



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

**Aplicación del método audio magnetoteléurico de
fuente controlada en la exploración de depósitos
epitermales de alta sulfuración profundos en el
proyecto Libertad, Tacna, Perú**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con
mención en Recursos Mineros

AUTOR

Marco Antonio TAPIA PACHAO

ASESOR

Dr. Jaime César MAYORGA ROJAS

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Tapia, M. (2024). *Aplicación del método audio magnetotélico de fuente controlada en la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad, Tacna, Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Marco Antonio Tapia Pachao
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	29646237
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0472-958X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jaime César Mayorga Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10369482
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8423-3343
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Alfonso Alberto Romero Baylón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	31625834
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Enrique Guadalupe Gómez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09191995
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Toledo Gutiérrez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06016715
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.1.11. Recursos Mineros
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Tacna Provincia: Candarave Distrito: Candarave Latitud: -16.79658559950983 Longitud: -70.29029291068579
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021 - 2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental y geológica: http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01 Geología: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los dos días del mes de febrero del año dos mil veinticuatro, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000034-2024-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 23 de enero del 2024, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«APLICACIÓN DEL MÉTODO AUDIO MAGNETOTELÚRICO DE FUENTE CONTROLADA EN LA EXPLORACIÓN DE DEPÓSITOS EPITERMALES DE ALTA SULFURACIÓN PROFUNDOS EN EL PROYECTO LIBERTAD, TACNA, PERÚ»

Presentado por el Bach. **MARCO ANTONIO TAPIA PACHAO**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOLOGÍA** con mención en **RECURSOS MINEROS**.

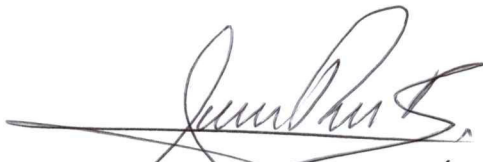
El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20210096662, de fecha 29 de diciembre del 2021, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:


MUY BUENO (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOLOGÍA** con mención en **RECURSOS MINEROS** al Bach. **MARCO ANTONIO TAPIA PACHAO**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. ALFONSO ALBERTO ROMERO BAYLÓN
Presidente


MG. ENRIQUE GUADALUPE GÓMEZ
Secretario


MG. CARLOS ALBERTO TOLEDO GUTIÉRREZ
Miembro


DR. JAIME CÉSAR MAYORGA ROJAS
Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Jaime César Mayorga Rojas en mi condición de asesor acreditado con el Número de Dictamen N°000461-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «APLICACIÓN DEL MÉTODO AUDIO MAGNETOTELÚRICO DE FUENTE CONTROLADA EN LA EXPLORACIÓN DE DEPÓSITOS EPITERMALES DE ALTA SULFURACIÓN PROFUNDOS EN EL PROYECTO LIBERTAD, TACNA, PERÚ» presentado por el Bachiller Marco Antonio Tapia Pachao, para optar el Grado Académico de Magister en Geología con mención en Recursos Mineros CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de investigación y producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 08% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.



UNMSM

Firmado digitalmente por MAYORGA
ROJAS Jaime Cesar FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 04.10.2023 08:54:19 -05:00

Firma del Asesor:

DNI: 10369482

Nombres y apellidos del asesor:

Jaime César Mayorga Rojas

Huella Digital



DEDICATORIA

A mi familia por su invalorable apoyo y a mi profesión por la satisfacción de contribuir con el desarrollo del país

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a la empresa IAMGOLD Perú S.A. por brindarme acceso a los recursos y datos necesarios para llevar a cabo mi investigación. Su apoyo logístico y técnico fue fundamental para la realización de la investigación y la obtención de resultados relevantes.

También, agradezco a los docentes de la unidad de posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por sus conocimientos y experiencias compartidas. En especial a mi asesor de tesis el Dr. Jaime Cesar Mayorga Rojas por su motivación y guía constante al supervisar mi investigación, su visión y comentarios constructivos fueron fundamentales para darle forma y mejorar la calidad.

ÍNDICE

ÍNDICE	III
Lista de Cuadros	VI
Lista de Figuras	VII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación Problemática.	1
1.2. Formulación del Problema	3
1.2.1. Problema General.	3
1.2.2. Problemas Específicos.	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.	5
1.4.2. Objetivos Específicos.	5
1.5. Hipótesis.....	6
1.5.1. Hipótesis General.....	6
1.5.2. Hipótesis Específicas	6
1.6. Identificación de Variables	6
1.6.1. Variable Independiente.....	6
1.6.2. Variable Dependiente.....	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de Investigación	7
2.1.1. Antecedentes Internacionales	7
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	14
2.2. Bases Teóricas	19
2.3. Marcos Conceptuales	35
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	39
3.1. Tipo y Diseño de la Investigación	39

3.2. Unidad de Análisis	39
3.3. Población de Estudio	39
3.4. Tamaño de la Muestra	40
3.5. Selección de la Muestra	40
3.6. Técnicas de Recolección de Datos	40
3.6.1. Audio Magnetotelúrico de Fuente Controlada	41
3.6.2. Magnetometría	41
3.6.3. Polarización Inducida	42
CAPÍTULO 4: MARCO GEOLÓGICO	43
4.1. Ubicación y Accesibilidad	43
4.2. Geología Regional	44
4.3. Geología Local	51
4.3.1. Litología.....	51
4.3.2. Estructuras	59
4.3.3. Alteración Hidrotermal	62
4.3.4. Geoquímica.....	66
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES	71
5.1. Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados	71
5.1.1. Aplicación del Método de Polarización Inducida en el Proyecto Libertad.	71
5.1.2. Aplicación del método CSAMT en el Proyecto Libertad.....	78
5.1.2. Aplicación del Método de Magnetometría en el Proyecto Libertad.	99
5.2. Presentación de Resultados	107
5.2.1. Alteraciones Hidrotermales vs Anomalías Resistivas	107
5.2.2. Modelos de Exploración.	111
5.2.3. Programa de Perforación Propuesto.	113
5.3. Pruebas de Hipótesis.....	116
5.3.1. Hipótesis General.....	116
5.3.2. Hipótesis Específica 1	116
5.3.3. Hipótesis Específica 2	117
5.3.4. Hipótesis Específica 3.	117

CONCLUSIONES.....	119
RECOMENDACIONES.....	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

Lista de Cuadros

<i>Cuadro 1.</i>	Resistividad del agua y algunas rocas.....	28
<i>Cuadro 2.</i>	Tipo y diseño de la investigación.....	39
<i>Cuadro 3.</i>	Estadística geoquímica de rocas.....	67
<i>Cuadro 4.</i>	Coefficiente de correlación de Pearson.....	67
<i>Cuadro 5.</i>	Ubicación del Bipolo.....	79
<i>Cuadro 6.</i>	Corrientes Típicas del bipolo.....	79
<i>Cuadro 7.</i>	Programa de perforación propuesto.....	114

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i>	Depósitos de oro descubiertos en el mundo (1970 – 2019).....	1
<i>Figura 2.</i>	Magnetotelúrico - Ancho de banda de frecuencias y tipos de estudios.....	23
<i>Figura 3.</i>	Rangos típicos de resistividad eléctrica o conductividad para materiales terrestres.....	27
<i>Figura 4.</i>	Ubicación del proyecto Libertad	43
<i>Figura 5.</i>	Concesiones mineras del proyecto Libertad	44
<i>Figura 6.</i>	Ubicación metalogenética del proyecto Libertad	45
<i>Figura 7.</i>	Columna estratigráfica regional del área del proyecto Libertad	49
<i>Figura 8.</i>	Geología regional del área del proyecto Libertad	50
<i>Figura 9.</i>	Andesita afanítica silicificada.....	51
<i>Figura 10.</i>	Toba riodacítica fresca	52
<i>Figura 11.</i>	Toba riodacítica con alteración argílica avanzada.....	53
<i>Figura 12.</i>	Toba riodacítica con vuggy silica.....	53
<i>Figura 13.</i>	Domo riodacítico intemperizado	54
<i>Figura 14.</i>	Domo riodacítico con ópalo en fracturas y cavidades.....	55
<i>Figura 15.</i>	Domo traquítico inalterado	56
<i>Figura 16.</i>	Domo andesítico inalterado	57
<i>Figura 17.</i>	Brecha polimíctica matriz soportada.....	58
<i>Figura 18.</i>	Brecha polimíctica clasto soportada	58
<i>Figura 19.</i>	Mayores sistemas de fallas y lineamientos en el sur de Perú ...	60
<i>Figura 20.</i>	Geología local	60
<i>Figura 21.</i>	Geología local interpretada	61
<i>Figura 22.</i>	Columna estratigráfica local.	61
<i>Figura 23.</i>	Alteraciones hidrotermales y zonas de interés.	62
<i>Figura 24.</i>	Zona 1 - Minerales de alteración	63
<i>Figura 25.</i>	Zona 2 - Minerales de alteración	64
<i>Figura 26.</i>	Zona 3 - Minerales de alteración	64
<i>Figura 27.</i>	Índice composicional de alunita y Cociente Pb/Sr	65
<i>Figura 28.</i>	Zona 1 - Targets de interés (SWIR).....	66
<i>Figura 29.</i>	Geoquímica Au.	68
<i>Figura 30.</i>	Acercamiento de la zona anómala en Au	68
<i>Figura 31.</i>	Geoquímica Ag	69
<i>Figura 32.</i>	Geoquímica Hg	69

<i>Figura 33.</i>	Geoquímica As.....	70
<i>Figura 34.</i>	Geoquímica Sb.	70
<i>Figura 35.</i>	Estudio IP-Res con geología y geoquímica	72
<i>Figura 36.</i>	Estudio IP-Res - Línea L1700	72
<i>Figura 37.</i>	Estudio IP-Res - Línea L2100	73
<i>Figura 38.</i>	Estudio IP-Res - Línea L2500	73
<i>Figura 39.</i>	Esquema de un domo relacionado a un sistema epitermal de alta sulfuración y su separación espacial a un sistema pórfido	74
<i>Figura 40.</i>	Sección típica de mineralización en el depósito Quimsacocha. 75	
<i>Figura 41.</i>	Estudio IP-Res – Anomalías de resistividad - Líneas L1700, L2100 y L2500	76
<i>Figura 42.</i>	Proyecto Querco - Sección de resistividad (CSAMT) – Línea L20800.....	77
<i>Figura 43.</i>	Configuración del estudio CSAMT.....	79
<i>Figura 44.</i>	Zona de transición entre el campo lejano y cercano.....	81
<i>Figura 45.</i>	Modelo de capas 1D suave de Occam.....	83
<i>Figura 46.</i>	Sección de modelo 1D enlazado.....	84
<i>Figura 47.</i>	Ubicación de líneas del estudio CSAMT.....	85
<i>Figura 48.</i>	Rangos de resistividad de tipos de rocas en el yacimiento Yanacocha.....	86
<i>Figura 49.</i>	Secciones con inversión 2D de las líneas L13800, L13600, L13400 y L13200	87
<i>Figura 50.</i>	Secciones con inversión 2D de las líneas L12900, L12500, L12300 y L12100	88
<i>Figura 51.</i>	Secciones con inversión 2D de las líneas L11900, L11700, L11500 y L10900.....	89
<i>Figura 52.</i>	Secciones con inversión 2D de las líneas L10500 y L9400.	90
<i>Figura 53.</i>	Mapa 4,000 msnm con anomalías resistivas.....	91
<i>Figura 54.</i>	Mapa 4,300 msnm con anomalías resistivas.....	91
<i>Figura 55.</i>	Mapa 4,500 msnm con anomalías resistivas.....	92
<i>Figura 56.</i>	Mapa 4,700 msnm con anomalías resistivas.....	92
<i>Figura 57.</i>	Mapa 4,800 msnm con anomalías resistivas.....	93
<i>Figura 58.</i>	Mapa 4,900 msnm con anomalías resistivas.....	93
<i>Figura 59.</i>	Comparación de las líneas L1700 (IP-Res) y L11700 (CSAMT)	94
<i>Figura 60.</i>	Comparación de las líneas L2100 (IP-Res) y L12100 (CSAMT)	94

<i>Figura 61.</i>	Modelo de resistividad (CSAMT)	95
<i>Figura 62.</i>	Proyecto Lucanas - Sección de resistividad (CSAMT) – Línea L7200.....	96
<i>Figura 63.</i>	Muestra LB-3. Lava andesítica fresca	98
<i>Figura 64.</i>	Muestra LB-3. Luz transmitida, nicoles paralelos	98
<i>Figura 65.</i>	Muestra LB-3. Luz transmitida, nicoles paralelos.	98
<i>Figura 66.</i>	Estudio de magnetometría en el proyecto Libertad	102
<i>Figura 67.</i>	Magnetometría – Señal analítica	102
<i>Figura 68.</i>	Magnetometría – Derivada de inclinación.....	103
<i>Figura 69.</i>	Magnetometría – Reducción al Ecuador.....	103
<i>Figura 70.</i>	Magnetometría – Magnético total	104
<i>Figura 71.</i>	Magnetometría – Derivada vertical.....	104
<i>Figura 72.</i>	Litología vs Reducción al Ecuador (MAG)	105
<i>Figura 73.</i>	Línea L11700 – Anomalías de resistividad vs Susceptibilidad magnética	105
<i>Figura 74.</i>	Línea L12100 – Anomalías de resistividad vs Susceptibilidad magnética	106
<i>Figura 75.</i>	Modelo con anomalías de resistividad vs Susceptibilidad magnética	106
<i>Figura 76.</i>	Zoneamiento de alteración hidrotermal en depósitos epitermales de alta sulfuración	108
<i>Figura 77.</i>	Modelo conceptual de alteraciones de la zona Reina Elizabeth en Chile.....	108
<i>Figura 78.</i>	Modelo de alteraciones hidrotermales del proyecto Libertad. .	109
<i>Figura 79.</i>	Rangos de Resistividad de las alteraciones hidrotermales del proyecto Libertad	110
<i>Figura 80.</i>	Línea CSAMT 12300 – Alteraciones hidrotermales vs Resistividad.....	110
<i>Figura 81.</i>	Línea CSAMT 12500 – Alteraciones hidrotermales vs Resistividad.....	111
<i>Figura 82.</i>	Modelo geológico del proyecto Libertad (Línea L11700)	111
<i>Figura 83.</i>	Modelo geológico del proyecto Libertad (Unidad Toba 1).....	112
<i>Figura 84.</i>	Distribución de targets resistivos vs litología	113
<i>Figura 85.</i>	Modelo de targets resistivos prospectivos del proyecto Libertad	113
<i>Figura 86.</i>	Programa de perforación propuesto	115
<i>Figura 87.</i>	Modelo de targets resistivos con programa de perforación propuesto	115

RESUMEN

Encontrar yacimientos profundos o que no afloran es uno de los principales retos en el descubrimiento de nuevos yacimientos epitermales de alta sulfuración en el sur de Perú. El proyecto Libertad, que presenta un sistema epitermal de alta sulfuración en la región de Tacna, también forma parte de esta problemática.

El objetivo de esta investigación fue demostrar que el método geofísico no convencional audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT), complementado con el método de magnetometría (MAG) y el soporte de herramientas geológicas y geoquímicas permitieron identificar anomalías resistivas someras y profundas que podrían estar relacionadas con cuerpos de sílice con mineralización altamente prospectiva.

La metodología fue ejecutar en el proyecto Libertad estudios geofísicos que consisten en 84.3 km de CSAMT, 294 km de MAG y 15 km de polarización inducida-resistividad (IP-Res). Adicionalmente se colectaron 212 muestras de roca para análisis geoquímico y estudios de espectrometría de onda corta del infrarrojo (SWIR). También se realizó un estudio de petrografía e índices de composición de las alunitas y cocientes de Pb/Sr. Finalmente con los softwares Leapfrog y ArcGis se compiló y analizó toda esta información para determinar targets altamente prospectivos.

Como resultado de la investigación, se concluye que la aplicación del método CSAMT en el proyecto Libertad demostró ser eficaz en la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos. Se identificaron 10 anomalías resistivas altamente prospectivas, destacando al este del proyecto una anomalía mayor a 750 ohm.m asociada a cuerpos silicificados a una profundidad mayor de 300 metros, con volumen y potencial para albergar un depósito aurífero económico. La profundidad confiable de investigación del método CSAMT en el proyecto Libertad fue de 750 metros, lo que permitió identificar las raíces o alimentadores de los fluidos hidrotermales que formarían los depósitos mineralizados. Se definió que el rango de resistividad prospectiva del proyecto está entre 750 a 4,000 ohm.m, sin embargo los domos

andesíticos inalterados también son altamente resistivos, pero se pueden discriminar porque presentan susceptibilidades magnéticas mayores a 23250 nT.

Palabras clave: Alta Sulfuración; CSAMT; Geofísica; Magnetometría.

ABSTRACT

Finding deep or non-emerging deposits is one of the main challenges in the discovery of new high sulphidation epithermal deposits in southern Peru. The Libertad project, which is a high sulphidation epithermal system in the Tacna region, is also part of this problem.

The objective of this research was to demonstrate that the unconventional geophysical method Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric (CSAMT), complemented with the method of magnetometry (MAG) and the support of geological and geochemical tools allow to identify shallow and deep resistive anomalies that could be related to silica bodies with highly prospective mineralization.

The methodology was to execute in the Libertad project geophysical studies consisting of 84.3 km of CSAMT, 294 km of MAG and 15 km of induced polarization-resistivity (IP-Res). Additionally, 212 rock samples were collected for geochemical analysis and shortwave infrared spectrometry (SWIR) studies. A study of petrography and composition indices of alunites and ratios of Pb/Sr. was also carried out. Finally, with the Leapfrog and ArcGis software, all this information was compiled and analyzed to determine highly prospective targets.

As a result of the research, it is concluded that the application of the CSAMT method in the Libertad project proved to be effective in the exploration of deep high sulphidation epithermal deposits. 10 highly prospective resistive anomalies were identified, highlighting to the east of the project an anomaly greater than 750 ohm.m associated with silicified bodies at a depth greater than 300 meters, with volume and potential to host an economical gold deposit. The reliable depth of investigation of the CSAMT method in the Libertad project was 750 meters, which allowed to identify the roots or feeders of the hydrothermal fluids that would form the mineralized deposits. It was defined that the range of prospective resistivity of the project is between 750 to 4,000

ohm.m, however the unaltered andesitic domes are also highly resistive, but can be discriminated because they have magnetic susceptibilities greater than 23250 nT.

Keywords: High Suptidation; CSAMT; Geophysics; Magnetometry.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática.

Según Schodded (2021), a nivel mundial entre el 2010 y el 2019 hubo un significativo descenso en el número de nuevos descubrimientos de depósitos auríferos. En el 2023 esta tendencia continúa en descenso y el Perú no es ajeno a esta problemática (ver Figura 1).

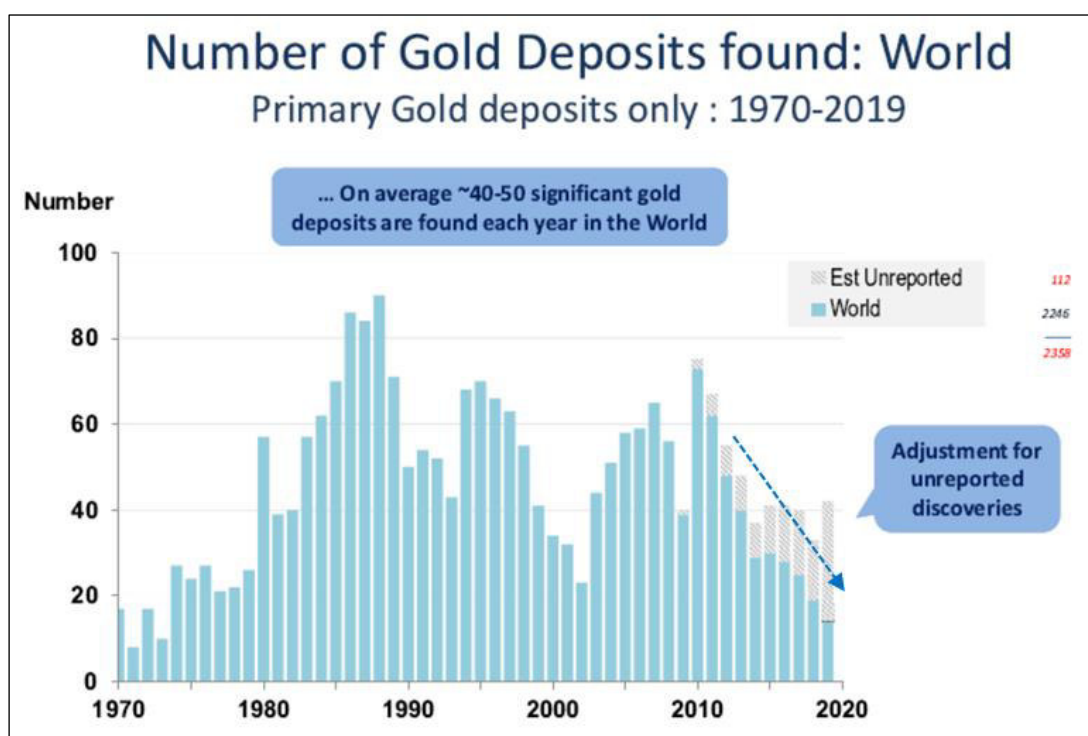


Figura 1. Depósitos de oro descubiertos en el mundo (1970 – 2019).

