

PARÁMETROS DE LA FUENTE DEL SISMO DE SAMA (TACNA), 20 DE NOVIEMBRE DE 2006 (5.4MW)

SOURCE PARAMETERS OF SAMA (TACNA) EARTHQUAKE (5.4MW) OF 20 NOVEMBER 2006

Hernando Tavera¹, Laurence Audin² & Isabel Bernal¹

RESUMEN

El 20 de Noviembre de 2006 (14:48 UTC) cerca de la localidad de Sama (Tacna) ocurre un inusual evento sísmico con posible origen en una de las trazas de falla ubicada en el borde oeste del sistema de fallas de Incapuquio. Este sismo de foco superficial (17 km) y magnitud moderada (5.3ML), presenta su epicentro próximo a la traza de la falla Sama-Calientes, siendo su mecanismo focal del tipo compresional con planos orientados en la misma dirección que la falla (NO-SE). Los espectros de amplitud del desplazamiento de ondas S indican un momento sísmico (Mo) de $1.2E+24$ dina-cm equivalente a una magnitud de 5.4Mw, además de un radio de ruptura de 3.7 km. De acuerdo a la traza de la falla Sama-Calientes y a los parámetros de la fuente del sismo, se sugiere que dicha falla es del tipo inversa con posible geometría de bajo ángulo en profundidad.

Palabras Claves: Fuente Sísmica, Falla, Sismotectónica, Intensidades

ABSTRACT

On November 20th, 2006 (14:48 UTC) near the locality of Sama (Tacna) an unusual occurrence of a seismic event with possible origin in one of the faults from the system Incapuquio. This earthquake of a shallow source (17 km) and moderate magnitude (5.3ML) presented its epicenter next to the plan of the Sama-Calientes fault being its focal mechanism of the compresional type with planes oriented in the same direction of the fault (NO-SE). The spectral amplitude of S-wave's displacement indicates a seismic moment (Mo) of $1.2E+24$ dyne-cm equivalent to a magnitude of 5.4Mw and radius of rupture of 3.7km. According to the geometry of the Sama-Calientes fault and the source parameters, this fault is the inverse type with low angle in depth.

Keywords: Seismic source, Fault, Seismotectonic, Intensities

INTRODUCCIÓN

El día 20 de noviembre de 2006, cerca de la localidad de Sama (Tacna) ocurre un sismo de magnitud moderada (5.3ML) que produjo intensidades del orden de V (MM) en un área con radio del orden de 110 km. El epicentro del sismo fue ubicado en el extremo SE de la falla Incapuquio, siendo esta la mas importante de la región sur de Perú por su longitud y por estar bordeada por una serie de fallas pequeñas con similar orientación que aun no han sido del todo estudiadas, pero que muestran evidencias de actividad reciente (Audin et al, 2006).

En la región sur del Perú, la actividad sísmica toma relevancia por la frecuencia de ocurrencia de sismos de magnitud moderada a grande, todos asociados al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana y con epicentros distribuidos frente a la línea de costa (Figura 1). La sismicidad con foco superficial ($h < 60$ km) que se produce en el interior del continente es escasa y muy dispersa; por lo tanto, no es posible asociarla con alguna unidad tectónica de la región, cualquiera sea su tamaño. En esta región y por debajo del continente, la sismicidad con foco intermedio ($61 < km < 350$) es mas importante debido principalmente a que esta asociada a la deformación

