

Nuevas perspectivas para la exploración en zonas de cobertura post-mineral: caso de estudio en la pampa caya (20°30' - 21°s).

P. A. Molina

Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile.

B. A. Madariaga

Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile.

W. Garrido

Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile.

S. Perroud

Incaic Exploration SpA, Santiago, Chile.

Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile.

G. Fuentes

Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile.

Incaic Exploration SpA, Santiago, Chile.

ABSTRACT: In the Domeyko Range, northeast of the Collahuasi mining district, is the Pampa Caya, a sedimentary basin of Miocene age, which covers almost the entire geology of the area. From the use of magnetic and gravimetric geophysical data, the geological units and structures that are underlain by the Pampa Caya were determined. Using Low-Pass and High-Pass filters and first vertical derivatives of the Residual Vector of the Magnetic Field and Bouguer Anomaly, it was possible to interpret geophysical anomalies that indicate a continuity of the formations and structures hidden under the pampa coverage. With these results it was possible to correlate the continuity of the Collahuasi, Quehuita and Cerro Empexa formations and local reverse faults and establish the latitudinal continuity of the Domeyko Fault System. The regional and district distinctive geological and geophysical characteristics for the Andean Metallogenic Belt and of the Collahuasi cluster were applied in the study area, in order to propose a prospective map under the post-mineral coverage of the Pampa Caya.

RESUMEN: En la Cordillera de Domeyko, al noreste del distrito minero Collahuasi, se encuentra la Pampa Caya, una cuenca sedimentaria de edad miocena, que cubre casi en totalidad la geología de la zona. A partir del uso de datos geofísicos de potencial magnético y gravimétrico se determinaron las unidades y estructuras geológicas que se encuentran bajo la cobertura en la Pampa Caya. Utilizando filtros Pasa-Baja, Pasa-Alta y primeras derivadas verticales del Vector Residual del Campo Magnético y Anomalía de Bouguer, se logró interpretar anomalías geofísicas que indican una continuidad de las formaciones y estructuras ocultas bajo la pampa. Con estos resultados fue posible correlacionar la continuidad de las formaciones Collahuasi, Quehuita y Cerro Empexa, fallas inversas locales y establecer la continuidad latitudinal del Sistema de Falla de Domeyko. Las características geológicas y geofísicas distintivas regionales para franjas metalogénicas andinas y distritales del clúster de Collahuasi fueron aplicadas en la zona de estudio, con la finalidad de proponer un mapa prospectivo bajo la cobertura post-mineral de la Pampa Caya.

KEYWORDS: Pampa Caya, Collahuasi, Magnetometría, Gravimetría, Cordillera de Domeyko, Exploración mineral.

1 INTRODUCCIÓN

En la Cordillera de Los Andes, entre los 20° y 27°S, se encuentra el Sistema de Fallas de Domeyko (SFD), un arreglo estructural de más de 1.000 km de extensión, que fue foco de la actividad hidrotermal en los períodos Eoceno Medio/Oligoceno Temprano (43-31 Ma), generalmente asociado al cinturón metalogénico de similar edad (Sillitoe, 1998; Perelló *et al.*, 2003; Sillitoe y Perelló, 2005; Maksaev *et al.*, 2007).

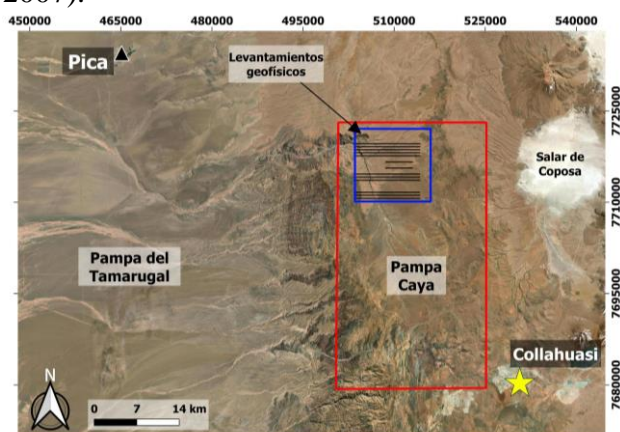


Figura 1. Zona de estudio en rojo

Los depósitos asociados a este cinturón metalogénico de aproximadamente 130 km a 30-50 km de ancho en el Norte de Chile, corresponden a yacimientos de tipo pórfidos cupríferos de Mo y/o Au, y depósitos tipo skarn (Sillitoe, 1998; Perelló *et al.*, 2003; Sillitoe y Perelló, 2005; Maksaev *et al.*, 2007). Dentro de estos, se destacan los yacimientos de Collahuasi-Quebrada Blanca, Chuquicamata, Escondida y El Salvador (Münchmeyer, 1996; Sillitoe, 2005).

Si bien, gran parte de estos depósitos minerales han sido descubiertos por exploración de minerales expuestos, en la actualidad los objetivos de exploración se encuentran más bien enfocados en depósitos minerales ciegos y/o profundos. Acorde a esto, el uso de métodos como la geofísica, geoquímica y en especial el entendimiento de las estructuras en profundidad como canales mineralizadores, se convierten en una necesidad latente para el descubrimiento de nuevos depósitos bajo cobertura (Sillitoe y Thompson, 2006; Fuentes *et al.*, 2018; Skarmeta, 2021). Específicamente en la región de estudio y el sector de la Pampa Caya, es importante entender la configuración y distribución de las estructuras del SFD, comprendiendo su influencia en el control de depósitos minerales

como, por ejemplo, Collahuasi-Ujina (Ossandón *et al.*, 2001). Por lo tanto, este estudio busca determinar las unidades y estructuras geológicas cubiertas al norte del distrito Collahuasi, y su potencial rol en el ascenso de fluidos hidrotermales, convirtiéndolas en áreas prospectivas para la exploración mineral basado en los patrones reconocidos en cinturones metalogénicos andinos y en particular en el clúster de Collahuasi.