Fuente. Schodded (2021).

En el sur del Perú donde está ubicado el proyecto Libertad, los últimos descubrimientos de yacimientos auríferos mayores a 1.0 Moz Au fueron San Gabriel en Moquegua y Pucamarca en Tacna. Sin embargo, desde hace más de 10 años no hay nuevos descubrimientos de depósitos auríferos epitermales de alta sulfuración en esta parte del Perú. Las causas son varias, empezando porque se ha explorado intensamente los metalotectos y los depósitos que

afloraban o estaban a poca profundidad ya fueron descubiertos. Otra causa es la falta de inversión de las empresas mineras en métodos o herramientas menos convencionales pero más costosas para tener mayor éxito en sus programas de exploración.

Ramayo (2017), también indica que en Latinoamérica las empresas que se dedican a la exploración profunda se enfrentan a dificultades, como el aumento de los costos de las perforaciones y la incapacidad de las técnicas tradicionales de exploración (reconocimiento geológico y geoquímico, así como la tecnología geofísica convencional) para producir datos de alta calidad.

El proyecto Libertad presenta locales afloramientos con características de un sistema epitermal de alta sulfuración. Sin embargo, la mayor extensión de la propiedad minera está cubierta por material reciente post mineralización. El modelo geológico conceptual sugiere la presencia de depósitos someros y sobre todo profundos, por lo que para orientar mejor las exploraciones se ejecutó un estudio geofísico convencional con el método de polarización inducida – resistividad (IP-Res), pero el alcance de este método solo llegó con información confiable hasta los 300 m de profundidad dejando abiertas algunas anomalías geofísicas prospectivas.

Es así, como surgió también el problema de identificar un método geofísico no convencional que se haya aplicado con éxito en el descubrimiento de otros depósitos epitermales de alta sulfuración y que su alcance de investigación confiable sea mayor a 300 m de profundidad.

Atendiendo a esta problemática del proyecto Libertad y de la región sur del Perú, la presente investigación se enfoca en la aplicación del método geofísico audio magnetotelérfico de fuente controlada (CSAMT), que combinado apropiadamente con el método geofísico de magnetometría y otras herramientas geológicas y geoquímicas podrán contribuir en el descubrimiento de depósitos epitermales profundos de tipo alta sulfuración.

El método geofísico CSAMT ha sido determinante en la exploración de yacimientos epitermales de alta sulfuración en otros países, como por ejemplo Veladero con 11 Moz Au en Argentina (Quantec Geoscience, 2022) y Salares Norte con 4 Moz Au en Chile (Brewer et al., 2017), así como yacimientos profundos de cobre como Zhongxingtun en Inner Mongolia (Jiang et al, 2020). En el Perú este método ha sido empleado en la exploración del yacimiento Yanacocha de 50 Moz Au en Cajamarca (Goldie, 2000). Este método también se ha empleado en la prospección de otros tipos de yacimientos como los sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) del depósito Cerro Lindo con resultados eficientes a nivel distrital (Bueno, 2019).

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General.

¿En qué medida el método geofísico audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT) puede contribuir en la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad?

1.2.2. Problemas Específicos.

PE1. ¿El método geofísico magnético podría complementar al método CSAMT para que los resultados en la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad sean más eficientes?

PE2. ¿Cómo con el método geofísico CSAMT se podría inferir alteraciones hidrotermales que vectoricen a la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración en el proyecto Libertad?

PE3. ¿De qué manera las herramientas geológicas y geoquímicas complementarían al método geofísico CSAMT en la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos?

1.3. Justificación

La geofísica forma parte importante de un programa de exploración minera que contrastada con información geológica y geoquímica hace más eficientes los programas de exploración. Como indican West y Witherly (1995), las técnicas geofísicas brindan información muy útil sobre litologías, estructuras y alteraciones que nos vectorizan para identificar depósitos minerales. En el proyecto Libertad la geofísica se ha convertido en una importante herramienta para la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración.

La presente investigación adquiere importancia en el proyecto Libertad porque los resultados de la aplicación del método geofísico no convencional audio magnetoteléurico de fuente controlada (CSAMT), proporcionará mayor profundidad de investigación, mejor resolución y un uso más eficaz de los tiempos de producción. Permitirá interpretar anomalías de resistividad someras y profundas, las cuales están relacionadas a cuerpos silicificados con posible diseminación aurífera, que deberán ser probados posteriormente con un programa de perforación.

También es conveniente realizar esta investigación porque su metodología y resultados podrían ser replicados en otros proyectos mineros del sur del Perú, donde hace más de 10 años no hay nuevos descubrimientos de depósitos epitermales de alta sulfuración, siempre en cuando tengan el mismo marco geológico.

Esta investigación mejorará los procesos en la exploración de depósitos minerales. Los resultados obtenidos en este estudio serán de gran utilidad para las empresas mineras, ya que les proporcionará información y conocimientos relevantes para optimizar sus exploraciones, aumentar su eficiencia y tener mayor éxito en la exploración de yacimientos epitermales de alta sulfuración profundos.

Además, la utilidad de esta investigación se extiende a otros investigadores en el campo de la geofísica aplicada a las exploraciones mineras. Los resultados obtenidos en este estudio podrán ser compartidos en conferencias, publicaciones científicas y plataformas académicas, lo que contribuirá al avance en la investigación de la geología económica.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

Encontrar depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad mediante la aplicación del método geofísico audio magnetotelérfico de fuente controlada (CSAMT).

1.4.2. Objetivos Específicos.

OE1. Determinar que el método geofísico magnético puede complementar al método CSAMT para que sus resultados en identificar depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad sean más eficientes.

OE2. Aplicar el método geofísico CSAMT para inferir alteraciones hidrotermales que vectoricen a la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración en el proyecto Libertad.

OE3. Utilizar herramientas geológicas y geoquímicas para complementar al método geofísico CSAMT en la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

La aplicación del método geofísico audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT) contribuye significativamente en la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad.

1.5.2. Hipótesis Específicas

HE1. El método geofísico magnético complementa al método CSAMT para que sus resultados en identificar depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad sean más eficientes.

HE2. El método geofísico CSAMT infiere alteraciones hidrotermales que vectorizan a la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración en el proyecto Libertad.

HE3. Las herramientas geológicas y geoquímicas aplicadas en el proyecto Libertad apoyan al método geofísico CSAMT en la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos.

1.6. Identificación de Variables

1.6.1. Variable Independiente

Método audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT).

1.6.2. Variable Dependiente

Depósitos epitermales de alta sulfuración profundos.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Ramayo (2017), en su artículo “Exploración Geofísica Profunda: Experiencia en Latinoamérica”, explica que, en el pasado, los elevados gastos y los prolongados tiempos de exploración han provocado una disminución de la probabilidad de encontrar nuevos yacimientos, y sólo las empresas que utilizan técnicas de investigación eficaces tendrían más posibilidades de éxito y resultarían más atractivas para los posibles inversores. Por otro lado, señala que, dado que muchos recursos poco profundos están aún en fase de desarrollo, el sector minero se está concentrando en la exploración profunda.

Para las empresas, la exploración en profundidad presenta una serie de dificultades, como el aumento de los costes de perforación y la imposibilidad de obtener datos de alta calidad con las técnicas de exploración tradicionales (geología de superficie y reconocimiento geoquímico, así como tecnología geofísica convencional). Las nuevas tecnologías, como TITAN 24 de Quantec Geoscience, ofrecen la posibilidad de estudiar el subsuelo desde la superficie hasta más de 1,5 km, una profundidad muy superior a la que permiten las técnicas geofísicas convencionales, que han sido durante mucho tiempo el pilar de la exploración geofísica.

El principal objetivo de su estudio fue demostrar que el método TITAN 24 puede utilizarse para realizar estudios de yacimientos minerales profundos en diversas situaciones difíciles de exploración, como zonas brownfield o áreas topográficas y climáticas complejas.

En sus conclusiones, señala que su estudio aportó con múltiples casos prácticos que mostraban cómo el estudio TITAN 24 se aplicó con éxito en varios proyectos en América Latina, entre ellos Cerro Chacay

(Chile), Copaquire (Chile), San Rafael (México) y San Elías (Perú). Estos proyectos están asociados a diversos tipos genéticos de yacimientos profundos de oro.

La investigación de Ramayo se alinea con la problemática de mi investigación. En su investigación demostró que el método magnetotelúrico TITAN 24 es un excelente método de prospección y que fue aplicado con éxito en el descubrimientos de depósitos minerales profundos. En mi investigación me enfoqué en otro método no convencional denominado audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT) que también tiene un alcance de investigación profundo pero orientado a la exploración de sistemas epitermales.

Song et al. (2021), en su artículo científico “A geological-geophysical prospecting model for deep-seated gold deposits in the Jiaodong península, China” menciona que el cratón del norte de China es una de las principales áreas productoras de oro de China, y que han logrado avances continuos en la prospección a profundidades de 500 a 2000 m en la península de Jiaodong, y los métodos geofísicos han jugado un papel importante. Dado que las señales geofísicas de los depósitos auríferos profundos son difíciles de detectar debido a sus gruesas capas de sobrecarga, los métodos geofísicos convencionales no son adecuados para la prospección profunda. Por lo tanto, su investigación actualizó el modelo geológico-geofísico de prospección, que se basa en el modelo metalogénico profundo y el método geofísico de grandes profundidades de exploración. Este estudio propone que los depósitos de oro están controlados por fallas a gran escala, que generalmente ocurren cerca de las interfaces de contacto entre las serie de rocas metamórficas del Precámbrico Temprano y granitoides Mesozoicos, y exhiben un modelo metalogénico escalonado. Este modelo se convierte entonces en el requisito previo y la condición básica para la prospección profunda por métodos geofísicos. Por esta razón, el modelo geofísico tradicional, que se enfoca en la exploración de anomalías de mineralización superficial, se transforma en un modelo

de prospección cualitativo geológico-geofísico integral de parámetros múltiples que destaca la exploración de planos estructurales que controlan el mineral. El modelo adopta varios métodos de dominio de frecuencia (p. ej., CSAMT, AMT, WFEM), sismología de reflexión y otros métodos para detectar la estructura geológica profunda. Las características de parámetros como la gravedad y el magnetismo, la resistividad, la polarizabilidad y el espectro de reflexión sísmica se aplican para identificar la ubicación de la falla que controla el mineral y el cambio del ángulo de buzamiento y para estimar la ubicación del mineral de acuerdo con el modelo metalogénico escalonado.

La demostración de prospección de depósitos auríferos profundos en el área minera de Shuiwangzhuang indica la efectividad del modelo integral. El modelo integral de prospección profunda resuelve eficazmente el problema de la prospección profunda de depósitos de oro controlados por fallas, promueve el gran avance de la prospección profunda en la península de Jiaodong y proporciona una demostración tecnológica importante para la prospección profunda en toda China.

La investigación de Song confirma que el método CSAMT (audio magnetoteléurico de fuente controlada) es una importante herramienta para la identificación de mineralización aurífera profunda. Aunque la península de Jiaodong contenga depósitos orogénicos distintos a los epitermales del proyecto Libertad, en ambos la mineralización aurífera está asociada a silicificación, por lo tanto el método CSAMT es ideal para identificarlas y prospectarlas.

Zhang et al. (2020), en su artículo científico “Deep mineral exploration of the jinchuan cu–ni sulfide deposit based on aeromagnetic, gravity, and csamt methods” indica que la exploración de recursos minerales profundos es un requisito previo importante para satisfacer la demanda continua de recursos. La geofísica es uno de los medios más efectivos para explorar los recursos minerales a gran profundidad y una alta resolución. Basado en el estudio de los antecedentes geológicos, las

propiedades petrofísicas y las características de las anomalías aeromagnéticas del depósito de sulfuro de Cu-Ni de Jinchuan, que es famoso en todo el mundo, esta investigación utilizó los métodos de gravedad, aeromagnético y CSAMT (audio magnetotelúrico de fuente controlada) con una resolución complementaria para revelar la posición favorable de prospección.

Al combinar los resultados de gravedad y aeromagnético con el CSAMT, se encuentra que las áreas de resistividad media-baja, alta densidad y anomalías magnéticas altas cerca del cinturón estructural pueden corresponder muy bien con las conocidas masas rocosas que contienen minerales en el área minera. Al mismo tiempo, de acuerdo con el modelo de exploración geofísico y los datos de propiedades geológicas y físicas, se delinearon cuatro áreas prospectivas en la parte profunda del área minera conocida.

Zhang también afirma que una de las principales herramientas para identificar depósitos minerales profundos es la geofísica. Es por lo que en su investigación utilizó el método CSAMT y lo complementa con los métodos de gravedad y magnetometría aérea, identificando áreas prospectivas para la exploración de Cu-Ni en sulfuros. En mi investigación voy a complementar el método CSAMT con el método magnético pero terrestre que tiene una mejor resolución, y voy a analizar las anomalías resistivas altas a diferencia de la investigación de Zhang que utilizó anomalías resistivas medias y bajas.

Guo et al. (2019), en su artículo científico "Application of the CSAMT method to Pb-Zn mineral deposits: A case study in Jianshui, China" menciona que el método electromagnético (EM) se usa comúnmente en la exploración de minerales debido a la sensibilidad del método a los objetivos conductores. El método audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT) se desarrolla a partir del método magnetotelúrico (MT) con una fuente EM artificial para mejorar la amplitud de la señal. Esta investigación realizó un caso de estudio de la aplicación CSAMT para los depósitos de minerales de Pb-Zn Eagles-Nest en Jianshui,

China. El depósito Eagles-Nest está ubicado en el suroeste de China en un terreno complejo cubierto de bosques, lo que dificulta la adquisición de datos geofísicos. Con base en los resultados anteriores de polarización inducida (IP) de doble frecuencia, se diseñaron cuatro perfiles para la adquisición de datos CSAMT. Después del procesamiento y la inversión de datos, se mapeó la distribución de resistividad del subsuelo.

A partir de los resultados de CSAMT, se infirió la ubicación del yacimiento, que fue verificado por los pozos de perforación. El cuerpo de mineral de Pb-Zn se encontró a una profundidad entre 373,70 m y 407,35 m.

Esta investigación también demostró la eficacia del método CSAMT, por tratarse de mineralización de plomo y zinc se utilizó la conductividad del método y no la resistividad. Se comprobó la eficacia del método con los sondajes de perforación identificando el depósito mineralizado por debajo de la cobertura cuaternaria. En el proyecto Libertad donde se realizó mi investigación también existe una extensa cobertura cuaternaria, y al igual que en la investigación de Guo se iniciará con la aplicación del método de polarización inducida- resistividad para luego diseñar la malla para aplicar el método CSAMT.

Jiang et al. (2020) en su artículo científico “Using the CSAMT method to predict deep mineralisation of copper and molybdenum: a case study of the Zhongxingtun area in Inner Mongolia, China” indica que el área de Zhongxingtun en Inner Mongolia alberga un importante yacimiento de mineral polimetálico de cobre. Se han encontrado yacimientos superficiales de cobre y molibdeno-cobre sin perforaciones profundas, pero una nueva etapa de prospección se centra en encontrar yacimientos profundos. Para identificar estos yacimientos de cobre y molibdeno y la estructura profunda, se implementó el método audio magnetotelérfico de fuente controlada (CSAMT) en el área de Zhongxingtun con un sistema de prospección eléctrico multifunción V8 utilizando el método de perfil continuo con una densidad de red de 100

m x 20 m en la región occidental y 50 m x 20 m en la oriental. Estas densidades de medición son diferentes de las que se utilizan en la mayoría de las otras áreas y una red densa se utiliza principalmente debido a la necesidad de exploración minera. Las posiciones de los pozos se determinaron mediante un análisis exhaustivo de las imágenes bidimensionales de los datos recopilados, las características geológicas del área de estudio y las características físicas del lecho rocoso. La perforación demostró que existen yacimientos de molibdeno en las regiones más profundas donde la mineralización se caracteriza por el predominio del molibdeno seguido del cobre.

Los resultados muestran que a través del análisis de la resistividad aparente obtenida por el método CSAMT en el área de Zhongxingtun, se determinó las posiciones de los pozos de perforación y se descubre un cuerpo mineralizado profundo, lo que demuestra que el método CSAMT es efectivo. Se espera que este método sea ampliamente utilizado en la prospección de depósitos de minerales polimetálicos de cobre.

Al igual que en la investigación de Jian, donde su estudio geofísico partió en los yacimientos superficiales y se extendió a explorar depósitos profundos, en mi investigación se partirá del estudio de los locales afloramientos alterados y mineralizados del proyecto Libertad, considerando que son una expresión en superficie de los depósitos auríferos profundos que aún no han sido descubiertos. También concuerdo con Jian en que las anomalías resistivas que son el resultado de la investigación servirán para determinar la posición de los sondajes en un programa de perforación.

Yang et al. (2021), en su artículo científico "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" indica que con el aumento de la demanda humana de recursos, el espacio tradicional de exploración de minerales se ha vuelto cada vez más pequeño, por lo

que se debe expandir un nuevo espacio de prospección. La exploración global de recursos y energía se ha trasladado a locaciones profundas y áreas bajo sobrecarga. Las áreas del desierto de Gobi están ampliamente distribuidas en el oeste de China, que albergan un gran espacio de prospección. Sin embargo, debido a que no existe una observación geológica de la superficie del afloramiento para obtener información metalogénica, la incertidumbre de la predicción teórica basada en la geología aumenta considerablemente, lo que restringe el efecto de la predicción y ubicación del mineral oculto. Por lo tanto, es necesario fortalecer la investigación de la tecnología de prospección de minerales ocultos en áreas cubiertas por el desierto y explorar un sistema de métodos técnicos efectivos. Tomando como ejemplo el área de Qiongheba en el margen oriental de la cuenca East Junggar, esta investigación presenta prácticas de prospección y predicción en áreas cubiertas por el desierto de Gobi. Basada en datos magnéticos y de gravedad del suelo de alta precisión, la tecnología de detección de bordes de múltiples escalas se utiliza para delinear estructuras de fallas. Combinado con la inversión tridimensional magnética y de gravedad y la tecnología de detección de bordes de múltiples escalas, se llevó a cabo el reconocimiento de forma tridimensional de la masa rocosa oculta. Sobre esta base, combinada con datos geoquímicos y geológicos regionales, se pronosticaron siete objetivos de prospección, de los cuales se verificó el área objetivo de Layikeleke. Desde la predicción hasta la investigación detallada, a través de la combinación innovadora de tecnología geofísica, el depósito polimetálico de cobre a gran escala en Layikeleke se descubrió recientemente bajo el desierto de Gobi sin pistas de mineralización en la superficie.

Los resultados muestran que la tecnología de predicción y localización de depósitos ocultos en áreas cubiertas por el desierto de Gobi propuesta en este trabajo tiene un cierto significado de demostración en áreas de ambientes similares. El descubrimiento del depósito polimetálico de cobre Layikeleke también muestra que el trabajo de

prospección en las áreas de sobrecarga del desierto de Gobi en Xinjiang y Mongolia Interior tiene un futuro brillante.

Esta investigación se alinea con la problemática de mi investigación, porque afirma que hay que fortalecer las herramientas geofísicas, cuando aumenta la incertidumbre geológica en superficie y se explora en áreas cubiertas por material estéril. También al igual que en mi investigación consideró que las herramientas geológicas y geoquímicas (regionales en este caso), complementan eficazmente los métodos geofísicos para predecir y ubicar depósitos minerales ocultos.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Goldie (2000), en su artículo científico “A geophysical case history of the Yanacocha gold district, northern Peru”, evaluó los resultados de varios métodos geofísicos terrestres y aéreos que fueron empleados en el distrito de Yanacocha ubicado en el norte de Perú, como parte de un continuo programa de exploración que alberga uno de los depósitos de oro de alta sulfuración más grandes del mundo. Los métodos empleados fueron magnetismo/radiometría aérea, campo eléctrico, electromagnético y potencial en tierra. Los estudios se realizaron como parte de la delimitación y descubrimiento de varios yacimientos de oro dentro del distrito. El recurso/reserva de oro está contenido principalmente en mineral de óxido hospedado en roca alterada con sílice o material aluvial. Las técnicas geofísicas terrestres que se utilizaron para delinear y explorar nuevos depósitos consisten principalmente en resistividad.

Su conclusión fue que los métodos de resistividad son los que se utilizan con mayor éxito, como: polarización inducida/resistividad (IP/resistividad), sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM), y magnetotéluricos de audiofrecuencia de fuente controlada (CSAMT).

Como menciona la investigación de Goldie, el CSAMT fue uno de los métodos aplicados en el yacimiento Yanacocha con mayor éxito en la ubicación de depósitos epitermales de alta sulfuración asociados a cuerpos silicificados. El proyecto Libertad donde se desarrollará mi investigación presenta un marco geológico similar a Yanacocha, por lo que el método CSAMT fue una importante herramienta en la exploración profunda del proyecto.

