



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

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

Estimación de la tasa de desplazamiento y el máximo desplazamiento acumulado a lo largo de la falla Tambomachay, ciudad del Cusco

Lorena Rosell¹; Carlos Benavente¹; Enoch Aguirre¹

¹ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú

1. Introducción:

La ciudad del Cusco se caracteriza por tener importante actividad sísmica asociada a fallas activas adyacentes a la ciudad. Los sismos son de magnitudes moderadas a elevadas (>5.5 Mw) (Silgado, 1978); sin embargo, la información histórica e instrumental aún es limitada para entender y realizar una coherente evaluación sismotectónica.

La falla Tambomachay es una de las fallas más importantes, se ubica a 4 km al norte de la ciudad del Cusco (Figura 1a), y se extiende a lo largo de 20 km con una tendencia NNW-SSE. Recientes investigaciones (Sébrier et al., 1985; Cabrera, 1988; Benavente et al., 2010;

Benavente et al., 2013) muestran evidencias de actividad reciente, principalmente morrenas holocenas desplazadas de manera vertical en su terminación oeste, y conos aluviales desplazados en su terminación este (Cabrera, 1988). Su actividad a largo plazo dio como resultado el frente montañoso (Figura 1b) formado a lo largo de toda su longitud, éste exhibe indicadores morfológicos que han retenido la información de los procesos tectónicos y climáticos; la cuantificación de estas geformas permite calcular tasas de desplazamiento (Tsimi & Ganas, 2015; Whittaker, Attal, & Cowie, 2008) mediante el uso de sensores remotos de alta resolución.

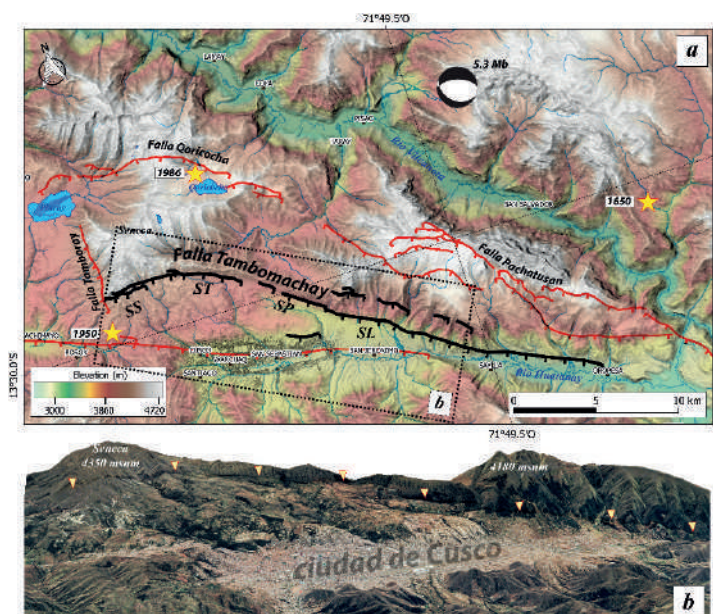


Figura 1. (a) Mapa topográfico mostrando la localización de la falla Tambomachay en líneas negras, donde SS=Sector Sencaca, ST=Sector Tambomachay, SP=Sector Pumamarca, SL=Sector Larapa; fallas geológicas activas en líneas rojas, las estrellas amarillas indican los epicentros de los eventos sísmicos más recientes (1650, 1950 y 1986) (Silgado, 1978) y el recuadro negro de línea entrecortada muestra la ubicación de (b). También se muestra un mecanismo focal, correspondiente al sismo superficial (<40 km) del 5 de abril de 1986 con momento magnitud >5 Mw (International Seismological Centre, 2015).

(b) Imagen satelital de Google Earth con vista 3D del frente montañoso de Tambomachay; las flechas amarillas con borde rojo señalan el escarpe de falla.