Nueva información geofísica y geológica de la industria minera publicada en el Sistema de Información de Exploración (SIGEX) del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile provee una oportunidad única para la investigar las configuraciones geológicas de superficie y sub-superficie. En particular, datos geofísicos crudos (“raw data”) publicados en SIGEX permiten el reprocesamiento y análisis de la información. A partir de esto, se obtiene un set de resultados que permiten una interpretación de las propiedades físicas de la geología. Interpretación que en muchos casos podría haber sido realizada con filtros geofísicos y algoritmos que no necesariamente son aplicables a las condiciones de inducción magnética del Norte de Chile. Es sabido, que, en estas latitudes, condiciones de remanencia magnética, “reversals” y bajas latitudes magnéticas condicionan severamente el resultado de estos filtros a una interpretación probablemente errónea o con alto grado de incertidumbre. De allí, un filtro como el Vector Residual del Campo Magnético (VRMI) emerge como una posibilidad de ajustar de forma más precisa estos resultados a la realidad, por sobre aquellos filtros comúnmente utilizados, como por ejemplo el mapa reducido al polo del campo magnético total (RTP) y todos aquellos filtros derivados del mismo, reduciendo el grado de incertidumbre y cumpliendo con la finalidad de realizar nuevas interpretaciones geológicas y estructurales. Admitiendo la entrega de una visión novedosa en sectores altamente prospectivos, pero con condiciones que complejizan la exploración mineral, como la cobertura post-mineral (sobrecarga). Este estudio ha sido focalizado en la Pampa Caya, entre los 20°30’ y 21°S, y los principales resultados han permitido establecer la continuidad septentrional del Sistema de Falla de Domeyko y unidades geológicas involucradas en la deformación, siendo plausible proponer

nuevas perspectivas de exploración en zonas cubiertas hacia el norte del distrito Collahuasi.

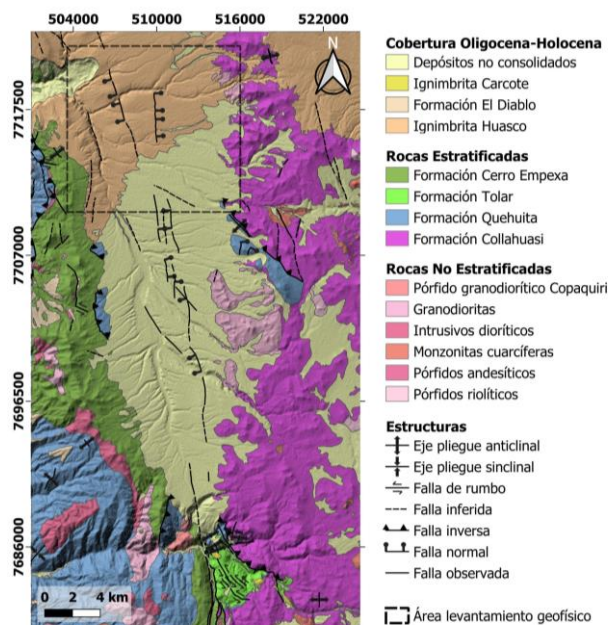


Figura 2. Mapa Geológico compilado de (Vergara y Thomas, 1984; Tomlinson et al., 2001).

2 GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Las secuencias más antiguas se distribuyen a lo largo del borde oriental del área de estudio (Fig. 2), y corresponden a rocas volcanosedimentarias de la Formación Collahuasi (Vergara, 1978; Vergara y Thomas, 1984) cubiertas, en discordancia, por series marinas y continentales Jurásico Inferior al Cretácico Inferior de la Formación Quehuita (Vergara, 1978), distribuidas en los bordes este y oeste de la Pampa Caya y hacia el sector centro sur de la zona de estudio. Sobreyaciendo en leve discordancia angular se encuentra la Formación Cerro Empexa (Galli, 1967), distribuida en el borde occidental de la Pampa Caya y es constituida por rocas sedimentarias continentales clásticas y volcánicas (Dingman y Galli, 1965; Blanco *et al.*, 2012; Vergara y Thomas, 1984). Aflorando solo al sur de la zona y en contacto discordante sobre la Formación Quehuita y bajo la Formación Collahuasi se encuentra la Formación Tolar (Maksaev, 1978), compuesta de conglomerados gruesos en su base y brechosos en su techo, también se encuentra un nivel de areniscas rojas estratificadas en artesa.

También se encuentran en la zona depósitos no consolidados correspondientes a la Ignimbrita

Huasco (Galli, 1967), concordante con la Formación El Diablo y corresponden a una secuencia de tobas soldadas. La Formación El Diablo (Galli, 1967), por su parte, corresponde a secuencia de areniscas seguidas por conglomerados al techo de la formación (Galli, 1967). Sobreyaciendo a la Formación Tolar, la Ignimbrita Carcote (Tomlinson *et al.*, 2001) solo aparece en la zona sur de la zona y corresponde a un depósito de flujo piroclástico (Tomlinson *et al.*, 2001).

En el área de estudio también existen una variedad de unidades y cuerpos intrusivos (Tomlinson *et al.*, 2001), como es el caso de pórfidos riolíticos, andesíticos y el Pórfido Granodiorítico Copaquiri, los riolíticos se emplazan en la Formación Collahuasi, los andesíticos la Formación Cerro Empexa respectivamente, se presentan en grupos de stocks y en el caso de los andesíticos se tienen filones que presentan una débil alteración propilítica. El pórfido granodiorítico Copaquiri aflora al sur de la zona de estudio y las granodioritas de la zona son cuerpos orientados N-S de tipo stock. En el basamento paleozoico se tienen monzonitas cuarcíferas de tipo Stock, ubicadas a ambos lados del Sistema de Fallas de Domeyko.