Ponce (2017), en su tesis “Estudio Geológico y Aplicación del Método Polarización Inducida en la Exploración del Yacimiento Jesica Ocuviiri – Puno” explica que con fines exploratorios en las zonas aledañas al tajo Jésica para identificar áreas de interés de acuerdo con los valores de resistividad y cargabilidad obtenidos del estudio, se aplicó el método de polarización inducida (IP). Se ejecutaron 64 kilómetros lineales de IP/Resistividad, un total de 42 líneas con configuración polo-dipolo y espaciamiento entre electrodos de potencial de 100 metros. Con el fin de identificar los valores de cargabilidad elevados que zonifican las concentraciones potenciales de sulfuros y completar el estudio con los resultados del estudio de resistividad, se sondearon 1,6 kilómetros lineales del tajo Jésica, distribuidos en 4 líneas de IP de 400 metros cada una, con un espaciado entre dipolos de 50 y 100 metros. Los perfiles de resistividad y cargabilidad correspondientes se utilizaron también para construir el plano de isovalores de la zona de investigación.

Sus conclusiones muestran que se han identificado anomalías de resistividad denominadas Norte, Central y Sur. La anomalía Sur se representa como una resistividad alta, lo que sugiere que la roca caja ha sido moderadamente sustituida por sílice. Mientras que la anomalía Norte muestra una resistividad moderada-alta, la anomalía Central muestra formas circulares y tabulares. Mientras que los valores moderados de cargabilidad al oeste de la anomalía Sur indican una zona potencial de mineralización de sulfuros, los valores de

cargabilidad en Jérica muestran una correlación espacial con la zona de altas resistividades en la anomalía Central y la anomalía Sur. En el área Jérica se han encontrado zonas de concentración potencial de sulfuros cerca de la superficie y por debajo del límite del pit. El centro del tajo y un pequeño cuerpo al oeste son las únicas zonas de cargabilidad. Al oeste del yacimiento, una zona con resistividad moderada y baja cargabilidad que puede estar relacionada con sílice granular necesita ser evaluada para una mineralización potencial. El comportamiento en profundidad del yacimiento de Jérica se determinó mediante una investigación geológica y el uso del método IP, que conectó los aspectos litológicos, estructurales y mineralógicos con los datos de resistividad y cargabilidad obtenidos en el estudio.

De acuerdo con la investigación de Ponce, el método convencional de polarización inducida también ha sido efectivo, no solo para identificar cuerpos resistivos, sino también para identificar anomalías de cargabilidad que podrían estar asociadas a mineralización en sulfuros. La limitante de este método fue prospectar más profundo con un método geofísico, como el CSAMT que hubiese permitido delimitar mejor la geometría de las anomalías y la posible fuente de la mineralización del yacimiento.

Bueno (2019), en su investigación “Herramientas de exploración aplicadas a la generación de nuevos targets en el yacimiento VMS Cerro Lindo”, comprende métodos geofísicos, con mediciones DCIP y MT (magnetotelúrica) mediante el método Titan 24 para un total de 24 líneas (93 kilómetros lineales en total), que se añadieron a las líneas iniciales realizadas en el yacimiento en 2012. Estas líneas cortan transversalmente los 8 targets de exploración geoquímica. Algunos de los objetivos de interés generados por la geofísica pueden estar relacionados con mineralización profunda porque no corresponden con anomalías geoquímicas. La mineralización económica presenta altas concentraciones de pirita y pequeñas concentraciones de sulfuros de cobre y zinc. Con altos niveles de cargabilidad en zonas de diseminación y vetilleo errático de sulfuros que forma la periferia de

zonas de sulfuro masivo, la enorme naturaleza de la mineralización exhibe una respuesta de resistividad muy baja.

Bueno concluye que la herramienta Titan 24 fue muy eficaz para definir la zona conocida de sulfuros masivos desde una perspectiva distrital (kilómetros). Sin embargo, el resultado del Titan 24 es dudosa a una vista a escala de yacimiento (decenas de metros), identificando la zona de perforación con un escaso grado de precisión.

La investigación de Bueno demuestra que los métodos geofísicos magnetotelúricos son herramientas de prospección profunda que se pueden también aplicar en depósitos tipo sulfuros masivos volcanogénicos (VMS). Mi investigación demostrará que una variante del método magnetotelúrico denominado CSAMT tiene un mejor resultado en la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración.

Contreras (2017), en su tesis “Estudio Magnético, Polarización Inducida y Resistividad en el Yacimiento Minero de Shahuindo: Adquisición, Procesamiento e Interpretación, Periodo 2002 – 2012, Región Cajamarca”, menciona que los corredores mineralizados Norte, Central, Sur y Noroeste del yacimiento de Shahuindo se encontraron anomalías magnéticas de alta susceptibilidad, según los resultados del estudio magnético. Estas anomalías están controladas por fallas inferidas que discurren en las direcciones NO-SE, NE-SO y N-S. También se encontraron lineamientos y contactos magnéticos. Las zonas ricas en material ferromagnético donde hay mineral valioso corresponden a las anomalías magnéticas. La litología y la mineralización del yacimiento de Shahuindo están representadas por los resultados de la polarización inducida y la resistividad. Se han identificado zonas de alta cargabilidad con valores superiores a 14 mV/V en los corredores mineralizados Norte, Central, Sur y Noroeste, que estarían relacionadas con zonas de alta oxidación y mineralización con alto contenido en sulfuros, y Sur y Noroeste que estarían relacionadas con zonas de alta oxidación y mineralización con alto

contenido en sulfuros. Se encontraron zonas de alta resistividad superiores a 200 Ohm-m que estarían asociadas a zonas de silicificación en contraste con esta zona. La delimitación de las vías mineralizadas, en particular el corredor mineralizado Central, se vio favorecida por la integración de las mediciones magnéticas, de polarización inducida y de resistividad.

El yacimiento Shahuindo es de tipo epitermal de alta sulfuración en rocas sedimentarias, donde el método de magnetometría fue importante para detectar las principales estructuras mineralizadas, y la polarización inducida-resistividad exploró estas estructuras, identificando varias anomalías resistivas que quedaron abiertas después de los 300 metros de profundidad. Por lo cual, sería importante ejecutar un método geofísico como el CSAMT que tiene un alcance confiable más profundo, para reconocer el verdadero potencial del yacimiento.

Ticona (2014), en su tesis “Geología y Aplicación de Métodos de Resistividad en la Exploración de Oro en el Distrito de Yanacocha – Cajamarca”, menciona que el uso de la resistividad en la exploración de oro en el distrito de Yanacocha, se considera un componente crucial en la búsqueda de nuevos yacimientos. El estudio dice que la respuesta de resistividad aparente ha demostrado ser beneficiosa en la definición de sistemas de alta sulfuración que contienen oro. En 2001, un programa exploratorio que incluía la perforación de sondeos de tipo RCD en 13 prospectos que se habían encontrado con profundidades medias de 200 m y que se priorizaron utilizando datos geológicos y geoquímicos permitió verificar la respuesta de resistividad aparente descubierta por métodos eléctricos. El objetivo era relacionar más estrechamente las anomalías de resistividad aparentes con la alteración de la roca descubierta mediante el registro geológico de muestras de roca cortada por perforación. Al hacer esto, fue posible determinar los valores de resistividad en ohm-m de los diversos tipos de alteración de la roca encontrados en los diversos prospectos

perforados y distinguir entre los tipos de alteración que podrían contener mineralización.

En conclusión, valores resistivos superiores a 1000 ohm-m son probables de mostrar litologías con alteración silíceo, así como rocas con alteración propilítica y fresca si están expuestas cerca de la superficie; sin embargo, en prospectos como Tatiana y Sorpresa, valores superiores a 3000 ohm-m mostraron proximidad al basamento con mayor probabilidad de tener roca caliza.

La importancia de la investigación de Ticono radica en que logró identificar los rangos de resistividad para cada una de las alteraciones hidrotermales del yacimiento Yanacocha. Esta información es valiosa para mi investigación, porque me permitió replicar su metodología en el proyecto Libertad para reconocer los rangos de resistividad de las alteraciones del sistema epitermal de alta sulfuración y poder vectorizar a las zonas de mayor interés del proyecto. Esta investigación también evidencia que no todas las anomalías resistivas están asociadas a cuerpos silicificados prospectivos, por lo que hay que tener especial énfasis en su interpretación.

2.2. Bases Teóricas

Geofísica

En este campo se utilizan los principios de la física para investigar la Tierra. Las mediciones realizadas cerca de la superficie que se ven afectadas por la distribución interna de los atributos físicos se utilizan en las investigaciones geofísicas del interior de la Tierra. Estas observaciones pueden analizarse para mostrar las variaciones verticales y laterales de las propiedades físicas internas de la Tierra.

Las técnicas geofísicas pueden utilizarse para una gran variedad de investigaciones, desde estudios de toda la Tierra hasta la investigación de una zona específica de la corteza superior, así como para objetivos

de ingeniería o de otro tipo. En los métodos de exploración geofísica se utilizan mediciones en zonas delimitadas para determinar la distribución de los atributos físicos a profundidades que corresponden a la geología regional del subsuelo (Kearey et al., 2002, p.1).

Prospección Geofísica.

Se trata de estudios geofísicos que ofrecen una forma rápida y eficaz de obtener información detallada sobre la distribución de la geología en el subsuelo, aunque en ocasiones presentan ambigüedades o incertidumbres de interpretación.

Las técnicas pueden identificar y delinear características regionales de importancia en la exploración de recursos del subsuelo que pueden no verse mediante programas de perforación. La perforación sigue siendo necesaria, pero con una buena aplicación, la prospección geofísica puede optimizar los programas de exploración para aumentar el área de búsqueda y reducir la necesidad de perforación (Kearey, 2002).

Métodos Geofísicos para Explorar Depósitos Epitermales

Aunque existen muchas formas extremadamente eficaces de aplicar la geofísica a la exploración minera, su adopción se ve limitada por el costo y la viabilidad técnica. La geofísica es un componente crucial de un programa de exploración minera que, en comparación con los datos geológicos y geoquímicos, aumenta la eficacia de los programas de exploración. Los métodos geofísicos ofrecen información muy útil sobre litologías, estructuras y modificaciones que permiten reconocer yacimientos minerales, como señalan West y Witherly (1995).

A continuación se presentan varios métodos geofísicos que pueden utilizarse para evaluar los yacimientos epitermales, fueron revisados por White (1995) y Sillitoe (1995). Dependiendo de diversos elementos, como la ubicación regional y el estilo del yacimiento, el momento y la conveniencia de su utilización varían de un prospecto a otro. Lo crucial es tener en cuenta que la geofísica ofrece una gama de instrumentos,

cada uno de los cuales puede añadir información al modelo de exploración que se está construyendo en su conjunto.

La información sobre el marco regional, los contactos geológicos y las estructuras se obtiene mediante estudios magnéticos aerotransportados. Este enfoque también permite descubrir magnetita ligada a núcleos de biotita en sistemas de pórfidos. Los máximos magnéticos se relacionan con intrusiones que contienen magnetita. La técnica ofrece además detalles sobre la alteración hidrotermal y la eliminación de señales primarias de magnetita en rocas ígneas por sistemas de alta y baja sulfuración, lo que conduce a un bajo magnético. Debido a la pérdida de magnetita cerca de la superficie en entornos epitermales, los perfiles magnéticos del suelo sobre rocas alteradas hidrotermalmente son suaves.

El cuarzo oqueroso suele tener una resistencia eléctrica elevada en condiciones secas, lo que hace que los métodos eléctricos sean especialmente útiles para analizar el núcleo silíceo en yacimientos de alta sulfuración y también los encapes líticos estériles. La técnica IP puede identificar claramente este núcleo silíceo, aunque las capas de calcedonia pueden interponerse. Cuando se utilizan herramientas de interpretación 3D, el enfoque puede determinar la forma y la extensión lateral o en profundidad. Los perfiles IP pueden utilizarse para evaluar la extensión lateral del cuerpo silíceo. Si los sulfuros no están oxidados, puede haber una respuesta de cargabilidad IP de pirita. También deberían encontrarse arcillas conductoras en las zonas argílica y argílica avanzada. Las vetas de baja sulfuración también pueden mostrar halos argílicos (Hedenquist et al., 2000).

Corrientes Magnetotelúricas

Los estudios de las corrientes telúricas tienen ocasionalmente el inconveniente de que su seguimiento se realiza durante periodos de intensa actividad de la fotosfera solar que afecta al campo magnético externo de la Tierra. De hecho, ocasionalmente puede ser tan violenta

e impredecible que nos referimos a ellas como tormentas magnéticas porque en esos momentos, los picos de amplitud de los micro pulsos del campo magnético externo de la tierra, que tienen una frecuencia muy baja de menos de 0,1 Hz, pueden alcanzar hasta 500 nT, son bastante grandes. Debido a su excesivo nivel de ruido en este último escenario, toda recolección de datos telúricos debe detenerse inmediatamente (Chelotti et al., 2009).

Método Magnetotelúrico

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica geofísica electromagnética que utiliza campos eléctricos naturales de fuentes de rayos, erupciones solares y resonancias ionosféricas que inducen el flujo de corriente en el suelo que nos permite obtener imágenes de la estructura de resistividad eléctrica de la tierra desde la superficie hasta grandes profundidades. Los datos se procesan y presentan como resistividades y pueden correlacionarse con la geología, la estructura y pueden resaltar tanto las características conductoras para definir targets como las características resistivas para el mismo fin. Es un método de penetración profunda que mide rutinariamente desde superficie hasta 2, 5, 10 o muchas decenas de kilómetros dependiendo de la aplicación.

Para obtener información de resistividad y profundidad se realiza la medición pasiva de la superficie de la electricidad natural de la tierra (E) y los campos magnéticos (H). La relación entre el campo eléctrico y el campo magnético proporciona información simple sobre la conductividad del subsuelo, esta relación generalmente se representa como resistividad aparente en función de la frecuencia. La profundidad de la investigación es inversamente proporcional a la frecuencia, es decir, la relación en rangos de frecuencia más altos da información sobre la tierra poco profunda, mientras que la información más profunda es proporcionada por el rango de baja frecuencia. Este método mide los cambios en E y H con tiempo y en todos los rangos de frecuencia (10 kHz a 0,001 Hz).

El estudio magnetotelúrico (MT), generalmente se refiere a la grabación de banda ancha de $>10,000$ Hz a $.001$ Hz (también conocida como 1000 segundos) o tan baja como 10K S ($.0001$ Hz) desde la superficie hasta grandes profundidades (hasta 100 km y más). El estudio audio magnetotelúrico (AMT), Se refiere a frecuencias de "audio", generalmente con grabación > 1 Hz a 10KHz+. El ancho de banda funciona bien donde se necesitan resultados de resistividad modelada por inversión de alta resolución a profundidades de 1 km (más o menos).

El estudio audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT) se refiere al estudio AMT pero con una "fuente controlada" (rango de profundidad de hasta 1,000 m, pero típicamente útil para 700 m más o menos). Es ventajoso para mediciones con dipolos más pequeños de menos de 50 m (ver Figura 2).

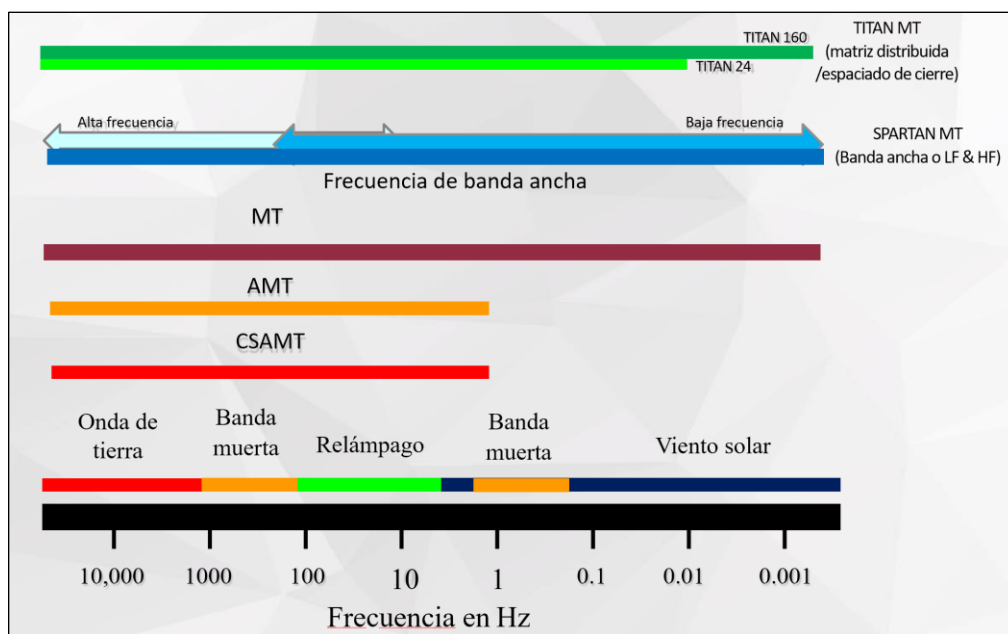


Figura 2. Magnetotelúrico - Ancho de banda de frecuencias y tipos de estudios

Fuente. Quantec Geoscience. (2020).

Método Audio Magnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAMT)

Existe una amplia banda de radiación electromagnética de origen natural y se puede utilizar geofísicamente. Estos campos magnetotelúricos provienen en parte de las corrientes ionosféricas y en parte de la actividad de las tormentas. Las señales más útiles, en el rango de frecuencia de 1 Hz a aproximadamente 20 kHz, se denominan comúnmente audio-magnetotelúrica (AMT). Estos se propagan hacia la tierra como frentes de onda aproximadamente planos orientados paralelos a la superficie de la Tierra.

La amplia banda de frecuencia AMT permite investigar las variaciones de conductividad en un rango correspondientemente amplio de profundidades, desde unos pocos metros hasta varios kilómetros. Sin embargo, las señales, como tantas otras cosas que vienen gratis, no siempre son confiables. Las fluctuaciones de amplitud a corto y largo plazo causan muchos problemas, y es posible que se necesiten tiempos inaceptablemente largos para obtener lecturas satisfactorias debido a las bajas intensidades de la señal. En particular, las señales tienden a ser muy débiles en el rango de 1 a 5 kHz, que es crucial para la exploración de los 100 m superiores del suelo. Por lo tanto, ahora es común generar señales similares a partir de fuentes controladas (CSAMT) y usarlas para complementar o reemplazar las señales naturales (Milson, 2003, p.149).

En ese sentido, el CSAMT es un método geofísico de investigación que recopila datos sobre la resistividad del subsuelo. Este método arroja valores de resistividad relevantes desde el punto de vista geológico. La existencia de tipos específicos de asociaciones minerales, el contenido de fluidos y la porosidad son los elementos clave que afectan a la resistividad de las rocas y/o sedimentos. El uso de CSAMT en la exploración minera proporciona datos vitales sobre litología, cambios hidrotermales y geología (Quantec, 2021).

La resistividad de las rocas es una guía importante en la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración y puede ser obtenida por ejemplo por el método geofísico convencional IP-Res y el método no convencional CSAMT, sin embargo, cada uno de estos métodos tienen sus propias características. Una mejor resolución, una mayor profundidad de investigación y un uso más eficaz del tiempo de producción son ventajas de la CSAMT. El método CSAMT consiste en enviar una señal controlada al suelo desde un punto (el transmisor) utilizando varias frecuencias, y medir los campos eléctricos y magnéticos en la zona objetivo (receptor).

De acuerdo con Milson (2003), la fuente para un estudio CSAMT suele ser un cable largo (2 km o más) conectado a tierra en el que la corriente se barre a través de un rango de frecuencias que puede extenderse desde tan bajo como 0.1 Hz hasta tan alto como 100 kHz. Se puede medir una variedad de parámetros, pero el campo eléctrico horizontal paralelo al cable fuente (E_x) y el campo magnético horizontal en ángulo recto con él (H_y) son los más utilizados. Los campos magnéticos se miden utilizando pequeñas bobinas verticales, campos eléctricos utilizando pares de electrodos cortos conectados a tierra (dipolos) dispuestos paralelos al transmisor.

Los parámetros más comúnmente medidos en los estudios CSAMT son las relaciones de E_x a H_y y las diferencias de fase (las fases de impedancia) entre ellas. La relación de amplitud se utiliza para calcular una cantidad conocida como resistividad de Cagniard, que viene dada por $\rho_a = (E_x/H_y)^2/5f$. La resistividad de Cagniard a menudo se considera como una estimación de la resistividad promedio hasta una profundidad igual a la profundidad de la corteza dividida por 2, es decir, hasta aproximadamente $300 (\rho_a/f)$. El rango de frecuencias utilizado en los levantamientos CSAMT permite estimar este promedio a profundidades desde unos pocos metros hasta varios kilómetros.

Los programas se pueden ejecutar en computadoras portátiles para llevar a cabo inversiones unidimensionales (capas horizontales) y

bidimensionales de resistividades de Cagniard a resistividades reales. Para estimar la resistividad a una profundidad dada, las resistividades de Cagniard deben obtenerse hasta al menos tres veces esa profundidad. Sin embargo, el hecho de que la profundidad de la investigación dependa de la resistividad implica un grado de circularidad en los cálculos y el proceso de modelado es inherentemente ambiguo.

Las diferencias de fase se utilizan principalmente para investigar fuentes pequeñas, en lugar de estratificaciones. Por ejemplo, puede ser posible ver tanto la parte superior como la base de una fuente enterrada utilizando mediciones de fase, aunque solo la parte superior sea visible en las gráficas de resistividad correspondientes.