¹ Dirección de Sismología, Instituto Geofísico del Perú, hjtavera@geo.igp.gob.pe

² IRD, Casilla 18-1209, Lima 18, Perú

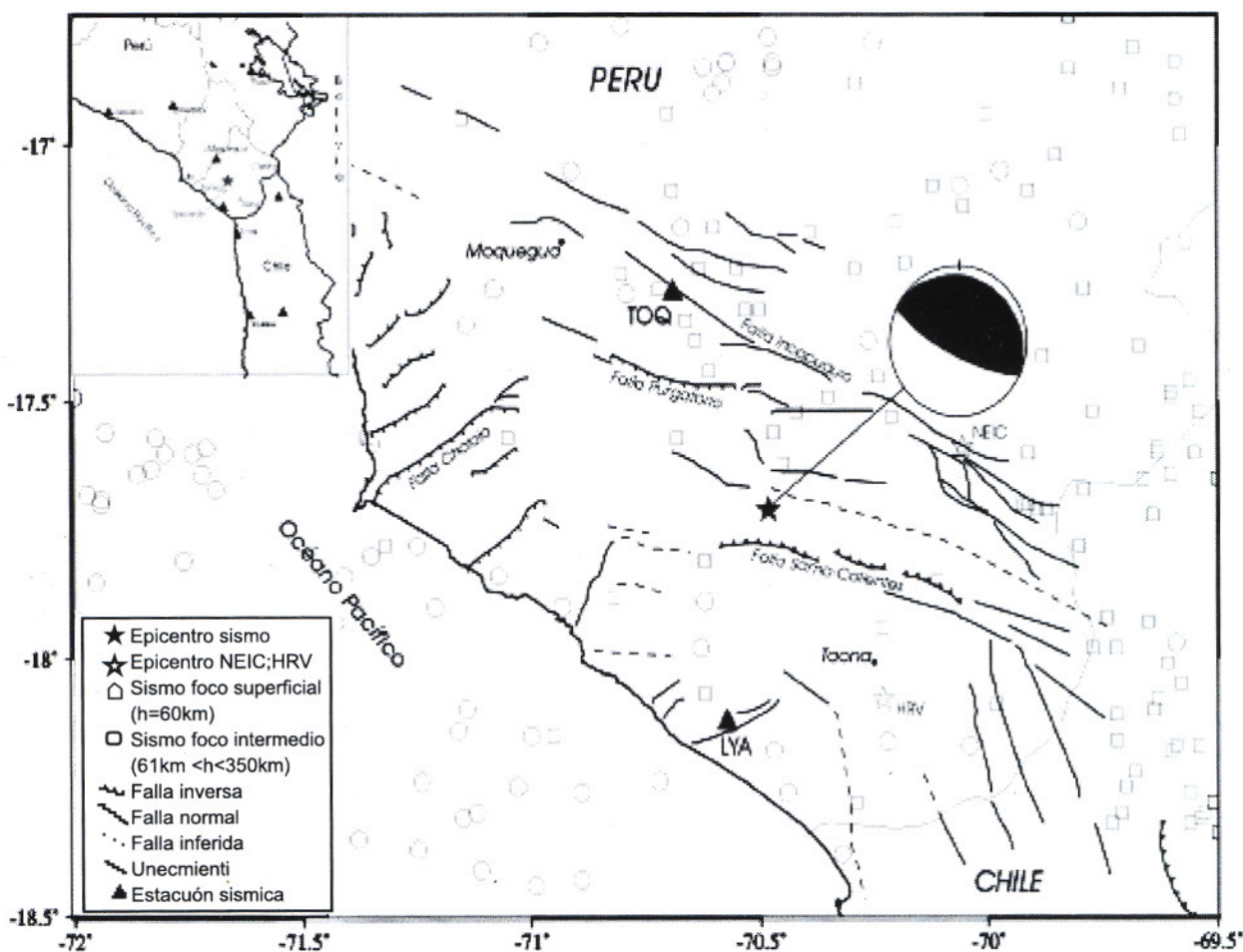


Figura 1.- Distribución especial de la sismicidad presente en la región sur del Perú para el periodo 1980-2006 con magnitudes $ML > 4.0$. Ubicación del epicentro del sismo del 20 de noviembre de 2006 y de las estaciones sísmicas cuya información se utilizó en la localización del sismo. La esfera corresponde al mecanismo focal de tipo inverso (área en negro compresión y blanca dilatación). Las estrellas indican los epicentros reportados por HRV y NEIC (ver texto).

interna de la placa de Nazca a mayores niveles de profundidad.

Los sismos de carácter cortical con foco superficial y magnitud moderada como el ocurrido el 20 de noviembre del 2006 (5.3ML) a quien llamaremos “sismo de Sama”, se producen después de largos periodos de tiempo de acumulación de energía propios de la lenta deformación continental o en la mayoría de los casos debido a los procesos de relación de esfuerzos impuestos en el antearco después de ocurrir un sismo de gran magnitud con origen en el proceso de subducción, tal es el caso del sismo del 23 de junio de 2001 (8.2Mw), el mas grande ocurrido en esta región después de aproximadamente 100 años (Tavera et al., 2006).

