

GEOMETRÍA, MORFOLOGÍA Y PELIGRO SÍSMICO DE LA FALLA PURGATORIO MIRAVE – ANTEARCO DEL SUR DEL PERÚ

GEOMETRY, MORPHOLOGY AND SEISMIC HAZARD OF THE PURGATORIO MIRAVE FAULT-FOREARC SOUTHERN PERU

Carlos Benavente¹ y Laurence Audin²

RESUMEN

La actividad sísmica del Perú tiene su origen en el proceso de convergencia de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. La geometría de la margen continental del Sur del Perú es un factor que condiciona la partición de esfuerzos y/o distribución de la deformación en el Antearco y la Cordillera Occidental, dando como resultado sistemas de fallas de dirección NO-SE como el sistema de falla Incapuquio (SFI), la falla Sama Calientes (FSC), falla Purgatorio Mirave (FPM), entre otros.

La falla Purgatorio Mirave se ubica en la vertiente del Pacífico de la Cordillera Occidental en el sur del Perú, entre los departamentos de Tacna y Moquegua. Tiene una expresión morfoestructural a lo largo de 50 km, donde la placa oceánica subducta con un ángulo de 30° al Este y el vector de convergencia es oblicua. Cabe mencionar que el extremo Sureste de la falla Purgatorio Mirave se conecta con el Sistema de Falla Incapuquio. En el presente artículo se demuestra la actividad de la falla Purgatorio Mirave y su asociación con la deformación compresiva del Piedemonte Occidental de los Andes.

La falla Purgatorio Mirave, por su geometría, morfoestructura y cinemática, se puede dividir en tres segmentos: El segmento Este presenta un trazo de falla rectilíneo, morfoestructura bien conservada y un último movimiento de tipo inverso. El segmento Central presenta un trazo rectilíneo y escarpe de falla conservado, siendo el de mayor desnivel (3.5 m). En este segmento Central la falla Purgatorio Mirave afecta depósitos cuaternarios donde las estrías del plano de falla nos indican un movimiento de tipo dextral. El segmento Oeste presenta un trazo curvilíneo para luego formar una geometría de tipo cola de caballo hacia el sector más occidental. Este segmento muestra evidencias de últimos movimientos de tipo inverso, formando pliegues por flexión de falla, que afectan a depósitos cuaternarios y cenizas del volcán Huaynaputina emitidas en el año 1600 DC.

La determinación de la geometría, análisis morfoestructural y cinemática de la falla Purgatorio Mirave, nos permitió calcular un momento magnitud (Mw) de 6.3, 6.5 y 6.6 para el segmento Este, Central y Oeste respectivamente, utilizando las relaciones de Wells y Coppersmith (1994) y Stirling et al. (2002); además, de calcular una ley de atenuación de aceleraciones de 250 cm/seg² equivalente a VII grados de intensidad en la escala Modificada de Mercalli, para la ciudad de Moquegua.

Palabras claves: Falla Purgatorio Mirave, tectónica activa, geomorfología, Andes, sur Perú

ABSTRACT

The seismic activity of Peru has its origin in the process of convergence of the Nazca Plate under the South American Plate. The geometry of the continental margin of southern Peru is a factor that determines the partition of efforts and/or distribution of the deformation in the Antearco and the Western Cordillera, forming systems of NW-SE faults like the Incapuquio Fault (SFI), Sama Calientes Fault (FSC), Purgatorio Mirave Fault (FPM), among others.

¹ INGEMMET Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima-Perú, cbenavente@ingemmet.gob.pe

² Institut de recherche pour le développement-IRD, LMTGToulouse now OSUG Grenoble, laurence.audin@ird.fr

Purgatorio Mirave Fault (FPM) is located in the pacific slope of the Western Cordillera between the departments of Tacna and Moquegua. It has morfoestructural expression along 50 km where the ocean plate subducts on a 30° angle to the East and the vector of convergence is oblique. It is important to mention that the South-east end of the FPM is connected to the System of Incapuquio Fault (SFI). In this article the activity of FPM and its association with the compressive strains at the western foothills of the southern Peru Andes are demonstrated.

Based on its geometry, structure and kinematics the FPM is subdivided in three segments: Segment East presents a rectilinear fault line, a well conserved structure and a reverse last movement. The Central Segment presents a rectilinear line and conserved fault escarpment, which is the greatest slope of the FPM (3.5 m). In this Central segment the FPM affects Quaternary deposits, where the striations of the fault plane indicate a movement of dextral type. The West Segment presents a curvilinear line which forms a horse-tail geometry to the west. This segment shows evidence of reverse last movements, forming folds by fault flexion that affect Quaternary deposits and Huaynaputina volcano ashes (1600 A.D).

The determination of geometry, structural analysis and kinematics of the FPM allowed to determine a magnitude (M_w) of 6.3, 6.5 and 6.6 for the East, Central and Western segments, respectively, using the relations of Wells & Coppersmith (1994) and Stirling et al. (2002). Also, it was possible to calculate an attenuation law of 250 cm/seg² accelerations equivalent to VII degrees in the Modified Mercalli intensity scale of Moquegua city.

Keywords: *Purgatorio Mirave Fault, active tectonic, geomorphology, Andes, Southern Peru*

INTRODUCCIÓN

En la vertiente del Pacífico de la Cordillera Occidental son conocidos eventos sísmicos de magnitud elevada (M_w 8) asociados con el proceso de subducción desarrollado a lo largo de toda la margen pacífica. El Antearco de los Andes presenta una pendiente elevada desde los -6000 m de la Fosa Oceánica hasta alcanzar alturas máximas en los picos volcánicos de la Cordillera Occidental, como el Misti que alcanza los 5800 m, esto en menos de 250 km de distancia. En la mayoría de las cadenas de montañas altas alrededor del mundo, al menos parte del alzamiento o de su gradiente topográfico está asociado a tectónica activa y esfuerzos compresionales. En el Sur del Perú, aunque existen estudios neotectónicos y descripciones de la topografía en esta región de los Andes Centrales (Sébrier et al., 1985), los autores concluyen la presencia de fallas normales.

Una pregunta por resolver es determinar si el gradiente topográfico del Antearco de los Andes Centrales se asocia a sistemas de fallas activas de tipo inverso que se extienden paralelas a la fosa oceánica y en el piedemonte de la Cordillera Occidental del Sur del Perú.

Sébrier et al. (1979), Sébrier et al. (1982), Sébrier et al. (1985), Macharé (1986), Fenton et al. (1995), Audin et al. (2008), Benavente et al. (2008a,b), señalan que los depósitos del Cuaternario en el Sur del Perú están afectados por fallas activas, estudiando

algunas de estas en detalle sin señalar el sistema descrito en el presente estudio.

