

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

Carlos Benavente & Laurence Audin

Instituto Geológico Minero y Metaúrgico, INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima
Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, LGCA, Grenoble-Francia

INTRODUCCIÓN

En el Antearco de los Andes Centrales son conocidos eventos sísmicos de magnitudes elevadas ($M_w > 8$) asociados con el proceso de subducción desarrollado a lo largo de toda la margen del pacífico. 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. La mayoría de las cadenas de montañas altas alrededor del mundo, al menos parte de su alzamiento o de su gradiente topográfico está asociado a tectónica activa y esfuerzos compresivos. En el sur del Perú, aunque existen estudios neotectónicos y descripciones de la topografía en esta región de los Andes Centrales, los autores concluyen la presencia de fallas normales Sébrier et al. (1985), Fenton et al. (1995), entre otros. 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.

Sébrier et al. (1985), Fenton et al. (1995), Audin et al. (2008), Benavente et al. (2008a), 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 ML 3 a 5, sismos que se encuentran registrados en el catálogo sísmico instrumental de los últimos 40 años. Sin embargo, el análisis geomorfológico en el Antearco del sur del Perú muestra claras evidencias de actividad tectónica cuaternaria relacionada a sismos de $M_w > 6$ con rupturas de superficie.

La falla Purgatorio-Mirave (FPM), se ubica en el Antearco del sur del Perú entre la ciudad de Tacna y Moquegua, emplazándose a lo largo del piedemonte de la Cordillera Occidental con una longitud de 50 km (Fig. 1), donde la placa oceánica subduce con un ángulo de 30° al este y el vector de convergencia es oblicuo a la margen.

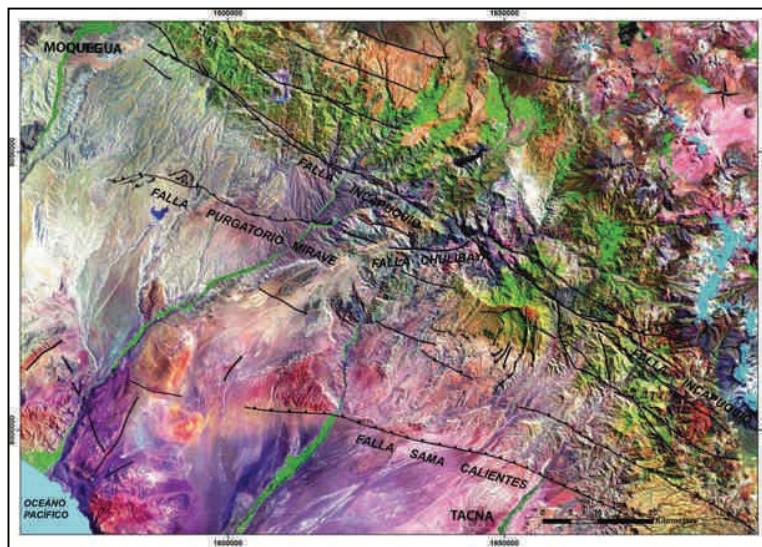


Figura 1. Imagen satelital LANDSAT mostrando las fallas principales de la Cordillera Occidental del sur del Perú, entre ellas la Falla Purgatorio Mirave.

Rocas cretácicas afloran al noreste de la falla Purgatorio Mirave y están compuestas por intercalaciones de lavas andesíticas porfíricas y depósitos de flujos piroclásticos de pómez y de cenizas, pertenecientes a la Formación Quellaveco, sobreyaciendo a esta formación se tiene intercalaciones de conglomerados polimícticos, areniscas y limolitas de color rojizo pertenecientes a la Formación Moquegua (Eoceno a Mioceno), posteriormente se distingue la Formación Huaylillas que esta compuesta de depósitos de flujos piroclásticos de cenizas y cristales

de composición riodacítica y riolítica. Conglomerados polimícticos pliocuaternarios moldean las pampas costeras y rellenan los valles formando terrazas aluviales de tipo encajonado (Benavente et al., 2008a).

MORFOLOGÍA, GEOMETRÍA Y CINEMÁTICA DE LA FPM

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 (Fig. 2).

a. 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 de N80°E y un buzamiento de 70° al N. El extremo este se caracteriza por poner en contacto la Formación Quellaveco con la Formación Moquegua, con un desplazamiento inverso (2a y b).