2. Metodología

2.1. Análisis de DEM de alta resolución

Para realizar el análisis geomorfológico, generamos un modelo de elevación digital (DEM) de 1.53m/px de resolución, a partir de dos imágenes stereo adquiridas por el satélite Pléiades. La alta resolución de estas imágenes nos permitió cartografiar la falla y los indicadores morfológicos a lo largo de ésta.

2.2. Análisis morfométrico y estadística de facetas triangulares

Las facetas triangulares son marcadores geomorfológicos frecuentemente observados en escarpes de falla normal, el inicio de su formación se da tras la generación de un escarpe de falla, que va siendo incisado progresivamente por drenajes que fluyen perpendicularmente al escarpe, esta incisión a su paso forma valles en V y conos aluviales (Hamblin, 1976; Wallace, 1978). Al estar controlada la morfología por procesos tectónicos y climáticos; son excelentes para retener información sobre estos procesos (Petit et al., 2009).

En esta investigación primero cartografiamos las facetas triangulares exhibidas en el footwall de la falla Tambomachay, sobre rásters generados a partir del DEM. La superposición de los rásters: Real Surface Index, Hillslope, y de Aspecto nos permitieron tener mayor precisión para fotointerpretar los límites geométricos de cada faceta; luego, cuantificamos la altura y las pendientes de cada una de ellas.

Obtuvimos las pendientes, se evaluaron y se seleccionaron aquellas que muestran pendientes homogéneas, este filtro es importante ya que la pendiente es la variable independiente para calcular la tasa de desplazamiento.

La evaluación estadística de las características geométricas de las facetas se realizó en lenguaje

de programación Python; y la estimación del valor de la tasa de desplazamiento se calculó a partir de la fórmula empírica desarrollada por Tsimi & Ganas (2015).

2.3. Análisis de perfiles de drenaje

Otro marcador geomorfológico importante son los perfiles longitudinales de ríos, ya que éstos son sensibles a los cambios tectónicos que ocurren en una cuenca. Los perfiles de ríos en estado de equilibrio son cóncavos, si estos no lo son, se debe comenzar analizar estas anomalías. Para el análisis de los perfiles; realizamos una digitalización automática de los drenajes en el software SAGA GIS a partir del DEM; posteriormente sólo seleccionamos aquellos drenajes que cruzan transversalmente el escarpe de falla y se establecen los límites: superior a 75m sobre el escarpe, e inferior a 25m bajo el escarpe de falla. Luego se realiza un muestreo sobre cada drenaje; la distancia de muestreo equivale a 1.53m, para cada punto muestreado se extrajimos valores de posición y elevación a partir del DEM y el valor de la pendiente a partir del raster de pendientes.

El análisis morfométrico y estadístico propiamente dicho se realiza en lenguaje de programación Python; donde se plotean los puntos muestreados en diagramas de: “elevación vs distancia aguas abajo” y “pendiente vs distancia aguas abajo”; se hace una evaluación de: a) la morfología en el primer diagrama, y b) la pendiente de los perfiles longitudinales. Sobre el segundo diagrama se calcula la pendiente promedio sin ruido e identificamos los valores de máxima y mínima pendiente aplicando el método de ZIG-ZAG (Nelson, 2018), para la cuantificación del escarpe acumulado.

3. Resultados

3.1. Morfometría de facetas triangulares

Cartografiamos un total de 20 facetas triangulares (Figura 2), de éstas se han seleccionado 7 y la pendiente promedio de éstas varían de 24.73° a 31.20°; siendo el promedio **29.53°**.

Tabla 1. Resultados estadísticos de las 20 facetas triangulares analizadas. (N.F.=n° de facetas; P.P.= pendiente promedio; H.=altura)

N.F.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P.P.	46.6	37.1	35.9	35.8	24.7	30.3	33.8	34.1	30.3	28.9	33	34.8	31.6	31.2	32.4	32.7	31.1	29.5	32.7	32.75
H.	77.2	68.1	90.3	48.3	45.3	80	51.1	70.8	58.1	35	99.3	99.2	84.2	86.2	61.1	86.6	60.5	55.2	61.1	124.7

La tasa de desplazamiento (slip rate) calculada a partir del promedio de las pendientes para el sector Tambomachay es de **0.58 mm/año**.