Estas fallas producen sismos corticales de magnitudes M_I 4 a 5, sismos que se encuentran registrados en el catálogo sísmico de los últimos 40 años. Sin embargo, el análisis geomorfológico en el Antearco del Sur del Perú (Audin et al., 2006) muestra claras evidencias de actividad tectónica cuaternaria relacionada a sismos de $M_w > 6$ con rupturas de superficie (Benavente et al., 2008a, b).

La falla Purgatorio-Mirave (FPM), se ubica en la vertiente del Pacífico de la Cordillera Occidental del Sur del Perú, entre la ciudad de Tacna y Moquegua (Fig.1). Afecta al piedemonte de la Cordillera Occidental en la zona del antearco con una longitud de 50 km (Fig. 1), donde la placa oceánica subducta con un ángulo de 30° al Este y el vector de convergencia es oblicua en relación a la zona de contacto de las placas.

CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

Las rocas del Cretácico superior afloran al noreste de la falla Purgatorio-Mirave (Fig. 2) y están compuestas por lavas andesíticas porfíricas de color gris oscuro intercaladas con depósitos de flujos piroclásticos de pómez y de cenizas, rico en líticos, pertenecientes a la Formación Quellaveco. Además, afloran unidades Cenozoicas compuestas

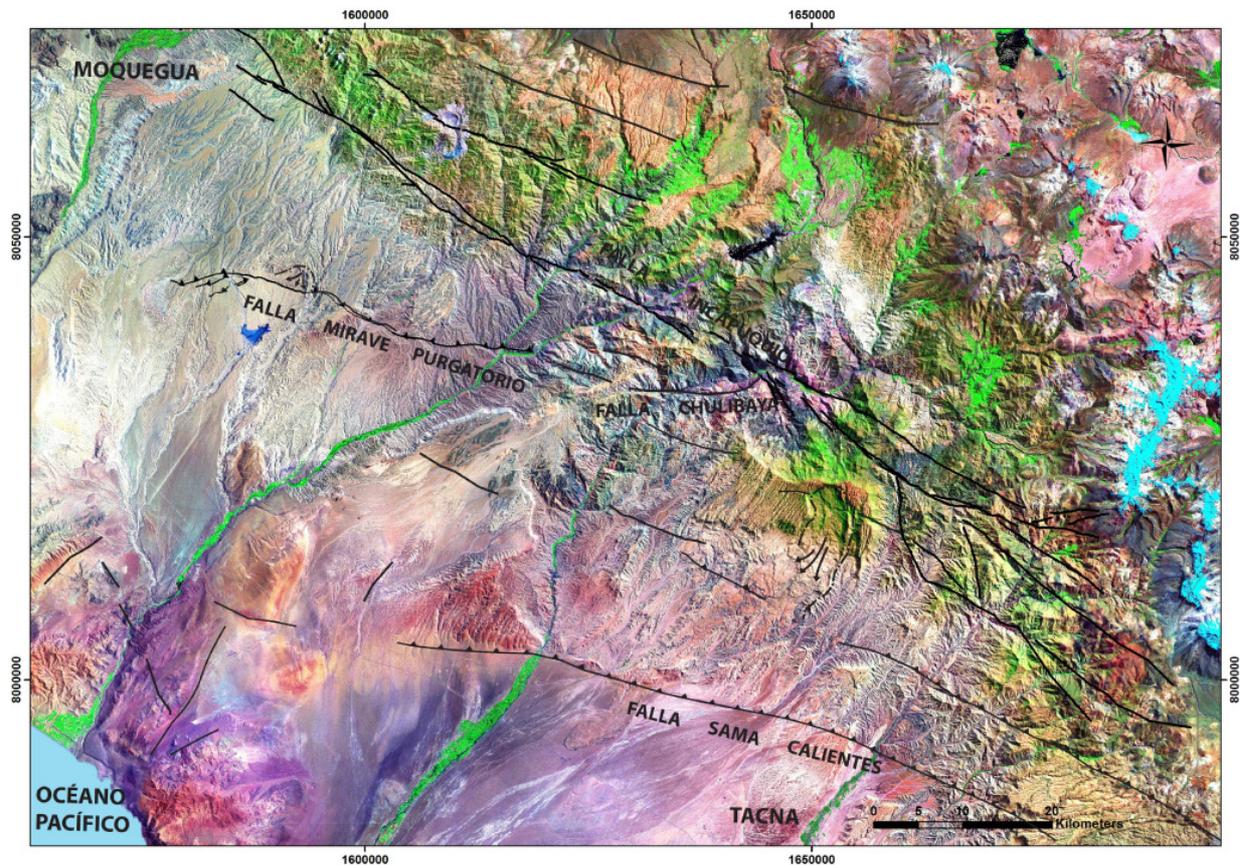


Figura 1. Imagen satelital LANDSAT mostrando las fallas principales de la Cordillera Occidental del sur del Perú, entre ellas la Falla Purgatorio Mirave. Además se puede observar dos escarpes de deslizamientos afectando las ignimbritas de la Formación Huayllillas.

por intercalaciones de conglomerados polimícticos, areniscas y limolitas de color rojizo pertenecientes a la Formación Moquegua (Eoceno a Mioceno), esta sobreyace en discordancia a la Formación Quellaveco (Quang et al., 2005).

Suprayaciendo a la Formación Moquegua se tiene la Formación Huayllillas, en la que se puede distinguir dos miembros: el Miembro inferior consta de depósitos de flujos piroclásticos de cenizas y cristales de composición riódacítica. El Miembro superior consiste en depósitos de flujos piroclásticos de cenizas de composición riolítica a riódacítica de color rosado, con algunos niveles de depósitos de caída de pómez constituidas por cristales de cuarzo, plagioclasa y biotita.

Al Noreste del área de estudio afloran granodioritas, monzodioritas y dioritas que intruyen a rocas Jurásicas y Cretácicas. Beckinsale et al. (1985) determina que estas rocas tienen una edad de 64 ± 3 y 68 ± 3 Ma mediante el método Rb-Sr. Estas edades fueron corroboradas por Monge et al.

(2000) que obtuvo edades de 60.4 ± 0.70 a 70.1 ± 0.9 Ma, con el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, en una aplita de la Mina Tojenes.

Los conglomerados polimícticos pliocuaternarios moldean las Pampas Costeras y rellenan los valles formando terrazas aluviales de tipo encajonado (Benavente et al., 2008a). Además, se tienen aportes de sedimentos por grandes deslizamientos que se muestran como grandes cicatrices en la vertiente del Pacífico de la Cordillera Occidental (Fig. 1).