En este estudio, se analiza los parámetros hipocentrales del sismo de Sama, así como la orientación y tamaño de su fuente a partir de la cual

se realiza la interpretación sismotectónica a fin de explicar el origen de dicho sismo.

Parámetros Hipocentrales

Para el cálculo de los parámetros hipocentrales del sismo de Sama se ha hecho uso de los datos de 9 estaciones sísmicas pertenecientes a la Red Nacional del Perú (RSN) y a la Red de la Región I de Chile, de esta manera se logra tener buena cobertura sobre el área afectada por el sismo. Para dicho calculo se ha utilizado el programa Hypoinverse (Klein, 1978) y el modelo de velocidad propuesto para la región sur del Perú por Grange (1983). Los resultados permiten ubicar al epicentro en las coordenadas $17.71^{\circ}S$ y $70.48^{\circ}O$ con foco a una profundidad de 17 km. La magnitud del sismo ha sido estimada usando la relación propuesta por Ccallo y Tavera (2002) en 5.3ML.

El epicentro del sismo de Sama reportado por

Tabla 1. Parámetros hipocentrales del sismo del 20 de noviembre de 2006 obtenidos en este estudio y reportados por HRV y NEIC.

Fuente	Latitud	Longitud	Prof.	Mag.			Mo (Nm)	r (km)	Eje P		Eje T	
	Sur	Oeste	(km)	ML	mb	Mw			λ°	ϕ°	λ°	ϕ°
Este estudio	17.71°	70.48°	17	5.3		5.4	1.2	3.7	207°	30°	27°	60°
HRV	18.08°	70.23°	68		5.6	5.5	1.9		171°	20°	57°	48°
NEIC	17.58°	70.06°	43	5.9	5.8	5.6	3.6		212°	2°	314°	6°

la Universidad de Harvard (HRV) y por el National Earthquake Information Center (NEIC) es presentado en la figura 1, junto al obtenido en este estudio (Tabla 1). De estos epicentros, los dos últimos se encuentran sobre importantes trazas de falla que son parte del sistema Incapuquio, aunque se debe asumir que el epicentro reportado por el NEIC tiene mayor incertidumbre debido al uso de datos telesismicos. Sin embargo, se ha visto por conveniente evaluar ambas soluciones utilizando sus parámetros hipocentrales y la ubicación de las estaciones LYA y TOQ, las más próximas a ambos hipocentros. Para tal objetivo, se han calculado los tiempos teóricos de llegada para las ondas P y S usando el algoritmo Hypoinverse y un semiespacio de velocidad constante para la onda P (6 km/seg). A diferencia de los resultados obtenidos para el hipocentro reportado por el NEIC, los tiempos teóricos calculados asumiendo el hipocentro de este estudio, son muy próximos a los tiempos observados en las estaciones LYA y TOQ; por lo tanto, se confirma que estos parámetros hipocentrales han sido mejor determinados debido al uso de información proveniente de estaciones sísmicas locales.

Orientación de la Fuente

La orientación de la fuente para el sismo de Sama ha sido obtenida usando la polaridad de la onda P de un total de 40 registros provenientes de estaciones sísmicas pertenecientes a las redes nacionales de Perú, Bolivia, Chile y Ecuador, además de algunas estaciones de la red sísmica mundial. La solución obtenida indica un mecanismo de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección NO-SE, siendo el plano con buzamiento hacia el NE próximo a la horizontal y el otro a la vertical (Fig. 2).

Las soluciones para el mecanismo focal reportados por el NEIC y HRV para el sismo de Sama a partir del tensor momento, corresponden a fallas inversas con planos nodales orientados en dirección NO-SE y E-O con buzamientos del orden de 45° en el caso del NEIC y de 40° y 73° en el caso de HRV (Fig. 2). Estas soluciones para la fuente difieren de la obtenida en este estudio, tanto en la orientación de los planos

