

Combinación de métodos geofísicos para la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos

Combination of geophysical methods for the exploration of deep high sulphidation epithermal deposits

Para citar este trabajo:

Tapia, M., y Mayorga, C. (2024). Combinación de métodos geofísicos para la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos. *Reincisol*, 3(5), pp. 1678-1700.
[https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(5\)1678-1700](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(5)1678-1700)

Autores:

Marco Antonio Tapia Pachao

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Ciudad: Lima, País: Perú

Correo Institucional: marco.tapia1@unmsm.edu.pe

Orcid <https://orcid.org/0000-0003-0472-958X>

Jaime Cesar Mayorga Rojas

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Ciudad: Lima, País: Perú

Correo Institucional: Jaime.mayorga@unmsm.edu.pe

Orcid <https://orcid.org/0000-0001-8423-3343>

RECIBIDO: 6 abril 2024 **ACEPTADO:** 11 mayo 2024 **PUBLICADO** 24 junio 2024

Resumen

Uno de los actuales desafíos en el descubrimiento de depósitos del tipo epitermal de alta sulfuración, es identificar los depósitos que no afloran, los que están profundos u ocultos. El objetivo de esta investigación es determinar una combinación de métodos geofísicos que permitan vectorizar hacia las anomalías resistivas profundas que estén asociadas a cuerpos silicificados con mineralización económica. La metodología fue evaluar de forma sistemática los programas de geofísica de los proyectos Querco y Lucanas ubicados en el cinturón de rocas volcánicas Terciarias del Perú y detallar en orden cronológico como se fue perfeccionando la aplicación de los métodos geofísicos en cada proyecto hasta determinar la combinación que permitió generar targets de exploración más confiables y precisos. Como resultado se identificó el método no convencional Audio Magnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAMT) que tiene un alcance de profundidades mayores a 300 m y define con buena resolución anomalías resistivas prospectivas. Pero no todas estas anomalías resistivas identificadas están asociadas a cuerpos silicificados tal como lo demostró un posterior programa de magnetometría, el que comprobó que varias de estas anomalías corresponden a unidades subvolcánicas máficas inalteradas, discriminando de esta manera las anomalías resistivas prospectivas de las que no presentan interés exploratorio.

Palabras claves: Alta sulfuración; CSAMT; geofísica; magnetometría.

Abstract

One of the current challenges in the discovery of high sulfidation epithermal type deposits is to identify the deposits that don't outcrop, those that are deep or hidden. The objective of this research is to determine a combination of geophysical methods that allow vectoring towards deep resistive anomalies that are associated with silicified bodies with economic mineralization. The methodology was to systematically evaluate the geophysical programs of the Querco and Lucanas projects located in the Tertiary volcanic rock belt of Peru and to detail in chronological order how the application of geophysical methods was perfected in each project until determining the combination that allowed to generate more reliable and precise exploration targets. As a result, the unconventional Controlled Source Audio Magnetotelluric method (CSAMT) was identified, which has a range of depths greater than 300 m and defines prospective resistive anomalies with good resolution. But not all these identified resistive anomalies are associated with silicified bodies, as was shown by a subsequent magnetometry program, which found that several of these anomalies correspond to unaltered mafic subvolcanic units, discriminating in this way the prospective resistive anomalies from those that don't present exploratory interest.

Keywords: CSAMT, Geophysics; High Sulfidation; Magnetometry.

INTRODUCCIÓN

La geofísica es una herramienta en la exploración de yacimientos minerales con la cual se han identificado importantes yacimientos que tenían una fuerte firma geofísica. En el Perú hace más de una década no hay descubrimientos de yacimientos epitermales de alta sulfuración, por lo que los futuros descubrimientos de este tipo de depósito presentan desafíos importantes ya que se encuentran a mayor profundidad u ocultos en áreas remotas y con señales geofísicas menos prominentes (Ramayo, s.f.).

En los depósitos epitermales de alta sulfuración las alteraciones hidrotermales son importantes para vectorizar hacia las zonas económicamente más prospectivas, siendo los cuerpos silicificados (vuggy silica, brechas hidrotermales, etc.) los principales targets de perforación. Los métodos geofísicos convencionales como la polarización inducida-resistividad (IP-Res) ha sido por mucho tiempo el método tradicional para la ubicación de estos cuerpos silicificados que son resistivos (Hedenquist et al., 2000).

Sin embargo, el alcance confiable en profundidad de los métodos convencionales no supera los 300 metros, por lo que para prospectar más profundo es necesario encontrar otro método no convencional y poco usado en el Perú.

Como antecedentes se tiene que el método CSAMT de alcance profundo fue aplicado y contribuyó significativamente en el descubrimiento de los yacimientos epitermales de alta sulfuración Veladero en Argentina (Quantec Geoscience, 2022) y Salares Norte en Chile (Brewer et al., 2017). También en la exploración de otros tipos de yacimientos en Perú como Cerro Lindo (Bueno, 2019), y en otras áreas de China como Jianshui (Guo et al., 2019), Zhongxingtun (Jiang et al., 2020), Jiaoding (Song et al., 2021) y Layikeleke (Yan et al., 2021).

La presente investigación tiene la hipótesis que la aplicación del método geofísico no convencional de penetración profunda CSAMT combinado con el método convencional de magnetometría es una importante herramienta en la prospección de depósitos epitermales profundos del tipo alta sulfuración.

MATERIALES Y METODOS

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, es de tipo no experimental con un diseño transeccional causal (Hernández-Sampieri, R. y Mendoza, C., 2018).

La población de esta investigación son los proyectos de exploración minera Querco y Lucanas, en los cuales como parte de las exploraciones se realizó prospección geofísica con los métodos polarización inducida-resistividad (IP-Res), audio magnetoteléurico de fuente controlada (CSAMT) y magnetometría (MAG).