En la última década se desarrollaron diversos estudios sobre sedimentación e incisión durante el Cuaternario en el Sur del Perú, llegando a determinar los procesos de sedimentación e incisión de la superficie de las Pampas Costeras (Tosdal et al., 1984; Quang et al., 2005). La sedimentación en el Sur del Perú cesó después de 7.9 Ma, de aquí, en adelante comenzó una nueva etapa de incisión y formación de terrazas aluviales. Hall et al. (2008) tomaron muestras de la superficie de terrazas aluviales y del nivel más bajo de las quebradas a lo largo de todo el Antearco

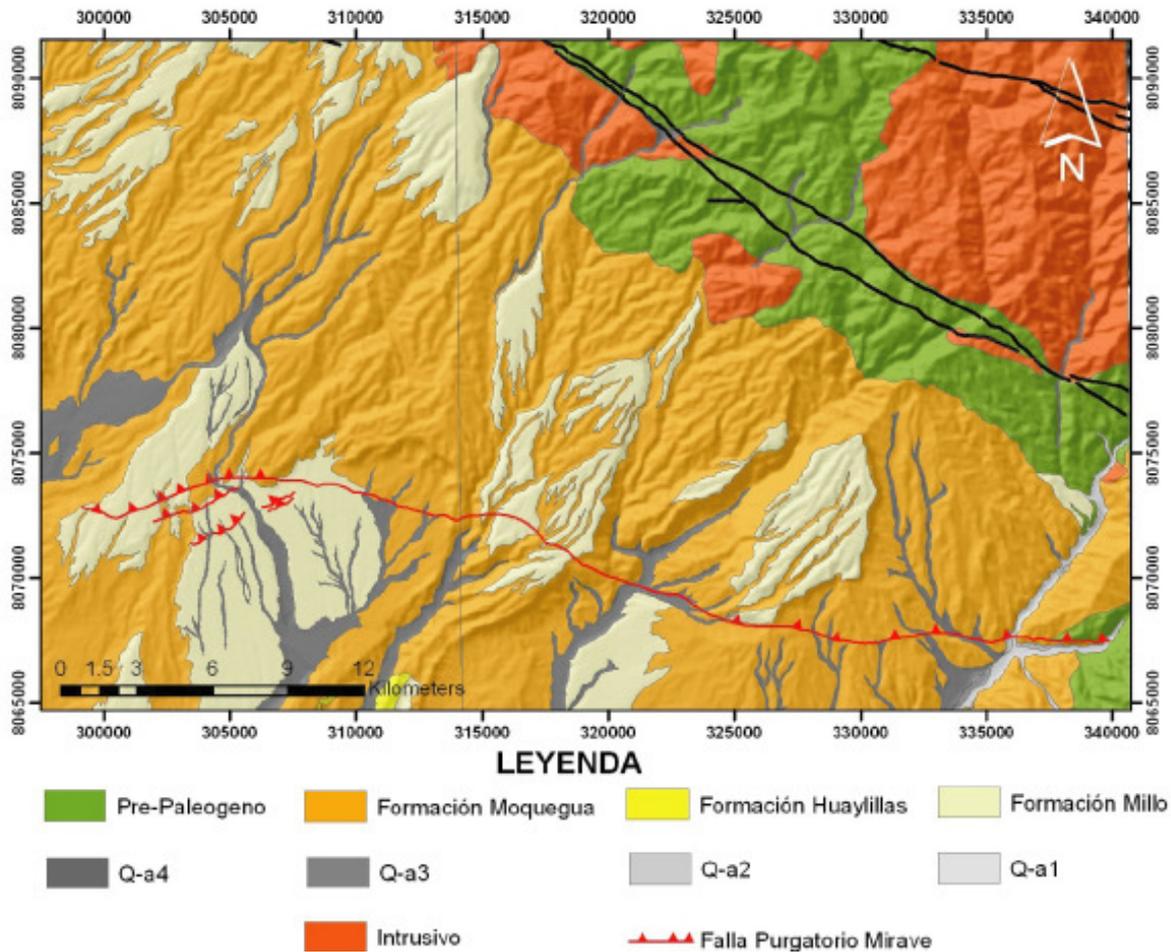


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio. Modificado de Martínez y Zuloaga (2000).

del Sur del Perú, proporcionando edades entre 300 ka y 100 ka utilizando nucleidos cosmogénicos ^{10}Be . Estas superficies se encuentran deformadas por la actividad de la falla Purgatorio Mirave.

MORFOLOGÍA, GEOMETRÍA Y CINEMÁTICA DE LA FALLA PURGATORIO-MIRAVE

La falla Purgatorio Mirave a lo largo de su trazo presenta diferentes características en su geometría, morfoestructura y cinemática, por tal motivo la dividimos en tres segmentos: a. Segmento Este, b. Segmento Central y c. Segmento Oeste (Fig. 3).

Segmento Este

Este segmento se asocia probablemente a la falla Chulibaya cartografiada por Sébrier et al. (1985) en la localidad del mismo nombre, aunque la falla Chulibaya sea descrita como normal (Fig. 1).

El segmento este tiene una longitud de 12 km,

se extiende desde la localidad de Ticapampa hasta el Noroeste de la localidad de Mirave con un rumbo aproximado a $\text{N}80^{\circ}\text{E}$ (Fig. 3).

El extremo este (cerro Ticapampa) se caracteriza por poner en contacto unidades del Cretácico superior (Formación Quellaveco) con unidades del Eoceno a Oligoceno superior (Formación Moquegua), con un movimiento inverso (Fig. 4).

En la Quebrada Mirave se puede apreciar un escarpe de falla de morfología bien conservada de 4 m de desnivel, haciendo aflorar los conglomerados de la Formación Moquegua (Fig. 5). En la cara libre del escarpe se observan clastos estriados, fracturados y desplazados indicando un movimiento de tipo inverso con componente transcurrente dextral.

Las medidas de estrías fueron procesadas con el software FaultKinWin (Allmendinger, 2001). Para este sector se muestra la representación gráfica (Fig.