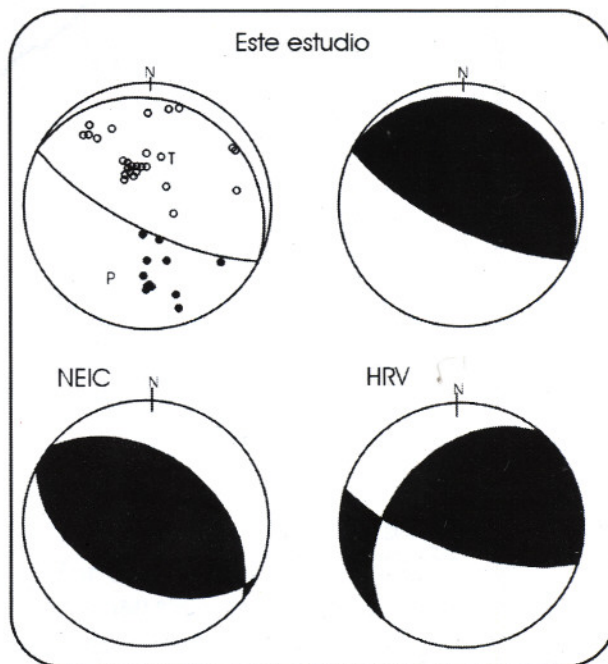


Figura 2.- Soluciones para el mecanismo focal del sismo del 20 de noviembre de 2006 (5.4Mw) reportados por el HRV y NEIC, además del obtenido en este estudio. Las áreas y círculos en negro indican compresiones, las áreas y círculos en blanco las dilataciones. P y T corresponden a los ejes de presión y tensión.

nodales en el caso de HRV como en el buzamiento de los mismos en ambas soluciones (Tabla 1). Sin embargo, se debe considerar que para el mecanismo focal obtenido en este estudio se ha utilizado un gran número de datos (polaridad de onda P), lo cual ha permitido cubrir completamente la esfera focal y así reducir posibles incertidumbre en los parámetros que definen la orientación de la fuente (Fig. 2).

Distribución de Intensidades

El mapa de intensidades de la figura 3 ha sido elaborado utilizando información recolectada mediante encuestas realizadas vía línea telefónica a dos o tres personas de ciudades y localidades afectadas por el sismo. La información obtenida fue interpretada utilizando la escala de Mercalli Modificada (MM). La intensidad máxima evaluada