El uso de fuentes controladas elimina algunos de los problemas asociados con los campos naturales, pero introduce otros. Se requieren corrientes muy altas para que las fuentes de hilo largo generen señales suficientemente sólidas a las distancias kilométricas requeridas por la aproximación de campo lejano, y rara vez es fácil encontrar sitios donde los kilómetros de cable que transporta muchos amperios de corriente se pueden colocar en el suelo de forma segura. Incluso cuando esto se puede hacer, las irregularidades gráficas pueden crear distorsiones significativas en la señal.

Las fuentes de bucle pueden ser considerablemente más pequeñas, pero requieren corrientes aún mayores (por factores de hasta 10) que las necesarias para las fuentes de línea. El campo lejano para las mediciones de CSAMT se considera comúnmente que comienza a una distancia de tres profundidades de corteza de una fuente de cable largo y, por lo tanto, depende de la frecuencia. En una sola gráfica de sondeo, el inicio de las condiciones de campo intermedio generalmente se puede reconocer por un gradiente inverosímilmente pronunciado en la curva de sondeo.

Una regla general simple que se puede utilizar en la planificación de estudios es que, para garantizar condiciones de campo lejano, la distancia desde la fuente hasta el receptor debe ser al menos seis veces la profundidad requerida de investigación. Sin embargo, es posible que haya que modificar la disposición a la luz de las condiciones reales del campo. En principio, se deben usar ecuaciones muy diferentes en la interpretación de campo intermedio y cercano, pero el control de calidad en el campo generalmente se lleva a cabo utilizando solo las aproximaciones de campo lejano.

En la Figura 3 y Cuadro 1, se presenta los rangos típicos de resistividad eléctrica o conductividad para algunos materiales terrestres donde se puede apreciar que las rocas ígneas y metamórficas pueden tener una resistividad en el rango de 1,000 a 100,000 ohm.m, las lavas frescas entre 300 y 10,000 ohm.m y las tobas frescas entre 20 y 100 ohm.m. Estos datos fueron la base para la interpretación de las anomalías de resistividad en el proyecto Libertad.

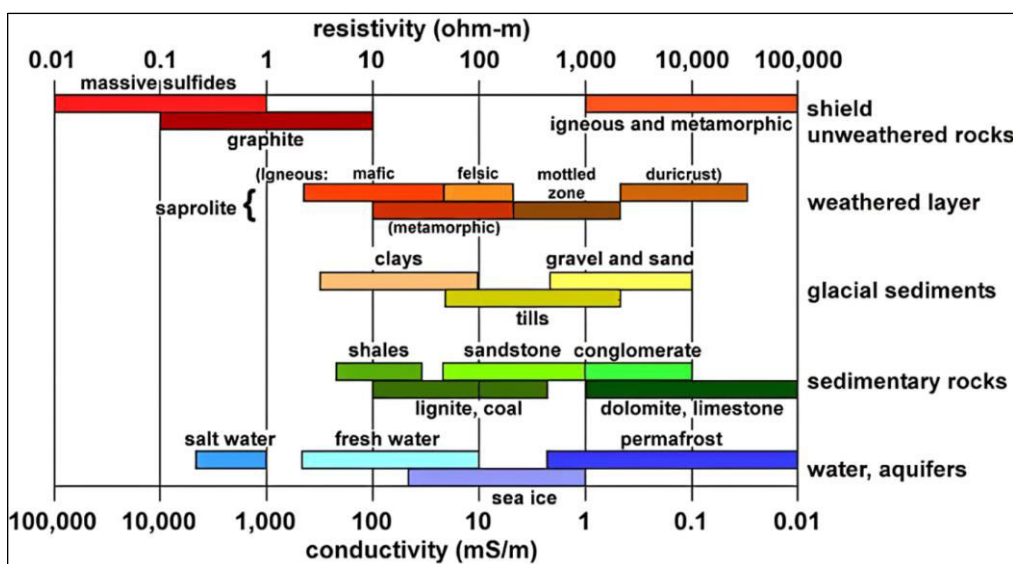


Figura 3. Rangos típicos de resistividad eléctrica o conductividad para materiales terrestres

Fuente. Palacky, G. (1988).

Cuadro 1. Resistividad del agua y algunas rocas.

Fuente. Astier, J. (1975)

Aguas y Rocas	Resistividad (ohm*m)
Agua de mar	0.2
Agua de acuíferos aluviales	10 - 30
Agua de fuentes	50 - 100
Arenas y gravas secas	1000 - 10000
Arenas y gravas con agua dulce	50 - 500
Arenas y gravas con agua salada	0.5 - 5
Arcillas	2 - 20
Margas	20 - 100
Calizas	300 - 10000
Areniscas arcillosas	50 - 300
Areniscas cuarcíticas	300 - 10000
Tobas volcánicas	20 - 100
Lavas	300 - 10000
Esquistos grafitosos	0.5 - 5
Esquistos arcillosos	100 - 300
Esquistos sanos	300 - 3000
Gneis, granito alterado	100 - 1000
Gneis, granito sanos	1000 - 10000

Método de Magnetometría

El objetivo del método magnético es examinar la geología del subsuelo utilizando anomalías del campo magnético terrestre provocadas por las características magnéticas de las rocas subyacentes. A pesar de que la mayoría de los minerales que forman las rocas no son magnéticos, algunos tipos de rocas incluyen suficientes minerales magnéticos como para provocar anomalías magnéticas notables.

Al igual que los objetos naturales, los objetos ferrosos artificiales también provocan anomalías magnéticas. Así pues, la prospección magnética tiene numerosos usos, desde prospecciones arqueológicas o de ingeniería a pequeña escala para encontrar objetos metálicos enterrados hasta prospecciones a gran escala para observar la estructura geológica regional.

Es posible realizar prospecciones magnéticas en tierra, mar y aire. Por ello, esta tecnología se utiliza con frecuencia, y la rapidez con la que se pueden realizar prospecciones aéreas la hace especialmente atractiva

para encontrar determinados tipos de yacimientos que contienen minerales magnéticos (Kearey, 2002).

Método Eléctrico

El método eléctrico puede hacerse de varias maneras. Algunas se basan en los campos naturales de la tierra, mientras que otras requieren inyectar corrientes artificiales en el suelo. El método de la resistividad se utiliza para investigar discontinuidades horizontales y verticales en las características eléctricas del suelo, así como para encontrar cuerpos con una conductividad eléctrica anormalmente alta en tres dimensiones. La investigación de la geología del subsuelo poco profundo se realiza con frecuencia en estudios de ingeniería e hidrogeológicos.

El método de polarización inducida localiza zonas en las que los minerales conductores están dispersos dentro de sus rocas huésped aprovechando la acción capacitiva del subsuelo. El enfoque del potencial espontáneo localiza cuerpos poco profundos de conductividad anómala utilizando corrientes naturales del terreno producidas por procesos electroquímicos.

A diferencia de los métodos electromagnéticos, que utilizan para ello campos electromagnéticos alternos de alta frecuencia, los métodos eléctricos exploran las propiedades eléctricas del subsuelo utilizando corrientes directas o corrientes alternas de baja frecuencia (Kearey, 2002).

Método de Polarización Inducida (IP-Res)

Si la corriente se corta rápidamente al utilizar una dispersión de resistividad convencional de cuatro electrodos en modo DC, el voltaje entre los electrodos de potencial no cae inmediatamente a cero. La tensión disminuye gradualmente tras una caída inicial significativa y puede tardar varios segundos en llegar a cero. Cuando se enciende la corriente, se observa el mismo efecto. El voltaje aumenta de forma

constante durante un periodo de tiempo discreto hasta alcanzar un valor de estado estacionario tras una brusca subida de tensión inicial. La tierra se polariza eléctricamente al actuar como un condensador que almacena carga eléctrica.

Dado que la capacitancia del suelo bloquea el paso de corrientes continuas pero transmite corrientes alternas con eficacia creciente a medida que aumenta la frecuencia, se descubre que si se utiliza una fuente de corriente alterna variable de baja frecuencia para medir la resistividad en lugar de una fuente de corriente continua, la resistividad aparente medida del subsuelo disminuye a medida que aumenta la frecuencia.

Tanto la reducción transitoria del voltaje residual como la fluctuación de la resistividad aparente en función de la frecuencia son provocadas por la característica capacitiva del suelo. La transformación de Fourier conecta los dos efectos, que son representaciones del mismo fenómeno en los dominios del tiempo y la frecuencia. Estos dos ejemplos de la característica capacitiva del suelo ofrecen dos enfoques de estudio alternativos para examinar el efecto.

La medición IP en el dominio del tiempo es la medición de una tensión decreciente durante un periodo de tiempo predeterminado. El levantamiento IP en el dominio de la frecuencia es la medición de la resistividad aparente en dos o más frecuencias de CA bajas (Kearey, 2022).

Exploración Minera

Los geólogos exploradores caminan por las rocas y hacen observaciones cuando inician el proceso de exploración minera o, más exactamente, de descubrimiento de minerales. Para comprender todos los datos de una prospección determinada y tomar las medidas oportunas, el explorador de éxito utiliza conocimientos sobre relaciones geológicas y estilos de yacimientos minerales, templados por la

experiencia. Entender cómo los procesos de formación de menas se presentan como productos hidrotermales, como los diseños de alteración y los minerales de mena, puede ayudar a comprender mejor cómo un tipo de yacimiento mineral puede verse influido por diferentes ubicaciones geológicas. Esta comprensión puede reforzarse conociendo los sistemas hidrotermales activos, que son los equivalentes modernos de los yacimientos de oro epitermales.

A pesar del esfuerzo que supone localizar una oportunidad prometedora en primer lugar, la evaluación representa ahora la mayor parte de los costos de exploración. En consecuencia, nuestra atención se centra en la exploración de yacimientos epitermales desde el punto de vista de un explorador que evalúa un potencial o una propuesta. Hay que desarrollar las distintas hipótesis de trabajo de un prospecto, y la responsabilidad del explorador es diseñar pruebas fiables para cada una de ellas, ya sea un sondeo de perforación o una prueba mental.

Conocer los objetivos geológicos y económicos de una empresa es crucial para la evaluación de una prospección, y es importante tenerlos presentes en todo momento. Por muy prometedora que parezca una posibilidad, si los controles geológicos apuntan a un tonelaje insuficiente para satisfacer las necesidades económicas de la empresa o si se prevé que la zona mineralizada será de baja ley o refractaria, lo adecuado será interrumpir la inversión. Nadie quiere dejar pasar un yacimiento que está esperando a ser descubierto, pero para evitar gastos excesivos injustificados, los aspectos económicos deben tenerse muy en cuenta en cada fase de la revisión del proyecto. Aunque a menudo es cierto que las minas se crean más que se descubren, ninguna inversión puede crear una mina a partir de un yacimiento que no está allí (Hedenquist et al., 2000).

Ambiente Epitermal

Es difícil dar una definición precisa de la expresión "epitermal", que se utiliza con frecuencia para describir un entorno poco profundo que

suele contener depósitos de oro, plata y metales base. Otros minerales y metales extraídos de sistemas epitermales son caolinita, alunita, sílice, Sb, Hg y S. Basándose en la reconstrucción geológica, Lindgren (1933) estimó la profundidad máxima de la formación en 3.000 pies (aproximadamente 1,000 m). El límite máximo de presión se estimó en 100 atmósferas, lo que equivale a agua de baja salinidad y bajo contenido de gas con punto de ebullición a una profundidad de unos ~1,000 m. A partir de las limitaciones de estabilidad percibidas de los distintos minerales y de las similitudes entre las texturas de las vetas y las de los depósitos de aguas termales, estos últimos desarrollados a menos de 100°C, Lindgren (1933) calculó un intervalo de temperaturas de 50° a 200°C.

Ahora sabemos que los yacimientos con texturas y asociaciones minerales típicas del ambiente epitermal contienen minerales e inclusiones fluidas que pueden soportar temperaturas de hasta 300°C, a pesar de que la mayoría de los yacimientos se producen en un rango de temperaturas entre 160° y 270°C. La presión de vapor del agua en ebullición restringe la mayor temperatura a una profundidad dada bajo presión hidrostática. Este rango de temperaturas se correlaciona con un rango de profundidad por debajo de la paleo nivel freático de alrededor de 50 a 700m, respectivamente, ya que hay pruebas sólidas de que la ebullición se produce con frecuencia dentro de las zonas de mineralización epitermal. Según Lindgren (1933), la deposición de mineralización se produce porque los fluidos concentrados que ascienden y cambian rápidamente su composición a menos de un kilómetro de la superficie. Ahora comprendemos que la ebullición, que es el método más eficaz para precipitar metales de complejos bisulfurados como el oro, es lo que provoca este cambio. Como resultado de la ebullición y el posterior enfriamiento rápido se producen otras numerosas características relacionadas, como la deposición de ganga de cuarzo con textura coloforme, adularia y calcita hojosa. Además, se crean aguas calentadas por vapor, que dan lugar a halos y encapsulamientos de alteración argílica y argílica avanzada. Tras la

fracturación hidráulica, también se produce una despresurización prolongada, que intensifica el flujo de fluido en ebullición. Estos factores han dado lugar a la existencia de un entorno epitermal de deposición de mineralización (Hedenquist et al., 2000).

Depósito Epitermal de Alta Sulfuración.

En las regiones donde existen yacimientos de tipo pórfido, el estilo de alta sulfuración de un yacimiento epitermal se desarrolla en una posición de transición entre la superficie y una intrusión superficial desgasificante. Los yacimientos suelen estar alojados en conductos estructurales o litologías permeables y se encuentran cerca de conductos volcánicos. La presencia de un potente sistema de canales en el sistema volcánico-hidrotermal que permita el rápido ascenso del fluido magmático hasta las profundidades epitermales es una necesidad crucial.

En los depósitos de alta sulfuración, las rocas huésped primarias varían. 16 de los 43 yacimientos examinados por Sillitoe (1999) están albergados por rocas volcánicas andesíticas y dacíticas, tanto flujos como brechas; 10 están albergados por ignimbrita débil a moderadamente soldada. Mientras que otras unidades volcánicas son más frecuentes en Asia y Europa, la ignimbrita parece ser más común en Sudamérica. Diez yacimientos se encuentran en pórfidos dacíticos a andesíticos y otras intrusiones. Nueve yacimientos se encuentran parcial o totalmente en rocas sedimentarias de diversos tipos, como pizarra, arenisca, estratos calcáreos y grauvacas metamorfoseadas. Curiosamente, a pesar del extendido vínculo entre los depósitos de alta sulfuración y los domos, sólo una pequeña parte de los depósitos residen realmente dentro de los domos. Esto podría ser el resultado de su sincronización sin-hidrotermal con la intrusión.

La zonación de la alteración del yacimiento es una de las características más típicas de los depósitos de alta sulfuración. La roca huésped de la mineralización es sílice vuggy que ha recristalizado a

partir de sílice residual, con leyes que disminuyen a medida que se alejan del núcleo silíceo. Una zona de alteración argílica avanzada con cuarzo-alunita y minerales de kandita (como caolinita, nacrita o dickita), ocasionalmente con pirofilita o diáspora, se extiende hacia el exterior desde el núcleo de cuarzo oqueroso o vuggy. Además, partes de la zona silícea pueden mostrar esta relación, posiblemente preservadas de la lixiviación total en zonas cercanas de menor permeabilidad.

La alteración argílica externa de illita o arcillas intercaladas sigue al núcleo silíceo y alterado argílico avanzado. La clorita es un producto de la zona final de alteración propilítica. La zona de alteración argílica avanzada puede variar en anchura desde un máximo de 100 m hasta un mínimo de 1 m. Este patrón de zonación alterada denota circunstancias cada vez menos ácidas a medida que se aleja del canal de fluidos ácidos. Donde son visibles, las zonas de sílice (cuarzo oqueroso) y cuarzo-alunita se acuñan hacia abajo, y la zona de alimentación estructural está rodeada por una zona sericítica o argílica. En ciertos yacimientos, como en Pueblo Viejo, la zona de cuarzo-pirofilita alberga la mineralización aurífera en ausencia de la zona de sílice.

La enargita o su dimorfo de baja temperatura la luzonita, se relaciona con mayor frecuencia con la mineralización aurífera en yacimientos de alta sulfuración. Estos sulfuros de cobre de alto estado de sulfuración a menudo se producen al principio de la paragénesis, tienen una baja concentración de oro y están cortados por mineralización aurífera (por ejemplo, Lepanto y El Indio, Chile). La pirita, tennantita-tetraedrita, calcopirita y telururo presentes en el mineral de oro post enargita son indicativos de una etapa de sulfuración más baja que la de la enargita. En Summitville, hay una transición creciente dependiente de la profundidad de la enargita a la tetraedrita. La anhidrita y la barita son a menudo alteraciones tardías y minerales de ganga, mientras que la alunita es típicamente una alteración temprana y un mineral de ganga (Hedenquist et al., 2002).

2.3. Marcos Conceptuales

Alteración Argílica

Según la mayor o menor fuerza del metasomatismo H^+ , es una alteración hidrotermal que destruye los feldespatos y produce caolinita o montmorillonita (Oyarzun, J. y Oyarzun, 2014).

Alteración Argílica Avanzada

Se trata de una alteración hidrotermal que es común en niveles cercanos a la superficie o muy tardíos en el crecimiento de un pórfido de cobre. También puede encontrarse en enormes depósitos de sulfuros y depósitos epitermales de alta sulfuración (Oyarzun, J., y Oyarzun, R., 2014).

Alteración Propilítica

Minerales como clorita, epidota, albita y calcita son algunos de los que la definen. Se trata de una alteración de los pórfidos de cobre contemporánea a la alteración potásica y contiene únicamente piritita (Oyarzun, J., y Oyarzun, R., 2014).

Alunita

Mineral característico de la alteración argílica avanzada, aunque potencialmente pueden tener orígenes supergénicos provocados por la acidez producida por la oxidación de la piritita. La alunita es un sulfato básico de fórmula $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$. Según Oyarzun, J. y Oyarzun, (2014), la fórmula química genérica del grupo de la alunita es $AB_3(SO_4)_2(OH)_6$, donde A puede ser K, Na, Ca, Pb, Ag o NH_4^+ y B puede ser Al, Cu o Fe.

Andesita

Emplazamiento subvolcánico extrusivo o intrusivo de una roca ígnea con estructura afanítica y composición intermedia. El piroxeno, el anfíbol y la plagioclasa calcosódica (que suele encontrarse en la andesita) componen su mineralogía. Tanto en los arcos magmáticos de

tipo andino como en los arcos insulares, las andesitas son un tipo de roca común (Oyarzun, J., y Oyarzun, R., 2014).

Anomalía.

Característica o acción de un sistema que difiere del comportamiento típico o previsto. Las anomalías geoquímicas y geofísicas son marcadores críticos de la aparición de yacimientos no aflorantes en la exploración minera (Oyarzun, J., y Oyarzun, R., 2014).

Anomalía Geofísica

En zonas de posible interés exploratorio o de desarrollo de recursos, consiste en registrar, procesar y visualizar la respuesta proporcionada por diversos campos físicos (Chelotti et al., 2009).

Brecha

Las brechas son rocas rotas que se estudian por su relación variable con la mineralización, incluso como vectores del mineral, aunque hay una miríada de formas de brechas y modos de desarrollo de brechas. (Corbett, 2017).

Conductividad Eléctrica

Dado que permiten el paso de portadores de carga eléctrica en diversos grados, todos los cuerpos son conductores eléctricos en sentido estricto (Chelotti et al., 2009).

Domo

Es un cuerpo o que se asemeja a un hongo. Existen cuerpos ígneos subvolcánicos de esta estructura que son creados por magmas ricos en sílice (Oyarzun, J., y Oyarzun, R., 2014).

Epitermal

La expresión describe los yacimientos hidrotermales que se originaron a bajas temperaturas y a profundidades relativamente bajas. El rango

epitermal, o el intervalo de aproximadamente 100° a 300° C (Oyarzun, J. y Oyarzun, 2014).

Estructura Mineralizada.

La estructura controla el desarrollo de depósitos de mineral epitermal y de pórfido de varias maneras. Los sistemas de fracturas dilatantes extraen fluidos minerales de las rocas generadoras magmáticas en profundidad hacia niveles más altos de la corteza (tanto epitermales como de pórfido) donde se produce la deposición de minerales, mientras que los fluidos epitermales se devuelven durante la migración ascendente (Corbett, 2017).

Falla

Es cuando se ha producido un desplazamiento notable paralelo a la superficie de fractura a lo largo de esta fractura de roca frágil. Nos referimos a una diaclasa si no existe tal desplazamiento a lo largo del plano de fractura (Oyarzun, J. y Oyarzun, R., 2014).

Resistividad eléctrica

La dificultad que tiene la corriente para moverse a través de un material viene indicada por su resistividad eléctrica. La facilidad con la que una corriente eléctrica puede fluir a través de un material se denomina conductividad. La resistencia eléctrica de un conductor homogéneo se rige por la geometría del conductor y la resistividad de los materiales que lo componen (Chelotti et al., 2009).

Silicificación

La sílice (SiO₂), un componente común de las soluciones hidrotermales puede añadirse a las rocas a través de la alteración hidrotermal, o los silicatos pueden ser completamente destruidos por la extrema acidez del sistema, dejando un residuo silíceo de cuarzo microcristalino (Oyarzun, J., y Oyarzun, R., 2014).