En la Quebrada Mirave se aprecia un escarpe de falla conservado (Fig. 2b), la cara libre del escarpe muestra clastos estríados, fracturados y desplazados indicando un movimiento inverso haciendo aflorar a la Formación Moquegua. Las medidas de estrías indican un régimen compresivo con componente dextral, siendo el eje de compresión N50°E (Fig. 2a).

b. SEGMENTO CENTRAL

Se extiende desde el noroeste de la localidad de Mirave hasta la quebrada Santallana con una longitud de 17 km, un rumbo N110°E y buzamiento de 85° al N. A lo largo de su trazo se puede observar las unidades cenozoicas y cuaternarias deformadas, su trazo es rectilíneo y la morfología del escarpe se encuentra conservado (Fig. 2c)

En este segmento se aprecia variación lateral de los cursos de los ríos producto de la reactivación de la falla (Fig. 2c), este movimiento lateral o de rumbo fue corroborado con medidas de estrías hechas en el plano de falla, dando como resultado un movimiento de tipo dextral (Fig. 2a). La edad de la última reactivación de este segmento es posterior a 100 ka, edad que obtuvieron Hall et al. (2008) de la datación de los depósitos aluviales utilizando el método de cosmogénicos Be¹⁰.

c. SEGMENTO OESTE

El segmento oeste se extiende de este a oeste desde la quebrada Santallana hasta el cerro Altos de Jaguar, a lo largo de 21 km. 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. 2a), estos segmentos tienen una longitud aproximada de 2 km con rumbos N80°E y 65°N de buzamiento, estos segmentos muestran evidencias de movimientos de tipo inverso (Fig. 2d), con pliegues por flexión de falla que afectan niveles delgados de cenizas volcánicas, posiblemente del Huaynaputina (1600 DC).

PELIGRO SÍSMICO

La definición de peligro sísmico varía según el ámbito científico y técnico. Desde el punto de vista de la sismotectónica y neotectónica; el peligro sísmico se entiende como la probabilidad de que ocurra un terremoto de un tamaño dado en una determinada área o falla concreta. Por tal motivo, la caracterización de una falla comprende dos objetivos fundamentales: a) La estimación de la magnitud máxima posible que la geometría de la falla puede producir y b) La recurrencia media de tal evento.

Para lograr el primer objetivo es necesario estudiar la 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/o diferente estilo de deformación, el resultado del estudio morfoestructural debe conducir a la estimación de la longitud máxima de ruptura cada segmento. Para alcanzar el segundo objetivo es necesario estimar con la mayor precisión posible la edad de las deformaciones más recientes asociadas a la falla.

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 et al., 1989; Wells & Coppersmith, 1994), a partir de datos como la longitud de la falla, tasa de deslizamiento y periodo de recurrencia. En el presente trabajo proponemos el cálculo del momento sísmico (M_0) y momento magnitud (M_w) a partir de los datos obtenidos del análisis morfoestructural de la falla Purgatorio Mirave (Tabla 1).