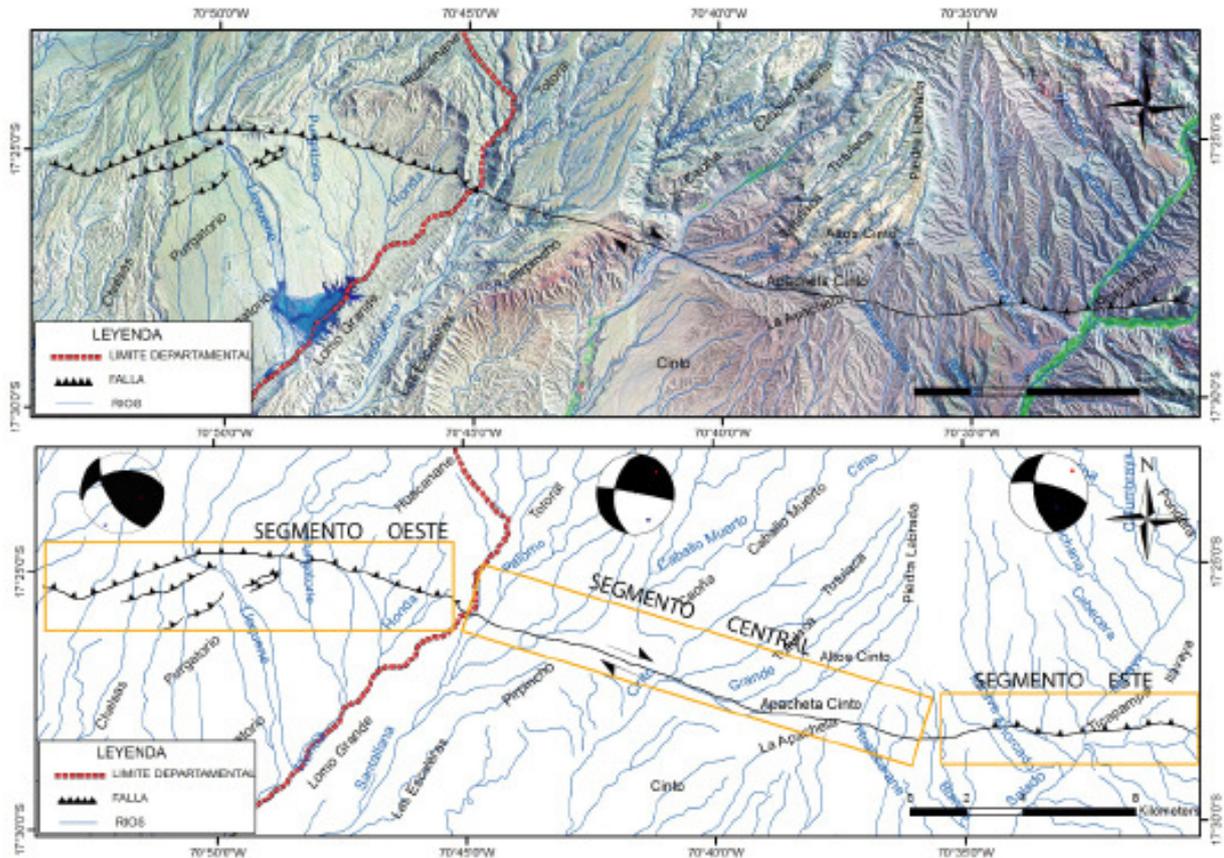


Figura 3. Imagen LANDSAT donde se muestra el trazo de la falla Purgatorio Mirave. En la figura inferior se observa la red hidrográfica en líneas azules y diedros rectos calculados a partir de medidas de estrias para cada segmento. Se puede observar que la red hidrográfica en el Segmento Central está deformada por el movimiento de rumbo dextral de la falla.

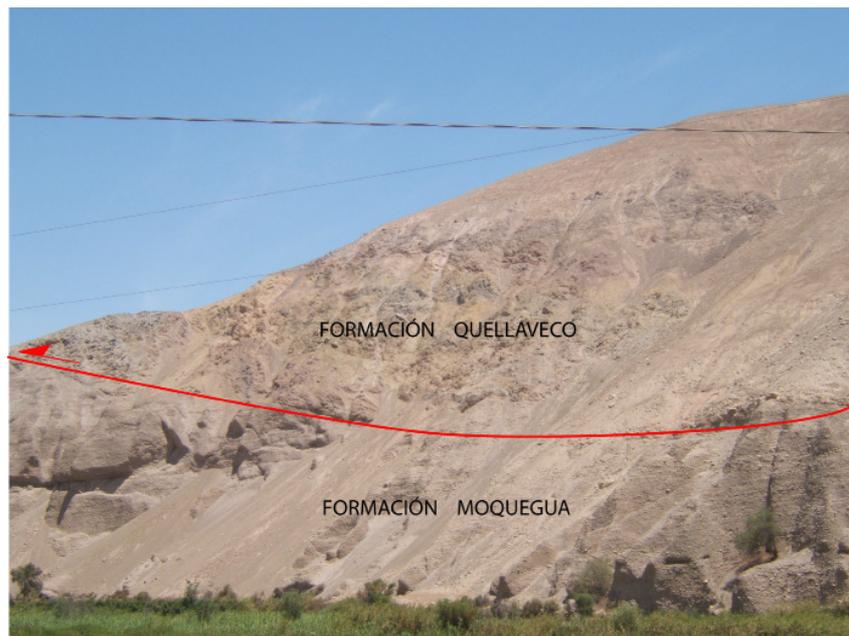


Figura 4. Segmento Este de la falla Purgatorio Mirave donde pone en contacto la Formación Quellaveco sobre la Formación Moquegua.



Figura 5. Escarpe de falla Purgatorio Mirave en la quebrada Mirave. Se observa un desnivel de 3.5 m en la superficie. Tiene un movimiento de tipo inverso que hace aflorar la Formación Moquegua. Fotografía tomada hacia el Norte.

3), donde se observa un régimen compresivo (color negro) con componente transcurrente dextral, siendo el eje de compresión N50°E.

Segmento Central

Se extiende desde el noroeste de la localidad de Mirave hasta la quebrada Santallana con una longitud de 17 km y rumbo N110°E (Fig. 3). A lo largo de su trazo se puede observar las unidades cenozoicas y cuaternarias deformadas.

El trazo de falla es rectilíneo y la morfología del escarpe se encuentra conservada con una altura

de 3.5 m, que puede ser apreciado en el cerro Los Ángeles, a 4 km al noroeste de la localidad de Mirave (Fig. 3 y 6).

A pesar de la aridez de la zona (Kober et al., 2007; Hall et al., 2008) el escarpe no fue conservado en todas las quebradas quedando solo pequeños desniveles en los depósitos aluviales. En cambio, las características morfoestructurales de la falla se encuentran conservadas en litologías más antiguas y compactas.