La zona de estudio presenta un arreglado estructural importante, asociado a diversas fallas de carácter tanto regional como local, entre las más relevantes son las Fallas Challoy Copaquiri y en especial el Sistema de Fallas Precordillerano o de Domeyko. El Sistema de Fallas de Domeyko (falla central Figura 6) corresponde a una fractura de escala regional orientada predominantemente N-S, se extiende a lo largo de la Precordillera por alrededor de 1000 km (Lindsay *et al.*, 1995) y se toma como la falla maestra dentro de un grupo de fallas inversas de vergencia hacia el oeste y este (Smoje, 1989; Tomlinson *et al.*, 2001). Adicionalmente, que divide en varias ramas regionales con cinemáticas y deformaciones características (Lindsay *et al.*, 1995). Para este estudio el Sistema de Fallas de Domeyko, siendo este la rama norte, de alrededor de 170 km desde el norte de Calama hasta Quebrada Blanca de manera casi ininterrumpida, posee actividad desde el Eoceno tardío/Oligoceno temprano (Reutter *et al.*, 1996) por lo que presenta actividad hidrotermal desde al menos 34 millones de años siendo alimentador de depósitos

de pórfidos cupríferos como Chuquicamata, el cual presenta altas concentraciones de metales y sulfuros (Ossandón *et al.*, 2001). Su última actividad registrada corresponde a un movimiento de cizalle dextral, sin-tectónico a la fase tectónica Incaica (Reutter *et al.*, 1991; Tomlinson y Blanco 1997). La falla Challos (Tomlinson *et al.*, 2001), parte del sistema de fallas de reversa del Eoceno, ubicado al sur de la zona de estudio de orientación NNO-SSE se extiende aproximadamente 22 km por el este de la Falla de Domeyko, generando que la Formación Collahuasi se encuentre sobre las rocas de la Formación Cerro Empexa y las calizas de la Formación Tolar (Figura 2). La falla Copaquiri encontrada al este de la falla Challos, de orientación ONO-ESE y produce la deformación que provoca que la Formación Cerro Empexa sobreyace la Formación Collahuasi. La orientación paralela entre las estructuras del Paleógeno y Neógeno. Según Víctor *et al.* (2004), las orientaciones paralelas de estructuras más antiguas paleógenas controlan la geometría de las jóvenes neógenas, en esta área dominada por sistemas de fallas extensionales dextrales N-S y NO-SE.

Por otro lado, se tiene la mineralización del distrito Collahuasi, correspondiente a los yacimientos Monctezuma, Quebrada Blanca, Copaquiri, Ujina y Rosario, de edades Eoceno-Oligoceno, corresponde a uno de los distritos de pórfidos más prominentes de Chile. El hecho de que las rocas volcanosedimentarias paleozoicas y su relación con la mineralización tipo pórfido se encuentren aflorando la convierten en un centro de estudio tanto geológico como mineralógico. que hospedan. La mineralización se centra en vetas epitermales Cu-Ag-(As)-(Au) y vetas Ag-Mn-Au, de orientaciones NNO y NNE respectivamente, también existen depósitos exóticos de paleogravas de cobre y placeres de oro en menor medida (Ireland, 2010).

3 METODOLOGÍA

En este estudio se utilizó la base de datos de uso público SIGEX desarrollada por Sernageomin, con la cual se generó una base de datos con la geofísica y geología disponible del Proyecto Quinchamale de la empresa Minera Freeport McMoran South America Ltda. Los datos de la magnetometría y gravimetría fueron

georreferenciados y compilados en ArcMap y Leapfrog Geo, información que fue reprocesada en el programa Oasis Montaj de Seequent. Dado esto se elaboró el mapa geológico compilado de la zona de estudio a una escala 1:150.000 (Figura 2).

Los datos magnéticos se obtuvieron a partir del levantamiento aéreo ZTEM (Z-Axis Tipper Electromagnetic) realizado con un espaciamiento de 500 m entre cada línea y una orientación E-W. En la figura 3A se muestra la imagen resultante de este proceso, el campo magnético total (TMI) medido de la zona. El TMI muestra la anomalía dipolar del campo magnético terrestre sumado a los efectos de remanencia y bajas latitudes magnéticas que están presentes en el Norte de Chile, que pueden afectar significativamente la interpretación generando falsas anomalías e imprecisión en la ubicación de los cuerpos magnéticos. De allí, que a través de la aplicación del filtro Vector Residual del Campo Magnético (VRMI; Dransfield *et al.*, 2003), que elimina el efecto dipolar y remanencias magnéticas al centrar la anomalía exactamente sobre el cuerpo, se simplifica de modo importante la interpretación de los datos magnéticos. En la figura 3B, se presenta el resultado de aplicar este filtro al campo magnético total. Por otro lado, para el levantamiento gravimétrico, se utilizaron alrededor de 130 estaciones gravimétricas terrestres, mediciones que se realizaron utilizando un equipo Lacoste & Romberg, con estaciones espaciadas cada 1 y 2 km (figura 3C).

Con el fin de resaltar fuentes magnéticas someras, a los datos magnéticos se les aplicaron filtros de alta frecuencia, como por ejemplo la primera derivada vertical y Pasa-Alta. Mientras que, a partir de la gravimetría se obtuvo la anomalía de Bouguer, a la cual también se le aplicó un filtro Pasa-Alta para resaltar contrastes de densidad someros. Cabe señalar, que como parte del proceso de datos también se aplicaron filtros de baja frecuencia para destacar datos más profundos.

