

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6881

INFORME NEOTECTÓNICO DE LA FALLA GEOLÓGICA ACTIVA CHOLOLO

**Región Moquegua
Provincia Ilo**



**ABRIL
2019**

INFORME NEOTECTÓNICO DE LA FALLA GEOLÓGICA ACTIVA CHOLOLO (PROVINCIAS DE ILO-MARISCAL NIETO, DEPARTAMENTO DE MOQUEGUA)

Autores:

Carlos Benavente Escóbar
Briant García Fernandez Baca
Lorena Rosell Guevara

CONTENIDO

RESUMEN	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO CONCEPTUAL.....	3
3. CONTEXTO GEOLÓGICO Y ASPECTOS GEOTÉCNICOS	3
4. NEOTECTÓNICA EN LA REGIÓN MOQUEGUA.....	5
4.1. FALLA ACTIVA CHOLOLO	6
5. CONCLUSIONES	13
6. RECOMENDACIONES	14
7. REFERENCIAS	15

INFORME NEOTECTÓNICO DE LA FALLA GEOLÓGICA ACTIVA CHOLOLO (PROVINCIAS DE ILO-MARISCAL NIETO, DEPARTAMENTO DE MOQUEGUA)

RESUMEN

El INGEMMET dentro de sus principales funciones, considera el apoyo a las instituciones gubernamentales, con la finalidad de dar a conocer zonas susceptibles a peligros geológicos, como por ejemplo la ubicación de fallas geológicas activas, que son fuente de sismos superficiales.

En la región Moquegua, así como otras regiones del país, se han reconocido fallas geológicas activas capaces de generar sismos de hasta 7Mw. Una de estas es la falla Chololo, la cual cruza la ciudad de Ilo. La falla Chololo se reactivó en el 2001 y 2004, generando sismos de magnitud moderada (<5Mw).

Los estudios geológicos realizados en la zona, apoyados con herramientas como la geofísica, nos permiten afirmar la presencia de la falla en el subsuelo de la ciudad de Ilo. Por otro lado, los modelos de atenuación de la aceleración de ondas sísmicas en la superficie nos permiten delimitar las zonas con mayor peligro.

Finalmente, este informe concluye en que la ciudad de Ilo y alrededores se encuentran expuestos a un alto peligro en caso ocurra una reactivación de la falla Chololo. Sin embargo, es posible utilizar esta información para la planificación y elaboración de proyectos de construcción, considerando las aceleraciones de ondas sísmicas en el sitio.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), como ente técnico-científico, incorpora dentro de los proyectos de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), el apoyo y/o asistencia técnica a gobiernos nacionales, regionales y locales, así como instituciones estatales; su alcance consiste en contribuir con las entidades gubernamentales en el reconocimiento, caracterización y diagnóstico de los peligros geológicos en sus territorios, con la finalidad de proporcionar una opinión técnica sobre la problemática, además de proponer medidas de prevención y mitigación ante la ocurrencia de desastres naturales.

La Municipalidad provincial de Ilo, solicita mediante Oficio N°459-2019-A-MPI, información concerniente a estudios realizados sobre la falla geológica Chololo, que estaría afectando el predio ubicado en la margen izquierda del Ramal de la Carretera Panamericana Sur, altura del km 40, en el distrito y provincia de Ilo, departamento de Moquegua.

El INGEMMET, a través de sus especialistas de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), analizaron la información remitida por la Superintendencia Nacional de Bienes Estatales y emiten el presente informe técnico.

2. MARCO CONCEPTUAL

Falla

Es una estructura plana a través de las cuales ocurre desplazamientos de cizalla (e.g. Billings, 1972). Además, es definido como una fractura o zona de fracturas a lo largo de la cual ha ocurrido desplazamiento relativo de los bloques paralelos a la fractura (Bates y Jackson, 1980).

Falla activa

Es una falla que registra antecedentes históricos o sismológicos de actividad y que tiene una expectativa en un intervalo de tiempo futuro de afectar el desarrollo de la sociedad (Slemmons, 1977; Wallace, 1986).

3. CONTEXTO GEOLÓGICO Y ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Según los mapas geológicos del INGEMMET (Figura 1), en la zona de estudio se tiene registro únicamente de rocas ígneas del Mesozoico y depósitos cuaternarios que se detallarán a continuación.