Los estudios geofísicos (levantamiento de campo y procesamiento de la data) fueron realizados por la empresa que brinda servicios de geofísica Quantec Geoscience. Posteriormente los autores interpretaron los mapas y secciones geofísicas generadas por Quantec, luego se integró la información geológica de los proyectos como litología, alteración, mineralización, estructuras y los resultados de los programas de perforación de los proyectos Querco y Lucanas. Toda esta información se compiló, interpretó y modeló con los softwares ArcGis 10.8.1 y Leapfrog 2022.1, con los que se generó los mapas y secciones finales que permitieron comprobar la hipótesis y llegar a las conclusiones de la investigación.

Herramientas utilizadas

Estudio Audio Magnetoteléurico de Fuente Controlada (CSAMT)

El CSAMT es un método de investigación geofísica para obtener información sobre la resistividad del subsuelo. Los valores de resistividad calculados a partir de los

datos CSAMT se relacionan con la geología. Los factores primarios que afectan la resistividad incluyen la porosidad de la roca o del sedimento, los fluidos de los poros y la presencia de ciertos conjuntos minerales (Zonge International, 2015).

El CSAMT también provee información geológica profunda hasta 1,000 metros de profundidad basada en los contrastes de resistividad lateral y vertical. Como herramienta de mapeo, es capaz de mejorar significativamente la cobertura y la calidad de un mapa geológico, sobre todo en áreas con pocos afloramientos. Como herramienta de exploración minera, nos permite la detección y delimitación de cuerpos minerales con contrastes de resistividad. (Quantec Geoscience, 2020).

El estudio CSAMT ha avanzado notablemente y es un método efectivo en la exploración de depósitos minerales, sobre todo aquellos depósitos relacionados con sistemas hidrotermales en general y más específicamente en sistemas epitermales de alta sulfuración, donde los targets de exploración suelen estar relacionados a cuerpos resistivos.

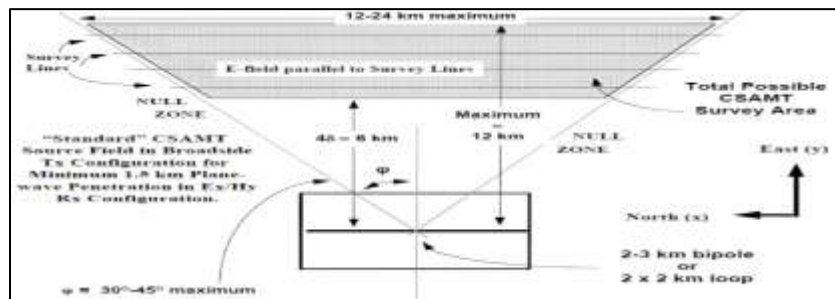
La instrumentación utilizada en este método fue la siguiente:

- Receptor: Zonge GDP-32-II
- Transmisor: Zonge GGT-30
- Controlador de frecuencia: Zonge XMT-16
- Regulador de Voltaje: Zonge VR1b
- Generador: Hatz 40 kVA
- Sensor magnético (bobina): Phoenix MTC-30
- Electrodo receptores: Stainless Steel rods

La configuración del estudio CSAMT fue la siguiente:

- Técnica: Modo magnético transversal (TM), es decir, campos telúricos (Ex) medidos paralelos a la línea de estudio y campos magnéticos (Hy) ortogonales a la línea de estudio (Figura 1).
- Configuración de la matriz: 6-1 (Ex a Hy por configuración) con bobina magnética ubicada en el centro de la matriz.
- Espaciamiento entre líneas: 200 m
- Longitud del campo (dipolo): 50 m
- Frecuencias transmitidas: 2 Hz - 8192 Hz, pasos binarios de $2n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)
- Frecuencias fundamentales: 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192 Hz
- Frecuencias armónicas: se recolectaron cinco armónicos impares para frecuencias fundamentales entre 2 Hz y 1024 Hz
- Longitud nominal de bipolo: 1.1 km

Figura 1. Configuración Estándar de un Estudio CSAMT



Nota. Tomado de CSAMT (Controlled Source Audio Magnetotelluric) Survey – Querco Project. Quantec Geoscience. 2018.

Estudio de Magnetometría

Como indica Kearey et al. (2002): El objetivo de un estudio magnético es investigar la geología del subsuelo sobre la base de anomalías en el campo magnético de la tierra que resultan de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. Aunque la mayoría de los minerales formadores de rocas son efectivamente no

magnéticos, ciertos tipos de rocas contienen suficientes minerales magnéticos para producir anomalías magnéticas significativas.

El método de magnetometría (MAG) es una técnica de exploración geofísica que consiste en medir las variaciones del campo magnético terrestre y en base a ellas, inferir la geología del subsuelo. Los levantamientos magnéticos consisten en realizar mediciones de la intensidad del campo magnético sobre la superficie terrestre, con instrumentos denominados magnetómetros, en intervalos de distancia aproximadamente constantes a lo largo de una línea denominada perfil. Es necesario que las mediciones sean lejos de fuentes que puedan generar un campo magnético de gran magnitud. La susceptibilidad magnética de las rocas es casi completamente controlada por el contenido de minerales ferrimagnéticos, el tamaño de grano, forma de distribución en la roca, entre otros, y es una propiedad extremadamente variable (Kearey et al., 2002).

La instrumentación utilizada en este método fue la siguiente:

- Aeronave RPAS: Robotic Air Systems, modelo Geox 8, con 4 motores. Controlado por señal de 900 MHz para programación de vuelo y monitoreo, así como un control remoto adicional de 2.4 GHz de frecuencia.
- Sensor aeromagnético para RPAS Geometrics Magarrow, con doble sensor de vapor de cesio MFAM, ubicados a 90 grados entre sí, lo cual elimina zonas sin acople de señal. El sensor cuenta con un IMU digital, así como una brújula y GPS interno. Sensor encapsulado en una estructura aerodinámica para una mayor estabilidad. Error de dirección menor a 5 nanoTeslas.erhauser v7.0W.
- Estación de base magnética GEM GSM19T, sensor de precesión de protones con una frecuencia de muestreo de 3 segundos.