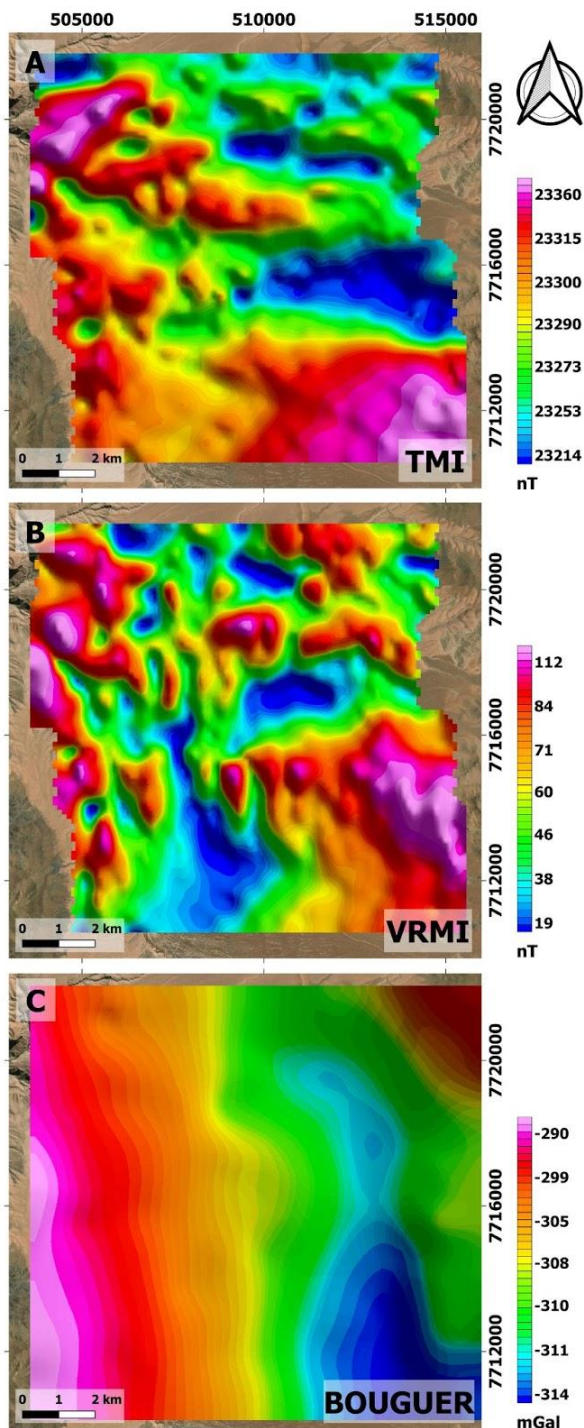


Figura 3. Comparativa de datos geofísicos, (A) Campo Magnético Total (TMI), (B) Vector Residual del Campo Magnético (VRMI), (C) Anomalía de Bouguer.

4 RESULTADOS

Utilizando la información geofísica disponible, se dio lugar a la generación de mapas predictivos o interpretativos de propiedades magnéticas y gravimétricas para ser ajustados o acotados por la geología, con lo cual se identificaron formaciones, estructuras y paquetes

sedimentarios correspondientes a la cobertura post-miocena.

En principio la utilización del filtro VRMI, simplifica la interpretación (Figura 3B). Se utilizó además el filtro Pasa-Baja para identificar cuerpos más profundos o de baja frecuencia (Figura 4A). Paralelamente a este se le aplicó el filtro primera derivada vertical al VRMI (resultado que se muestra en la figura 5), resaltando los datos magnéticos someros, es decir posibles lineamientos o estructuras magnéticas, probablemente controladas por la geología de la zona.

En el caso de los datos gravimétricos las anomalías de contrastes de densidad se reducen preliminarmente a la anomalía de Bouguer. En el caso de las anomalías gravimétricas, estas se encuentran centradas sobre los cuerpos geofísicos (Figura 4B). Dado que la gravimetría entrega datos asociados a las densidades de un cuerpo, se aplicó un filtro Pasa-Alta, para identificar los altos contrastes de cuerpos de alta y baja densidad entre la superficie y el límite matemático del filtro (Figura 4B). De la misma forma que se realizó con la magnetometría, se aplicó el filtro primera derivada vertical a la anomalía de Bouguer en paralelo, con el objetivo de resaltar lineamientos y contrastes de densidad someros (Figura 5).

Se identificaron dos grandes familias de estructuras, tanto para los lineamientos magnéticos (Figura 5), las cuales corresponden a las siguientes direcciones: N-S y NO-SE, mostrado en el diagrama de roseta de la figura 5.

4.1 Cuerpos magnéticos y gravimétricos

Los principales cuerpos magnéticos identificados presentan orientaciones variables dependiendo de la intensidad. Los cuerpos de anomalías magnéticas altas tienen orientaciones preferenciales NNE (2, 3, 4) y NO (1), respuestas magnéticas altas a moderadas muestran una tendencia noroeste a oeste-este (5, 6, 7, 8, 9, 10) y anomalías bajas presentan orientaciones principales NO y NE (Fig. 4A).

De manera similar, los cuerpos gravimétricos muestran direcciones variables asociadas a la intensidad. Los cuerpos de respuesta gravimétrica elevada a moderada presentan una

orientación principal norte-sur, secundaria noreste y en menor medida ENE-OSO. En tanto, los cuerpos con anomalías gravimétricas bajas muestran direcciones preferenciales NO y NE (Fig. 4B).