En este segmento se pueden apreciar cambios en la red hidrográfica y en la morfología de los depósitos

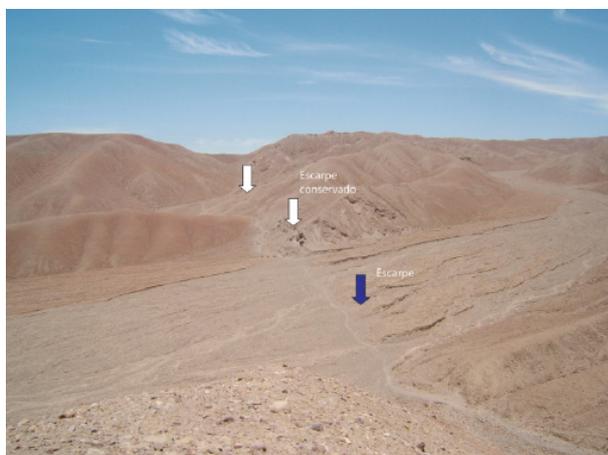


Figura 6. A la izquierda, la falla Purgatorio Mirave afecta depósitos aluviales de la quebrada Ahorcado, la flecha azul señala el escarpe más reciente, este afecta depósitos aluviales <100 000 años (Hall et al., 2008); vista al Norte. A la derecha escarpe conservado, posiblemente producto del desplazamiento relacionado con varios eventos sísmicos de magnitud igual o mayor a 6.

producto de la reactivación de la falla. El movimiento de tipo transcurrente dextral fue corroborado con medidas de estrías hechas en el plano de falla. Otra característica de este segmento es su buzamiento de aproximadamente 90° .

A partir de las medidas de estrías tomadas en campo obtuvimos una representación gráfica de población de fallas utilizando el método de los diedros rectos con el software FaultKinWin (Fig. 7), dando como resultado un movimiento de tipo dextral, que es coherente con el análisis morfológico.

Segmento Oeste

El segmento Oeste de la falla Purgatorio Mirave se extiende de Este a Oeste, desde la Quebrada Santallana hasta el cerro Altos de Jaguar, a lo largo de 21 km (Fig. 3). La falla tiene una forma curvilínea hacia el sector más occidental y se presenta en segmentos, generando una geometría de tipo echelón o tipo cola de caballo (Fig. 8). Así, en la Quebrada Santallana se observa que las unidades cenozoicas y cuaternarias se encuentran deformadas por movimientos de tipo inverso llegando a formar

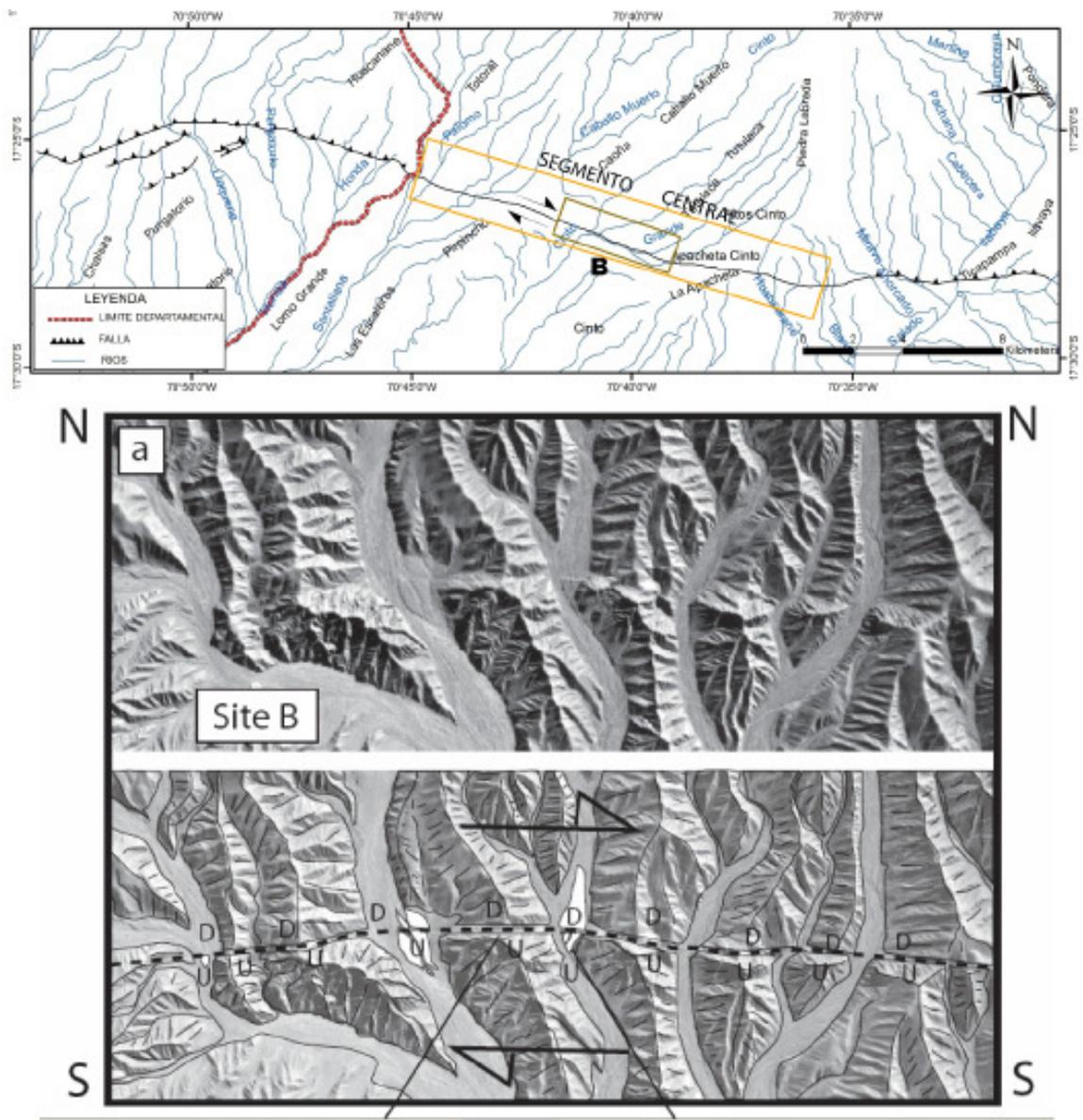


Figura 7. Análisis geomorfológico de parte del Segmento Central de la falla Purgatorio Mirave. En la figura superior se observa el trazo de la falla y en líneas azules se muestra la red hidrográfica desplazada debido al movimiento de tipo transcurrente dextral.

pliegues. La falla en este sector tiene un buzamiento de 80°E .