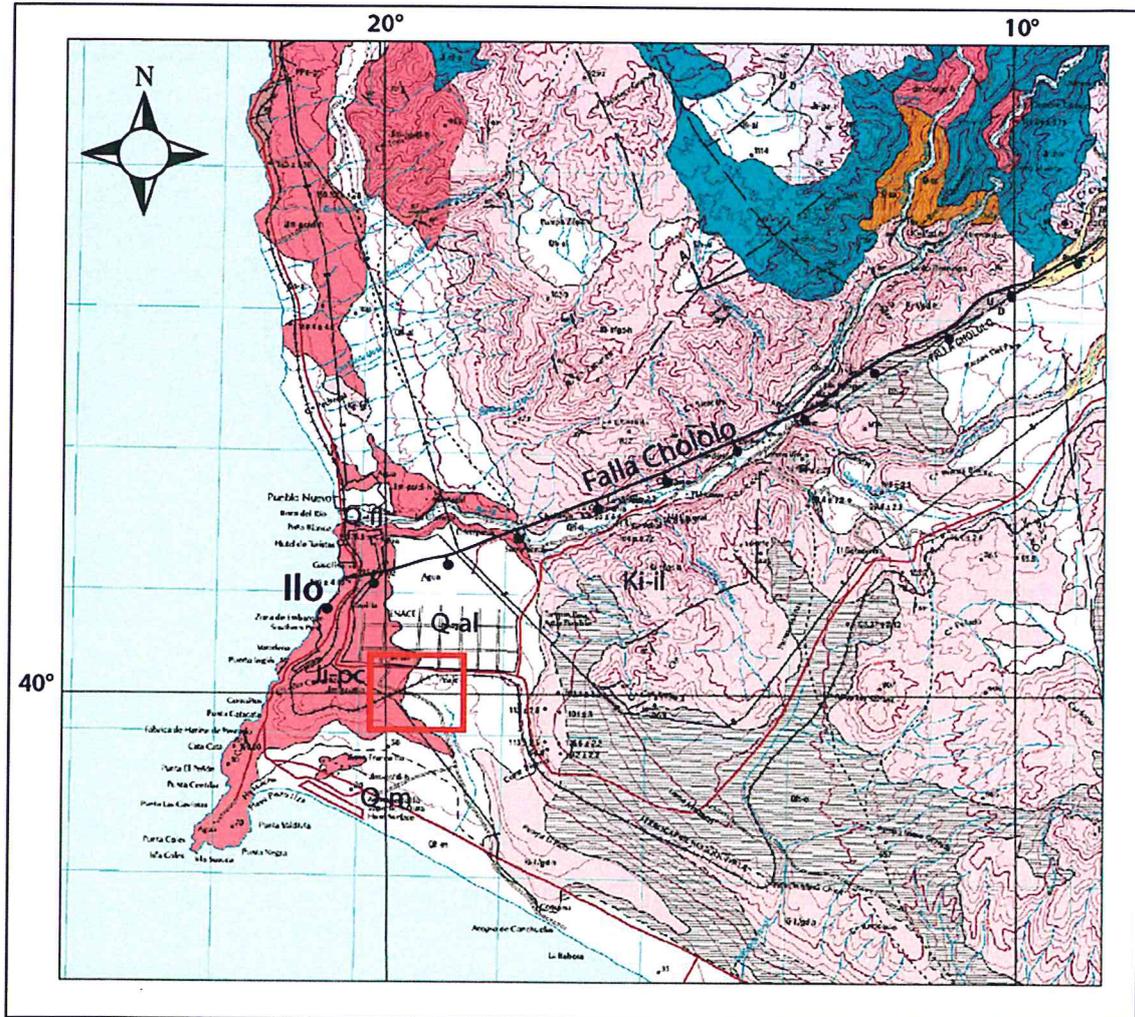


Figura 1. Mapa geológico del INGENMET, Hoja 36-t, Cuadrángulo de Ilo (Sanchez, *et al.*, 2000). El cuadrado con borde rojo indica el área de evaluada.

MESOZOICO

- Superunidad Punta Coles (Ji-pc)

Esta unidad corresponde a cuerpos de origen magmático compuesto principalmente por granodioritas, monzonitas y dioritas del Jurásico inferior (190-150 Ma).

Desde el punto de vista geotécnico podemos mencionar que estas rocas están medianamente fracturadas y meteorizadas. Este tipo de características permiten sugerir que la velocidad aproximada de onda de corte es de 748 m/s (Luzi *et al.*, 2011; Narciso *et al.*, 2012 y Wills & Clahan, 2006)

- Superunidad Ilo (Ki-il)

Esta unidad corresponde a cuerpos de origen magmático compuesto principalmente por granodioritas y dioritas del Cretáceo inferior (110-90 Ma).

Desde el punto de vista geotécnico podemos mencionar que estas rocas están medianamente fracturadas y meteorizadas. Este tipo de características permiten sugerir que la onda de corte es de 748 m/s (Luzi et al., 2011; Narciso et al., 2012 y Wills & Clahan, 2006).

CENOZOICO

- Depósitos marinos (Q-m)

Compuestos por arenas principalmente con niveles de coquinas de moluscos.

- Depósitos aluviales (Q-al)

Constituidas por material gravoso dentro de una matriz areno limosa

- Depósitos fluviales (Q-co)

Constituidos por gravas, arenas y limos.

Desde el punto de vista geotécnico las gravas y arenas de estas unidades cuaternarias presentan una velocidad aproximada de corte entre 302 y 309 m/s (Luzi et al., 2011; Narciso et al., 2012 y Wills & Clahan, 2006).

4. NEOTECTÓNICA EN LA REGIÓN MOQUEGUA

Es conocido que la costa es vulnerable a eventos sísmicos de magnitud elevada (<8Mw), asociados al proceso de subducción (Arequipa 2001, 8.4 Mw). Pero también existen los sismos relacionados a la reactivación de fallas geológicas.