3.2. Morfometría de perfiles de drenaje

La figura 2, muestra los sectores donde se realizó el análisis de la morfología del perfil longitudinal de los drenajes; para SS (Sector Sencca), se observa que las morfologías de los perfiles longitudinales 1 y 3 no son convexas, son casi planos; y que los canales 2, 4, 5 presentan tramos ligeramente convexas que están por encima de la falla; por último, el canal 6 presenta una ligera concavidad. En ST (Sector Tambomachay),

la mayoría de los perfiles longitudinales son ligeramente cóncavos a excepción del canal 2 que presenta una ligera convexidad que comienza por encima de la falla. Por último, en SP (Sector Pumamarca) la morfología de los perfiles son convexas y diferentes a los perfiles de los otros sectores. Es importante notar que la convexidad es en el footwall de la falla.

A partir de la anomalía observada se evalúan 3 canales más para este sector, teniendo como resultado

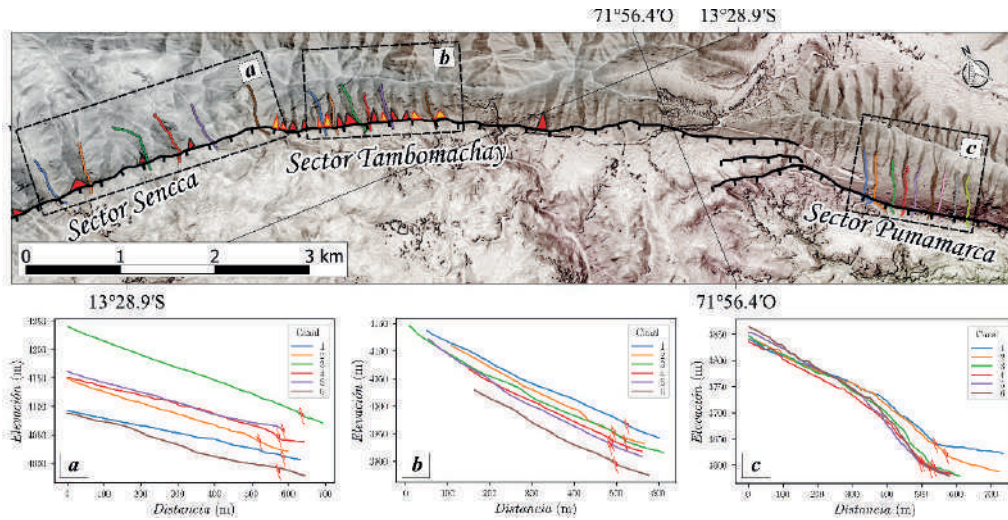


Figura 2. Mapa de sombras, mostrando la ubicación de las 20 facetas triangulares cartografiadas (triángulos rojos); de las cuales 7 facetas (triángulos amarillos) se seleccionaron para el cálculo de la tasa de desplazamiento. También se muestra la ubicación de los drenajes analizados a lo largo del trazo de falla; los resultados del análisis se muestran en la parte inferior siendo (a) el resultado para SS, (b) el resultado del ST y (c) el resultado del SP.