Susceptibilidad Magnética

Una sustancia se magnetiza cuando se expone a un campo magnético. Según Chelotti et al. (2009), adquiere una intensidad de magnetización proporcional al campo externo aplicado.

Toba

Se trata de rocas piroclásticas frecuentemente relacionadas con erupciones estrombolianas o plinianas, aunque no exclusivamente con éstas. Según Oyarzun, J., y Oyarzun, R. (2014), son depósitos de caída formados por materiales de tamaño fino que fueron arrojados violentamente desde el volcán.

Unidades de Intensidad Magnética

Mide la fuerza del magnetismo. El ersted (Wb/m^2) se utiliza para medir los campos magnéticos. Mucha gente utiliza Gauss para expresar las unidades, que es exactamente la misma magnitud pero tiene un nombre diferente. $g=10^{-5}$ es otra unidad del S.I. El Tesla (Maxwell/cm^2) sirve como unidad primaria en el sistema cgs, y nT equivale a 10^{-9}T (Chelotti et al., 2009).

Yacimiento Mineral

Es el término utilizado para describir una concentración natural de minerales que tiene buenas posibilidades de ser explotada con fines económicos, ya sea ahora o en un futuro relativamente próximo (Oyarzun, J. y Oyarzun, 2014).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de la Investigación

El tipo de investigación es no experimental, debido a que no se van a manipular la variable método audio magnetoteléxico de fuente controlada (independiente) porque su ejecución ya tiene un procedimiento predeterminado, tampoco se va a manipular la variable depósitos epidermales de alta sulfuración profundos (dependiente), porque son propios de la naturaleza. El diseño de la investigación es transeccional causal, porque esta investigación se centra en describir las variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento determinado del proyecto Libertad (ver Cuadro 2).

Cuadro 2. Tipo y diseño de la investigación.

Método audio magnetoteléxico de fuente controlada	→	Depósitos epidermales de alta sulfuración profundos
X ₁		Y ₁

3.2. Unidad de Análisis

La unidad de análisis es toda la propiedad minera del proyecto Libertad, que está constituida por 3,800 hectáreas, ubicadas en la región Tacna del sur del Perú.

3.3. Población de Estudio

La población son 3 tipos de estudios geofísicos realizados en el área más prospectiva del proyecto (3.0 km x 2.0 km).

- 84.3 km lineales de lecturas con el método audio magnetoteléxico de fuente controlada (CSAMT).
- 294 km lineales de lecturas con el método de magnetometría terrestre (MAG).
- 15 km lineales de lecturas con el método de polarización inducida (IP-Res).
- 212 muestras de roca.

3.4. Tamaño de la Muestra

El tamaño de la muestra es igual a la población de estudio.

3.5. Selección de la Muestra

No se han seleccionado muestras, porque el tamaño de la muestra es igual a la población de estudio.

3.6. Técnicas de Recolección de Datos

El objetivo de los estudios geofísicos es obtener información sobre la geología del subsuelo. Si bien la ejecución del estudio utilizando técnicas específicas puede diferir en detalle, casi invariablemente consistirá en tres pasos: recolección de datos, procesamiento de datos e interpretación de datos (Palacky, 1988).

La recolección y procesamiento de datos estuvo a cargo de la empresa contratista QUANTEC Geoscience especialista en este servicio. Mientras que la interpretación la realizó el autor de la presente investigación.

3.6.1. Audio Magnetotelúrico de Fuente Controlada

Con el método geofísico CSAMT se ejecutaron 84 km lineales, distribuidos en 14 líneas de dirección este-oeste. El instrumento receptor fue Zonge GDP-32-II, y el transmisor fue Zonge GGT-30. Para la adquisición se utilizó una matriz estándar de 6 dipolos de 300 m, con el receptor y la bobina magnética ubicados en el centro de la matriz.

Las inversiones 1D de Okeam o Marquardt se utilizaron primero para invertir los datos y producir una curva suave de resistividad 1-D/ profundidad para cada estación. La inversión Okeam del modelo suave 1D encadenado preliminarmente fue una primera aproximación del ajuste de datos y se utilizó como modelo de entrada para la inversión 2D. La inversión 2D se realizó en Geotools. Luego, los resultados finales se exportaron a Geosoft y se trazaron como secciones. Cada sección se presenta con contornos con espaciado logarítmico y se utilizó la misma distribución de color para todas las secciones. (Quantec Geoscience, 2020).

3.6.2. Magnetometría

En esta investigación se ejecutaron 294 km lineales de magnetometría terrestre, distribuidos en 53 líneas de dirección este-oeste. El instrumento usado fue un magnetómetro GEM GSM19-W, el tipo de sensor fue Overhauser Effect, mounted on a 2m staff. La configuración fue Total Magnetic Intensity Profiling.

En el procesamiento, las mediciones de intensidad magnética total (TMI) de la estación base y los magnetómetros móviles se transfirieron a una computadora usando GEMLink 5.4. Los archivos de datos se editaron cuando fue necesario y luego se importaron a Geosoft Oasis Montaj[™]. El procesamiento de datos y la corrección de los datos se realizó con los siguientes pasos: Los datos magnéticos brutos se corrigieron para la deriva diurna. Se eliminaron los picos y las punteras magnéticas. Se comprobaron las coordenadas GPS. Los productos de datos cuadrículados se calcularon para: Intensidad Magnética Total (TMI), Reducción a Ecuador (RTE), Derivada

vertical (calculada a partir de RTE ascendente continuada 10 m), Inclinación Derivada (calculada a partir de RTE hacia arriba continúa 10 m), Señal analítica (calculada a partir de TMI continuo ascendente de 10 m). (Quantec Geoscience, 2020).

3.6.3. Polarización Inducida

Para esta investigación se midió 3 líneas de 5 kilómetros cada una, de dirección este-oeste. El instrumento receptor DCIP fue IRIS Elrec-Pro, y el instrumento transmisor fue IRIS Vip 3000. Con la configuración polo-dipolo, espaciamiento de receptores de dipolo cada 100 metros, y arreglo de receptores de dipolo $n=1$ a 10.

Las inversiones 2D DC e IP se llevaron a cabo a lo largo de líneas para producir secciones transversales de las variaciones de resistividad y cargabilidad. La suite de inversión UBC DCIP2D consta de una biblioteca de programas que utiliza la biblioteca de computación paralela OpenMP (UBC-GIF-v5) para realizar el modelado directo y la inversión de datos de resistividad de DC e IP sobre una distribución 2D de conductividad eléctrica, y cargabilidad; consta de dos utilidades principales: DCINV2D programa para invertir potenciales DC para recuperar un modelo de conductividad 2D. Y IPINV2D programa para invertir datos IP para recuperar un modelo de cargabilidad 2D. (Quantec Geoscience, 2020).

CAPÍTULO 4: MARCO GEOLÓGICO

4.1. Ubicación y Accesibilidad

El proyecto está ubicado al sur del Perú, en la región Tacna, en la provincia y distrito de Candarave, a 134 km en línea recta de la ciudad de Tacna. La altitud promedio es de 4,800 m s. n. m. y consta de 3,800 hectáreas las que están distribuidas en 6 concesiones mineras (ver Figuras 4 y 5).

El acceso al proyecto desde Lima inicia por vía aérea hasta la ciudad de Tacna, luego por la carretera Panamericana Sur a la ciudad de Moquegua, se continúa por la carretera Binacional hasta el poblado de Huaytire y se termina por una trocha carrozable hasta llegar al proyecto. La distancia desde Tacna es de 310 km, en un tiempo de 5 horas en camioneta.

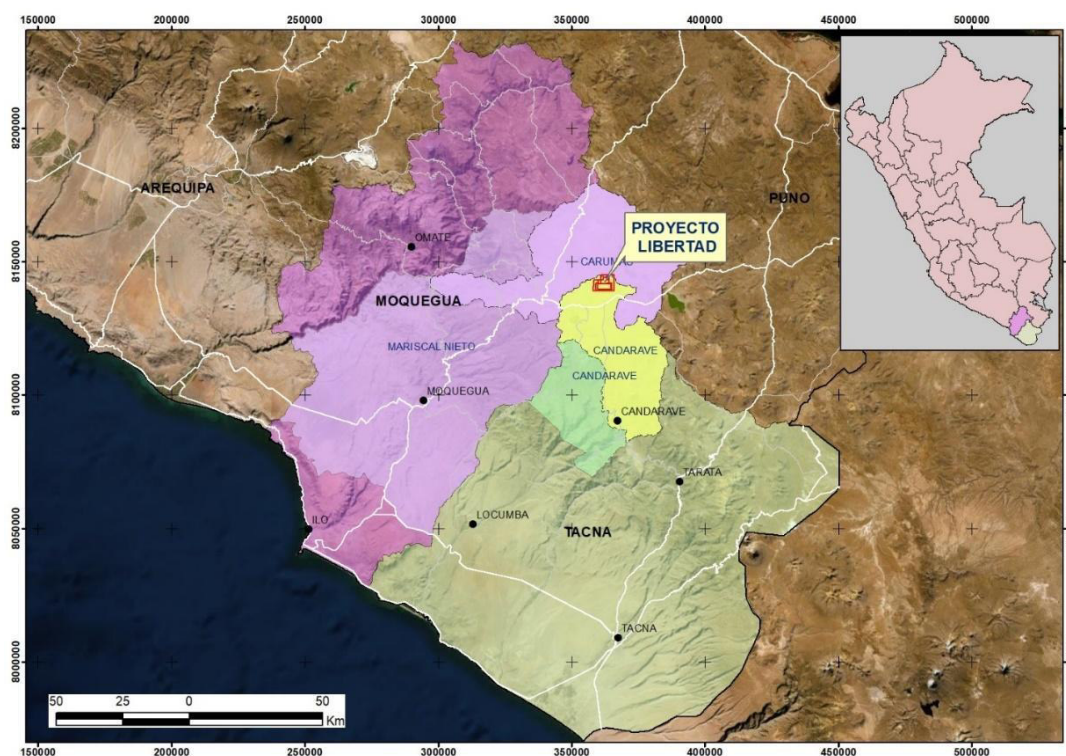


Figura 4. Ubicación del proyecto Libertad

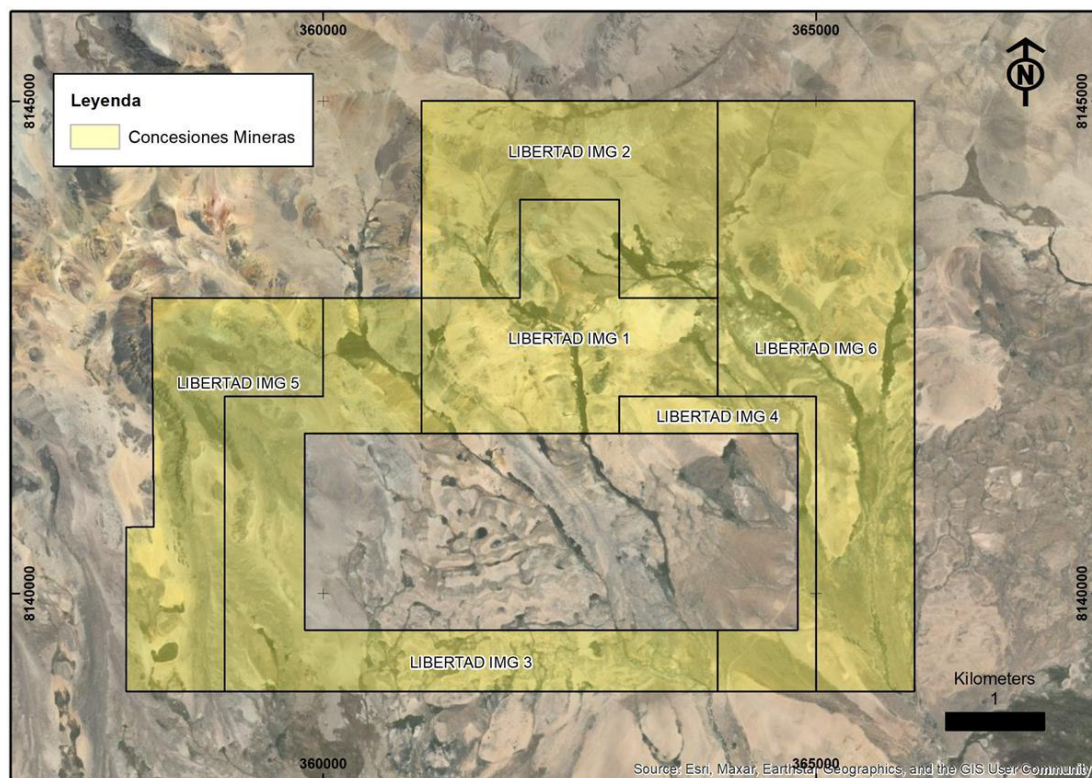


Figura 5. Concesiones mineras del proyecto Libertad

4.2. Geología Regional

El proyecto Libertad se ubica en la franja de yacimientos y proyectos epitermales de Au-Ag de edad Mioceno - Plioceno, próximo a la estructura regional Alto Condoroma-Caylloma y a 26 km al sureste del yacimiento Aruntani (ver Figura 6).

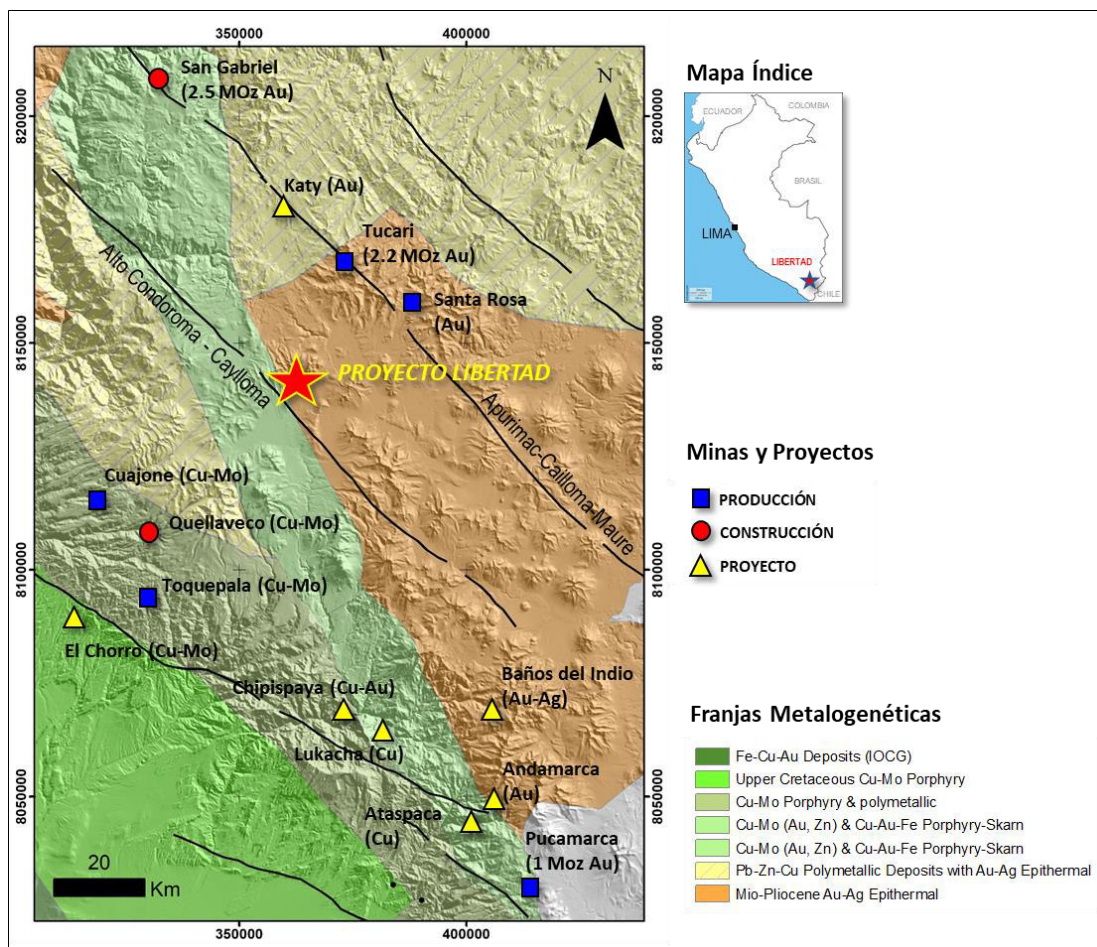


Figura 6. Ubicación metalogénica del proyecto Libertad

De acuerdo con García (1978), en el Boletín A-29 del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) regionalmente el área del proyecto presenta las siguientes unidades (ver Figuras 7 y 8) :

Formación Sencca.

Esta unidad está constituida por rocas volcánicas piroclásticas de composición riolítica con variaciones a andesitas y dacitas de coloraciones variables entre blanco, crema, rosado y gris claro que producto de la alteración también adoptan un color parduzco. Con frecuencia se encuentran tufo líticos brechoides poco compactados porosos y livianos, con ojos de cuarzo, feldespatos y micas. Se puede apreciar en los fragmentos líticos de andesitas, algunos elementos juveniles y matriz de cenizas finas. El intemperismo afecta

estas rocas haciendo que se conviertan en bloques irregulares de diferentes tamaños, y adoptan una erosión característica.

Edad y Correlación: La columna litoestratigráfica regional utiliza esta unidad de edad Plioceno como base. Dado que los volcánicos del Sencca no tienen edad radiométrica, debemos basarnos en sus relaciones estratigráficas para estimar su edad. Dado que se distribuyen regularmente bajo los depósitos de la formación Capillune del Plioceno superior y se sitúan sobre la formación Maure del Plioceno, su deposición debió tener lugar en el Plioceno medio.

Formación Capillune

Esta formación está constituida por sedimentos de origen volcánico, alternados con secuencias sedimentarias de génesis y ambiente lagunar. Al suroeste del proyecto se observa en la pampa de Huaytire, afloramientos, cuya composición se describe de la siguiente manera: en la parte inferior arenas intercaladas con arcillas blanco-amarillentas y limonitas finas estratificadas, en la parte media, en estratificación laminar se encuentran intercalaciones de limo arenas, arcillas y diatomitas, hacia la parte superior intercalaciones de arcillas, limonitas, tobas retrabajadas y conglomerados. Las areniscas inferiores son de color gris en fractura fresca, adoptando un color amarillento por efecto del intemperismo, su interestratificación es en capas delgadas de 20 a 30 cm, fácilmente disgregables, estas areniscas pasan a areniscas conglomerádicas cuyos elementos están incluidos en una matriz tufácea. También, hacia el sureste del proyecto se observa acumulaciones sedimentarias de limolitas, vulcarenitas y tobas retrabajadas formando lomadas y terrazas.

Edad y Correlación: La columna litoestratigráfica regional ubica a esta unidad suprayaciendo en discordancia erosional al Volcánico Tacaza y en concordancia al Volcánico Sencca e infrayace en discordancia erosional al Grupo Barroso, por lo tanto, se infiere que la formación Capillune es del Plioceno Superior.

Grupo Barroso

Este Grupo es producto de un vulcanismo amplio diferenciado litológica y morfológicamente, desde el punto de vista litológico corresponde a una secuencia de rocas volcánicas constituidas por intercalaciones de tufos y lavas de composición traquítica, traquiandesítica y andesítica, además también hay intercalaciones de brechas lenticulares con clastos de andesitas porfíricas y afaníticas. Desde el punto de vista morfológico se han reconocido estratovolcanes, centros y complejos volcánicos.

Estrato-volcán Asnuni (Plioceno-Pleistoceno): La base cónica tobácea aún es perceptible y está compuesta por fragmentos líticos de andesitas porfídicas y biotita y cuarzo en su parte cristalina. En el centro, también hay afloramientos de brechas andesíticas porfídicas. Esta estructura volcánica se encuentra en la esquina superior derecha de las concesiones del proyecto Libertad, al suroeste del reservorio Pasto Grande. Las tobas se describen como toba-brechoides riolíticas.

Complejo Volcánico Suches (Plioceno-Pleistoceno): Las lavas más comunes son las andesitas porfídicas, afaníticas y vesiculares. Las morrenas y los depósitos fluvio-glaciares han enterrado muchas de estas coladas de lava. Sus afloramientos también presentan mineralización y alteración hidrotermal.

Edad y correlación: Basándose en su posición estratigráfica, que indica que sobreyacen a la Formación Capillune, de edad pliocena, y yacen bajo depósitos del Cuaternario temprano, la columna litoestratigráfica regional utilizada para ubicar este Grupo y complejo de rocas en la escala geológica lo sitúa entre el Plioceno y el Pleistoceno.

Depósitos Cuaternarios.

Morrenas. Flujos de lodo o morrenas son los dos términos utilizados para describir estos depósitos. En algunas zonas, este material se exhibe en una matriz de arena y toba sin ninguna indicación de estratificación o división en partes constituyentes. Edad y relación: Se trata de depósitos cuaternarios del Pleistoceno.

Depósitos Fluvioglaciares. Su litología se compone de finos estratos o bancos de conglomerados finos de color blanco grisáceo con intercalaciones de arenisca. Edad y su relación: sedimentos del Pleistoceno al Holoceno.