La configuración del estudio MAG fue la siguiente:

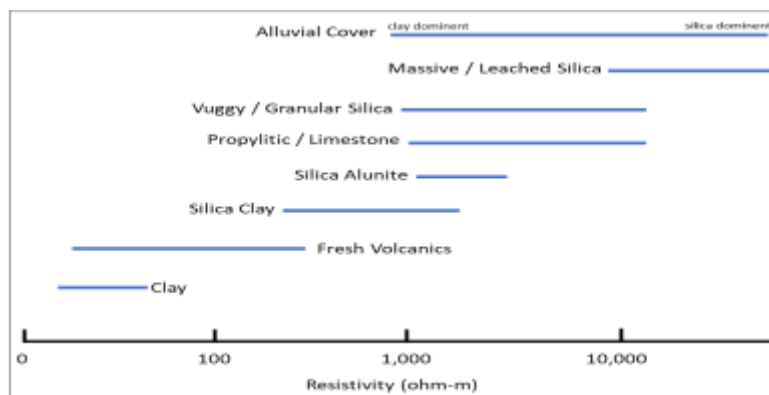
- Método: Magnetometría Aérea,
- Modo de Lectura: Magnetometría de campo total con sistema de aeronave no tripulada (AG-DMAG)
- Espaciamiento entre líneas: 100 m

RESULTADOS Y DISCUSION

La investigación comprende los proyectos de exploración minera Querco y Lucanas ubicados en el cinturón de rocas volcánicas terciarias del Perú, este cinturón es un importante metalotecto donde se han descubierto importantes depósitos epitermales de alta sulfuración como los yacimientos Yanacocha (52 Moz Au) en el norte y Tucari (3 Moz Au) en el sur.

La alteración hidrotermal en un sistema epitermal de alta sulfuración puede proporcionar distintas firmas resistivas. Por ejemplo: alteración argílica avanzada se asocia con minerales arcillosos lo que generaría una zona conductora (baja resistividad). En contraste, las texturas típicas de depósitos de alta sulfuración como cuerpos masivos de cuarzo residual (vuggy silica) formados como resultado de la lixiviación por fluidos ácidos, generan anomalías de resistividad. Por otro lado, cuerpos de sulfuros masivos a bandeados (Py y Enargita) generan anomalías negativas o de baja resistividad (Figura 2).

Figura 2. Rangos de resistividad de tipos de rocas.



Nota. Los rangos son referidos al depósito aurífero de Yanacocha. Adaptado de A geophysical case history of the Yanacocha gold district, northern Peru. Goldie, M. 2020.

Proyecto Querco.

Como menciona Rengifo y Ojeda (2018): El proyecto está ubicado en la región de Huancavelica, las unidades más representativas son: 1) Formación Castrovirreyna del Oligoceno, constituida por lavas andesíticas con horizontes volcanoclásticos; 2) Formación Caudalosa del Mioceno medio, constituida por lavas andesíticas y dacíticas porfiríticas, intercaladas con locales horizontes de tobas dacíticas. Ambas unidades intruídas por un complejo de domos andesíticos y dacíticos. La alteración es típica de un ambiente epitermal de alta sulfuración y la mineralización de Au-Ag está asociada a brechas hidrotermales con un fuerte control estructural en varias direcciones. (Figura 3).

Figura 3. Litología interpretada

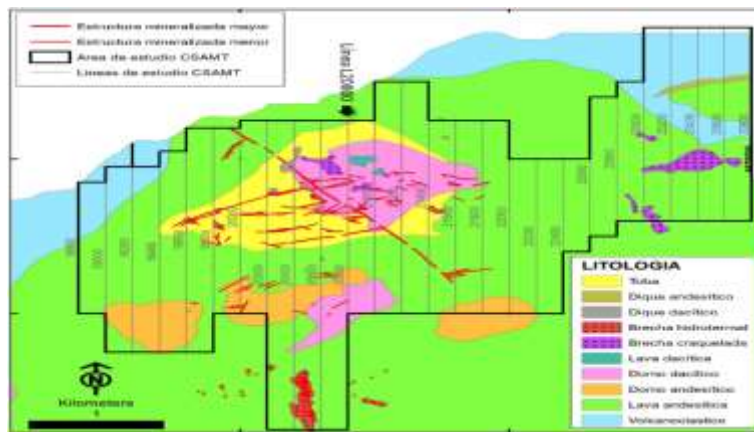
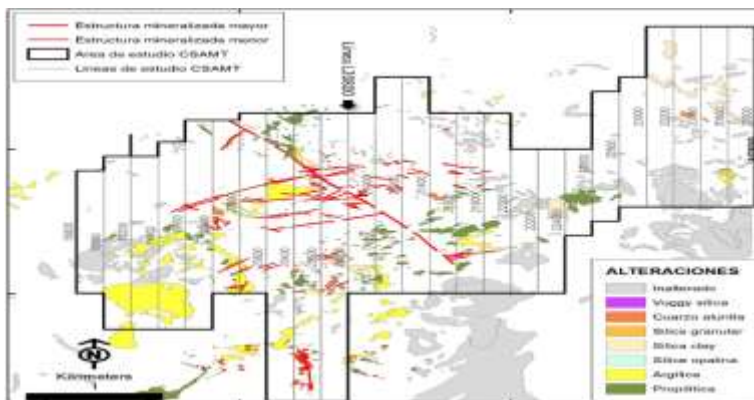


Figura 4. Alteraciones hidrotermales



En la Figura 3, se observa el mapa litológico interpretado del proyecto Querco, siendo las tobas dacíticas la principal roca caja de la mineralización. También se aprecia el fuerte control estructural de la mineralización en direcciones noreste-suroeste y noroeste-sureste.

En la Figura 4, se observa los minerales de alteración del sistema epitermal de alta sulfuración destacando la cuarzo-alunita que está asociada a las estructuras mineralizadas. La extensa cobertura cuaternaria y los locales afloramientos determinaron la ejecución de un estudio geofísico de penetración profunda CSAMT para explorar la continuidad horizontal y vertical de la estructuras mineralizadas. Nótese también el área de estudio CSAMT que consiste en 26 líneas de dirección norte-sur totalizando 70.80 km. (Quantec Geoscience, 2018).

