la ocurrencia de sismos. Dada la importancia para nuestro país, se recomienda implementar un mayor número de instrumentos geodésicos y geofísicos de monitoreo permanente a fin de mejorar el conocimiento y estar mejor preparados.

Agradecimientos

A las autoridades y pobladores de las ciudades y centros poblados donde se realizaron las mediciones de los puntos de control geodésicos por brindar su apoyo para la realización de los trabajos. Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación por brindar oportunidades para el desarrollo de proyectos de investigación. Parte de los resultados de este estudio

Referencias

- Dorbath, L., A. Cisternas, and C. Dorbath (1990), Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, Bull. Seismol. Soc. Am., 80(3), 551–576.
- Kendrick et al., (2003). The Nazca-South America Euler vector and its rate of change. J.S.A.E.S., 16, 125-131.
- Nocquet, J.-M. et al. (2014), Motion of continen-

tal slivers and creeping subduction in the northern Andes, *Nat. Geosci.*, 7(March), 287–291, doi:10.1038/NGEO2099

Norabuena, E. et al. (1999), Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence Across the Central Andes, *Science*, 279(5349), 358–362, doi:10.1126/science.279.5349.358.

Okada, (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace. *Bull. of the Seism. Soc. Am.*, vol. 75, 1135-1154.

Seiner Lizárraga, L. (2009), Historia de los sismos en el Perú. Catálogo: Siglos XV-XVII, edited by F. Editorial, Universidad de Lima, Lima.

Tavera, H., & E. Buforn (1998), Sismicidad y sismotectónica del Perú, *Fis. Tierra*, 10, 187–219. ^[1]_{SEP}

Silgado, E. (1978), Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974), Lima.

Villegas-Lanza, J. C. (2014), Earthquake cycle and continental deformation along the Peruvian subduction zone, PhD Diss. Univ. Nice. S. Antipolis, France.

Villegas-Lanza, J. C. et al. (2016), Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 7371-7394, doi: 10.1002/2016JB013080.