En la quebrada Honda se observan evidencias de reactivación de la falla, como son: la variación de la red fluvial, incisión en el labio levantado de la falla; a pesar de tratarse de un sector árido se observa vegetación alineada a la falla. El escarpe de falla en esta zona se encuentra erosionado.

A partir de la quebrada Purgatorio, la falla se ramifica generando una geometría en cola de caballo constituido por pequeños segmentos de hasta 2 km. Estos segmentos tienen un rumbo aproximado de $\text{N}80^{\circ}\text{E}$ y muestran evidencias de movimiento inverso, con pliegues por flexión de falla que afectan niveles delgados de cenizas volcánicas, posiblemente del Huaynaputina (1600 DC).

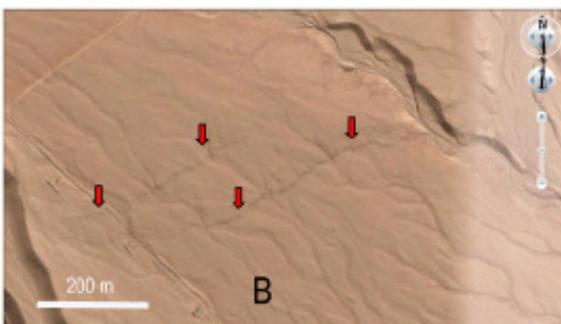
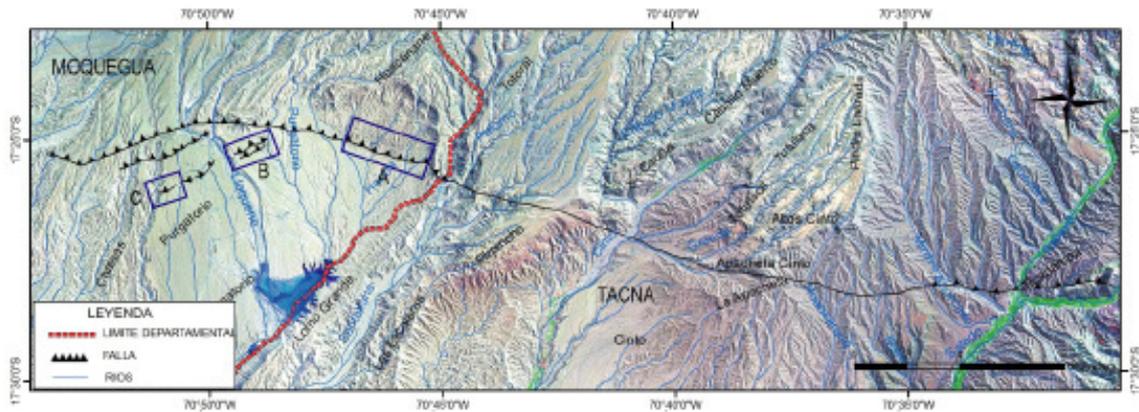


Figura 8. En la figura superior se observa el trazo de la falla Purgatorio Mirave en una imagen LandSat. En la figura A observamos la traza de falla afectando abanicos aluviales, las figuras B y C muestran en detalle segmentos de la falla formando una geometría en cola de caballo o echelón. Figuras A, B y C de Google Earth.

SISMICIDAD EN EL ANTEARCO DEL SUR DEL PERÚ

El sur del Perú presenta sismicidad intracontinental registrada por redes temporales entre 0 a 40 km de profundidad. Esta sismicidad está relacionada a fallas activas (Grange et al., 1984; David, 2007) . Las fallas activas mas notorias son: la falla Incapuquio que representa el rasgo estructural más marcado del Sur del Perú. La falla Purgatorio Mirave cambia de rumbo en su extremo Este y parece unirse a la falla Incapuquio. En consecuencia, se interpreta que la falla Purgatorio Mirave sería una conjugada del sistema transcurrente sinistral de la falla Incapuquio, de aquí se explica el movimiento transcurrente dextral. De igual forma se interpreta la falla inversa Sama Calientes que constituye el límite del Piedemonte del Pacífico y las Pampas Costeras de la región del Sur del Perú (Audin et al., 2006; Benavente et al., 2008a).

Sébrier et al. (1985) describe una falla normal al sureste de la localidad de Mirave, y mediante el análisis de uno de los planos de falla, esta refleja una historia compleja donde resaltan los movimientos transcurrentes dextrales.

PELIGRO SÍSMICO

La definición de peligrosidad sísmica varía según el ámbito científico y técnico. Desde el punto de vista de la sismo-tectónica, neotectónica y la geología de los terremotos; la peligrosidad sísmica se entiende como la probabilidad o posibilidad de que ocurra un terremoto de un tamaño dado en una determinada área o falla concreta. En el ámbito de la ingeniería sísmica se define como la intensidad del movimiento del terreno debido al paso de las ondas sísmicas asociadas a una probabilidad de ocurrencia dentro de un periodo de tiempo determinado.

La caracterización de una falla, con fines aplicativos a la peligrosidad sísmica, comprende dos objetivos fundamentales:

- La estimación de la magnitud máxima posible que la geometría de la falla puede producir.
- La recurrencia media de tal evento.

Para lograr el primer objetivo es necesario estudiar la zona de falla desde el punto de vista morfoestructural y establecer los diferentes segmentos en los que esta pueda dividirse, ya sea por cambios bruscos en la dirección y diferente estilo de deformación.

El resultado del estudio morfoestructural debe conducir a la estimación de la longitud máxima de rotura en cada segmento. Para alcanzar del segundo objetivo es necesario estimar con la mayor precisión posible la edad de las deformaciones más recientes asociadas a la falla, y cuando sea posible determinar la cinemática de la falla durante el Cuaternario. Este tipo de estudios no se han realizado en el Perú.

En general, se puede admitir que en las fallas donde no se han reconocido deformaciones de edad, al menos del Pleistoceno superior, la recurrencia del sismo máximo será mayor de 10 000 años (Costa et al., 2001). La falla Purgatorio Mirave es una de las fallas interplaca descrita en el antearco andino. El estudio morfológico de los depósitos recientes afectados por pliegues o escarpes de hasta 4 m bien preservados, permite concluir que la falla Purgatorio Mirave fue activa varias veces durante el Cuaternario, y al menos una vez desde hace 10 000 años. Esto es conocido por la datación de un abanico aluvial afectado por el escarpe de falla (Hall et al., 2008). Otro punto es la observación de fracturas abiertas que pudo desarrollarse a lo largo del sistema de fallas activas durante el terremoto de subducción del 2001. Sin embargo, la falla Purgatorio Mirave no se reactivó, sino que, la zona previamente fracturada permitió acomodar el movimiento sísmico de la placa superior.