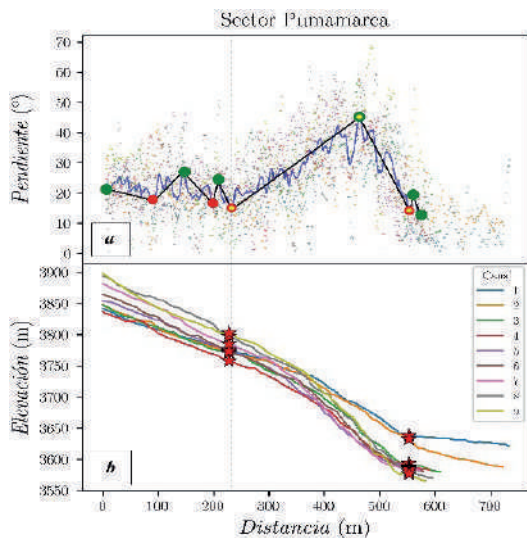


Figura 4. Diagramas donde se representan los perfiles longitudinales de los 9 canales analizados en SP, (a) pendiente vs distancia, mostrando la pendiente promedio: con ruido (línea azul) y sin ruido (línea negra), máxima pendiente (círculo amarillo de borde verde); pendientes mínimas y límites de escarpe acumulado (círculos amarillos de borde rojo), (b) elevación vs distancia mostrando los límites del escarpe acumulado máximo (estrellas rojas).

la misma convexidad observada en el análisis anterior, en el diagrama de distancia aguas abajo vs las pendientes; se observan los valores de máxima y mínima pendiente; la máxima pendiente refleja el centro del escarpe acumulado; y los dos valores mínimos más cercanos representan los límites superior e inferior del escarpe de falla (Figura 3). Tras delimitar el escarpe de falla calculamos un offset acumulado de **226.31m**.

Al conocer el valor del escarpe acumulado podemos calcular la tasa de desplazamiento; estableciendo una relación entre las alturas de las facetas con la tasa de desplazamiento calculada anteriormente; entonces la tasa de desplazamiento calculada en el sector Pumamarca es de **1.29 mm/año**.

4. Conclusiones:

El análisis de marcadores geomorfológicos complementados con modelos digitales de alta resolución; permiten cuantificar tasas de

desplazamiento a largo plazo (>100,000 años).

- Las tasas de desplazamiento calculadas para los sectores Tambomachay y Pumamarca, nos permite alimentar la base de datos de Tsimi & Ganas (2015); y ajustar la ecuación empírica con un valor para $r = 0.9$; para el cálculo de tasas de desplazamiento en ambientes extensionales con similares características geológicas y climáticas.

La tasa de desplazamiento calculada para el sector Pumamarca, nos permite afirmar que la actividad de la falla Tambomachay inició hace

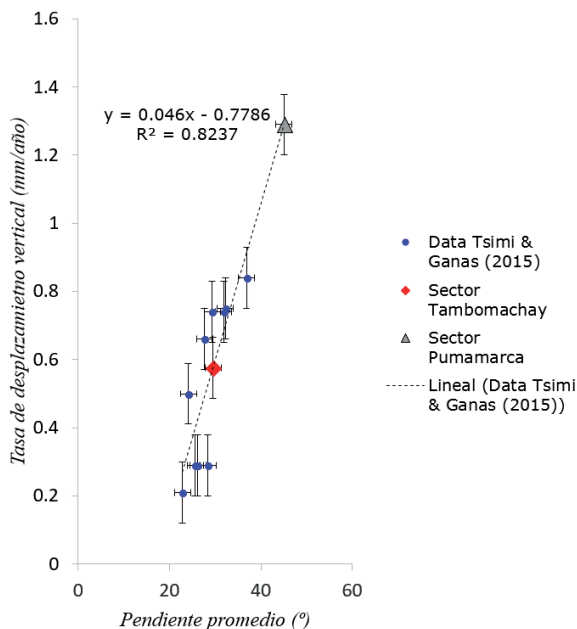


Figura 5. Tasa de desplazamiento vs pendiente promedio, ajuste de la ecuación planteada por Tsimi & Ganas (2015); tras la compilación de los resultados obtenidos en este estudio.