En la Figura 5, se muestra el mapa de resistividad del estudio CSAMT, 300 m por debajo de la superficie. Se observa como las principales estructuras mineralizadas se superponen a resistividades mayores a 100 ohm.m llegando a un máximo de 5,000 ohm.m en el domo dacítico silicificado. Por otro lado, las resistividades menores a 100 ohm.m correlacionan con la distribución de las secuencias de lavas andesíticas generalmente inalteradas o débilmente propilitizadas. El principal potencial del proyecto está en las estructuras lineales de dirección este-oeste donde se ejecutó un programa de perforación diamantina.

Figura 5. Mapa de resistividad en planta (CSAMT), 300 m por debajo de la superficie.

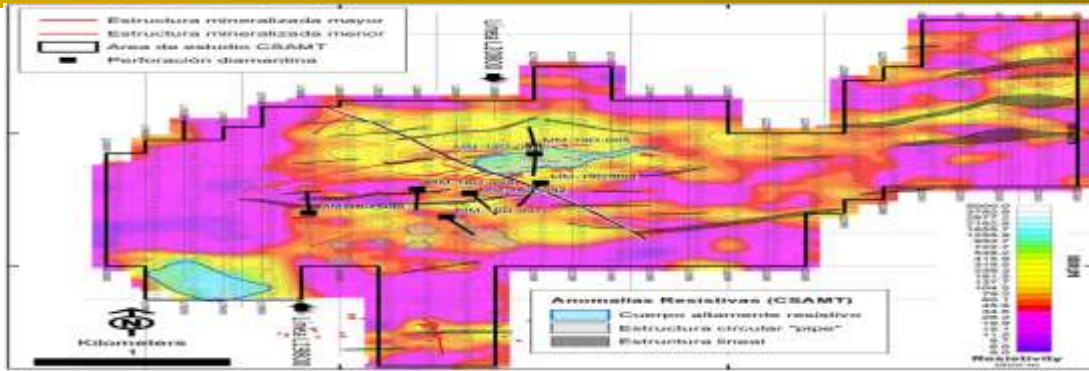
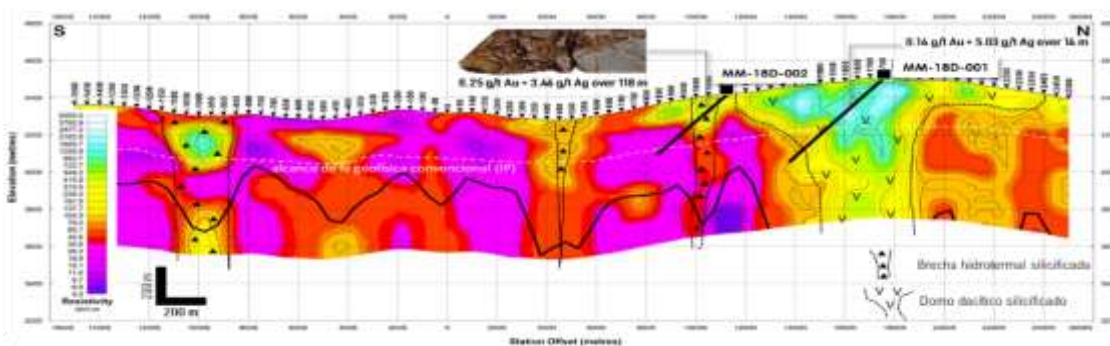


Figura 6. Sección de resistividad (CSAMT) – Línea L20800.

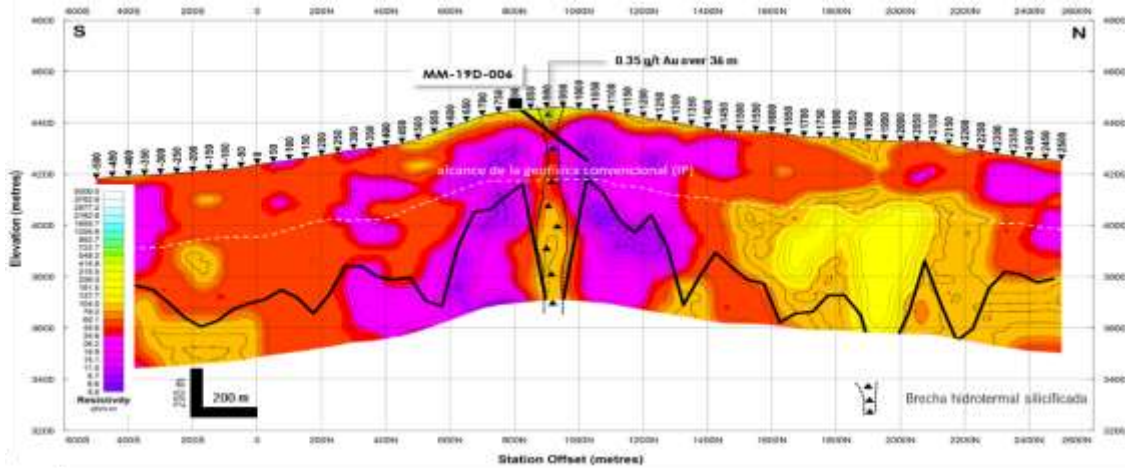


Lo primero que se destaca de la sección de resistividad (inversión 2D MT) de la línea L20800 (Figura 6), es el alcance en profundidad del estudio CSAMT de aproximadamente 700 m, comparado con los 300 m de un estudio convencional IP-Res. Este estudio nos permitió interpretar la continuidad vertical y las fuentes de la mineralización y alteración del sistema epitermal de alta sulfuración. Por otro lado, la resolución de la inversión es de buena calidad y se nota claramente los contratantes de resistividad.