Desde hace varias décadas muchos científicos vienen realizando estudios con la finalidad de hallar la relación entre las fallas activas y los sismos (Kanamori y Anderson, 1975; Slemmons, 1977, Kanamori, 1978; Slemmons et al., 1989; Wells y Coppersmith, 1994), a partir de datos como la longitud de la falla, tasa de deslizamiento y periodo de recurrencia. Para esto se utiliza el cálculo del momento sísmico (M_0) y del momento magnitud (M_w) mediante cálculos matemáticos. Estos se determinan a partir de los datos obtenidos del análisis de la geometría, cinemática y morfología de las fallas activas.

Entonces, con los parámetros expuestos anteriormente, la falla Purgatorio Mirave puede producir sismos que varían desde 6.3 hasta 7.1 de magnitud (M_w), como se muestra en la tabla 1: Por consiguiente, debido a su ubicación representa un peligro para los departamentos de Tacna y Moquegua, ya que puede afectar a las poblaciones y su infraestructura.

Con la finalidad de calcular la vulnerabilidad del

Tabla 1. Cálculo del Momento magnitud (M_w) para cada segmento de la falla Purgatorio Mirave a partir de los cálculos propuestos por Wells y Coppersmith (1994) y Stirling et al., (2002)

SEGMENTO	Strike	SRL (km)	Age (ka)	V (m)	Slip-Rate mm/yr	M_w (WC1994)	M_w (St02)
ESTE	NO-SE	12	10	1.5	0.150	6.3	6.5
CENTRAL	NO-SE	17	10	1.5	0.150	6.5	6.6
OESTE	NO-SE	21	10	1.5	0.150	6.6	6.7
Total	NO-SE	50	10	1.5	0.150	7.1	7.1

SEG= segment name, SRL= surface rupture length, V= total vertical displacement
 WC= Wells and Coppersmith (1994); St02 = Stirling et al. (2002)

departamento de Moquegua, calculamos la ley de atenuación de aceleraciones para fallas, utilizando la ley de atenuación propuesta por Patwardhan et al., (1978). La ciudad de Moquegua se encuentra a 30 km de la Pampa Purgatorio y comprende la parte central de la falla Purgatorio Mirave. Se utiliza esta distancia para calcular la aceleración de un sismo de magnitud $M_w=6,6$ que es el promedio obtenido de los cálculos mostrados anteriormente (Tabla 1). Con estos datos se aplica la fórmula propuesta por Patwardhan et al. (1978) y se obtiene la ley de atenuación para la ciudad de Moquegua que es de 250 cm/seg^2 .

Este resultado es proyectado en un diagrama de relación entre aceleración e intensidades, donde la aceleración se encuentra en el eje de las Y en cm/seg^2 y la intensidad modificada de Mercalli, en el eje de las X. De este modo, podemos observar (Fig. 9) que las aceleraciones de 250 cm/seg^2 pueden generar una intensidad en la Escala de Mercalli Modificada entre VII y VIII. Las intensidades indican que se producen daños de consideración en estructuras de albañilería, dificultad en las personas para mantenerse en pie, además se producen ondas en los lagos, los taludes de arena o gravas experimentan deslizamientos o hundimientos, se dañan los canales de agua, etc. No

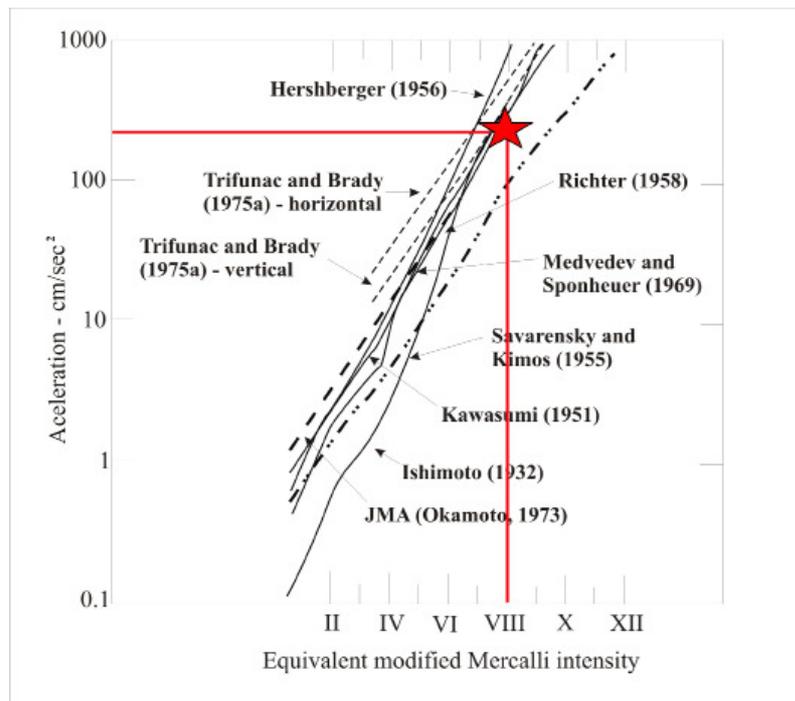


Figura 9. Relación entre aceleración e intensidad Modificada de Mercalli (Trifunac y Brady, 1975). La estrella indica la intersección entre la aceleración y el equivalente en la intensidad de Mercalli Modificado.

hay que olvidar que el sismo de Arequipa del 2001 afectó Moquegua con una intensidad VII dañando todas las construcciones de adobe.

CONCLUSIONES

La geometría de la falla Purgatorio Mirave es rectilínea casi en todo su tramo. El sector Oeste muestra una variación en su geometría siendo este de tipo echelón o cola de caballo. Los sectores Este y Oeste de la falla son de tipo inverso con una componente transcurrente dextral, mientras que el sector central es transcurrente dextral. Su extensión cortical en profundidad implica que tiene un papel importante que no fue tomado antes, en la definición estructural del piedemonte Occidental de los Andes Centrales. La falla Purgatorio Mirave tiene una larga historia de reactivaciones, su último movimiento queda evidenciado en los depósitos de cenizas volcánicas del Huaynaputina del año 1600 DC, éstas se encuentran deformadas y sugieren un movimiento inverso y por consiguiente se trata de una falla activa.