Bofedales. Existen depósitos de arenas arcillosas con materia vegetal descompuesta en zonas pantanosas que son alimentadas por el deshielo de algunas quebradas del proyecto, especialmente en la zona central de las concesiones, donde existe una gran variedad de pastos naturales utilizados para la crianza de auquénidos y las raíces secas utilizadas para hacer fuego en sus viviendas. Estos lugares son conocidos como bofedales. Estos depósitos son de edad cuaternaria y se correlacionan con el Holoceno.

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES	ESPESOR	LITOESTRATIGRAFÍA	DESCRIPCIÓN	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Flujoglaciares	15m.		Conglomerados finos con intercalaciones de areniscas en bancos	
			Morrenas	20m.		Matriz arenofúfúcea sin ofrecer ninguna manifestación de estratificación ni clasificación de sus elementos	
		PLEISTOCENO	GRUPO BARROSO	Complejo Volcánico Suches	50m.		Predominan tres tipos de lavas: Andesitas porfíricas, afaníticas y vesiculares. muchos de estos flujos de lava se encuentran cubiertos por morrenas y depósitos fluvioglaciares.
				Estrato Volcan Asnuri	50m.		Constituido por tobas, brechas andesíticas porfíricas.
			SUPERIOR	Fm. Capillune	150-200m.		Secuencias volcano sedimentarias de genesis y ambiente lagunar. Parte inferior arenas intercaladas con arcillas blanco amarillentas y limonitas finas estratificadas, en la parte media, en estratificación laminar se encuentran intercalaciones de limoarenas, arcillas y diatomitas, hacia la parte superior intercalaciones de arcillas, limonitas, tobas re trabajadas y conglomerados
	MEDIO	Fm. Sencca		50-100m.		Rocas volcánicas piroclásticas de composición mayormente riolítica con variaciones andesíticas y dacíticas de coloraciones variables entre blanco, crema, rosado y gris claro que producto de la alteración adoptan un color parduzco. Con frecuencia se encuentra tufo líticos brechoides poco compactados porosos y livianos con ojos de cuarzo, feldspatos y micas	

Figura 7. Columna estratigráfica regional del área del proyecto Libertad

Fuente. INGEMMET (1978).

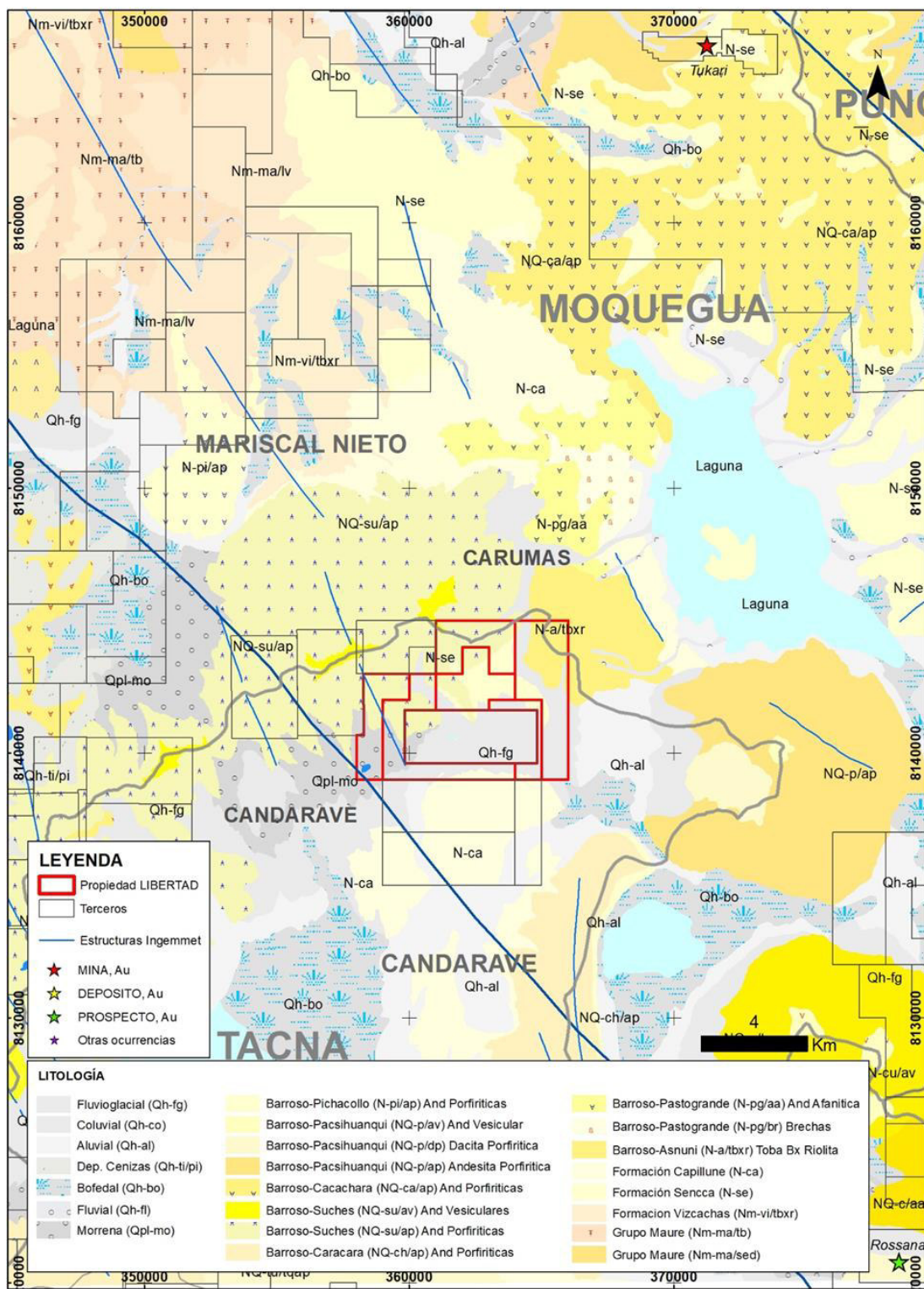


Figura 8. Geología regional del área del proyecto Libertad

Fuente. INGEMMET (1978).

4.3. Geología Local

Como se muestra en las Figuras 20, 21 y 22, las siguientes son las unidades más representativas del proyecto.

4.3.1. Litología

Lava Andesítica Afanítica (Andesita 1)

Se está considerando a esta unidad como parte del Grupo Barroso, aflora en la concesión Libertad IMG 1, en la zona más prospectiva del proyecto y es la que contiene hasta el momento las mayores anomalías geoquímicas de oro. Esta unidad presenta lavas andesíticas con matriz afanítica y cristales dispersos de plagioclasas menores a 2 mm. Los afloramientos son de colores oscuros y se aprecia silicificación local de moderada a fuerte con un control estructural, acompañado de pirita finamente diseminada y clorita dando coloraciones verdosas; por lo general están afectadas por débil a moderada argilización y local argílica avanzada (ver Figura 9).



Figura 9. Andesita afanítica silicificada.

Toba Riodacítica (Toba 2)

Sobre las lavas andesíticas descansa una secuencia de tobas riodacíticas con cristales de cuarzo redondeados (ojos de cuarzo), acompañados de biotitas y algunas plagioclasas pequeñas. Se destaca la amplia distribución de fiammes y de líticos de composición andesítica con tamaños de hasta 5 cm. Es en esta unidad donde se han desarrollado algunos cuerpos de brecha hidrotermal y especialmente un reemplazamiento intenso con sílice granular y masiva con desarrollo de alteración argílica avanzada.

En la zona central de la concesión Libertad IMG 1, aflora un cuerpo discontinuo de 700 m x 350 m de tobas riodacíticas fuertemente silicificadas, con desarrollo de alteración argílica avanzada. La sílice es principalmente granular y masiva, con desarrollo local y moderado de textura vuggy silica. La alunita se hospeda principalmente dentro de los fiammes como finos cristales (localmente alunita bladed); también, los registros de espectrometría indican gran distribución de alunita potásica, que estaría asociada a la sílice granular en forma pulverulenta. La presencia de óxidos de hierro es mayormente diseminada en la porosidad y en menor proporción en fracturas; el porcentaje de óxidos es 1% en promedio, y localmente hasta 5% (ver Figuras 10, 11 y 12).



Figura 10. Toba riodacítica fresca



Figura 11. Toba riodacítica con alteración argílica avanzada.



Figura 12. Toba riodacítica con vuggy silica

Hacia el noreste de estos afloramientos y en forma de halo, las tobas presentan silicificación opalina mayormente en fracturas, también con evidencias de alunita (esta zona es de aproximadamente 250 m x 60 m). Hacia el este, esta unidad se extiende en la concesión Libertad IGM 6 con las mismas características, sin embargo, no presentan alteración de interés.

Domo Riodacítico

Esta unidad litológica corresponde a los volcánicos del Grupo Barroso. Se distribuye en capas menores a 1 m de grosor, sumando más de 300 metros de espesor. El centro o fuente de emisión se ubica en un lineamiento de 500 metros de longitud con dirección sureste-noroeste (coordenada central 362,160E / 8'143,290N), en esa área el fracturamiento es vertical, además se observa abundantes xenolitos con ligera variación en composición y textura, estos xenolitos tienen formas esféricas con tamaños entre 2 cm y 20 cm de diámetro, son indicativos claros de la fuente de emisión volcánica.

Esta unidad es de composición riodacítica, porfírica, con contenidos de ojos de cuarzo hasta 5%, contiene cristales de biotita hasta 3 mm y plagioclasas hasta 5 mm en una matriz fina, presenta coloración superficial amarillenta por intemperismo. En el contacto del domo riodacítico con las brechas hidrotermales, hay un sector con silicificación opalina fuerte, tanto pervasiva como en relleno de fracturas. Esta área mide 700 m x 500 m, con presencia de alunita y alteración argílica avanzada débil (ver Figuras 13 y 14).



Figura 13. Domo riodacítico intemperizado



Figura 14. Domo riodacítico con ópalo en fracturas y cavidades.

Domo Traquítico

Se emplaza en la parte central de las concesiones Libertad IGM 3 y Libertad IMG 5, con afloramientos en área de 1,400 m x 1,700 m. La traquita es de textura porfírica con fenocristales espaciados, compuesto principalmente por feldespatos alcalinos y feldespatos potásicos, biotita y una matriz afanítica de color gris rosáceo. El centro del domo traquítico está siendo cortado por un domo andesítico controlado por fallamiento noroeste y noreste. Esta unidad no presenta alteración hidrotermal (ver Figura 15).



Figura 15. Domo traquítico inalterado

Domo Andesítico (Andesita 2)

En las concesiones Libertad IMG 3 y Libertad IMG 5 aflora un domo andesítico, del cual la erosión ha expuesto el conducto o chimenea y parte del derrame, se emplaza cortando al domo riódacítico y por el lado oeste corta al domo de traquita. Es de textura porfírica con fenocristales de plagioclasas hasta de 8 mm y biotita en una matriz afanítica de color gris rojizo. En dirección suroeste se hallan otros afloramientos de esta roca con aspecto de mantos, en general no presenta alteración, solo una local zona con alteración argílica avanzada en la coordenada 358,000E – 8'149,000N (ver Figura 16).



Figura 16. Domo andesítico inalterado

En la concesión Libertad IMG 2 aflora localmente lavas andesíticas porfíricas inalteradas sin interés prospectivo (Andesita 3)

Brechas Hidrotermales.

En la zona central del proyecto (concesión Libertad IMG 1) afloran 6 cuerpos de brechas hidrotermales polimícticas, son clasto y matriz soportada, contienen fragmentos sub-redondeados a sub-angulosos de tobas, lavas andesíticas, vuggy sílica y ópalo, en matriz pulverizada de la misma roca. Superficialmente estas brechas tienen formas circulares (tipo brecha pipe) y elongadas, su ocurrencia está asociada a una falla de dirección noroeste. Estos afloramientos presentan alteración argílica avanzada, con sílice granular y masiva, la alunita se aprecia mejor en los fragmentos porosos. Los afloramientos de brechas se distribuyen a lo largo de 650 m.

En el extremo sureste de las brechas hidrotermales polimícticas, en dirección noreste afloran otros 3 cuerpos de brechas hidrotermales hospedadas en las tobas, fuertemente silicificadas con moderada alteración argílica avanzada, estos afloramientos contienen hasta 4% de FeOx (ver Figuras 17 y 18).



Figura 17. Brecha polimíctica matriz soportada



Figura 18. Brecha polimíctica clasto soportada

En el extremo norte de la concesión Libertad IMG 5 y hospedado en lavas andesíticas, aflora un cuerpo de 300 m x 50 m con afloramientos de la lava andesítica, craqueladas, muy localmente con brecha hidrotermal por un control estructural de N70°/80° y con alteración Qz-Alunita, no se ha reconocido otra litología. Solo en esta parte del proyecto las lavas andesíticas (Andesita 2) están alteradas. Podría ser uno de los últimos eventos de alteración o en el mejor de los casos una ventana, la línea CSAMT más próxima es la L12900 que en este sector muestra una anomalía resistiva

muy superficial de 1,000 ohm.m. Estos afloramientos no presentan anomalías de oro u otro elemento pathfinder.

Coluvios con Rodados Alterados

En la parte central sur de la concesión Libertad IMG 1, hay 2 zonas importantes de 600 m x 200 m cada una, con rodados de tobas silicificadas y alteración argílica avanzada, este material tiene su origen en los afloramientos de brechas hidrotermales y tobas riódacíticas alteradas.

Gran parte de la parte sur de la propiedad minera está cubierta por material reciente. No se conoce la base de los volcánicos alterados o el contacto con unidades más antiguas. Cabe la posibilidad que litologías favorables a la alteración y mineralización pudieran estar subyaciendo a las andesitas afaníticas que están en la base de la columna estratigráfica local (Andesita 1) y hayan podido ser afectadas por fluidos hidrotermales formando áreas prospectivas.

4.3.2. Estructuras

Además de los datos colectados en el campo se realizó una interpretación de lineamientos en base a imágenes satelitales, donde se interpretó que el proyecto Libertad está cerca al cruce de dos estructuras regionales y es por ello por lo que el proyecto toma mayor interés para la exploración de un depósito económico. Según Martínez et al. (2017), el proyecto está próximo al corredor estructural Apurímac-Cailloma-Maure donde se encuentran los depósitos auríferos Tucari y Santa Rosa (ver Figura 19)

En la zona de mayor interés del proyecto se reconocieron lineamientos predominantes en dirección andina, fallas con dirección noroeste-sureste donde se emplazan las brechas hidrotermales y es el control preferente de las anomalías de resistividad. Los lineamientos con dirección noreste-suroeste, por lo general controlan cambios litológicos, y están relacionados o son parte de un sistema regional. Localmente, en el cruce de los sistemas de fallas de dirección N20° y N70°, se ha

emplazado el mayor cuerpo de tobas con alteración argílica avanzada (700 m x 350 m) y eventos de sílice calcedónica y opalina.

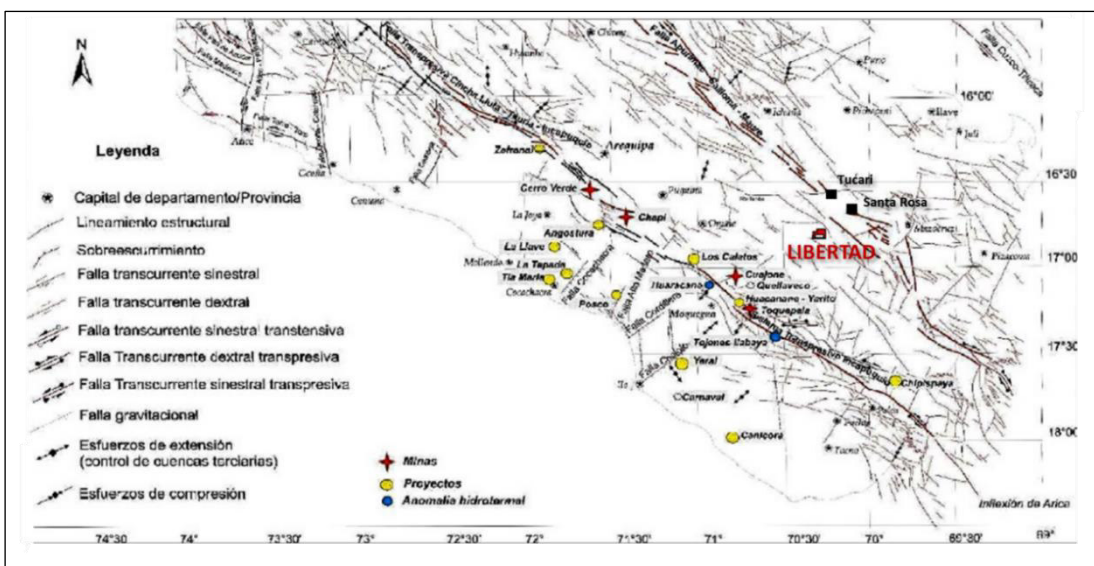


Figura 19. Mayores sistemas de fallas y lineamientos en el sur de Perú

Fuente. Martínez et al. (2017).

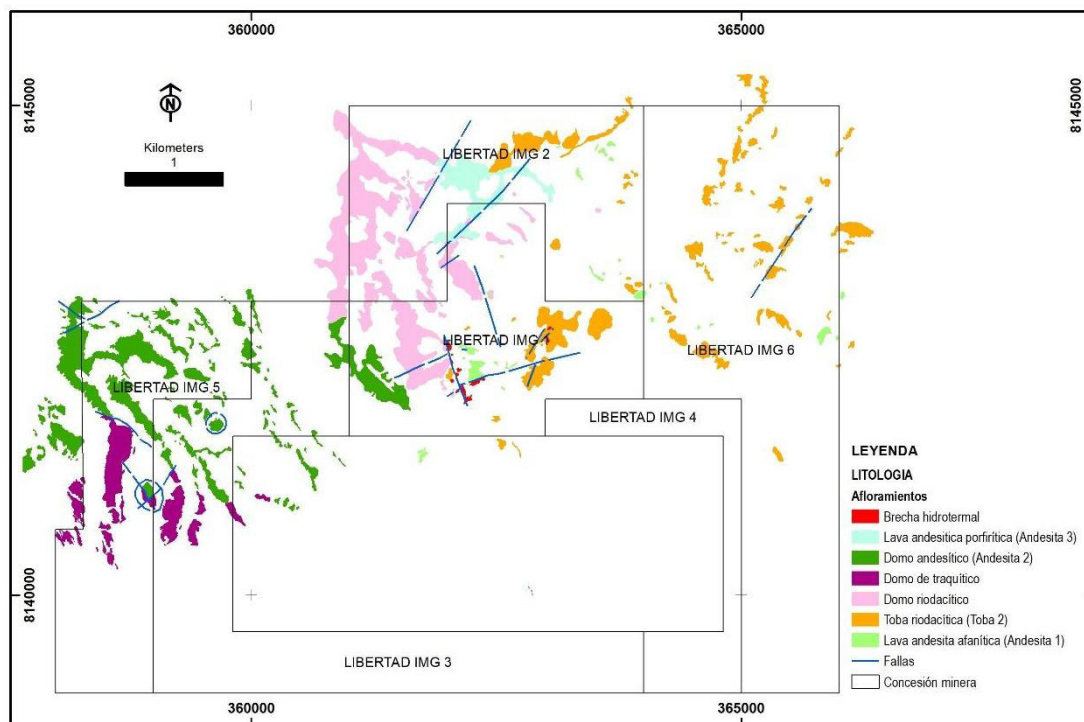


Figura 20. Geología local

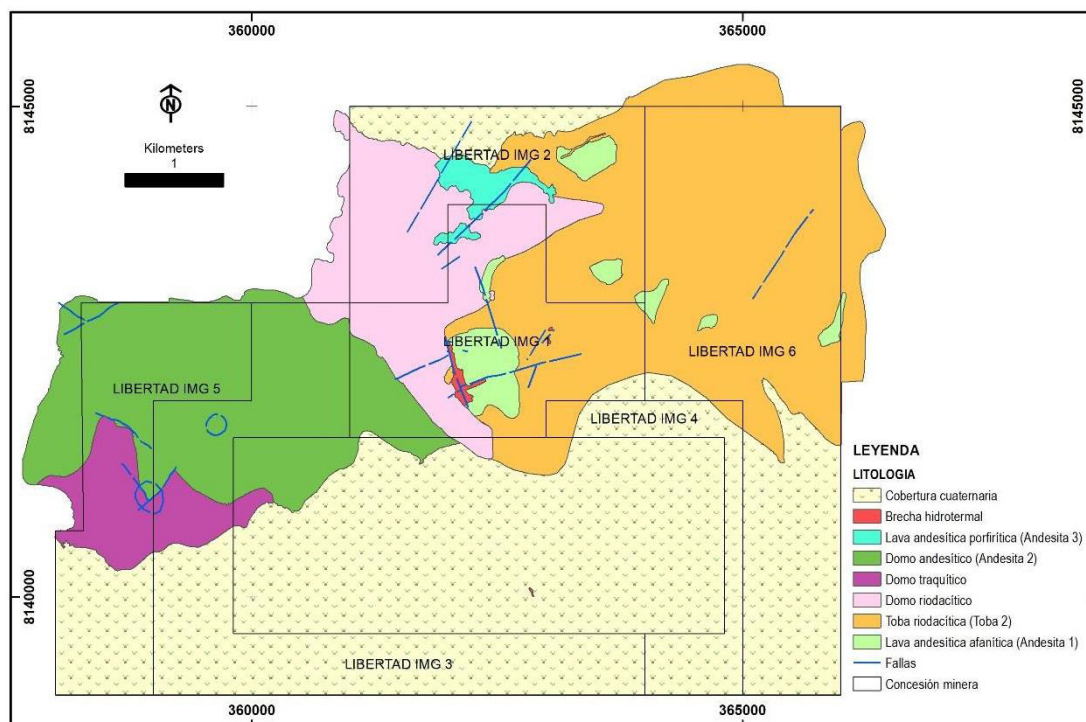


Figura 21. Geología local interpretada

ERA	SISTEMA	SERIE	ESPESOR	LITOESTRATIGRAFÍA	DESCRIPCIÓN	
CENOZÓICO	CUATERNARIO	HOLOCENO			Depósitos recientes, material fluvio-glaciar con rodados alterados.	
			50m.		Andesita 3 Lava de andesita porfírica, inalterada	
		PLEISTOCENO	200m.		Andesita 2 Domo andesita, porfírica inalterado	
			100m.		Domo de traquita inalterado	
			150m.		Domo riódacítico porfírico localmente inalterado	
			NEÓGENO	PLIOCENO	SUPERIOR	150m.
	150m.					Tobas riódacitas (Toba 2) alteración argílica avanzada fuerte, asociada a estructuras. Fragmentos líticos, abundancia de fiammes
	50m.				Andesita 1 Lava andesítica afanítica	

Figura 22. Columna estratigráfica local.