Un programa de perforación en el proyecto Lucanas permitió comprobar que las estructuras mineralizadas lineales con resistividades entre 100 ohm.m y 1,000 ohm.m correlacionan con brechas hidrotermales con alteración argílica avanzada y silicificación con mineralización prospectiva de Au-Ag (0.25 g/t Au, 3.46 g/t Ag sobre 118 m) como lo demuestra el sondaje MM-18D-002. Mientras que las resistividades más altas entre 1,000 ohm.m a 5,000 ohm.m correlacionan con un

cuerpo silicificado con débil alteración argílica avanzada en un domo dacítico y con locales intervalos mineralizados (0.14 g/t Au, 5.03 g/t Ag sobre 14 m) sin interés prospectivo, como lo demuestra el sondaje MM-18D-001.

Figura 7. Sección de resistividad (CSAMT) – Línea L19800.



La sección de resistividad L19800 (Figura 7) es otro claro ejemplo de la buena resolución del estudio CSAMT, en el contraste de resistividades se delinea una estructura mineralizada vertical que profundiza hasta los 750 m. La estructura aflora en superficie como brecha hidrotermal con óxidos de hierro y alteración argílica avanzada y silicificación. El sondaje MM-19D-006 comprobó la mineralización prospectiva de esta estructura con un intercepto de 0.35 g/t Au sobre 36 m. Es necesaria una nueva campaña de perforación con sondajes más profundos para comprobar la continuidad vertical de la mineralización con un posible aumento de las leyes que podría llegar a ser económico.

Proyecto Lucanas.

Como menciona Rengifo y Llerena (2020): El proyecto está ubicado en la región Ayacucho. Las principales unidades litológicas del proyecto son: 1) Lavas andesíticas de la formación Castrovirreyña de edad Oligoceno y, 2) Tobas dacíticas de la formación Caudalosa de edad Mioceno medio. Todas las anteriores unidades

fueron intruídas por un complejo de domos andesíticos, dacíticos y riolíticos. El control estructural de la mineralización tiene dirección noroeste-sureste y este-oeste, que cuando se interceptan forman los principales cuerpos mineralizados. La alteración también es típica de un sistema epitermal de alta sulfuración.

Figura 8. Litología interpretada.

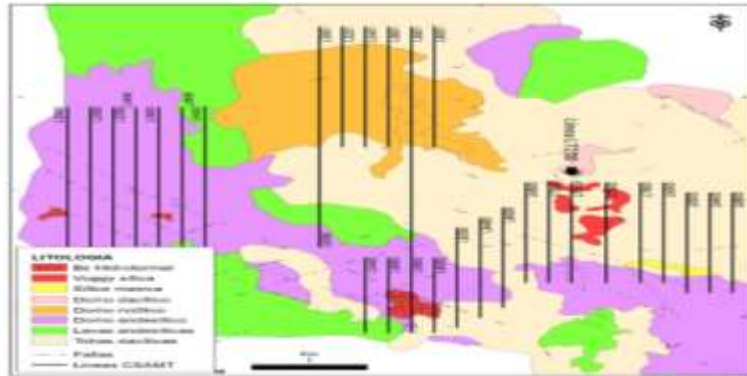
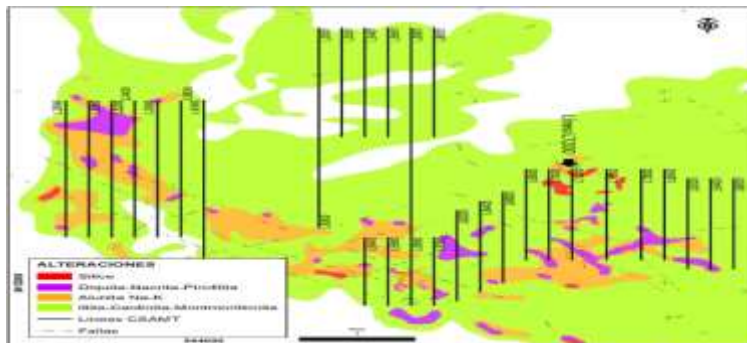


Figura 9. Alteraciones hidrotermales

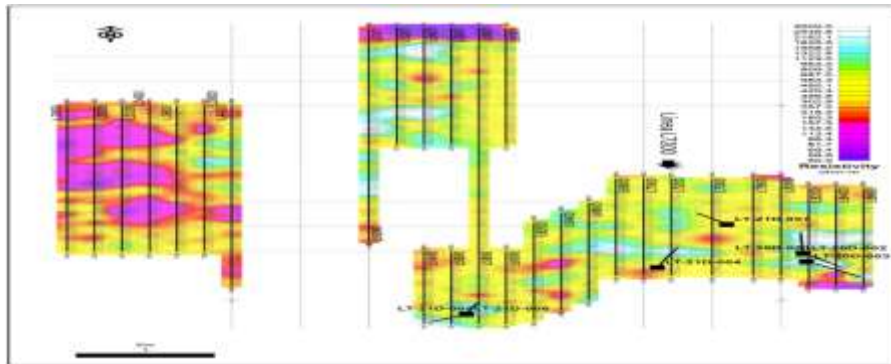


En la Figura 8, se observa el mapa litológico interpretado del proyecto Lucanas, siendo las tobas dacíticas y los domos andesíticos las principales rocas caja de la mineralización asociadas a brechas hidrotermales (domo andesítico) y cuerpos silicificados (tobas dacíticas).