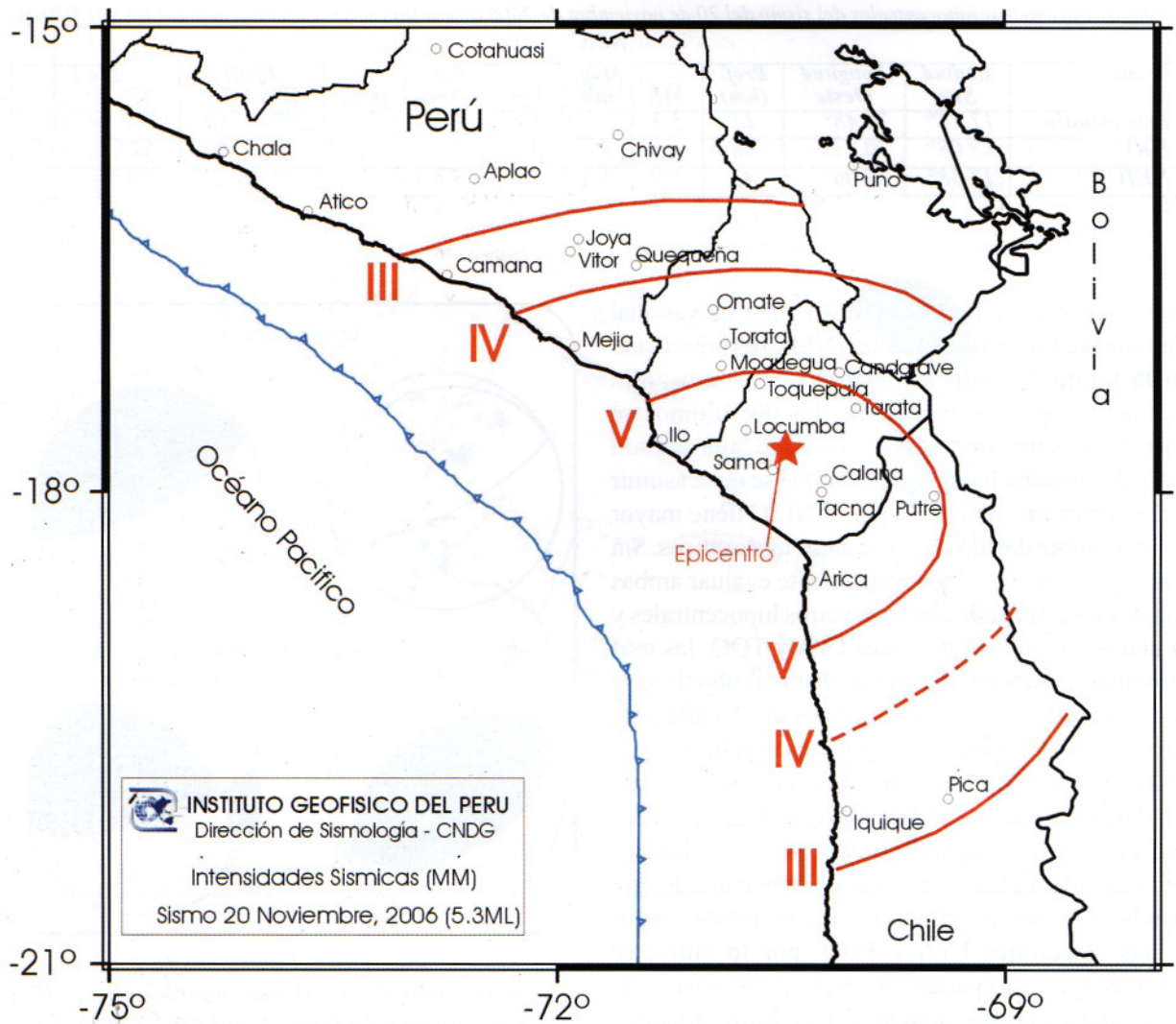


Figura 3.- Mapa de isosistas en la escala Mercalli Modificada para el sismo del 20 de noviembre de 2006 (5.4Mw). La estrella indica la ubicación del epicentro del sismo.

es de V (MM) para un área con radio del orden de 110 km en donde el sismo produjo daños parciales en algunas viviendas con la ruptura de vidrios en ventanas y pequeñas fisuras en paredes de viviendas construidas con adobe, principalmente en las localidades de Sama, Locumba, Tacna y Tarata. En otras localidades aledañas como Calama, Candarave, Las Yaras, Locumba, Toquepala, Torata y Omate, el sismo causó pánico y desesperación en la población. El sismo fue sentido moderado y suave en localidades como Sihuas, Mejia, Vitor, Quequeña, La Joya, Camana, Mollendo y ciudades como Arequipa. En general, el sismo fue sentido desde la localidad de Camana (Arequipa) por el norte hasta Iquique (Chile) por el sur, cubriendo toda la sierra de los departamentos de Tacna y Moquegua.

Parámetros de la Fuente

El momento sísmico y el radio de fractura para el sismo de Sama fueron obtenidos a partir de los espectros de la amplitud del desplazamiento del suelo registrado en las componentes horizontales de las estaciones sísmicas de banda ancha ubicadas en las ciudades de Puno y Huancayo, a 220 y 730 km de distancia del epicentro en dirección NE y NO (Fig. 4). El momento sísmico (Ω_0) y el radio de fractura (r_0) han sido calculados usando las relaciones propuestas por Boatwrigth (1980) y Brune (1970):

$$\Omega_0^S = \frac{M_0 \cdot R_{\theta\theta} \cdot F}{4\pi \cdot \rho_0 \cdot \beta_s^3 \cdot d} \quad r_s = (0.37) \frac{\beta_s}{f_c^S}$$