El INGEMMET viene realizando trabajos en este tipo de estructuras geológicas desde el año 2009, con el objetivo de analizar el peligro sísmico a partir de la reactivación de estas fallas.

Entre el 2017 y 2018 se identificó y caracterizó las fallas activas en la región Moquegua, compilándolas en un mapa. Este mapa muestra la existencia de más de 20 fallas activas en toda la región, de las cuales algunas muestran actividad reciente (últimos 300 años), como por ejemplo las fallas Incapuquio, Purgatorio y Chololo.

4.1. FALLA ACTIVA CHOLOLO

La importancia de estudiar esta falla radica en que, hacia el suroeste del trazo de la falla se encuentra la ciudad de Ilo, la cual es altamente vulnerable en caso se reactive la estructura.

Esta falla fue descrita inicialmente por Macharé *et al.* (2003, 2009), Audin *et al.*, (2006, 2008) y Benavente *et al.*, (in preparación); se ubica entre las provincias de Ilo y Mariscal Nieto (Figuras 2 y 3.) desde la península de Ilo hasta el valle de Moquegua, tiene una longitud de ~40 km, el trazo principal presenta una dirección preferente de N54° y un buzamiento al sureste, tiene un movimiento de tipo normal con componente sinistral.

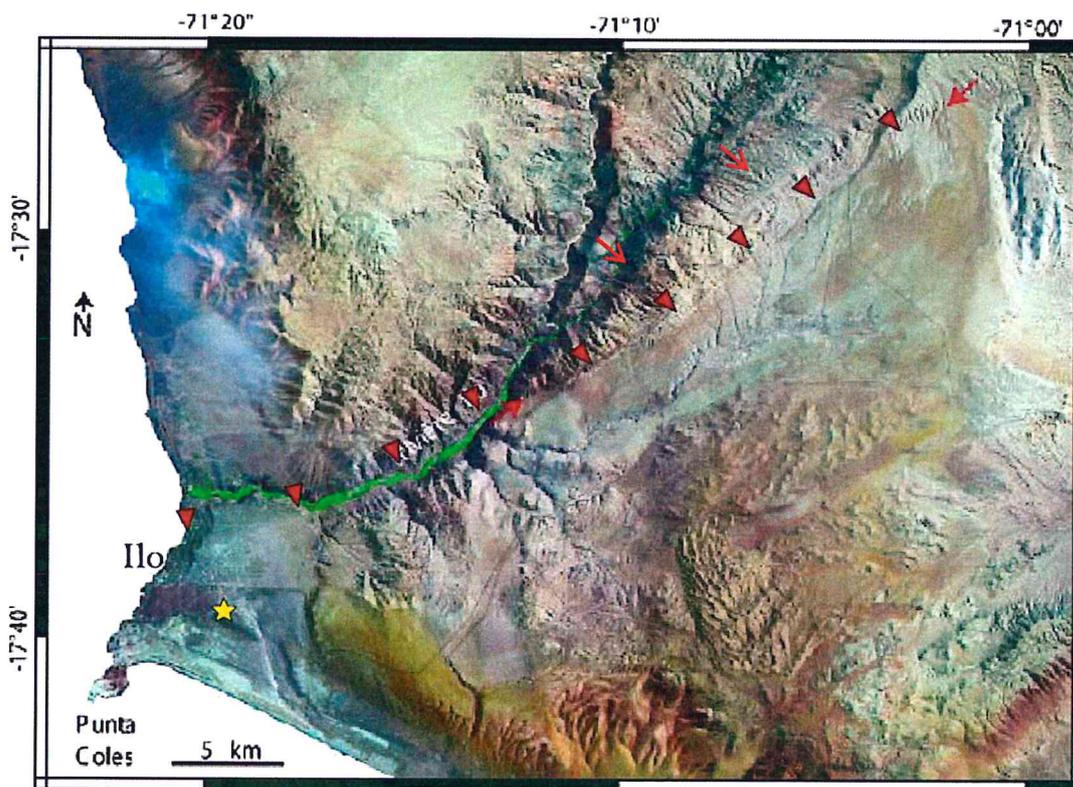


Figura 2. Ubicación de la falla Chololo, obsérvese las flechas rojas que indican el trazo de la falla. En estrella amarilla el predio de la SBN en consulta.

Hacia el noreste de la falla Chololo se observan otros 4 segmentos, que en conjunto forman una estructura en echelon o cola de caballo (Figura 4), estos segmentos tienen direcciones que varían entre N188° a 230° y buzanan hacia el norte, tienen un movimiento de tipo inverso.

La falla afecta depósitos recientes (Holoceno), así como también el sistema de drenaje, siendo estos desplazados con un movimiento transcurrente sinistral (Figura 5), evidencias que nos indica la actividad de la estructura geológica; así mismo, se puede observar que en las zonas

adyacentes a la traza de falla se encuentran cenizas del volcán de Huaynaputina (1600 A.D) interestratificadas y deformadas por la actividad reciente de la falla.

La geometría y cinemática de la falla sugiere que se trata de una falla normal con componente sinistral, presentando pliegues hacia su parte más oriental producto del acomodamiento por el movimiento de rumbo (Figura 5).