En la Figura 9, se observa los minerales de alteración hidrotermal destacando la silicificación (vuggy silica), alunita potásica y el ensamble diquita-nacrita-pirofilita, típicos de un sistema epitermal de alta sulfuración. La mineralización presenta un moderado control estructural, pero esta más asociada a un control litológico, por lo que se esperaba en profundidad la ocurrencia de cuerpos silicificados con

mineralización diseminada. Es por este motivo que decidió por la ejecución de un estudio geofísico de penetración profunda CSAMT para explorar los cuerpos silicificados que afloran y otros que se encontrarían profundos u ocultos por unidades inalteradas. El estudio CSAMT en este proyecto comprendió 28 líneas de dirección norte-sur totalizando 70.30 km (Quantec Geoscience, 2020)

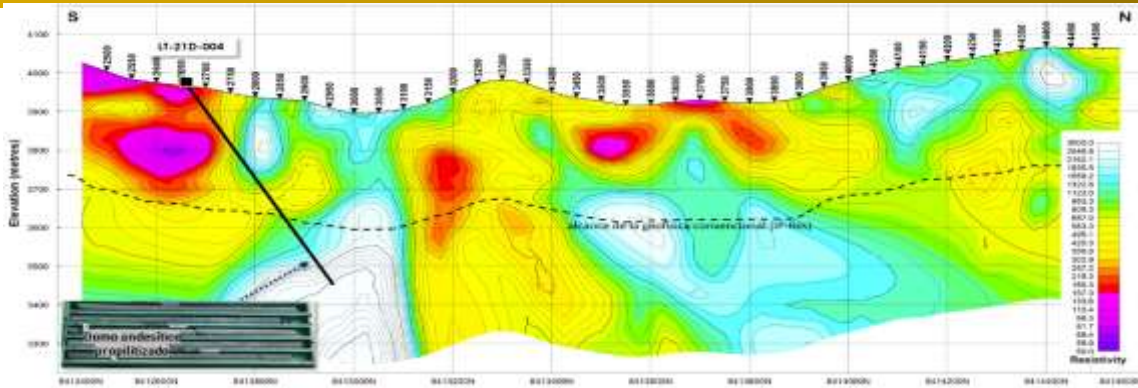
Figura 10. Estudio geofísico CSAMT en planta (-300 m).



Como se muestra en la Figura 10, en este proyecto los resultados del estudio CSAMT muestran anomalías resistivas muy altas que superan los 10,000 ohm.m, la mayoría de estas anomalías se convirtieron en targets geofísicos perforables, los cuales se ubican en los domos andesíticos y las tobas dacíticas, alguno de ellos se consideraron targets de tipo margen de domo característicos en sistemas epitermales de alta sulfuración asociados a complejo de domos como el caso del distrito minero Yanacocha (Zamora y Terrones, s.f.).

La mayoría de los principales targets resistivos fueron identificados a profundidades mayores de 300 m, donde los métodos geofísicos convencionales como el IP-Res no llegan de forma confiable. Con la experiencia del proyecto Querco, se decidió ejecutar un estudio CSAMT para optimizar las exploraciones en el proyecto y tener targets más confiables y precisos.

Figura 11. Sección de resistividad (CSAMT) – Línea L7200.



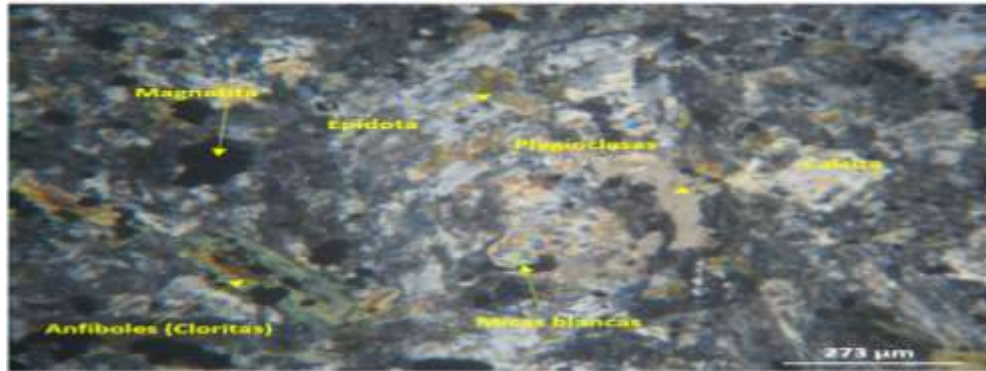
Como se aprecia en la sección L7200 (Figura 10), las anomalías resistivas superan los 3,000 ohm.m, con una geometría semi vertical y que se interpretaron como cuerpos silicificados asociadas a sílice masiva, vuggy silica o brechas hidrotermales con mineralización económica de Au-Ag. Estas anomalías resistivas se extienden y tienen su mejor distribución por debajo de los 300 m de profundidad. La profundidad de investigación es la principal característica del método CSAMT que en este caso llegó cerca de los 700 m.

Con estos resultados alentadores se ejecutó un programa de perforación con el objetivo de explorar estas interesantes anomalías resistivas. Es así como el sondaje LT-21D-004 que se muestra en la sección L7200 atravesó la anomalía resistiva de más de 3,000 ohm.m, pero solo interceptó un domo andesítico débilmente propilitizado sin interés prospectivo, demostrando que las altas anomalías resistivas (1,000 ohm.m - >5,000 ohm.m) no necesariamente están relacionadas a cuerpos silicificados, sean estos vuggy silica o brechas hidrotermales como sí ocurrió en el proyecto Querco.

Por lo que, se evaluó un método geofísico complementario que nos ayude a diferenciar las anomalías resistivas asociadas a cuerpos silicificados (vuggy silica o brecha hidrotermal) de los domos máficos inalterados. Con este objetivo se realizó un estudio petrográfico (muestra LT-5) de un intercepto del domo andesítico del

sondaje LT-21D- 004 a la profundidad de 477.60 m (Figura 12). El estudio determinó que se trata de una roca ígnea de textura fanerítica isotrópica inequigranular conformada por cristales <2.2mm de plagioclasas, alterados parcialmente a epidota, muscovita, calcita y arcillas; y moldes de anfíboles <1mm totalmente alterados a cloritas. Minerales opacos (12%) subhedrales (pirita y magnetita) diseminados rellenando porosidades secundarias de la muestra. En parte presenta textura amígdalar con relleno de cuarzo y corona de cloritas (Díaz, 2021).

Figura 12. Muestra petrográfica LT-5 (Luz transmitida, nicoles paralelos).