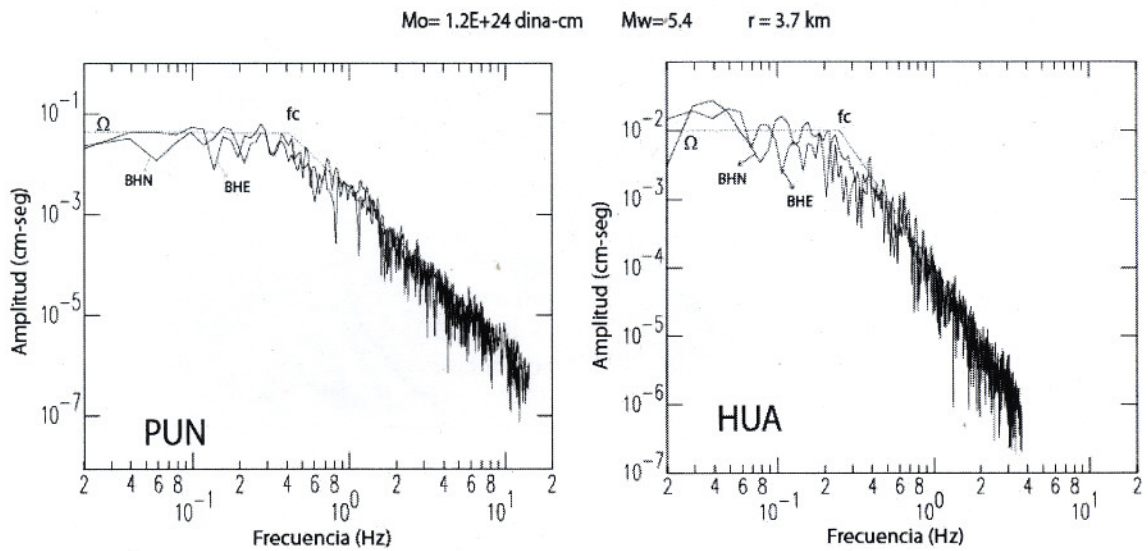


Figura 4.- Espectros del desplazamiento de las ondas S del sismo del 20 de noviembre de 2006 (5.4Mw) registradas en las componentes horizontales de las estaciones de Cotahuasi (CTH) y Huancayo (HUA). BHN y BHE indican componentes de registro en dirección norte-sur y este-oeste.

donde Ω es la parte plana del espectro, β la velocidad de la onda S, ρ la densidad, F el operador en la superficie libre, d la distancia hipocentral y f_c la frecuencia esquina.

El valor promedio obtenido para el momento sísmico es de $1.2E+24$ dina-cm equivalente a un momento sísmico de 5.4Mw y un radio de fractura de 3.7 km (Fig. 4). El valor de M_0 es similar al reportado por HVR y el NEIC (Tabla 1).

DISCUSIÓN

En la región sur del Perú, a diferencia de otras regiones, la ocurrencia de sismos de diversa magnitud y profundidad es mayor, aunque muchos de ellos están asociados principalmente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. La sismicidad de magnitud moderada asociada al importante número de fallas presentes en la región es muy escasa; por lo tanto, no es posible conocer la situación de los esfuerzos causantes de la lenta deformación que se produce en estas regiones. Sin embargo, según estudios realizados por Tavera et al (2006) es posible considerar que el gran sismo ocurrido en la región sur del Perú el 23 de junio de 2001 (8.2Mw), haya acumulado tanta energía en el borde occidental de la cordillera que ella se ha venido liberando con sismos de magnitud moderada asociada a fallas activas como los ocurridos el 26 de mayo del 2003 en Moquegua (5.8Mw), 1 de octubre de 2005 en Moquegua (4.5Mw) y recientemente,

el 20 de noviembre en Tacna con el sismo de Sama (5.4Mw).

Por otro lado, la experiencia ha mostrado que los sismos de magnitud moderada como el de Sama, solo pueden ser correctamente localizados en el espacio haciendo uso de información local proveniente de estaciones sísmicas que permitan tener buena cobertura sobre el área afectada o del posible epicentro. En este estudio, los parámetros hipocentrales para dicho sismo han sido correctamente determinados usando datos de 9 estaciones locales con buena cobertura azimutal, lo cual ha permitido reducir los errores principalmente para la profundidad del foco sísmico. De esta manera, el hipocentro del sismo ha podido ser correlacionado con mayor exactitud con una de las trazas de falla pertenecientes al sistema Incapuquio.