Figura 3. Foto con vista al norte de la Falla Chololo. Las flechas rojas indican el trazo de la falla, a lo largo de esta estructura se observan facetas triangulares.

Entonces, la falla de Chololo está constituido por varios segmentos, el segmento más antiguo presenta un movimiento transcurrente sinistral y los segmentos más pequeños muestran principalmente movimientos normales (bajan respecto al valle). Del análisis de fotografías aéreas se pudo identificar los segmentos de la falla y su influencia en la reorganización del drenaje. En la Figura 5, presentamos una reconstrucción de la topografía en base a los cauces de los ríos, crestas de montañas y las paredes de los valles.

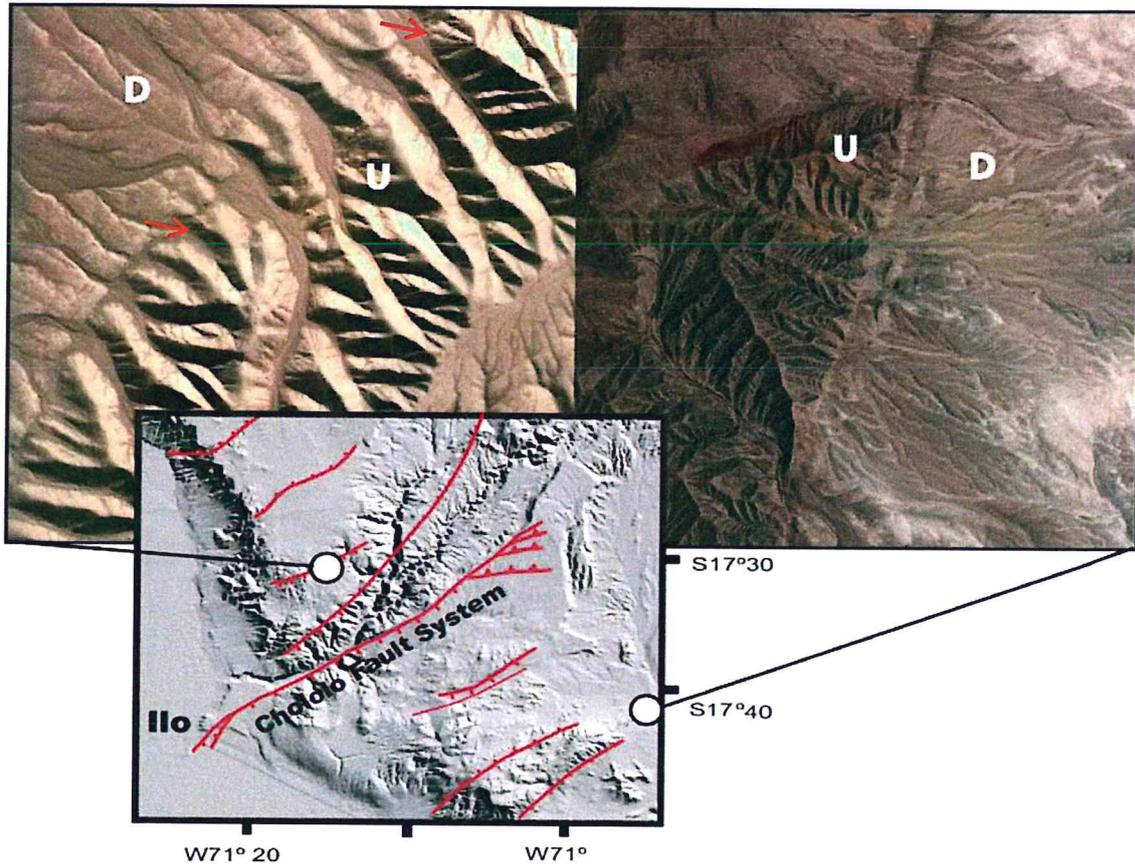


Figura 4. Detalle de dos de los segmentos de la Falla Chololo, imágenes Quickbird de Google Earth. Tomado de Audin et al., 2008

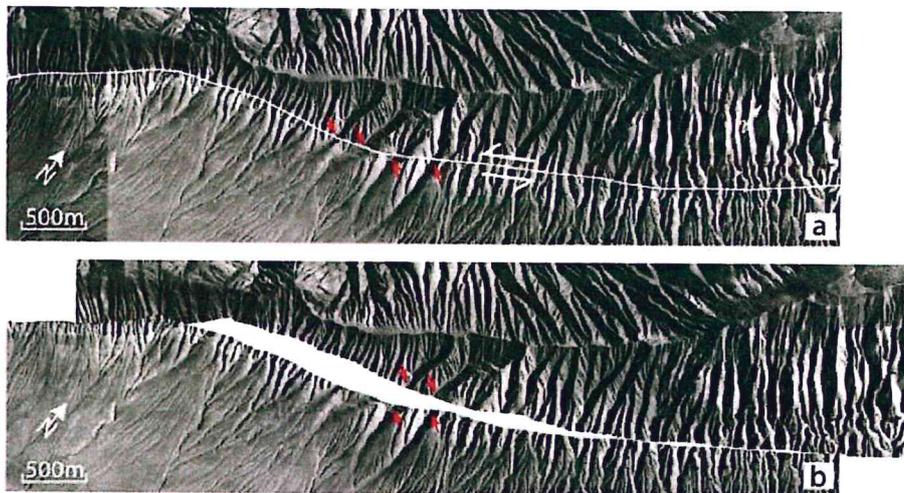


Figura 5. Fotografías aéreas mostrando en detalle la variación del drenaje producto del movimiento de la falla.

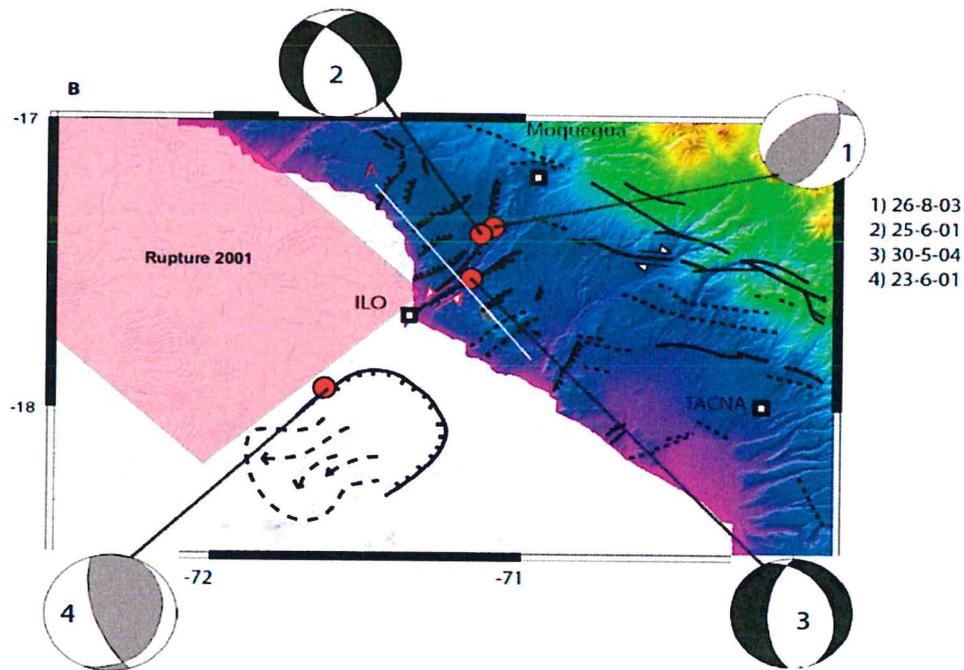


Figura 6. Imagen SRTM data donde se observa la traza de la falla Chololo y los sismos que se registraron después del sismo de Arequipa del año del 2001.

La actividad sísmica reciente pone en evidencia la actividad de la falla Chololo. Después del sismo de subducción del 2001 con epicentro en Ocoña-Arequipa, ocurrieron 4 sismos entre el 2001 y el 2004. En la Figura 6 se muestra la ubicación de epicentros de los cuatro sismos, según los mecanismos focales para los sismos 2 y 3 estos tuvieron un movimiento de tipo normal, mientras que los sismos 1 y 4 dieron mecanismos focales de tipo inverso.

4.1.1. GEOFÍSICA

Con la finalidad de complementar los estudios geológicos sobre la falla Chololo, se utilizó métodos geofísicos; estos métodos demuestran tener éxito en determinar la geometría de una falla en las primeras decenas o cientos de metros por debajo de la superficie (Wang, 2002; Donne et al., 2007). El método geofísico que se empleó fue la tomografía eléctrica, cuyo objetivo principal es determinar la geometría de la falla y estimar su grado de inclinación.

Se realizó 1 perfil geoelectrico transversal a la falla Chololo (AA') (Figura 8), con un equipo Syscal Pro Switch (Iris Instruments Company), el método utilizado fue Dipolo-Dipolo (D-D). Con esta herramienta obtuvimos un perfil con una profundidad de aproximadamente 100 m. Los datos obtenidos se procesaron utilizando el software RES2DINV, con el que se hizo el cálculo de la resistividad en modelos 2D.

El perfil AA'', se realizó en una zona donde los factores geológicos, como la erosión y factores antrópicos como el crecimiento poblacional, no permite observar evidencias superficiales o geoformas que nos indiquen la presencia de la falla en subsuelo.

Perfil AA''

El perfil de tomografía eléctrica se realizó en el flanco izquierdo del río Ilo, en el sector denominado Pampa Inalámbrica (Figura 8), tiene una longitud total de 2.72 km y una orientación NO-SE (Figura 7), donde los valores en base a la resistividad muestran una variación lateral: (1) las resistividades bajas a moderadas (R1), se encuentran desde los 0m hasta los 1960 m. y a partir de los 2500 m hasta los 2720 m, estos sectores presentan valores de resistividad menores a 1000 Ohm.m.; (2) las resistividades altas (R2) se encuentran desde los 1960 m hasta los 2500 m con resistividades mayores a 1000 Ohm.m. (3) la zona de conductividad moderada a alta (C1), se encuentra entre los 1880 y 1960 m.; (4) la zona con conductividades altas (C2), se encuentra entre los 560 y 1880 m.