4.3.3. Alteración Hidrotermal

Se colectaron 212 muestras de roca para el análisis e identificación de minerales de alteración a través de un estudio de espectrometría de onda corta del infrarrojo (SWIR), mediante el equipo TerraSpec. Por cada muestra se realizó la lectura de 2 a 5 espectros que se procesaron con los softwares Specmin y TSG 8, seguido de una revisión detallada de cada espectro, finalmente se validó e interpretó 199 firmas espectrales.

Después de la interpretación, se han identificado tres zonas de interés con firmas espectrales bien definidas (ver Figura 23).

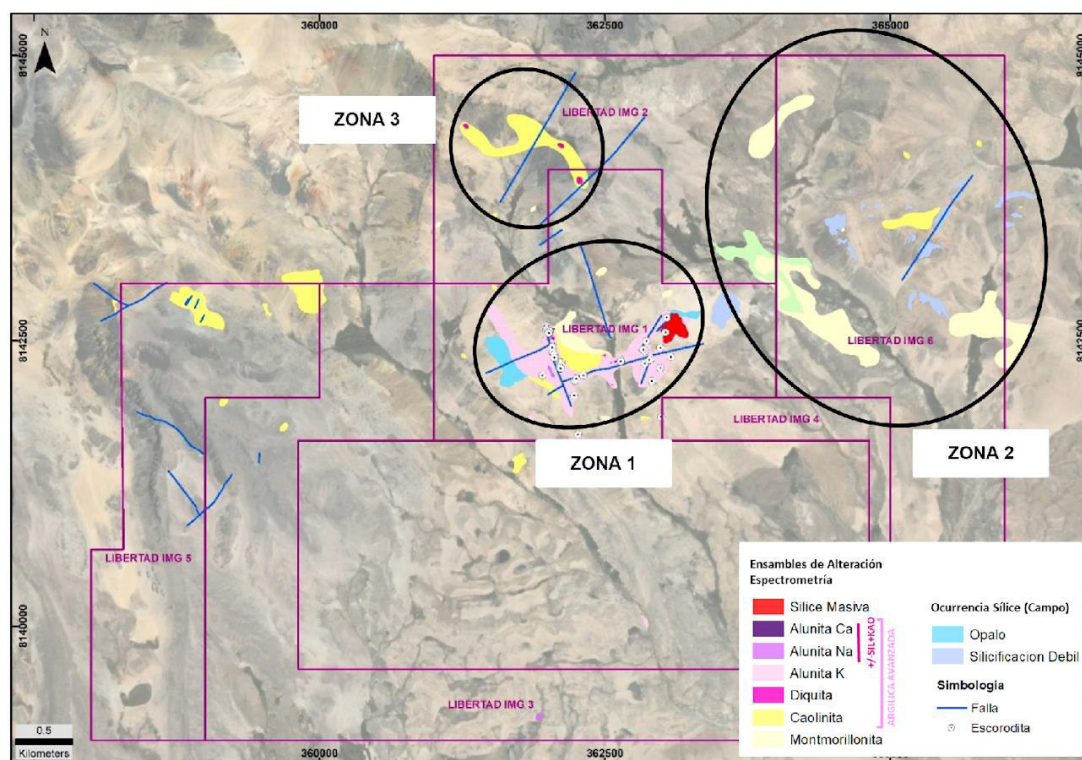


Figura 23. Alteraciones hidrotermales y zonas de interés.

Zona 1. Es la zona más prospectiva del proyecto, la alteración cubre un área de 1,350 m x 650 m, el sector oeste localmente presenta alunita Na y Ca con sílice +/- diquita y puntualmente nacrita, asociadas a brechas hidrotermales. La ocurrencia de estos minerales de alta temperatura está controlada por la presencia de fallas con orientación noroeste – sureste y noreste – suroeste. Los minerales de mayor

temperatura antes mencionados, están bordeados por un halo más grande de alunita K y +/- caolinita, (alteración argílica avanzada) y montmorillonita - caolinita (alteración argílica).

Hacia el sector este, ocurre un cuerpo de sílice masiva bordeado por alunita K y +/- escorodita. La alteración está hospedada en tobas riodacíticas y brechas hidrotermales. Algunos afloramientos del domo riodacítico y tobas presentan silicificación opalina (ver Figura 24).

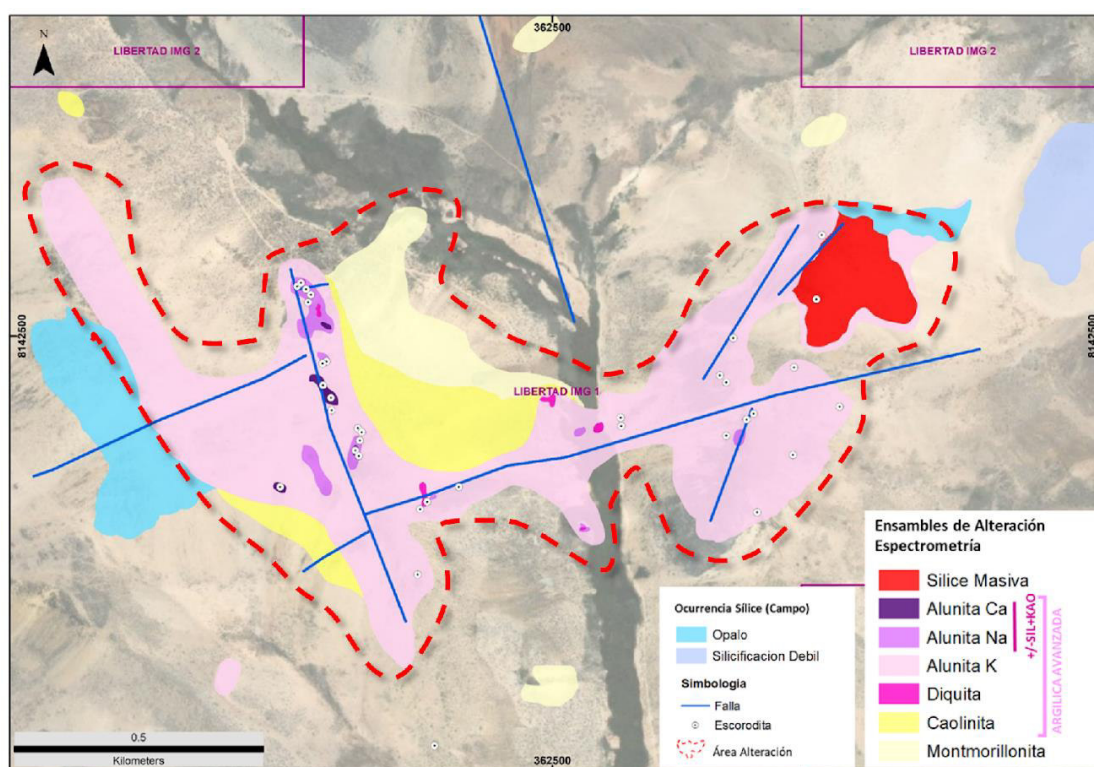


Figura 24. Zona 1 - Minerales de alteración

Zona 2. Presenta afloramientos de tobas riodacíticas con muy débil silicificación, y locales afloramientos con ópalo, bordeado por halos de montmorillonita, +/- caolinita y localmente clorita (en el lado oeste). La alteración sílica está asociada a una estructura de falla con dirección noreste-suroeste (ver Figura 25).

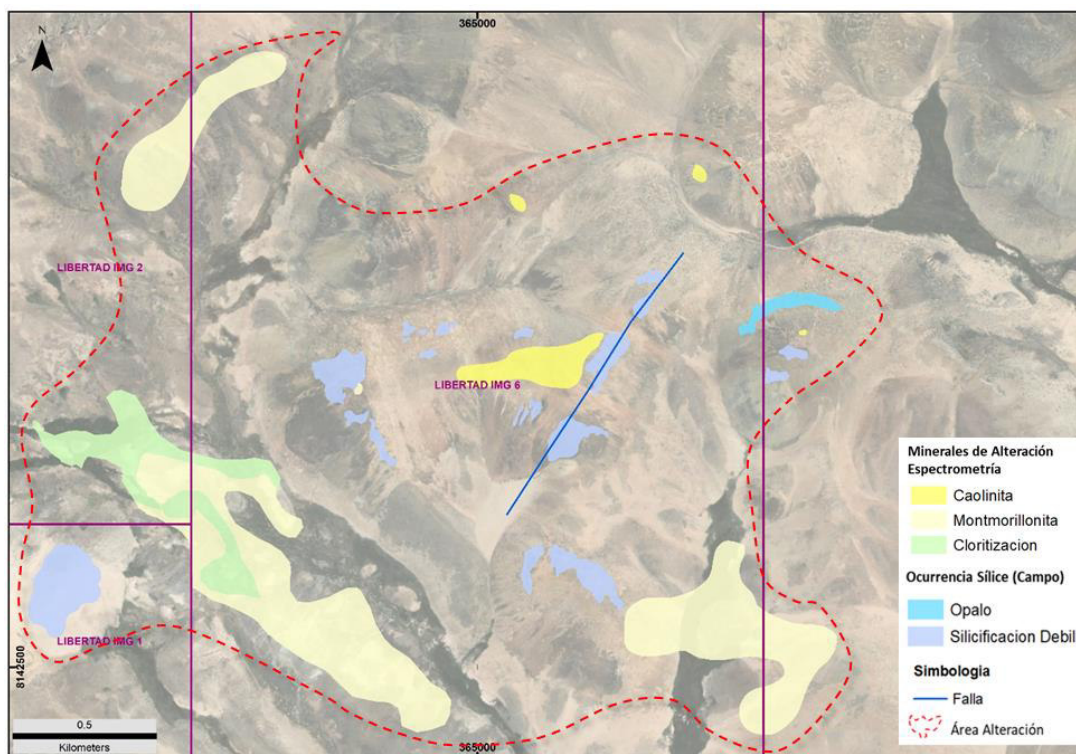


Figura 25. Zona 2 - Minerales de alteración

Zona 3. Presenta de manera puntual diquita bordeada por un amplio halo de caolinita asociado al contacto del domo riódacítico con las lavas andesíticas. El ensamble mineralógico está asociado principalmente a alteración argílica (ver Figura 26).

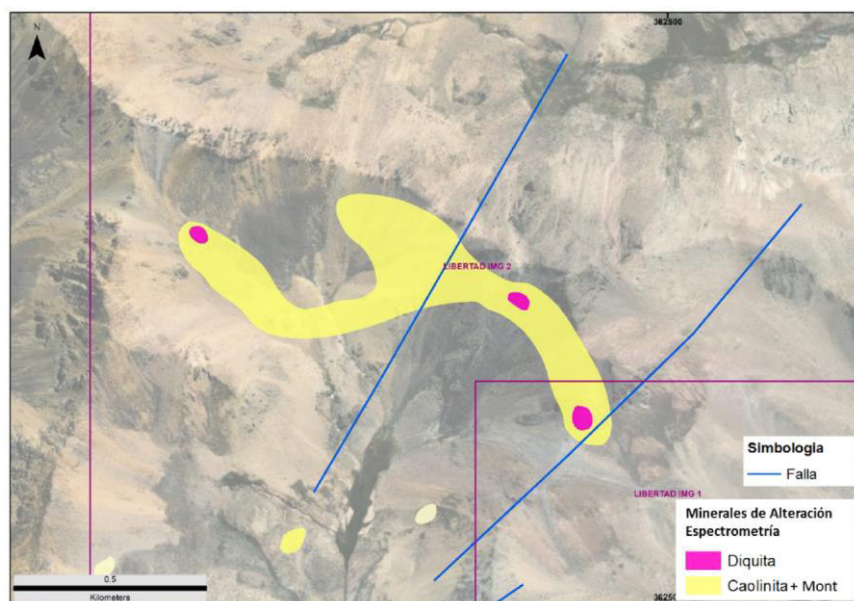


Figura 26. Zona 3 - Minerales de alteración

4.3.3.1. Índice Composicional de las Alunitas. En la zona 1, se identificó dos poblaciones de alunita: 1) población con longitud de onda 1475nm-1478nm que indican vectores de mineralización hacia la superficie y, 2) población con 1478nm-1483nm que indican vectores de mineralización semi expuestas o hacia profundidad.

También, en base a las alunitas potásicas se realizó el cociente Pb/Sr en donde los valores mayores a 0.4 indica zonas fértiles y valores menores a 0.4 indican bajo índice de fertilidad (ver Figura 27).

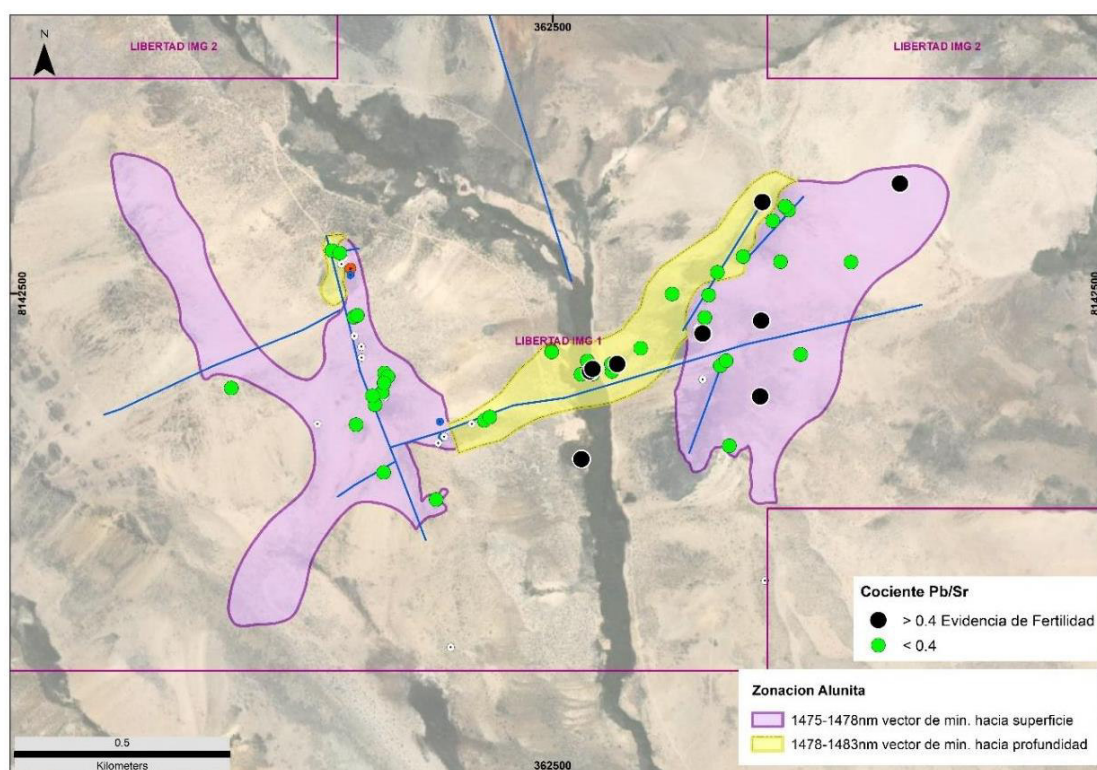


Figura 27. Índice composicional de alunita y Cociente Pb/Sr

El ensamble de alteración hidrotermal (alunita, sílice, diquita, +/-nacrita, caolinita) identificado en la zona 1 indica un sistema epitermal de alta sulfuración. En esta zona 1, el sector este (Target 1) indica una zona de mayor fertilidad con una extensión aproximada de 900 m x 450 m; mientras que el sector oeste de la zona 1 de 730 m x 200 m, indica menor fertilidad (Target 2). Ver Figura 28.

De acuerdo con los minerales de alteración identificados en el estudio de espectrometría de onda corta del infrarrojo, la zona 2 y la zona 3 no presentan interés prospectivo.

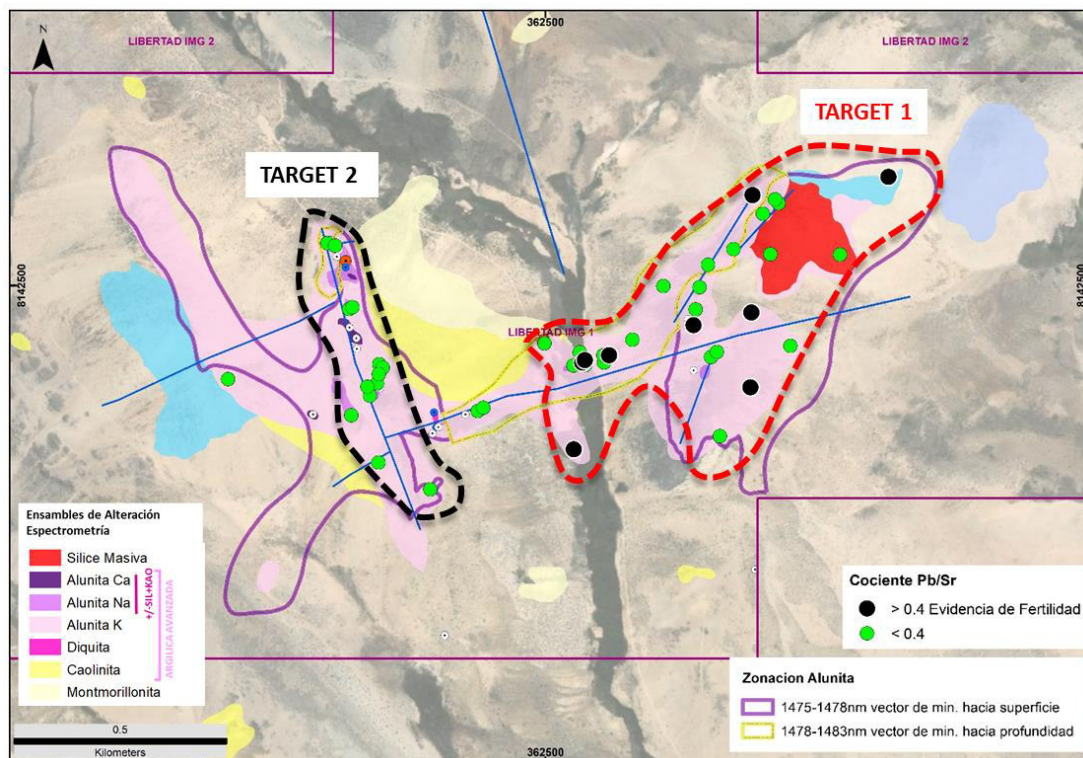


Figura 28. Zona 1 - Targets de interés (SWIR).

4.3.4. Geoquímica.

En toda la propiedad minera se han colectado 212 muestras de roca, por los métodos de canal, chips y de forma selectiva. Se ha identificado 17 muestras con anomalías de Au prospectivas, con un máximo de 605 ppb Au, estas muestras fueron colectadas en un área de 200 m x 80 m y otra de 15m² en las andesitas silicificadas en el fondo del valle en la concesión Libertad IMG 1, lo cual indica que hay presencia anómala de oro en el sistema epitermal. La Ag presenta débiles y puntuales anomalías (máximo valor 27.3 ppm Ag). Los demás elementos metálicos como Cu, Mo, Pb y Zn no presentan anomalías.

Respecto a los elementos volátiles el As y Hg resaltan con anomalías moderadas a altas y el Sb en menor medida. El Bi no tiene representatividad con valores cercanos a los límites de detección inferior.

Todos los valores anómalos de Au y elementos pathfinders están centralizados en el entorno de las brechas y tobas con alteración argílica avanzada de la concesión Libertad IMG 1. Del cuadro de correlación rescatamos que hay afinidad de Au con Ag, As, Bi y Sb, así como también la Ag con Hg, As, Bi y Sb; Hg con Ag, As, Bi y Sb; As con Sb, típicos de un sistema epitermal de alta sulfuración (ver Cuadros 3 y 4, y Figuras 29 a la 34).