La determinación de la geometría, análisis morfoestructural y cinemática de la falla Purgatorio

Mirave, ha permitido determinar un momento magnitud (M_w) de 6,3, 6,5 y 6,6 para los segmentos este, central y y una ley de atenuación de aceleraciones para la ciudad de Moquegua de 250 cm/seg^2 equivalente a intensidades VII y VIII en la escala Modificada de Mercalli. Sin embargo, es necesario estimar la edad y magnitud de todas las deformaciones cuaternarias con la finalidad de determinar la recurrencia holocena de estos eventos. Por lo tanto, queda por realizar trincheras en cada segmento de la falla, para identificar marcadores de los últimos movimientos y fecharlas. El sector más adecuado para realizar este tipo de estudios es, sin duda, la Pampa Purgatorio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Ing. Eduardo Sancca, Superintendente del departamento de Geotecnia de la Mina Toquepala - Compañía Minera Southern Perú, por facilitar los trabajos realizados dentro de la jurisdicción de la Mina. De igual manera al Dr. Víctor Carlotto y Cristina Cereceda por la revisión y aportes que mejoraron el presente artículo.

REFERENCIAS

- Allmendiger, R. (2001). FaultKin for Windows v.12. for analyzing up to 1000 fault planes at a time for non-commercial use only. <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs.html>.
- Audin, L., Lacan, P., Tavera, H. & Bondoux, F. (2008). Upper plate deformation and seismic barrier in front of Nazca subduction zone: The Chololo Fault System and active tectonics along the Coastal Cordillera, southern Peru. *Tectonophysics* 459, pp. 145-185.
- Audin, L., David, C. & Hall, S. (2006). Evidencias geomórficas de actividad tectónica reciente en el Antearco Perú sur. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* vol.61, no.4, pp. 545-554.
- Benavente, C., Audin, L. & Machare, J. (2008a). Evidencias geomorfológicas y estratigráficas de tectónica compresiva en el Pleistoceno superior en la zona pedemontana de Tacna, sur del Perú. XIV Congreso Peruano de Geología, XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Resúmenes extendidos, 6 p.
- Benavente, C., Audin, L., Machare, J. & Cerpa, L. (2008b). Estado de esfuerzo compresivo en el Pleistoceno Superior, zona pedemontana del sur del Perú-Tacna. XIV Congreso Peruano de Geología, XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Resúmenes extendidos, 5 p.
- Beckinsale, R., Sanchez, A., Brook, M., Cobbing, E., Taylor, W. & Moore, N. (1985). Rb-Sr whole-rock isochron and K-Ar age determinations for the coastal Batholith of Peru, In: "Magmatism at a plate edge: the Peruvian Andes" - *The Peruvian Andes*: pp. 177-202.
- Costa, J., Benergy, R., Hasui, Y. & Silva, M. (2001). Tectonics and paleogeography along the Amazon river. *Journal of south American Earth Sciences* 14. pp. 335-347.
- David, C., Audin, L., Tavera, H. & Gérard, H. (2004). Sísmicidad cortical y fallas recientes en el sur del Perú. XI Congreso de Peruano de Geología. Resumen, pp. 290-293.
- Fenton, C., Wong, I. & Bott, J. (1995). Seismic and volcanic hazard evaluation, Quebrada Honda Tailiing Impoundment-Appendix 5A: Oakland, CA, Woodward-Clyde Consultants, unpublished report prepared for Southern Peru Copper Corporation, 51 p.
- Grange, F., Cunningham, P., Hatzfeld, D., Roecker, S., Molnar, P., Rodriguez, A., Suarez, G. & Ocola, L. (1984). Tectonic implications of the micro-earthquake seismicity and fault plane solutions in the southern Peru, *Journal of Geophysical Research*, 89, pp. 6139-6152.

- Hall, S., Farber, D., Audin, L., Finkel, R. & Meriaux, A. (2008). Geochronology of pediment surfaces in Southern Peru: Implications for Quaternary deformation of the Andean forearc. *Tectonophysics* 459, pp.186-205.
- Kanamori, H. (1978). Quantification of earthquakes. *Nature* 271, pp. 411-414.
- Kanamori, H. & Anderson, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 65, pp. 1073-1096.
- Kober, F., Ivy-Ochs, S., Schlunegger, F., Baur, S., Kubik, W. & Wieler, R. (2007). Denudation rates and a topography-driven rainfall threshold in northern Chile: Multiple cosmogenic nuclide data and sediment yield budgets. *Geomorphology* 83, 97-120 (2007).
- Macharé, J. (1986). Tectónica cenozoica de la margen continental peruana. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*. vol 76, pp. 45-7.
- Martínez, W. & Zuloaga, R. (2000). Actualización de la hoja geológica de Moquegua (35-u). Carta geológica nacional-Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Monge, R.; Cervantes, J. (2002). Actualización de los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x). Carta geológica nacional-Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Patwardhan, A., Sadigh, K., Idriss, I. & Youngs, R. (1978). Attenuation of strong motion effect of site conditions, transmission path characteristics and Focal Depths. *Bulletin of Seismological Society of America*. v. 69; no. 4; pp.1573-1581.
- Quang, C., James, C. & Lee, J. (2005). Response of Supergene Processes to Episodic Cenozoic Uplift, Pediment Erosion, and Ignimbrite Eruption in the Porphyry Copper Province of Southern Perú. *Society of Economic Geology*, v. 100, pp. 87-114.
- Sébrier, M., Marocco, R. & Jacques, J. (1979). Evolución neógena del Piedemonte Pacífico de los Andes del sur del Perú. II Congreso Geológico Chileno. Arica, pp.171-188.
- Sébrier, M., Huaman, D., Macharé J., Blanc, J., Bonnot, D. & Cabrera, J. (1982). Observaciones acerca de neotectónica del Perú. Proyecto SISRA-GRUPO PERUANO DE NEOTECTÓNICA-Instituto Geofísico del Perú. 110 p.
- Sébrier, M., Mercier, J., Megard, F., Laubacher, G. & Carey-Gailhardis, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Andes of south Perú. *Tectonics*, vol. 4, N°7, pp. 739-780.
- Slemmons, D. (1977). Faults and earthquake magnitude, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, Miscellaneous Papers S-73-1, Report 6, pp. 1-129.
- Slemmons, D., Bodin, P. & Zang, X. (1989). Determination of earthquake size from surface faulting events, Proc. of the International Seminar on Seismic Zonation, Guangzhou, China, State Seismological Bureau, Beijing, 13 p.
- Stirling, M., Rhoades, D. & Berryman, K. (2002). Comparison of Earthquake Scaling Relations Derived from Data of the Instrumental and Preinstrumental Era. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 92, N°2, pp. 912-830.
- Tosdal, R., Clark, A. & Farrar, E. (1984). Cenozoic polyphase landscape and tectonic evolution of the Cordillera Occidental, southernmost Peru, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, pp.1318-1332.
- Wells, D. & Coppersmith, K. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(4), pp. 974-1002.