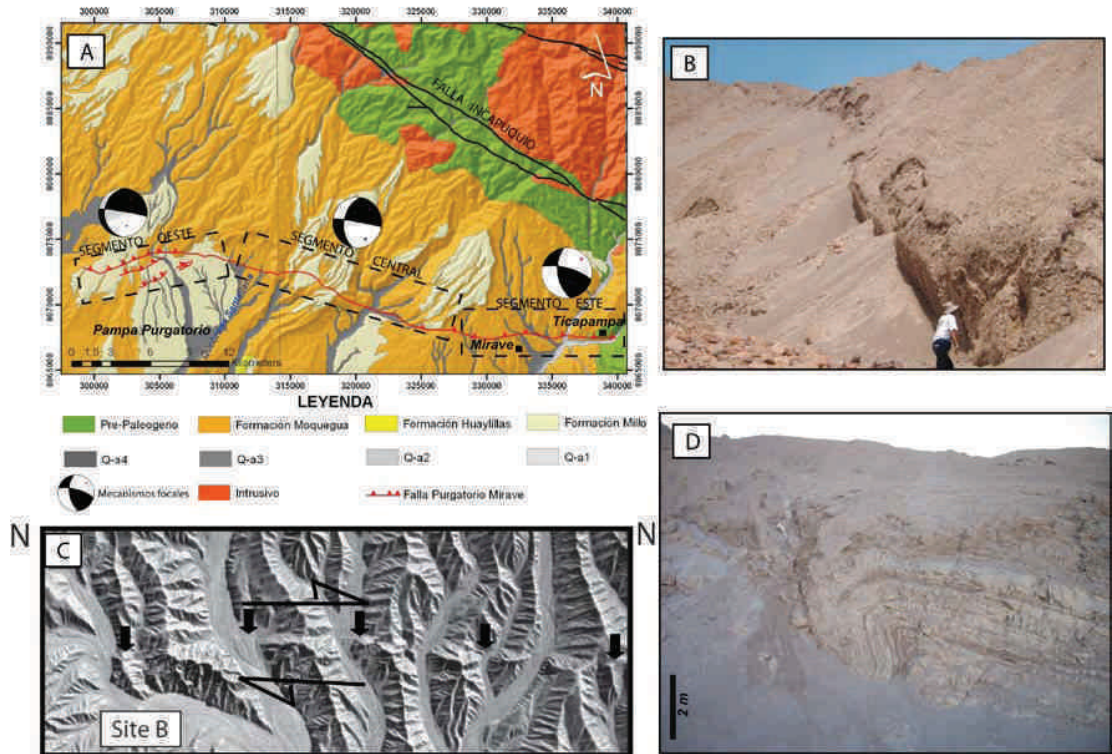


Figura 2: En la figura observamos: A) Mapa geológico del área de estudio, B) Foto del sector este de la falla Purgatorio Mirave, C) Imagen satelital del sector central de la falla en la que se observa el cambio de direcciones de los ríos y D) Foto vista al noroeste tomada en la quebrada Santallana (sector oeste) de la falla Purgatorio Mirave

Tabla 1: Cálculo del momento magnitud (M_w) para cada segmento de la FPM 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	Mw (WC1994)	Mw (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)

Entonces de 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, representa un peligro para las localidades de Tacna y Moquegua.

Con la finalidad de calcular la vulnerabilidad de la ciudad de Moquegua que se encuentra a 30 km de la parte central de la falla Purgatorio Mirave, calculamos la atenuación de aceleraciones, utilizando la ley de atenuación propuesta por Patwardhan et al., (1978), obteniendo una aceleración de 250 cm/seg^2 para un sismo de $M_w=6,6$ que es el promedio obtenido del cálculo mostrado anteriormente. Este resultado es proyectado a un diagrama de relación entre aceleración e intensidades, dando como resultado una intensidad en la Escala de Mercalli

Modificada entre VII y VIII. No 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, solo mostrando variación en el sector oeste donde la geometría es de tipo echelón o cola de caballo. Los sectores este y oeste de la falla son de tipo inverso con componente dextral, mientras que el sector central es netamente dextral. Su extensión cortical en profundidad implica que tiene un papel importante que no fue tomado antes en consideración 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 (1600 DC), éstas se encuentran deformadas y sugieren un movimiento inverso, por consiguiente la falla Purgatorio Mirave se trata de una falla activa y con movimiento histórico. La determinación de la geometría, análisis morfoestructural y cinemática de la falla Purgatorio Mirave, ha permitido determinar un momento magnitud (Mw) de 6,3, 6,5 y 6,6 para los segmentos este, central y oeste respectivamente y una ley de atenuación de aceleraciones para la ciudad de Moquegua de 245 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, con la finalidad de identificar marcadores de los últimos movimientos y fecharlas. El sector más adecuado para realizar este tipo de estudios es, sin duda, la Pampa Purgatorio.

Por último concluimos que el gradiente topográfico del Anteraco de los Andes Centrales esta controlado por fallas inversas, ejemplo la falla Calientes, falla Purgatorio Mirave, falla Torata, entre otras, que se extienden paralelas a la fosa oceánica y al piedemonte de las Cordillera Occidental.

REFERENCIAS

- 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.
- Benavente, C., Audin, L., & Machare O., 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.
- 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.
- 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. & Anderson, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 65, pp. 1073-1096.
- 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 Sesimological Society of America*. v. 69; no. 4; pp.1573-1581.
- 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., 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.
- 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.