En cuanto a la litología, las zonas con resistividades bajas (<50 Ohm.m) corresponden a materiales con granulometría fina, moderadas (50 a 1000 Ohm.m) están relacionadas con la cobertura de depósitos inconsolidados como arenas y/o material fracturado. Las resistividades altas mayores a 1000 Ohm-m, corresponden a material compacto.

Las interpretaciones que podemos obtener de estos resultados son:

- La zona (R1) tienen resistividades bajas (< 1000 Ohm-m), representan la presencia de material gravoso y arenoso de medios fluvio-aluviales, los cuales además tienen una porosidad muy importante y la capacidad de contener aguas en subsuelo (Figura 7).
- La zona (R2) tienen resistividades altas (>1000 Ohm-m), representan a rocas graníticas de la Superunidad Punta Coles (Figura 7).
- La discontinuidad entre ambas zonas R1 y R2, indica la presencia de la falla Chololo en subsuelo (Figura 7). Esta discontinuidad en realidad está representada por un área (C1), que corresponde a la zona de falla Chololo.

- A partir de los 80 m. por debajo de la superficie se encuentra una zona altamente conductiva (C2), posiblemente relacionada con el nivel freático.

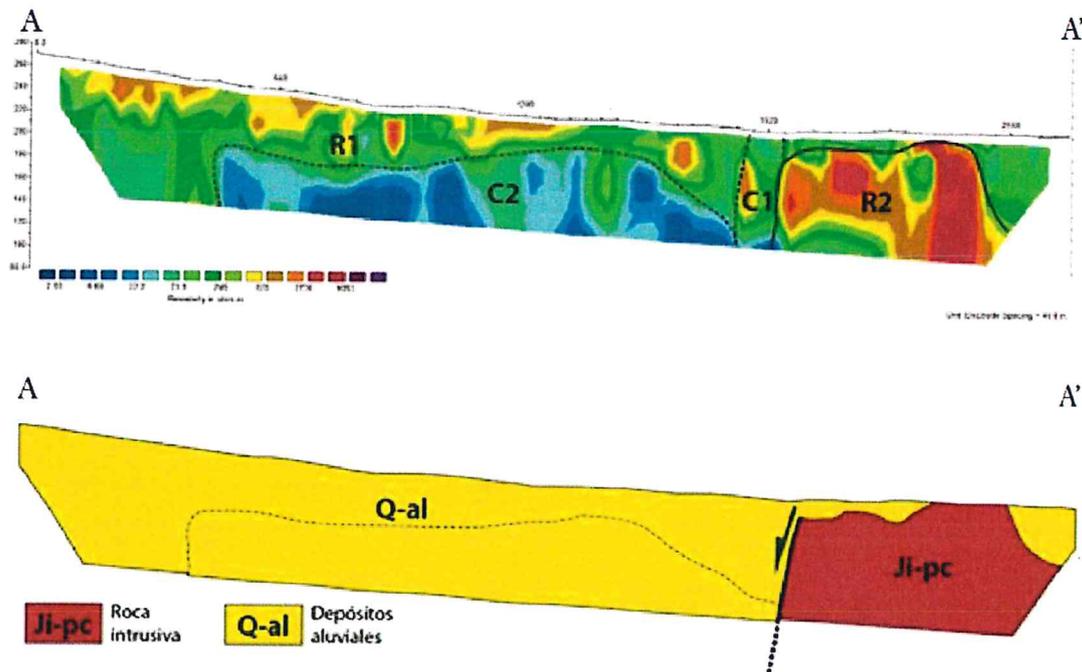


Figura 7. Perfil geofísico AA'', ubicado en la zona de Pampa Inalambrica. En el perfil geofísico (arriba), se pueden apreciar las zonas R1, R2, C1 y C2, las cuales representan zonas de distintas resistividades y conductividades. En la figura de abajo, se observa la interpretación geológica de los resultados geofísicos, donde claramente se observa dos distintas unidades y una discontinuidad (falla Chololo) entre ellas.

4.1.2. ANÁLISIS DE ACELERACIÓN SISMICA EN LA FALLA CHOLOLO

El propósito de este análisis es definir y cuantificar la amenaza sísmica que representa una posible reactivación de la falla en estudio, en este caso la falla Chololo. En este sentido, a partir de estudios de neotectónica y paleosismología, podemos caracterizar la falla, determinar su cinemática, dirección, longitud, buzamiento, ruptura promedio y calcular magnitudes máximas que una reactivación puede producir, información básica para crear mapas de aceleración sísmica.

Para construir los mapas escenario de aceleración sísmica, se utilizó el modelo de atenuación de Abrahamson & Silva (2008), el cual además de considerar el cartografiado y la caracterización de las fallas activas, considera el mapa de velocidades de onda de corte (V_{s30}), que es el parámetro que caracteriza la respuesta de la litología del sitio frente a un evento sísmico, cabe señalar que este mapa se construyó a partir de una recopilación bibliográfica.

Los resultados representan la aceleración máxima horizontal del suelo (PGA) para un determinado evento con una magnitud máxima para la falla. En el caso de Chololo, de acuerdo a los estudios de neotectónica, se consideró una ruptura de 1.5 m, dato que complementado con información de la longitud de la falla generaría un terremoto de 6.8 de magnitud.

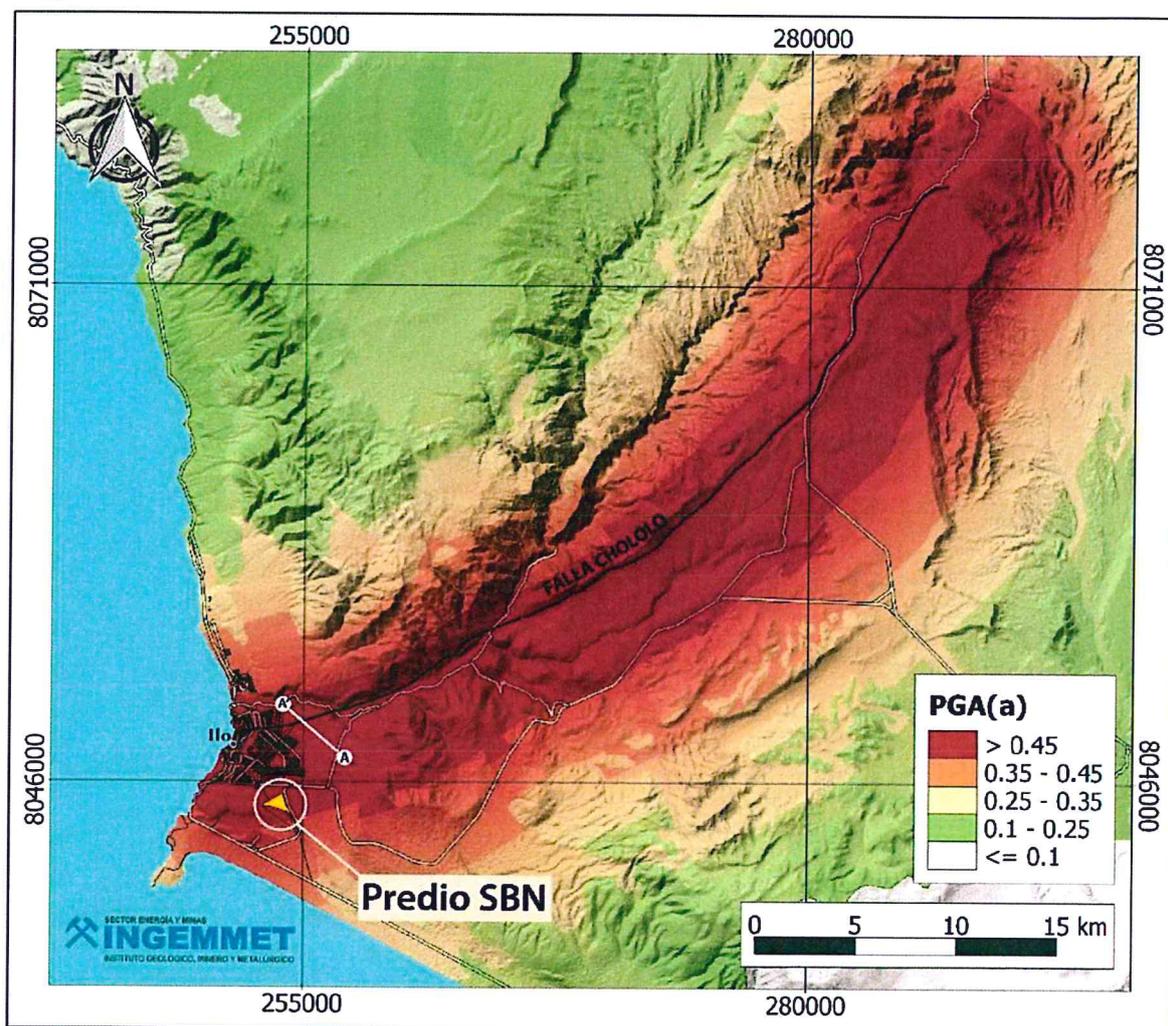


Figura 8. Mapa de aceleraciones (PGA). La escala de colores representa los valores de aceleraciones a lo largo de la falla Chololo, utilizando el rango propuesto por la norma E 030 del Ministerio de Vivienda y Construcción. En polígono amarillo se delimita el área del predio de la SBN. La línea blanca, que corta transversalmente a la falla simboliza la ubicación del perfil geofísico (AA').

Los resultados calculados muestran distintos valores, que, tomado en cuenta la Norma E.030 de diseño sísmoresistente de edificios del Perú (actualizado al 2018) se pueden clasificar en

cinco rangos. Es así que los colores rojos delimitan las zonas con aceleraciones más altas y las zonas de color verde representan las aceleraciones más bajas (Figura 8)

5. CONCLUSIONES

1. La falla geológica Chololo se extiende en las pampas costeras del sur del Perú a lo largo de 40 km, con dirección N60°E y buzamiento al sureste. Por sus características morfológicas, geométricas y cinemáticas determinamos que esta **estructura geológica es activa**. En este sentido, los sismos registrados después del sismo de subducción en Arequipa (2001) son una reconfirmación de su actividad.
2. Por la geometría de la falla, esta estructura geológica es el límite sur de la zona de ruptura del sismo del 2001, limita una zona de gap sísmico entre el sur del Perú y norte de Chile.
3. La **falla activa Chololo** muestra ruptura de superficie de hasta 3 m, lo que indica que las magnitudes asociadas con el movimiento de la falla son $> 6.5M_w$ en la escala de Richter.
4. Los resultados de la geofísica realizada, al menos en Pampa Inalámbrica, permiten confirmar la presencia de la falla Chololo en subsuelo.
5. Los mapas de aceleraciones nos permiten observar áreas más susceptibles a eventos sísmicos, en este caso el plano catastral nos indica el peligro alto al que está expuesto la ciudad de Ilo y alrededores (Figura 8).
6. Una posible reactivación de esta falla generaría un sismo mayor a 6.5, lo que hace que la ciudad de Ilo, se encuentre en una zona susceptible. Por condiciones o propiedades físicas de las rocas y depósitos no consolidados, se pueden llegar a generar aceleraciones de hasta $>0.45 g$.

6. RECOMENDACIONES

1. Los daños graves usualmente están restringidos a una zona angosta, de hasta 5 km de ancho a lo largo de la falla, rupturas subsidiarias pueden ocurrir hasta 10 km distantes de la falla principal. Por consiguiente, para la identificación de obras ingenieriles, se debe considerar la localización de las fallas geológicas con cada uno de sus segmentos, así mismo debe seguirse los lineamientos establecidos en las Normas de Seguridad Estructural de Edificaciones.
2. Para evitar daños en infraestructura es necesario planificar de manera adecuada, la construcción de estructuras lineales como carreteras, ferrocarriles, puentes, túneles, canales de riego, tuberías, así como también lugares para el tratamiento de residuos sólidos.
3. Si bien es cierto, se ha avanzado en la identificación y estudio de la falla Chololo, es necesario realizar un estudio paleosismológico, con la finalidad de identificar sismos pasados en el registro geológico y su posible recurrencia tal como el estudio que realizamos en la falla Tambomachay en la región Cusco.
4. En caso de realizarse obras de infraestructura de mediana a gran magnitud en el área de influencia de la falla, recomendamos que realicen un estudio de microzonificación sísmica de acuerdo a la escala del proyecto, para obtener el diseño sísmico apropiado.

7. REFERENCIAS

Abrahamson, N.A. & Silva, W.J. 2007. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations, *Earthquake Spectra*, 24(1): 67-97.

Billings, M. P., 1972, *Structural geology*, 3d ed.: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 606 p.

Audin, L., Lacan, P., Bondoux, F. 2008. Upperplate deformation and seismic barrier in front of Nazca subduction zone: The Chololo Fault system and active tectonics along the Coastal Cordillera, southern Peru. *Tectonophysics*.

Donne, D.D., Piccardi, L., Odum, J.K., Stephenson, W.J. y Williams, R.A. 2007. High resolution shallow reflection seismic image and surface evidence of the upper Tiber Basin active faults (Northern Apennines, Italy). *Bolletino della Società Geologica Italiana*, 126(2): 323-331.

Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. 2002. *INGENIERÍA GEOLÓGICA*. Pearson Educación, Madrid 2002. 744 p.

Luzi, L., Plugia, R., Pacor, F., Gallipoli, M.R., Bindi, D. & Mucciarelli, M. 2011. Proposal for a soil classification based on parameters alternative of complementary to Vs30. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6): 1877-1898.

Macharé, J., Benavente, C., Audin, L. 2008. Síntesis del Mapa Neotectónico del Perú. *INGEMMET. Boletín. Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, n. 40, 103 p., 2009.

Narciso, J., Vilanova, S., Lopes, I., Oliveira, C., Carvalho, J. 2012. Developing a site conditions map for seismic hazard assessment in Portugal. En: *World conference on earthquake Engineering*, 15. Lisbon, Portugal, 2012. *Proceedings*, 7 p.

Sanchez, A., Rosell, W. y Raymundo, T. 2000. Memoria explicativa de los cuadrángulos del proyecto de revisión geológica. Cuadrángulo de Punta de Bombon (35-s), Clemesi (35-t), Ilo (36-t), Locumba (36-u), la Yarada (37-u), Tacna (37-v), Huaylillas (37-x), Juli (33-y), Pizacoma(34-y) e Isla Anápolis (33-z). *INGEMMET*.

Slemmons, D.B. 1977. State of the art for assessing earthquake hazard, in the US. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Exp. Stn. Vicksburg, MS. Report No 6, *Miscellaneous Paper*, S-73-1.

Wallace, R.E. 1986. *Active tectonics: studies in Geophysics*. National Academy of Science. Washington.

Wang, C. Y. 2002. Detection of a recent earthquake fault by the shallow reflection seismic method. *Geophysics*, 67(5): 1465-1473.

Wills, C.J. & Clahan, K.B., 2006. Developing a map of geologically defined site condition categories for California. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(4a): 1483-1501.

Wells, D.L. & Coppersmith, K.J. (1994) - Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surfacedisplacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.