4.2 Estructuras magnéticas y gravimétricas:

La interpretación de discontinuidades magnéticas de la primera derivada vertical del filtro VRMI de la grilla de magnetometría, presenta un sistema de estructuras magnéticas que abarca 10 km de ancho y 10 km de largo, con orientaciones preferenciales N-S a NNO-SSE (Figura 5). Estos lineamientos magnéticos presentan características geométricas segmentadas y rectilíneas, con leves variaciones en el rumbo (Figura 5). Las principales truncaciones y desplazamiento de anomalías magnéticas de elevada amplitud son observadas en el sector central de la zona de estudio (Figuras 4A y 5).

4.3 Integración y correlación con la geología de superficie:

La gran mayoría de los cuerpos geofísicos identificados se encuentran cubiertos por secuencias sedimentarias miocenas (post-mineral), mostrado por las señales magnéticas y gravimétricas. Por tanto, es clave realizar la correlación de los cuerpos geofísicos con las unidades geológicas que afloran en las zonas adyacentes. Permitiendo generar un mapa sólido de la sub-superficie mediante la proyección de la geología aflorante en superficie.

Para la Formación Collahuasi, ubicada al sureste y noroeste de la zona de levantamientos geofísicos (Figura 2), se encuentran asociados los cuerpos 1 (Figura 4B), 25 y 22 (Figura 4B), correspondientes a intensidades gravimétricas altas a moderadas e intensidades magnéticas altas.

Utilizando el criterio antes aplicado, al sureste aflora la Formación Quehuita (Figura 2), representada por los de los cuerpos 35 y 40 (Figura 4B), correspondientes a un bajo magnético y gravimétrico. De esta manera, los intrusivos dioríticos del noreste de la zona

(Figura 2) corresponden a los cuerpos 11 y 37, que, han sido interpretados como los mismos stocks dioríticos, pero alterados.

En tanto, la Formación Cerro Empexa al suroeste de la zona (Figura 2), se correlaciona con altos magnéticos e intensidades gravimétricas moderadas a altas con los cuerpos 2 (Figura 4A) y 24 (Figura 4B).

Considerando las improntas identificadas en este trabajo, es posible interpretar la continuidad de estas unidades geológicas bajo la cobertura post-mineral que se distribuye ampliamente en la Pampa Caya.

La Formación Cerro Empexa tiene una orientación preferencial NS y los cuerpos magnéticos 3, 4, 8, 9, 19, 21, 23, 30 y 31 son correlacionables con esta (Figuras 4 y 6).

La Formación Quehuita se puede observar su continuidad al norte definida por los cuerpos magnéticos 12, 13, 18 y 32. Mientras que, la Formación Collahuasi se encontraría asociada a los cuerpos 5, 6, 7, 26, 27, 28, 29, los cuales, podrían corresponder a cuerpos controlados por fallas, yuxtaponiendo a esta formación con la Formación Quehuita (Figuras 4 y 6), agregado a esto los cuerpos 10 y 25 definen la continuidad de la Formación Collahuasi al norte.

Las estructuras magnéticas identificadas (Figura 5) son interpretadas como la expresión de estructuras geológicas que presentan una tendencia preferencial sub-paralela a la orientación de fallas regionales pertenecientes al Sistema de Falla de Domeyko (Figuras 2, 5 y 6).

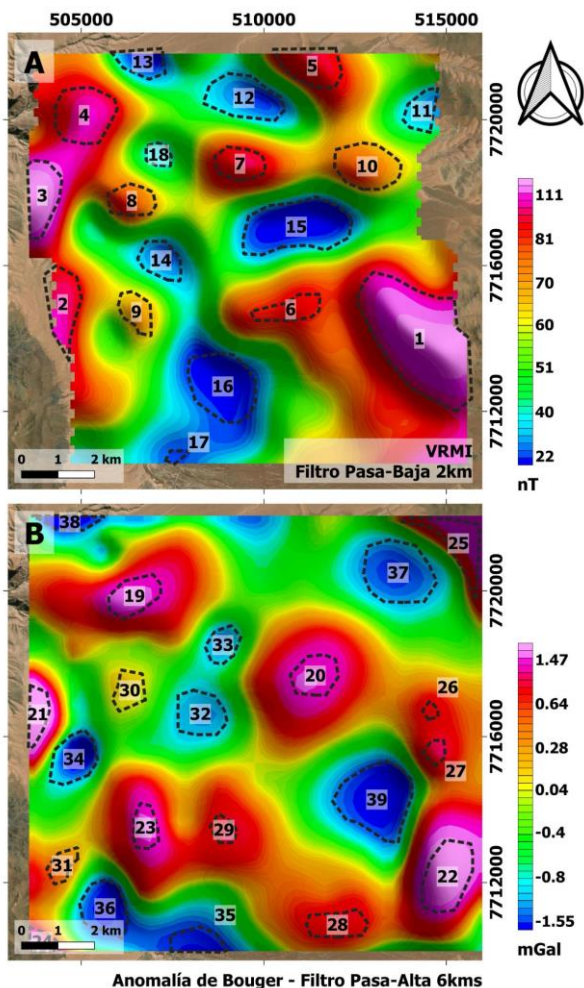


Figura 4. (A) Cuerpos magnéticos en el VRMI y (B) cuerpos gravimétricos en la anomalía de Bouguer.

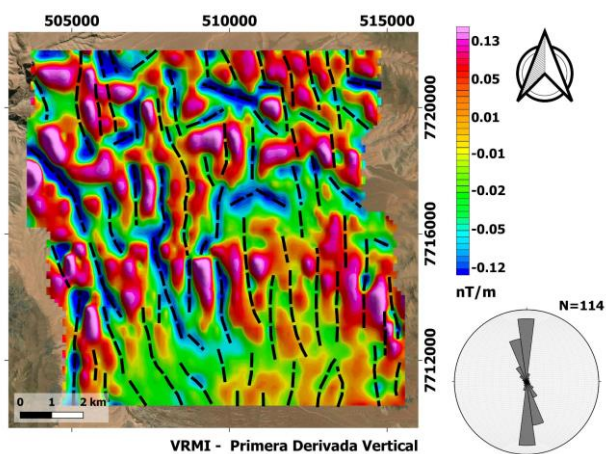


Figura 5. Estructuras magnéticas y diagrama de roseta.

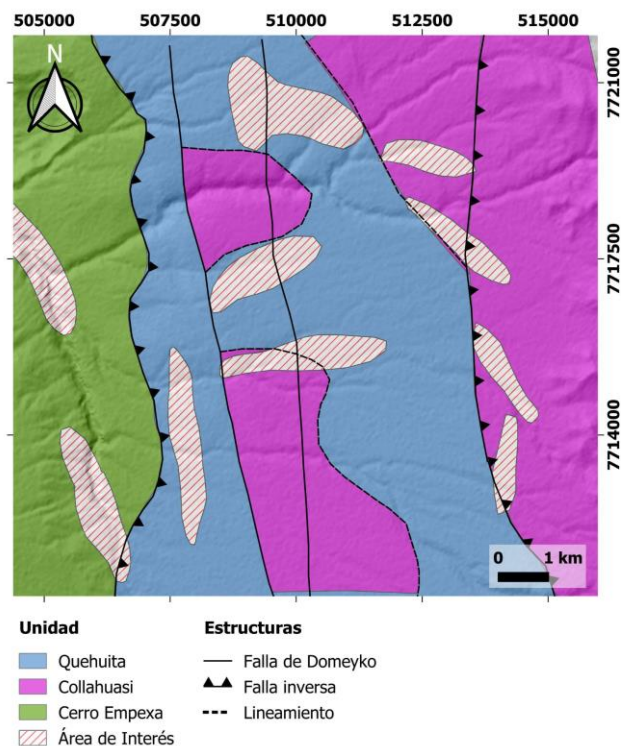


Figura 6. Distribución de las formaciones (de oeste a este) Cerro Empexa, Quehuita, Collahuasi interpretadas a partir de los cuerpos geofísicos correlacionados.

5 DISCUSIÓN

Considerando la ubicación espacial de las estructuras pertenecientes al Sistema de Falla de Domeyko expuestas hacia el sector meridional del área de estudio (Figura 2), es posible realizar la proyección latitudinal de este sistema bajo la cobertura post-mineral de la Pampa Caya (Figura 6). Esta proyección del SFD es complementada y validada por los prominentes quiebres longitudinales de respuestas gravimétricas elevadas (Figura 4b). En adición la integración de información geológica y geofísica llevada a cabo en esta investigación permitió develar la extensión septentrional de dos fallas inversas con vergencia hacia el occidente (Figuras 2 y 6), que cabalgan rocas paleozoicas (Formación Collahuasi) sobre secuencias sedimentarias jurásicas (Formación Quehuita) y estas últimas sobre sucesiones volcánicas cretácicas (Formación Cerro Empexa) por sector este y oeste, respectivamente (Figura 6).

El reconocimiento de la continuidad latitudinal del Sistema de Falla de Domeyko hacia la Pampa Caya hace plausible acotar zonas prospectivas basado en improntas reconocidas regionalmente para las franjas metalogénicas

andinas y distritalmente en el cluster Collahuasi (Figura 6). Desde una perspectiva geológica estructural, las zonas de intersección entre estructuras paralelas y oblicuas al orógeno andino han sido ampliamente utilizadas para las primeras etapas de exploración mineral de carácter regional (Richards, 2001; Piquer *et al.*, 2021). Estudios geofísicos (Behn *et al.*, 2001; Yañez y Rivera, 2019) han permitido establecer zonas de interés para exploración mineral basado en la ubicación de cuerpos densos y magnéticos. Behn *et al.* (2001) reconoce que los principales depósitos tipo pórfido cupríferos se encuentran localizados en anomalías magnéticas oblicuas a la orientación general de la Cordillera de los Andes. En tanto, Yañez y Rivera (2019) destacan el rol de los límites de cuerpos densos, altos gravimétricos, y estructuras de larga vida en la ocurrencia de depósitos minerales asociados a cobre principalmente. La sucesiva reactivación de estructuras preexistentes ha sido identificada en otras regiones altamente prospectivas como la Pampa del Tamarugal, donde fallas normales asociadas a la formación de cuencas extensionales del Jurásico han sido reactivadas en cinemática inversa desde el Cretácico Superior al reciente, controlando la ubicación de depósitos minerales y rasgos morfológicos (por ej. cerros islas) que irrumpen la pampa (Fuentes *et al.*, 2018; Fuentes *et al.*, 2021; Martínez *et al.*, 2021). Dando cuenta de la importancia del estudio de estructuras geológicas posteriores a períodos de mineralización, como guía para el reconocimiento de estructuras de larga vida y potencialmente utilizadas como canales de ascenso de fluidos mineralizadores.

Estas señales geológicas y geofísicas previamente establecidas y los resultados obtenidos en este trabajo han permitido proponer zonas de interés o “*targets*” donde podrían localizarse ocurrencias minerales bajo la cobertura post-mineral de la Pampa Caya (Figura 6). Abriendo nuevas perspectivas para disminuir el riesgo en la exploración en zonas cubiertas (sobrecarga).

6 CONCLUSIÓN:

La geofísica, a través de filtros matemáticos contrastados con la geología, proporcionó, de forma clave y clara, información de una zona cubierta prácticamente en su totalidad. El

reprocesamiento de datos magnéticos y gravimétricos, disponibles de forma pública en la plataforma SIGEX del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), agregado al análisis geológico estructural realizado en este trabajo, entrega nuevas perspectivas para la exploración en zonas de cobertura post-mineral.