Desde el punto de vista de la tectónica, Audin et al. (2006) indica que la morfología de la región sur del Perú, principalmente en el borde occidental de la Cordillera Andina, muestra claras evidencias de que recientemente se ha desarrollado importante deformación tectónica. El análisis de fotografías aéreas, mapas satelitales y trabajos de campo ha permitido además identificarse nuevas estructuras adicionales que han afectado terrazas jóvenes y a sedimentos cuaternarios presentes en el antearco de la región sur. Muchos de los indicadores de esta tectónica reciente pueden ser explicados con la

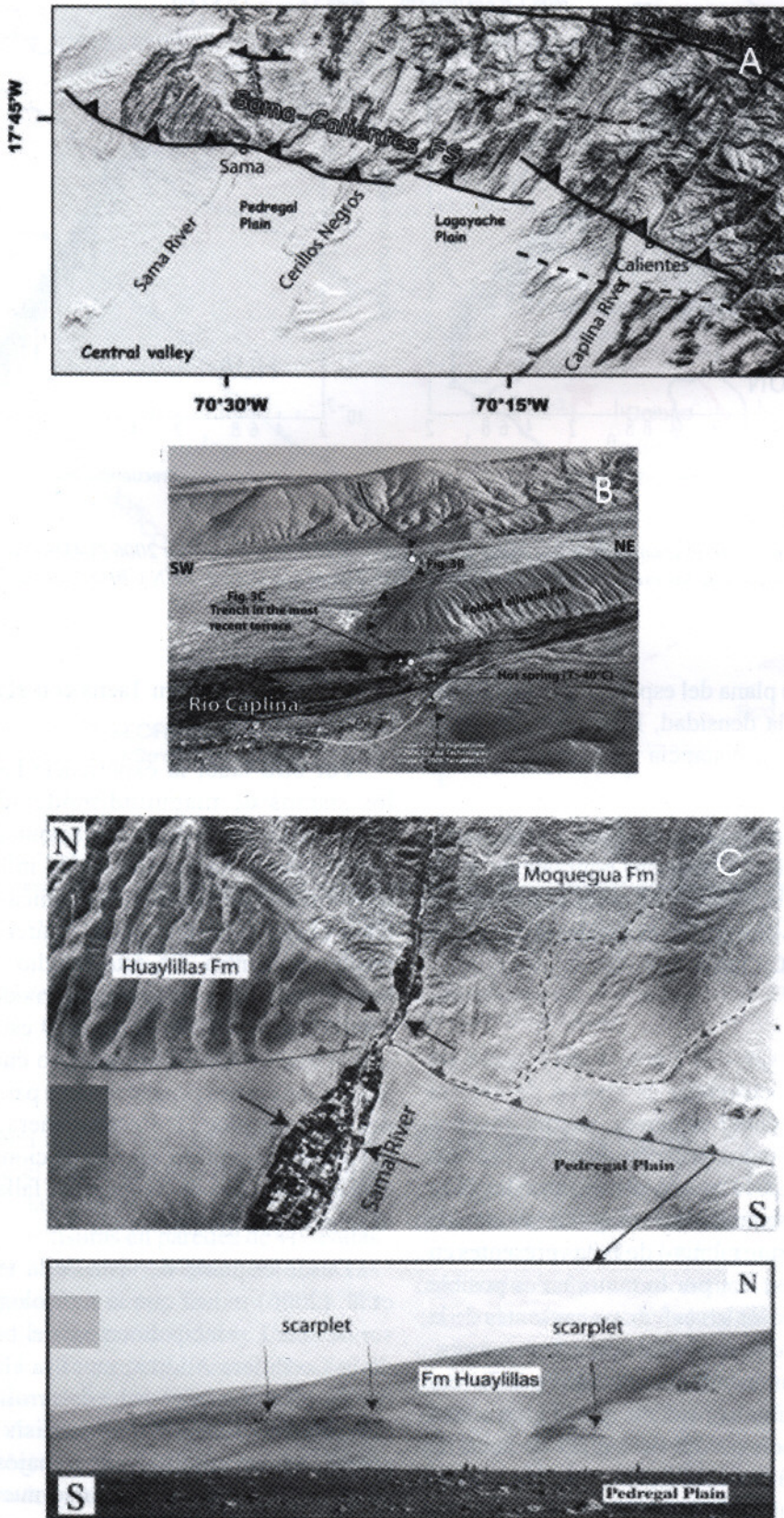


Figura 5.- Imágenes SRTM que muestran la topografía del área de estudio y la ubicación de las trazas de la falla Sama-Calientes (A,B). En la parte inferior, ejemplo de una escarpa reciente sobre la falla Sama-Calientes (C).

ocurrencia de actividad sísmica cortical y otros por los procesos de relajación de esfuerzos acumulados en la corteza debido a la ocurrencia de sismos de gran magnitud con origen en el proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana.

En la región sur del Perú, el sistema de fallas Incapuquio con 200 km de longitud en promedio, se constituye como la mayor estructura tectónica presente en la región debido a que esta formada por varios segmentos de fallas que presentan, desde el Oligoceno, una compleja historia de formación que aun no es muy comprendida (Jacay et al., 2002). Alrededor de este sistema, existen otras fallas pequeñas de tipo inverso, normal o asociados a plegamientos, todos con similar geometría que el sistema principal aunque aun no han sido estudiados en detalle. De estas fallas sobresalen las de Sama-Calientes y Purgatorio, ambas ubicadas al oeste de las fallas mayores del sistema Incapuquio y que fueron recientemente descritas en detalle por Audin et al (2006).

La falla Sama-Calientes es de tipo inversa y presenta una orientación NO-SE a lo largo de unos 50 km, además de estar compuesta por varios segmentos en escalón que muestran flexuras, plegamientos y escarpas de 1 a 2 metros de altura sobre la Formación Huaylillas y de otras formadas durante el Cuaternario (Fig. 5). De acuerdo a la ubicación

del epicentro del sismo de Sama y al mecanismo focal obtenido en este estudio, este habría tenido su origen en el extremo ubicado más al NO de la falla Sama-Calientes. Sin embargo, de acuerdo a la geometría de la falla descrita por Audin et al. (2006) y al mecanismo focal, el plano de falla buzará con un ángulo de 15° en dirección NE, y de acuerdo a la distancia existente entre el epicentro y la traza de la falla, además de la profundidad del foco sísmico estimada en este estudio (17 km), es posible que la falla Sama-Calientes presente una geometría de falla inversa con bajo ángulo en profundidad, esto como resultado del tectonismo típico de los procesos de deformación como el que se desarrolla en el borde occidental de la Cordillera Andina de la región sur de Perú.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Estela Minaya, Alexandra Alvarado, Carlos Alvear y Bianca Glass por proporcionar registros sísmicos. Asimismo, al Consorcio IRIS por los datos de la red sísmica mundial. Al personal de la Jefatura de Redes Geofísicas del IGP por el trabajo que realizan para mantener operativa la Red Sísmica Nacional del Perú. Asimismo, al IRD por los trabajos de tectónica activa en el Sur de Perú. Esta publicación es una contribución de la Dirección de Sismología del IGP, N°026-CNDG-SIS/07.

REFERENCIAS

- Audin, L., Claire, D., Sarah, H. & Daniel, F., Gerard, H. (2006). Geomorphic evidences of recent tectonic activity in the forearc, southern Peru. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, (en imprenta).
- Boatwright, J. (1980). A spectral theory for circular seismic sources: simple estimates of source dimension, dynamic stress drop and radiated energy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71, 69-94.
- Brune, J. (1970): Tectonic stress and seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.
- Ccallo, F. & Tavera, H. (2002). La magnitud de sismos locales y regionales ocurridos en Perú a partir de la onda LG y duración de su registro. *Bol. Soc. Geol. Perú*, V94, 61-69.
- Grange, F. (1983). Etude sismotectonique detaille de la subduction lithospherique au sud Perou. These pour Doctur 3er Cycle. Univ. Scientifique et Medicale de Grenoble, 400 p.
- Jacay, J., Sampere, T., Husson, L. & Pino, A. (2002). Structural characteristics of the Incapuquio Fault System, southern Peru. *Extended Abstract, 5° International Symposium on Andean Geodynamics*, 319-321.
- Klein F. (1978). Hypocenter location program hipoinverse. US, Geological Survey Open Field Report, 78-694.
- Tavera, H., Fernandez E., Bernal I., Antayhua Y., Agüero C., Rodriguez S., Zamudio Y., Portugal D., Inza A., Carpio J., Ccallo F. & Valdivia I. (2006). The southern region of Peru earthquake of June 23rd, 2001. *Journal of Seismology*, DOI: 10.1007/s10950-006-9014-2