Con esta información, se determinó que una de las características de los domos andesíticos del proyecto Lucanas es el contenido de magnetita. Por lo que se determinó que el método geofísico complementario más apropiado sería un estudio aéreo de magnetometría por la gran extensión de estas unidades. Como se puede apreciar en la Tabla 1, las rocas máficas presentan altas susceptibilidades magnéticas.

Tabla 1. Susceptibilidad Magnética de Rocas y Minerales Comunes.

<i>Common rocks</i>	
Slate	0–0.002
Dolerite	0.01–0.15
Greenstone	0.0005–0.001
Basalt	0.001–0.1
Granulite	0.0001–0.05
Rhyolite	0.00025–0.01
Salt	0.0–0.001
Gabbro	0.001–0.1
Limestone	0.00001–0.0001
<i>Ores</i>	
Hematite	0.001–0.0001
Magnetite	0.1–20.0
Chromite	0.0075–1.5
Pyrrhotite	0.001–1.0
Pyrite	0.0001–0.005

Nota. Tabla que muestra la alta susceptibilidad magnética de las rocas máficas. Tomado de Field Geophysics. Milson, J. 2003.

En el proyecto Lucanas se ejecutó un programa geofísico de magnetometría aérea de 260 km con líneas norte-sur, donde los resultados fueron contundentes y demostraron que la mayoría de los domos andesíticos inalterados o débilmente propilitizados que afloran en el proyecto presentan anomalías altas de susceptibilidad magnética (Figura 13).

Figura 13. Susceptibilidad magnética (RTP).

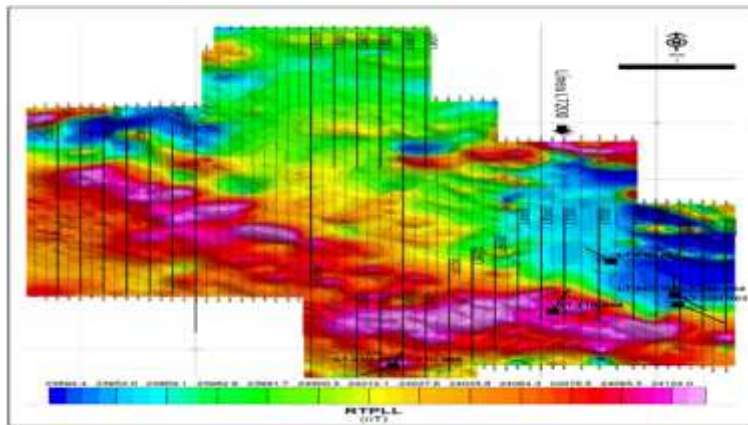
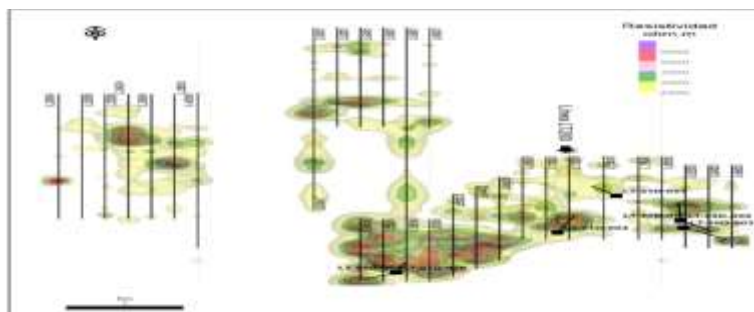
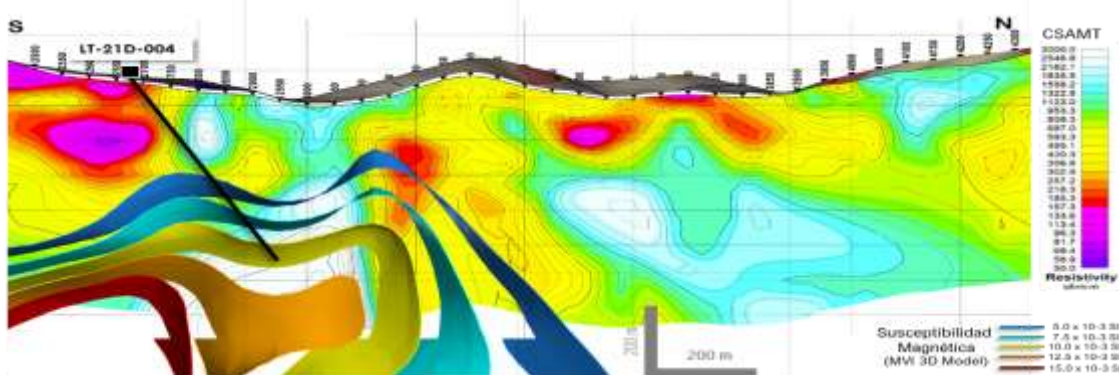


Figura 14. Modelo de resistividad CSAMT (Leapfrog)



En la figura 13 se aprecia la distribución de las altas anomalías de susceptibilidad magnética $>24,000$ nT que correlacionan con la distribución de los domos andesíticos (Figura 8). Usando el software Leapfrog 2022.1.0 se elaboró los modelos de resistividad (Figura 14) y susceptibilidad magnética (Figura 15), se superpuso y comparó, dando como resultado una correlación directa entre anomalías con altas resistividades $>1,000$ ohm.m. y altas susceptibilidades magnéticas $>5 \times 10^{-3}$ S.I., siempre en cuando estén relacionadas a domos andesíticos inalterados.

Figura 15. Sección de resistividad y susceptibilidad magnética – Línea L7200.



A la izquierda de la Figura 15, el modelo Leapfrog muestra la superposición de las altas susceptibilidades magnéticas mayores a 5×10^{-3} SI (MVI 3D Model) con las resistividades (CSAMT) mayores a $1,000$ ohm.m. En ese tramo el sondaje LT-21D-004 interceptó un domo andesítico débilmente propilitizado, quedando descartada esta anomalía como un target prospectivo.