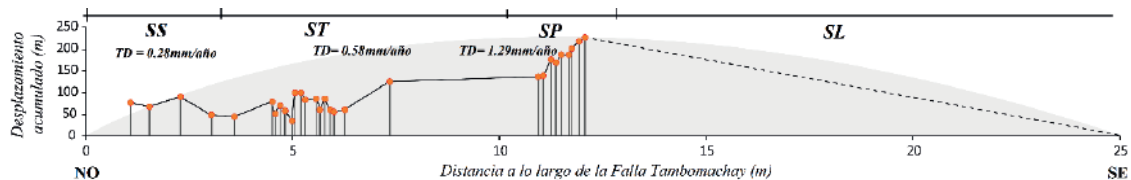


Figura 6. Diagrama de desplazamiento acumulado vs la distancia a lo largo de la Falla Tambomachay, mostrando el máximo desplazamiento acumulado en la parte central; así como las tasas de desplazamiento y pendientes calculadas para los sectores: Sencca (Rosell et al., 2018), Tambomachay y Pumamarca. En color gris indica la tendencia de los desplazamientos, mostrando que estos se acomodan a una geometría semi-circular.

~175,434 años.

- El cálculo de los desplazamientos acumulados a lo largo del frente montañoso, a partir del análisis de facetas triangulares y perfiles de ríos, sugieren que: a) El desplazamiento acumulado se ubica en la parte central con **226.31m** de altura, b) Los desplazamientos decrecen hacia el NO y el SE. Es posible calcular el máximo desplazamiento acumulado debido a que, en la parte central de la falla, el nivel de erosión no es influyente en la evolución del relieve; como en los extremos donde se observan una conexión con cabeceras de cuencas, que permiten el desarrollo de mayor erosión.

- En base al cálculo de los desplazamientos, podemos sugerir que la falla normal de Tambomachay tiene una geometría semi-circular (Figura 6), es decir que el mayor desplazamiento es siempre en la parte central, mientras en hacia los extremos, estos decrecen.

5. Referencias:

- Benavente, C., Cárdenas, J., Concha, R., García, B., & Morales, M. (2010).

- Evidencias de paleosismos en la estratigrafía de la cuenca cuaternaria Cusco, Perú. *XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos*, 1280-1283.
- Benavente, C., Delgado, F., Taipe, E., Audin, L., & Pari, W. (2013). *Neotectónica y Peligro Sísmico en la Región del Cusco*. Boletín N°55 Serie C, INGEMMET, Lima.
 - Cabrera, J. (1988). *Neotectonique et sismotectonique dans la Cordillere Andine au niveau du chagement de geometrie de la subduction: la region de Cuzco (Perou)*. These, Paris.
 - Hamblin, W. (1976). Patterns of displacement along the Wasatch Fault. *Geology*, 619-622.
 - International Seismological Centre. (2015). *ISC Bulletin: Focal mechanism search*. Obtenido de On-line Bulletin: <http://www.isc.ac.uk>
 - Nelson, J. (28 de 01 de 2018). *ZigZag*. Obtenido de <https://github.com/jbn/ZigZag>
 - Petit, C., Gunnell, Y., Gonga-Saholiariliva, N., Meyer, B., & Séguinot, J. (2009). Faceted spurs at normal fault scarps: Insights from numerical modeling. *Journal of Geophysical Research*.
 - Rosell, L. (2018). *Estudio morfotectónico y paleosísmico de las fallas Tambomachay y Qoricocha, implicancia en el peligro sísmico de la región del Cusco*. Tesis, Cusco.
 - Sébrier, M., Mercier, J., Mégard, F., Laubacher, G., & Carey-Gailhardis, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of South Peru. *Tectonics*, 739-780.
 - Silgado, F. E. (1978). *Historia de los sismos mas notables en el Perú*. Lima: Instituto de Geología y Minería.
 - Tsimi, C., & Ganas, A. (2015). Using the ASTER global DEM to derive empirical relationships among triangular facet slope, facet height and slip rates along active normal faults. *GEOMORPHOLOGY*, 171-181.
 - Wallace, R. (1978). Geometry and rates of changes of fault-related fronts, north-central Nevada. *J. Res. U. S. Geol. Surv.*, 6, 637-650.
 - Whittaker, A. C., Attal, M., & Cowie, P. A. (2008). Decoding temporal and spatial patterns of fault uplift using transient river long profiles. *GEOMORPHOLOGY*, 506-526.