Este estudio permitió develar unidades y estructuras geológicas bajo la cobertura de la Pampa Caya. Destacando la presencia de la Formación Collahuasi, Formación Quehuita y Formación Cerro Empexa. A su vez, la continuidad en sub-superficie de dos fallas inversas locales y la expresión septentrional del Sistema de Falla de Domeyko.

La integración de cuerpos geofísicos, correlación de formaciones y estructuras geológicas, y la implementación de improntas regionales estructurales y geofísicas (magnéticas y gravimétricas) en el área de estudio, hizo plausible proponer nuevas zonas prospectivas, con la finalidad de optimizar la exploración en sectores oscurecidos por cobertura post-mineral.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Seequent por facilitar licencias académicas de los programas Oasis Montaj y Leapfrog Geo. Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por los proyectos de investigación internos de la Universidad Santo Tomás. Agradecemos sinceramente a la compañía minera Freeport McMoran South America Ltda. y Servicio Nacional de Geología y Minería por la liberación de información geológica y geofísica, a través de la plataforma Sistema de Información Geográfica de Exploración (SIGEX). Finalmente, agradecemos al comité editor por sus valiosos comentarios, que ayudaron a mejorar la versión anterior del manuscrito.

REFERENCIAS

Behn, G., Camus, F., Carrasco, P., Ware, H. 2001. “*Aeromagnetic Signature of porphyry copper systems in northern Chile and its geologic implications*” Economic Geology 96(2).

- Blanco, N., Vásquez, P., Sepúlveda, F., Tomlinson, A., Quezada, A., Ladino, M., 2012. "Levantamiento geológico para el fomento de la exploración de recursos minerales e hídricos de la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Precordillera de la Región de Tarapacá (20°-21°S)". Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile).
- Charrier, R., Farías, M., & MaksaeV, V. 2009. "Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina". Revista de la Asociación Geológica Argentina 65. 05-35 pp.
- Charrier, R., Hérail, G., Pinto, L., García, M., Riquelme, R., Farías, M., Muñoz, N. 2013. "Cenozoic tectonic evolution in the Central Andes in northern Chile and west central Bolivia: implications for paleogeographic, magmatic and mountain building evolution". International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch) 102. 235-264 pp.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M. 2007. "Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile". The Geology of Chile. 21-114 pp.
- Dingman, R., & Galli, C. 1965. "Geology and ground-water resources of the Pica area, Tarapaca Province, Chile". No 1189. US Govt. Print. Off.
- Dransfield, M., Christensen, A., Liu, G. 2003. "Airborne vector magnetics mapping of remanently magnetized banded iron formations at Rocklea, Western Australia". Exploration Geophysics. 34. 93-96 pp.
- Fuentes, G., Martínez, F., Bascuñan, S., Arriagada, C., Muñoz, R. 2018. "Tectonic architecture of the Tarapacá Basin in the northern Central Andes: New constraints from field and 2D seismic data" Geosphere, v. 14, no. 6, 2430–2446 pp.
- Fuentes, G., Perroud, S., Cortez, S., Acuña, A., Townley, B., Garrido, W., Martínez, F. 2021. "Evolution and along-strike variations in the Arequipa-Tarapacá Basin structure at 21°S: Implications for Geological Exploration Models in Southern Perú and Northern Chile". XII Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores.
- Galli, C. 1967. "Pediplain in Northern and the Andean Uplift". Science. 158. 653-655 pp.
- Ireland, T. 2010. "Geological Framework of the Mineral Deposits of the Collahuasi district, Región de Tarapacá, Chile". Universidad de Tasmania. Hobart. Australia. Octubre. 412 pp.
- Jordan, T., Nester, P., Blanco, N., Hoke, G., Davila, F., Tomlinson, A. 2010. "Uplift of the Altiplano-Puna plateau: a view from the west". Tectonics 29. TC5007 pp.
- Labbé, N., García, M. 2016. "Configuración 3D de la Cuenca Pampa del Tamarugal: Implicancias en la Distribución de la Cobertura Oligocena-Holocena, Norte de Chile (20°20'-20°50')". Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago. Chile. Mayo. 64 pp.
- Lindsay, D., Zentilli, M. & Rivera, A.J., 1995. "Evolution of an active ductile to brittle shear system controlling mineralization at Chuquicamata porphyry copper deposit, Northern Chile". Int. Geol. Rev., 37, 945–958 pp.
- MaksaeV, V. 1978. "Cuadrángulo Chitigua y sector oriental del Cuadrángulo Cerro Palpana, Región de Antofagasta". Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, 31, escala 1:50.000, 55 pp.
- MaksaeV, V., Zentilli, M. 1988. "Marco metalogénico regional de los megadepositos de tipo pórfido cuprífero del norte grande de Chile". V Congreso Geológico Chileno. Santiago. Chile. B181-B212 pp.
- MaksaeV, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F. 2007. "Metallic ore deposits". The Geology of Chile. 179-199 pp.
- Martínez, F., Fuentes, G., Perroud, S., Bascuñan, S. (2021) "Buried thrust belt front of the western Central Andes of Northern Chile: Style, age, and relationship with basement heterogeneities" Journal of Structural Geology 147. 104337 pp.
- Mpodozis, C., Arriagada, C., Basso, M., Roperch, P., Cobbold, P., Reich, Martin. 2005. "Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: Implications for the tectonic evolution of the Central Andes". Tectonophysics. 399. 125-154 pp.
- Mpodozis, C., Cornejo P. 2012. "Cenozoic Tectonics and Porphyry Copper Systems of the Chilean Andes". Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication. 16. 329–360 pp.
- Mpodozis, C., Perelló, J. 2003. "Porphyry copper metallogeny of the middle Eocene-early Oligocene arc of western South America: relationships with volcanism and arc segmentation". X Congreso Geológico Chileno. Santiago. Chile. 1 pp.
- Mpodozis, C., Ramos, V. 1990. "The Andes of Chile and Argentina: Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources." Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources. Earth Science Series. Santiago. Chile.
- Münchmeyer, C. 1996. "Exotic Deposits – Products of Lateral Migration of Supergene Solutions from Porphyry Copper Deposits, in Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny." Society of Economic Geologists Special Publication 5:43-58 pp.
- Munizaga, F., MaksaeV, V., Fanning, C., Giglio, S., Yaxley, G., Tassinari, C., 2008. "Late paleozoic-early triassic magmatism on the western margin of Gondwana: Collahuasi area, northern Chile". Gondwana Res. 13 <https://doi.org/10.1016/j.gr.2007.12.005>.
- Ossadon, G., Fréaut, R., Gustafson, L.B., Lindsay, D.D., Zentilli, M., (2001). "Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report". Economic Geology. 96. 249-270 pp.
- Pardo-Casas, F., Molnar, P. 1987. "Relative Motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since late Cretaceous time". Tectonics, 6, 233–248 pp.
- Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra, C., Caballero A., Fuster N., Muhr R. 2003. "Porphyry-Style Alteration and Mineralization of the Middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru". Economic Geology. 98. 1575–1605 pp.
- Piquer, J., Sanchez, P., Pérez, P. 2021. "A new model for the optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation". Geology 49(5): 597-601 pp.