A la derecha de la figura 14 se presenta una anomalía de resistividad $>1,000$ uhm-m que no aflora (oculto), por debajo de una pequeña anomalía conductiva. A esta anomalía de resistividad no se superpone una anomalía de susceptibilidad magnética, por lo tanto se descarta que sea un domo andesítico, convirtiéndose en un target de intereses para un siguiente programa de perforación.

CONCLUSIONES

El método geofísico no convencional audio magnetotelérfico de fuente controlada (CSAMT) es una herramienta eficaz que mejora las exploraciones de yacimientos epitermales de alta sulfuración profundos u ocultos, porque como se demostró en los proyectos Querco y Lucanas, este estudio llega con información confiable a profundidades de 700 m y 800 m., en comparación con los métodos geofísicos convencionales como la polarización inducida-resistividad que solo llega con información confiable hasta los 300m de profundidad.

El método CSAMT identifica anomalías resistivas que podrían estar relacionadas a cuerpos o estructuras silicificadas (silicificación masiva, vuggy silica o brechas hidrotermales), pero en esta investigación se ha comprobado que no siempre ocurre esto, porque hay unidades litológicas como los domos máficos (andesíticos) inalterados o débilmente propilitizados que también tienen una respuesta de alta resistividad. Entonces es necesario ejecutar un método geofísico complementario, que en el caso de esta investigación fue la magnetometría, porque como los domos máficos inalterados en su composición tenían minerales magnéticos diseminados, fácilmente fueron reconocidos por este método geofísico. Por lo tanto, se puede filtrar las altas anomalías resistivas del CSAMT realmente asociadas a cuerpos silicificados de las asociadas a domos máficos inalterados, como se demostró en el proyecto Lucanas.

Esta combinación de métodos geofísicos, junto con la información geológica, es una herramienta muy útil para los próximos descubrimientos de yacimientos epitermales de alta sulfuración ocultos o a una profundidad donde los métodos geofísicos tradicionales no llegan de forma confiable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Arce Geofísicos (2021). *Levantamiento de Magnetometría de Campo Total con Sistema de Aeronave no Tripulada (AG-DMAG). Proyecto Lucanas.*
- Bueno, J. (2019). *Herramientas de exploración aplicadas a la generación de nuevos targets en el yacimiento VMS Cerro Lindo. [Resumen de conferencias y posters para lectura]. XI Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, Lima, Peru.*
- Brewer, N., Azevedo F., Huete, D., Guevara, T., Rojas, F., Rodriguez, J., Lagos, C., Cerda, C., Moreno, C., Baumgartner, R., Trueman, A. and Foley, A. (2017). *The Discovery and Geology of the Salares Norte Epithermal Gold-Silver deposit thern Chile. AME Roundup 2017, Vancouver.*
- Diaz, M. (2021). *Proyecto Lucanas – Estudio Petrográfico del sondaje LT-21D-004.*
- Goldie, M. (2000). *A geophysical case history of the Yanacocha gold district, northern Peru.* Society of Economic Geologist.
- Guo, Z., Hu, L., Liu, C., Cao, C., Liu, J., and Liu, R. (2019). *Application of the CSAMT Method to Pb–Zn Mineral Deposits: A Case Study in Jianshui, China.* Minerals, 9(12), 726. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/min9120726>
- Hedenquist, J., Arribas, A. y Gonzalez-Urien, E. (2000). *Exploración por Depósitos Epitermales de Oro.* SEG Reviews Vol. 13.
- Hernández-Sampieri, R. y Mendoza, C (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.* Mc Graw Hill Education

- Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd.
- Milson, J. (2003). *Field Geophysics*. Wiley, Third Edition.
- Quantec Geoscience (2018). *Informe de Interpretación de Controlled Source Audio-Magnetotelluric CSAMT. Proyecto Querco*.
- Quantec Geoscience (2020). Logistics Report for a CSAMT (*Controlled Source Audio-Magnetotelluric*) Survey CSAMT. *Proyecto Lucanas*.
- Quantec Geoscience. (26 de octubre de 2021). *Veladero Discovery*.
<https://Valadero discovery – Quantec Geoscience>
- Ramayo, L. (s.f.). *Exploración Geofísica Profunda: Experiencia en Latinoamérica*.
[Archivo PDF]. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG16-191.pdf>.
- Rengifo, M. y Ojeda, F. (2018). *Proyecto Querco - Informe de Prospección Geológica*.
- Rengifo, M y Llerena, O. (2020). *Proyecto Lucanas - Informe de Prospección Geológica*.
- Song, M., Xue, G., Liu, H., Li, Y., He, C., Wang, H., Wang, H., Wang, B., Song, Y. and Li, S. (2021). A geological-geophysical prospecting model for deep-seated gold deposits in the jiaodong peninsula, china. *Minerals*, 11(12)
doi:10.3390/min11121393
- Yan, J., Meng, G., Lu, Q., Deng, Z., Qi, G., Tang, H., Zhao, J., Xue, R., and Wang, X. (2021). Prediction and location of concealed deposits in desertgobi coverage areas using integrated geophysics : An example of the Layikeleke

copper polymetallic deposit in Xinjiang, Northwest China. Chinese Journal of Geophysycs-Chinese Edition.

Zamora, P. y Terrones H. (s.f.). *Geología del Deposito Chaquicocha Sur*.
<https://es.scribd.com/document/253592023/Geologia-Del-Deposito-de-Chaquicocha-Sur>

Zonge International. (2015). *Introduction to CSAMT*. [Archivo PDF].
http://zonge.com/wp-content/uploads/2011/10/Intro_CSAMT_2-19-2015.pdf#:~:text=Controlled%20Source%20Audio-frequency%20Magneto-%20tellurics%20%28CSAMT%29%20is%20a,data-collection%20equipment%20system%20for%20CSAMT%20to%20the%20industry.

Conflicto de intereses

El autor indica que esta investigación no tiene conflicto de intereses y, por tanto, acepta las normativas de la publicación en esta revista.

Con certificación de:

