

## Interpretación de Datos Magnetotelúricos de la Transecta del Sur del Perú y su Relación con la Metalogenia

Luis Ysaías Quispe-Rentería<sup>1</sup>, Víctor Torres-Bazán<sup>1</sup>, Alonso Arturo Marchena Campos<sup>1</sup>, Carlos Nicolas Fernández Geraldino<sup>2</sup> Jorge Acosta Ale<sup>1</sup>, Darwin Calla<sup>1</sup>, Rossmery Jacobo<sup>1</sup>, Carlos Valencia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá #1470, San Borja, Lima

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Cercado de Lima

[lquispe@ingemmet.gob.pe](mailto:lquispe@ingemmet.gob.pe)

**Resumen/Abstract** En este trabajo se presentan los resultados de la investigación magnetotelúrica (MT), realizada a lo largo de la Transecta P1, que se extiende desde Mollendo hasta Puno, en el sur de Perú. Al emplear este método, en combinación con data aeromagnética y grandes sistemas de fallas corticales del sur del Perú (Carlotto *et al.*, 2009), se desea destacar la importancia del método en identificar cuerpos resistivos, asociados a cuerpos ígneos, así como zonas poco resistivas, asociadas con grandes sistemas de fallas corticales y con zonas de intenso magmatismo e hidrotermalismo y su implicancia en definir Unidades Tectonoestratigráficas, las cuales albergan depósitos minerales de distintas características y edades, permitiendo así enriquecer el conocimiento del mapa Metalogenético (Acosta *et al.* 2009,2010).

*This paper presents the results of the magnetotelluric (MT) research, carried out along Transect P1, which extends from Mollendo to Puno, in southern Peru. When using this method, in combination with aeromagnetic data and large systems of crustal faults of southern Peru (Carlotto et al., 2009), it is desired to highlight the importance of the method in identifying resistive bodies, associated with igneous bodies, as well as low-resistive zones, associated with large systems of crustal faults and with areas of intense magmatism and hydrothermalism and their implication in defining Tectonostratigraphic Units, which house mineral deposits of different characteristics and ages, thus allowing to enrich the knowledge of the metallogenic map of Peru (Acosta et al. 2009,2010).*

### 1. Introducción

La magnetotelúrica (MT) es un método geofísico que utiliza como fuente la interacción natural de las ondas electromagnéticas con la Tierra. Esta interacción permite medir, de manera simultánea, los campos eléctricos y magnéticos. El cálculo de la relación de ambos campos permite obtener modelos de resistividad y/o conductividad eléctrica del subsuelo (Simpson & Bahr, 2005) que pueden ser correlacionados con las estructuras geológicas existentes en la zona de estudio, desde unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros de profundidad.

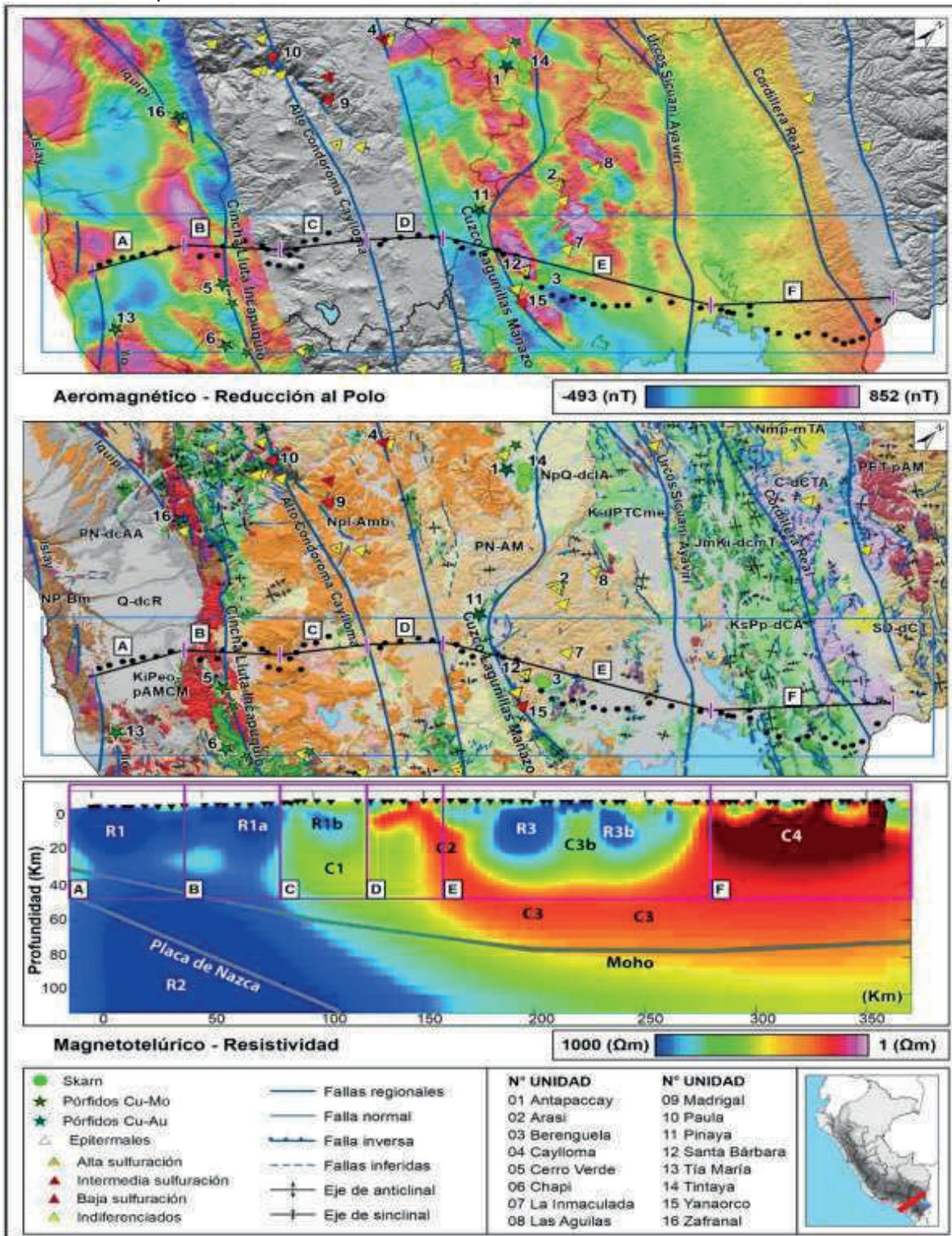
### 2. Metodología

El área de estudio se determinó sobre la base de la información geológica, y se desplegó una red de 71 estaciones MT, la recolección de datos consistió en un registro continuo de lecturas por 48 horas en promedio con cada estación separada entre 4 a 5 km. Los datos y las series temporales se procesaron utilizando técnicas estándar, con referencia remota, corrección de desplazamiento estático y análisis del impacto estructural y dimensionalidad basado en la descomposición del tensor. El análisis utilizó una combinación de inversión MT 2-D para definir la estructura de resistividad eléctrica en profundidad. Los resultados a lo largo del SE-NO orientado a un perfil de 360 km lineales aproximadamente con una profundidad de investigación de ~110 km se interpretaron utilizando la información geológica y tectónica disponible. Se obtuvieron valores de resistividad entre el rango de 1-1000 Ohm-m.

El levantamiento Aeromagnético del Sur del Perú fue tomado del trabajo de Cooperación entre SAN-INGEOMIN-AEROSERVICE, levantada por Intera Aeroservice en 1975. Escala 1:100,000. reducido al Polo, con un espaciamiento de línea de 2.5 km.

### 3. Contexto Geológico-Tectónico.

El marco geológico de la transecta P1, comprende a las unidades Tectonoestratigráficas (Quispe *et al.*, 2019 & 2020), definidas en base a sus característi-



**Figura 1.** Transecta Magnetotelúrica de resistividad, interpretación Aeromagnética de reducción al polo, Unidades Tectonoestratigráficas y los principales yacimientos en la zona de influencia.

cas litoestratigráficas, ambientes tectónicos y separada por discontinuidades tectónicas regionales, estas son:

1. Basamento metamórfico del Mesoproterozoico al Neoproterozoico (MPNP-cBC)
2. Plutonismo de Arco magmático a Plutonismo de Cuenca Marginal del Cretácico Superior – Eoceno (KiPeo-pAM CM).
3. Arco Magmático del Barroso del Mioplioceno (Npl-Amb).
4. Magmatismo de Arco del Eoceno al Mioceno (PeoNm-AM).
5. Plutonismo de Arco Magmático del Eoceno -Mioceno (PeoNm-pAM).
6. Depósitos de plataforma y talud carbonata marina epicontinental de Cretácico (Kis-dPTCME).
7. Depósitos de Cuenca antepaís del Cretácico Superior al Paleógeno (KsPp-dCA).
8. Depósitos de cuenca de Trasarco del carbonífero (C-dCTA).
9. Magmatismo de Trasarco del Mioceno - Plioceno (Nmp-mTA).
10. Plutonismo de Arco Magmático del Permotriásico (PET-pAM).
11. Depósitos de Cuenca Marina somera del Cámbrico al Ordovícico Superior (CAOs-dcMS).

#### 4. Interpretación Geológica de la Transecta Magnetotelúrica y Aeromagnética

La transecta P1 ha sido dividida en 6 sectores (Fig. 01) los cuales se describen a continuación:

Los **sectores A y B** comprenden las Unidades Tectonoestratigráficas **MPNP-cBC**, representada por la anomalía de resistividad R1, y un alto magnético en el mapa de reducción al polo del campo total (RTP). Mientras que el cuerpo resistivo R1a asociado a **KiPeo-pAM CM**, define un cuerpo altamente magnético de forma alargada de dirección NO-SE en el mapa RTP. Entre R1 y R1a se halla una zona de decaimiento de la resistividad de manera vertical (discontinuidad d1) y que en el mapa RTP estaría definiendo por una zona de transición magnética que sería la traza de la falla Sihuas (?) que pudo haber sido aprovechada posteriormente para el emplazamiento del Batolito de la Costa. Esta zona de decaimiento, expresada como una zona de debilidad, en un espesor cortical delgado, da potencial de mineralización de Fe-Cu-Au (IOCG y pequeños pórfidos del Jurásico -

Cretácico). El **sector B** se encuentra delimitado por el sistema de fallas Cinta-Lluta-Incapuquio. Alineados a este corredor se tienen al proyecto Zafranal y a la mina Cerro Verde. El marcado control estructural que tiene el emplazamiento del batolito de la costa (R1a) en una transición hacia una corteza más gruesa le da potencial prospectivo por pórfidos de Cu (-Mo-Au), en los controles estructurales que lo delimitan, especialmente hacia el este (Ramos *et al.*, 2002, Carlotto *et al.*, 2009, Mamani *et al.*, 2010, Martínez *et al.*, 2017 & Marchena, 2019). Se encuentran en este tramo pórfidos de Cu tales como Chapi, Cerro Verde, en la franja metalogenética X.

Por otro lado, a una profundidad de 40 a 45 km se encuentra la anomalía de resistividad (R2), que se relacionaría a la placa de Nazca, la que se subduce por debajo de la Sudamericana, en donde se ha podido definir la zona de discontinuidad de Moho, esta interpretación se asocia con la obtenida por Ma *et al.* (2014), Hayes *et al.*, (2012) y Phillips *et al.* (2012). En esta sección MT P1 se aprecia que la corteza continental se encontraría acortada y sobre engrosada, alcanzando en promedio > 60 km de espesor cortical. Esta anomalía R2 se ubica por debajo de las anomalías R1 y R1a, por lo que se considera que el actual frente de subducción se encontraría próximo a la ciudad de Arequipa, lo que genera fallas activas inversas como el sistema Incapuquio-Cinta-Lluta entre otros.

El **sector C**, se aprecian las consecuencias de la subducción de placas, lo que generarían arcos magmáticos por donde ascendieron los magmas y que podrían estar acompañados por fluidos hidrotermales a superficie a través de fallas profundas como se aprecia en la anomalía de conductividad (C1). Estos valores bajos, se prolongan en forma vertical por debajo del volcán Misti, estrechándose al llegar a la superficie pudiéndose interpretar como el conducto y su respectiva cámara magmática en profundidad, mientras que, la anomalía de resistividad (R1b), de valores de 50-100 Ohm-m estarían asociados a cuerpos subvolcánicos o posibles cámaras magmáticas antiguas que dieron origen al magmatismo de las unidades **Npl-Amb** y **PeoNm-AM**, respectivamente. Estas anomalías se encuentran abruptamente interrumpidas por el decaimiento de manera vertical de los valores de resistividad (1-10 Ohm-m) que se relaciona a la traza del corredor estructural Condoroma-Caylloma, el que marcaría el inicio del **sector D** en el que destacan las unidades tectonoestratigráficas

conformadas por el **PeoNm-AM**; la que se halla íntimamente ligada a la ocurrencia de yacimientos epitermales AS, IS y BS, como Selene, Orcopampa, entre otros. Esta unidad yace sobre un basamento compuesto por depósitos sedimentarias que van del Jurásico al Paleógeno, como son **JmKi-dcmT**, unidad que agrupa a las rocas del Grupo Yura, seguido por los **Kis-dPTCME**, formaciones Arcurquina, Chilcane y Puquín. Suprayaciendo a estos dos se encuentra la unidad **KsPp-dCA**, representado por la Formación Huanca. En este dominio se tiene la anomalía de conductividad (C2) con rangos que van de 1 a 10 Ohm-m, siendo ésta una zona conductiva, que se halla desde los 25 a 30 km de profundidad que, además, se prolonga tanto en superficie como a niveles más profundos. Estas zonas conductivas se relacionan a las unidades tectonoestratigráficas antes descritas, conforman el Alto de Condoroma-Caylloma, caracterizadas por ser permeables y por poder almacenar los primeros km de profundidad que al norte se asociaría a una estructura de rumbo EO paralelas al sistema de fallas Iquipi-Calvelinas, que se prolonga en sentido ENE-OSO, esta zona de debilidad ha favorecido la migración de los fluidos mineralizantes en la intercepción con el Alto de Condoroma-Caylloma, dando lugar a la presencia de los depósitos epitermales Paula, Caylloma, entre otros, favoreciendo así esta zona a mineralización de Au-Ag. Los sectores C y D se encuentran relacionados a la Franja de los Epitermales de Au-Ag del Oligoceno (Acosta *et al.* 2009,2010)

El **sector E**, se halla entre los sistemas de fallas Cusco Lagunillas Mañazo y Urcos-Sicuani-Ayaviri y comprende a la unidad **PeoNm-pAM**, conformada por las rocas del Batolito Andahuaylas-Yauri, que da lugar a la formación de yacimientos tipo pórfidos de Cu -Au y skarn Cu-Mo, (Au,Zn) de la Franja XV. En la transecta, esta unidad se encuentra relacionada a las anomalías de resistividad (R3) y (R3b) que en el mapa aeromagnético corresponderían a altos magnéticos que se disponen como cuerpos alargados de dirección NO-SE; los que se hallan separados por un bajo magnético, delimitado por una zona de transición magnética y que en la sección MT se relacionaría a una zona conductiva (C3b), corredor estructural profundo que se encuentra relacionado al emplazamiento de depósitos epitermales de Au-Ag y skarn (Pb-Ag-Zn-Cu±Au) como son: Inmaculada Santa Bárbara y Berenguela que estarían delimitados por dos posibles estructuras subverticales que llegan hasta los 20 km de

profundidad controlando la mineralización en este alto estructural; estas se tratarían de fallas verticales profundas, ciegas u ocultas que serían importantes para la mineralización ya que permiten el acceso de magmas a niveles corticales someros (Hollister,1978; Titley, 1981; Kutina, 1998). Este alto estructural estaría compuesto por las rocas sedimentarias del Cretácico **Kis-dPTCME** y **KsPp-dCA**, además, se encuentran cubiertas por **PeoNm-AM**. Por su parte, la zona conductiva (C3) ubicada entre los 40 y 70 km de profundidad se relacionaría a la zona de transición entre la base de la corteza continental y el manto, con presencia de fluidos convectivos desplazándose en su interior.

El **sector F** se encuentra delimitado por las fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri y Cordillera Real, en donde se presenta una zona conductiva (C4) más amplia entre los 5 y 30 km de profundidad por debajo de las unidades de **Kis dPTCME** y **KsPp-dCA** las que se relacionan con la zona de ocurrencias de U y Li. La zona conductiva C4 podría estar relacionada al basamento Paleozoico, que afloran a lo largo de la Cordillera Oriental sur; también se trataría de influencia del lago Titicaca al sur, así como la presencia de hidrocarburo asociado a las rocas calcáreas de la Formación Sipín. La característica conductiva de esta zona se debería a la posible circulación de materiales fundidos que llegan de la zona más profunda de la corteza continental y que alcanzan niveles más superficiales a través de los sistemas de fallas, así como por el aporte de agua y materiales conductivos desde la superficie (Valencia *et al.*, 2020). Por su parte, en el extremo Este se muestra una zona resistiva cuyos rangos van de 10 a 100 Ohm-m, que se halla desde los 0 a 10 km de profundidad que podría asociarse a la unidad tectonoestratigráfica **Nmp-mTA**, constituida por las formaciones Quenamari, Picotani y Cayconi, las que se relacionan a la mineralización de U y Li .

## 5. Conclusiones

La anomalía resistiva R2 se asociaría a la Placa de Nazca que se subduce acortando y engrosando la corteza suprayacente (espesor > 60km).

En la sección MT se observa que el actual frente de subducción se encontraría próximo a Arequipa.

Se han reconocido 3 cuerpos resistivos importantes (R1, R1a y R3-R3b) que corresponden a las unidades tectonoestratigráficas **MPNP-cBC**, **KiPeo-pAM CM** y **PeoNm-pAM**, correspondientes a unidades como el Complejo Basal de la Costa, Batolito de la Costa y Batolito Andahuaylas-Yauri, respectivamente. El cuerpo resistivo R1b correspondería a subvolcánicos o cámaras

magmáticas antiguas que dieron origen a las unidades **Npl-Amb** y **PeoNm-AM**.

Las zonas conductivas se asocian principalmente en niveles profundos a la actividad magmática y en niveles someros a zonas de debilidad afectadas por intenso fallamiento profundo que alcanza ~20km; circulación de fluidos, especialmente al este de la sección (anomalía C4).

Las discontinuidades marcadas entre zonas resistivas/conductivas denotan la presencia de sistemas de fallas corticales profundas, de alto ángulo, evidenciándose en la transecta especialmente para la discontinuidad entre R1 y R1a (falla Sihuas), R1b y C2 (SF ACC) C2 y R3 (SF CLM) y R3b-C4 (SF USA). El tramo entre SF-USA y SF CR se encuentra intensamente fallado y plegado.

La data aeromagnética permite corroborar discontinuidades observadas con la transecta MT, tales como la discontinuidad R3-R3b que presenta un alto y un bajo magnético, entre los cuales se encuentra el Skarn de Berenguela.

Las discontinuidades entre zonas resistivas/resistivas (R1-R1a y R3 -R3b) presentan zonas verticales conductivas las que marcan áreas de interés prospectivo, al implicar la combinación de factores tales como presencia de cuerpos intrusivos (zonas resistivas) y zonas de debilidad (fallas) que favorecen circulación de fluidos (conductivas). Estas discontinuidades marcan potencial de mineralización de Fe-Cu-Au en espesores corticales delgados (R1-R1a), Cu (-Mo-Au) (extremo oriental de R1a, próximo a R1a-R1b), Au-Ag (R1b-C2) y Cu -Au -Mo, (Pb, Zn) (R3 - R3b).

## 6. Agradecimientos

Especial agradecimiento a los geocientistas de la Universidad de Alberta Canadá por su invaluable apoyo en el desarrollo de la transecta P1, así mismo al Bach. Carlos Nicolas Fernández Geraldino por su incondicional apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

## 7. Referencias bibliográficas

Acosta Jorge, Rivera Raymond, Valencia Michael, Chirif Humberto, Huanacuni Dina, Rodríguez Italo, Villarreal Eder, Paico Deysi y Santisteban Alexander. (2009). Memoria Mapa Metalogenético del Perú 2009. En: Informe Técnico;N° A6485. INGEMMET URI: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1957>

Acosta Jorge, Quispe Jorge, Rivera Raymond, Valencia Michael, Chirif Humberto, Huanacuni Dina, Rodríguez Italo, Villarreal Eder, Paico Deysi y Santisteban Alexander. (2010) Memoria Mapa Metalogenético del oro en el Perú 2010. En: Informe Técnico;N° A6484. INGEMMET. URI: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1888>.

Carlotto, V.; Quispe, J.; Acosta, H.; Rodríguez, R.; Romero, D.; Cerpa, L.; Mamani, M.;Díaz-Martínez, E.; Navarro, P.; Jaimes, F.; Velarde, T.; Lu, S. & Cueva, E. (2009). Dominios Geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú* 103: 1-89.

Dalziel, IWD (1986). Colisión y orogénesis cordillerana: una perspectiva andina. Sociedad Geológica, Londres, Publicaciones Especiales, 19 (1), 389-404.

Hollister, V. F., 1978, Geology of the porphyry copper deposits of the western hemisphere: New York, Am. Inst. Mining Metall. Petroleum Engineers, 219 p.

Kutina, J., 1998. The role of deep lithospheric structure in the genesis of giant ore deposits. *Global Tectonics and Metallogeny*, V. 6, N° 3-4, Pt. 2.

Ma, Y. & Clayton, R.M. (2014). The crust and uppermost mantle structure of Southern Peru from ambient noise and earthquake surface wave analysis, *Earth and Planetary Science Letters*, 395, 61-70

Mamani, M.; Wörner, G. & Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*, 22 no 1/2.; p. 162-182.

Marchena, A. (2019). Caracterización petrográfica y litogeoquímica del magmatismo de los proyectos Tía María, Los Calatos y Chipispaya (Arequipa-Moquegua-Tacna). Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 279 p

Martínez, W.; Otero, J.; León, W. & Marchena, A. (2017). Estudio metalogenético de la faja magmática Jurásico-Cretácica, asociado a los depósitos minerales tipo IOCG y Pórfidos entre Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna. Bloque Sur. INGEMMET, 2017

Ramos, V. A.; Cristallini, E.O. & Pérez, D.J. (2002). The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15 (2002). 59-78.

Ramos, V.A., 2008, The basement of the Central Andes: The Arequipa and related terranes: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 36, p. 289-324, doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124304.

Simpson, M. & Bahr, K. (2005). *Practical Magnetotelluric*. Cambridge University Press.

Titley, S.R., and Beane, R.E., 1981, Porphyry copper deposits, in Skinner, B.J., ed., *Economic Geology Seventy-fifth Anniversary Volume, 1905- 1980: Economic Geology Publishing Co.*, p. 214-269. Titley, S.R., Thompson, R.C., Haynes, F.M., Manske, S.L.,

Valencia Carlos, Calla Darwin, Flores Rosmary, Huilca José, Valdivia Igor (2020). Informe Técnico Geofísico para la Transecta P01 Método Magnetotelúrico. INGEMMET.