- Reutter, K., Scheuber, E., Helmcke, D., 1991. "Structural evidence of orogen-parallel strike slip displacements in the Precordillera of northern Chile". *International Journal of Earth Sciences*. 80. 135–153 pp.
- Richards, J., Boyce, A., Pringle, M. 2001. "Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization". *Economic Geology* 96.
- Salazar, P., & Shapiro, S. 2011. "The upper crustal microseismicity image from the North Chilean subduction zone: implications for tectonics and fluid migration". Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad Libre de Berlín. Berlín. Alemania. Julio. 145 pp.
- Salazar, P., Kummerow, J., Wigger, P., Shapiro, S., Asch, G. 2017. "State of stress and crustal fluid migration related to west-dipping structures in the slab-forearc system in the northern Chilean subduction zone". *Geophysical Journal International*. 208. 1403–1413 pp.
- Sánchez, M. G., M. M. Allan, C. J. R. Hart, and J. K. Mortensen, 2013, "Orogen-perpendicular magnetic segmentation of the western Yukon and eastern Alaska cordilleran hinterland: Implications for structural control of mineralization", in K. E. MacFarlane, M. G. Nordling, and P. J. Sack, eds., *Yukon exploration and geology 2012: Yukon Geological Survey*.
- Sillitoe, R., & Thompson, J. 1998. "Intrusion-Related Vein Gold Deposits: Types, Tectono-Magmatic Settings and Difficulties of Distinction from Orogenic Gold Deposits". *Resource Geology*. 48. 237-250 pp.
- Sillitoe, R.H., & Thompson, J.F.H., 2006. "Changes in mineral exploration practice: consequences for discovery". *Soc. Econ. Geol. Special Publication* 12, 193–219 pp.
- Sillitoe, R. Perelló, J. 2005. "Andean copper province: tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery". *Society of Economic Geologists*. 100. 845-890 pp.
- Skarmeta, J. 2021. "Structural Controls on Alteration. Stages at the Chuquicamata Copper-Molybdenum Deposit, Northern Chile". *Economic Geology*, 116(1), 1-28 pp.
- Smoje, I; Corvalán, José, Profesor Guía. 1989. "Estratigrafía y facies del sistema jurásico en la precordillera entre las latitudes de Pica y Quillagua" [memorias - tesis]. Santiago : U. de Chile, 1989. 177 p.: il., perfiles, fotos, 2 mapas fuera de texto
- Tomlinson, A., Blanco, N. 1997. "Structural evolution and displacement history of the West Fault system, Precordillera, Chile" *Acta Congreso Geológico Chileno*. 8. 1878-1882 pp.
- Tomlinson, A.J., Blanco, N., MaksaeV, V., Dilles, J.H., Grunder, A.L., Ladino, M. 2001. "Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20°30'-22°30' S)". Servicio Nacional de Geología y Minería – Corporación del Cobre de Chile, SERNAGEOMIN, Informe Registrado IR-01-20, 444 pp, Santiago.
- Vergara, H. 1978a. "Cuadrángulo Quehuíta y sector occidental del cuadrángulo volcán Miño, Región de Tarapacá". Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 32, mapa escala 1:50.000, 44 pp. Santiago.
- Vergara, H., 1978b. "Cuadrángulo Ujina, Región de Tarapacá". Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 33, mapa escala 1:50.000, 63 pp. Santiago.
- Vergara, H., Thomas, A., 1984, "Hoja Collagua, Región de Tarapacá, Carta Geológica de Chile, Escala 1:250,000". Servicio Nacional de Geología y Minería, 79 pp. Santiago.
- Victor, P., O. Oncken, & J. Glodny. 2004. "Uplift of the western Altiplano plateau: Evidence from the Precordillera between 20° and 21°S (northern Chile)". *Tectonics* 23. TC4004 pp.
- Yanez, G. & Rivera, O. 2019. "Crustal dense blocks in the fore-arc and arc region of Chilean ranges and their role in the magma ascent and composition: Breaking paradigms in the Andean metallogeny". *Journal of South American Earth Sciences*. 93. 10.1016/j.jsames.2019.04.006.