Cuadro 3. Estadística geoquímica de rocas

Element	# Samples	Max	Min	Average all samples	Significant cut off selected	#samples above cut off	% samples above cut off	Average of samples above cut off
Au_ppb	212	605	5	21	10	17	8	208
Ag_ppm	212	27.3	0.2	0	0.5	15	7	3
Cu_ppm	212	144	1	19	50	17	8	82
Mo_ppm	212	57	1	3	10	5	2	24
Pb_ppm	212	104	2	13	50	5	2	70
Zn_ppm	212	110	2	21	50	23	11	68
Hg_ppm	212	47	1	3	2	39	18	9
As_ppm	212	4060	2	82	25	98	46	170
Bi_ppm	212	12	2	2	5	2	1	12
Sb_ppm	212	207	2	5	3	42	20	18

Cuadro 4. Coeficiente de correlación de Pearson

	Au_ppb	Ag_ppm	Cu_ppm	Mo_ppm	Pb_ppm	Zn_ppm	Hg_ppm	As_ppm	Bi_ppm	Sb_ppm
Au_ppb	1.00									
Ag_ppm	0.65	1.00								
Cu_ppm	0.19	0.26	1.00							
Mo_ppm	0.06	0.04	-0.02	1.00						
Pb_ppm	0.36	0.17	0.17	0.20	1.00					
Zn_ppm	-0.16	-0.08	0.15	-0.19	-0.13	1.00				
Hg_ppm	0.44	0.54	0.19	0.18	0.40	-0.16	1.00			
As_ppm	0.55	0.94	0.28	0.06	0.16	-0.16	0.52	1.00		
Bi_ppm	0.59	0.74	0.22	0.09	0.27	-0.08	0.74	0.67	1.00	
Sb_ppm	0.53	0.84	0.35	0.06	0.16	-0.12	0.56	0.85	0.57	1.00

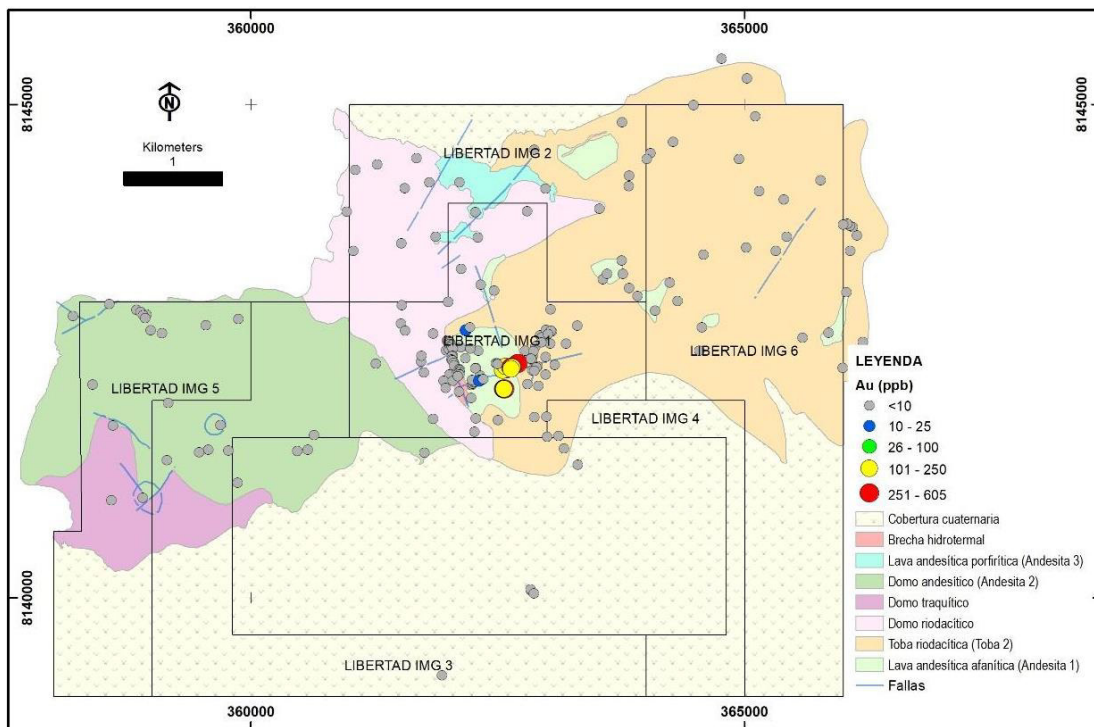


Figura 29. Geoquímica Au.

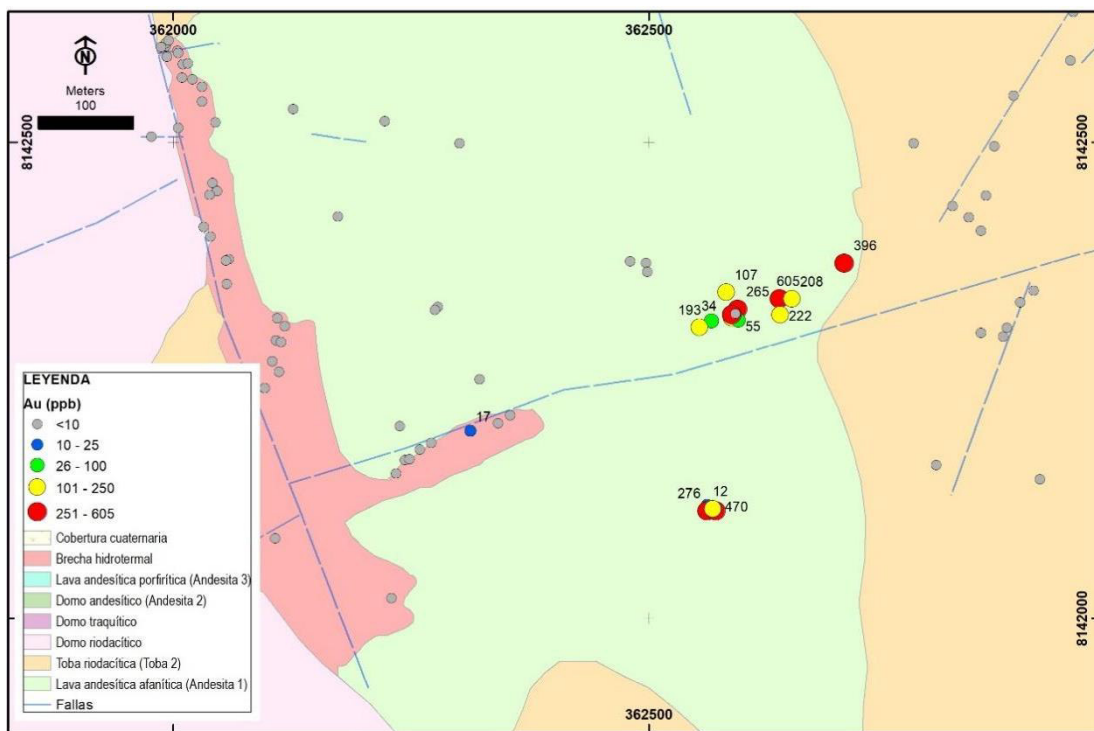


Figura 30. Acercamiento de la zona anómala en Au

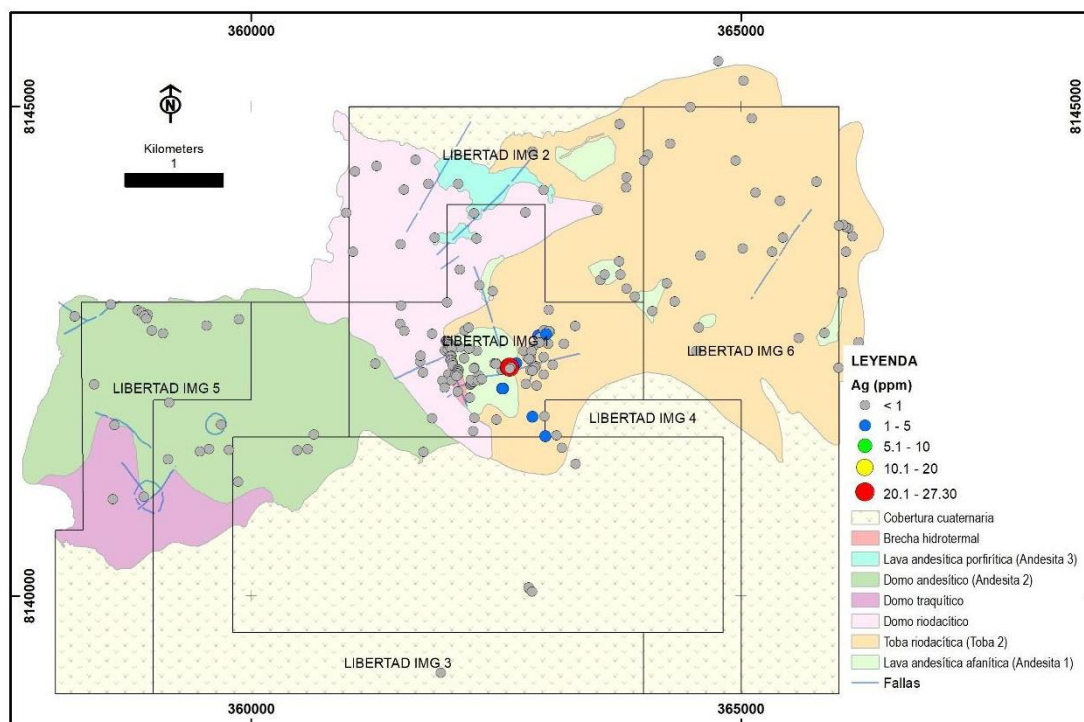


Figura 31. Geoquímica Ag

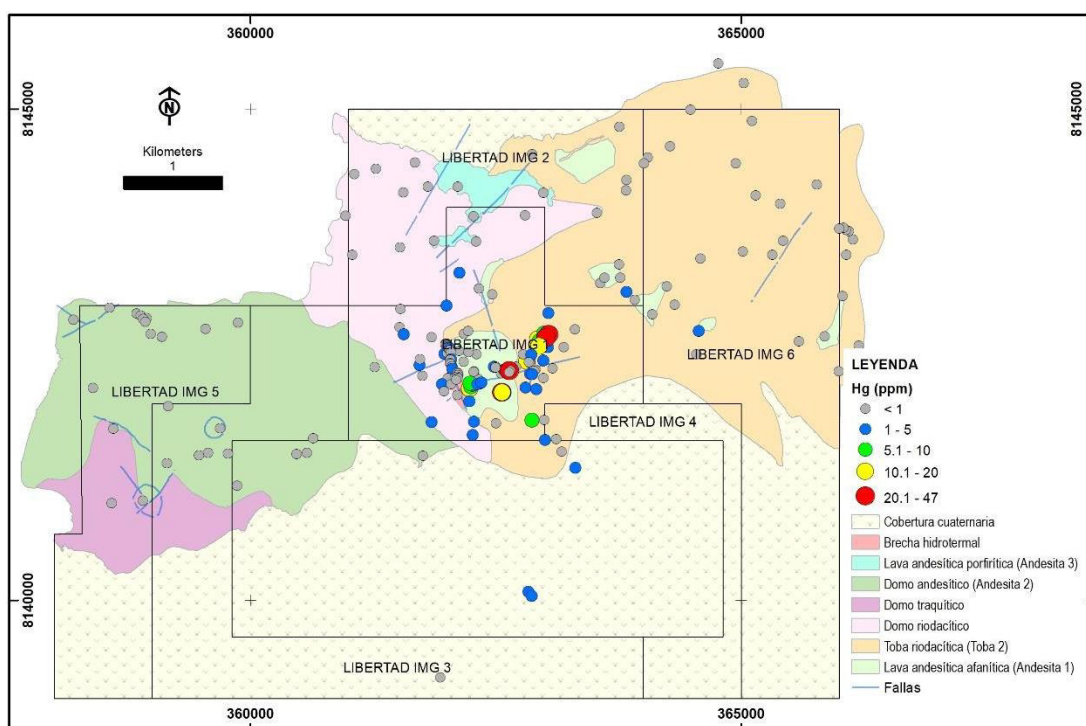


Figura 32. Geoquímica Hg

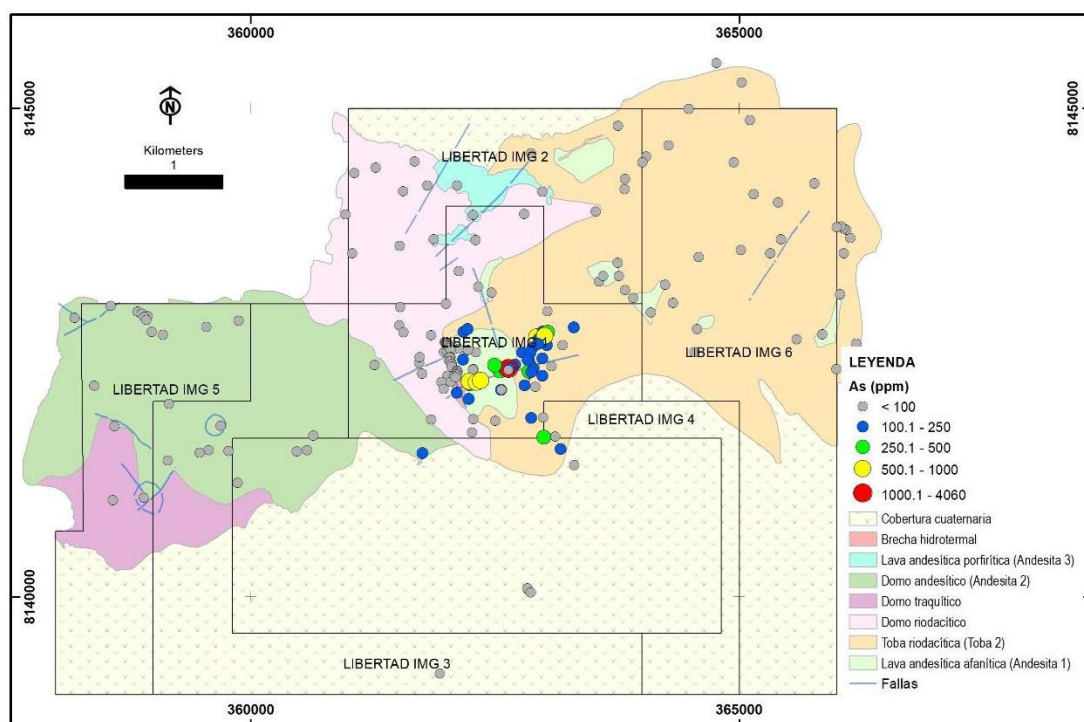


Figura 33. Geoquímica As.

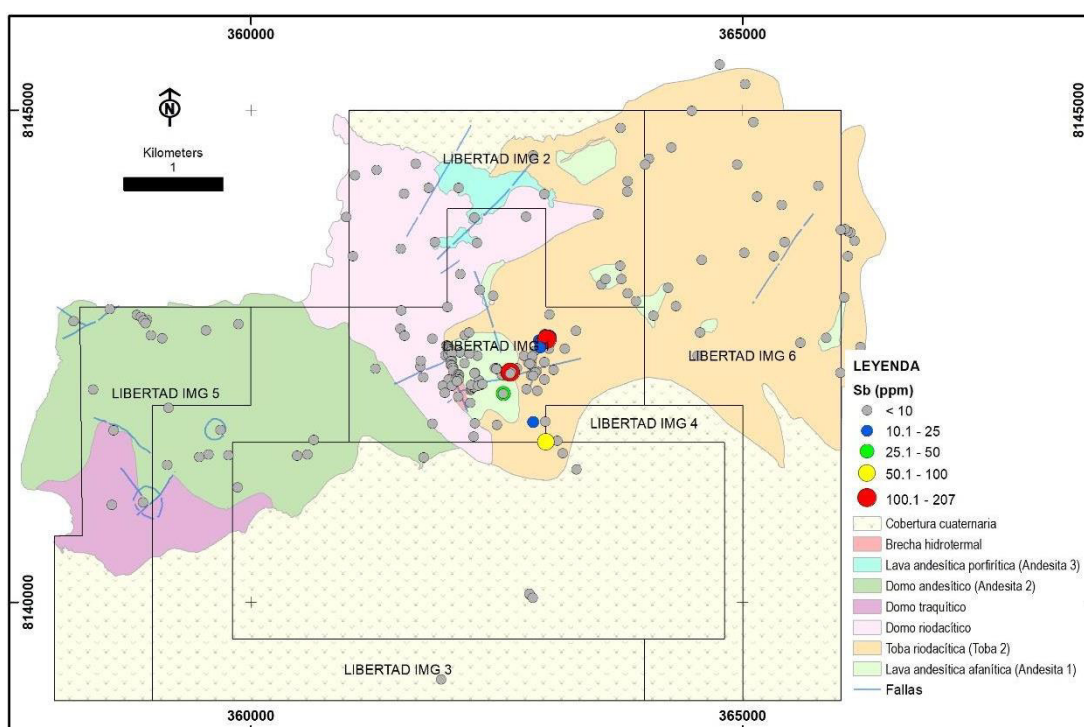


Figura 34. Geoquímica Sb.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados

Según Hedenquist et al. (2000), el momento y la aplicabilidad de los métodos geofísicos varían de una prospección a otra y dependen de diversas variables, como el entorno regional y el tipo de yacimiento. Lo crucial es tener en cuenta que la geofísica ofrece una gama de instrumentos, cada uno de los cuales puede añadir información al modelo de exploración que se está construyendo en su conjunto.

5.1.1. Aplicación del Método de Polarización Inducida en el Proyecto Libertad.

Como el proyecto Libertad está asociado a un depósito epitermal de alta sulfuración los métodos eléctricos como el método convencional de polarización inducida (IP-Res) fue la mejor opción en una primera fase. El objetivo del estudio fue explorar en profundidad la continuidad lateral y vertical de los locales afloramientos con alteración asociada a un sistema epitermal de alta sulfuración y con moderadas a débiles anomalías auríferas.

Es así como, se ejecutó un estudio de polarización inducida- resistividad en la zona más prospectiva del proyecto como se observa en la Figura 35. El estudio consistió en tres líneas de 5 km cada una, de dirección este – oeste, del tipo polo-dipolo y un espaciamiento entre dipolos de 100 m. Las tres líneas de este estudio fueron L1700, L2100 y L2500 (Quantec Geoscience, 2020)

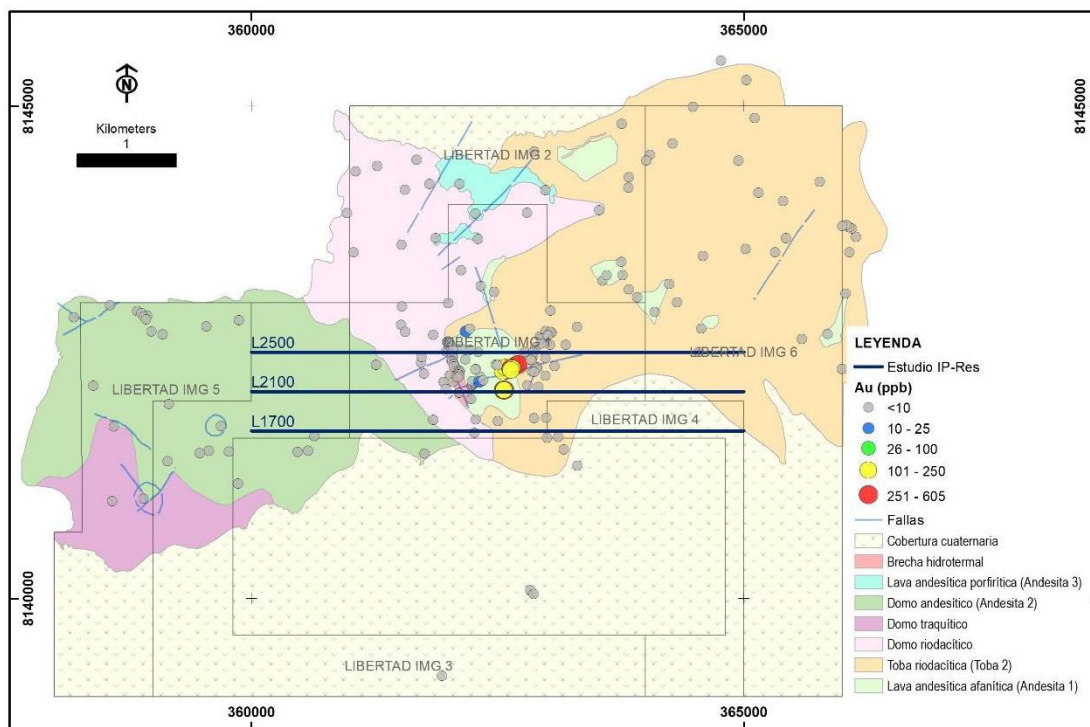


Figura 35. Estudio IP-Res con geología y geoquímica

Los resultados del estudio IP-Res muestran que la línea L1700 presenta en el sector este un horizonte de 2.0 km de longitud y un espesor que no supera los 300m con moderadas a fuertes anomalías resistivas $< 2,000$ ohm.m. Mientras que en el sector oeste existen muy fuertes anomalías resistivas $< 20,000$ ohm.m quedando abiertas en esa dirección. Con respecto a la cargabilidad existe una local y moderada anomalía < 15 mV/v en el sector oeste que coincide con una fuerte anomalía de resistividad (ver Figura 36).

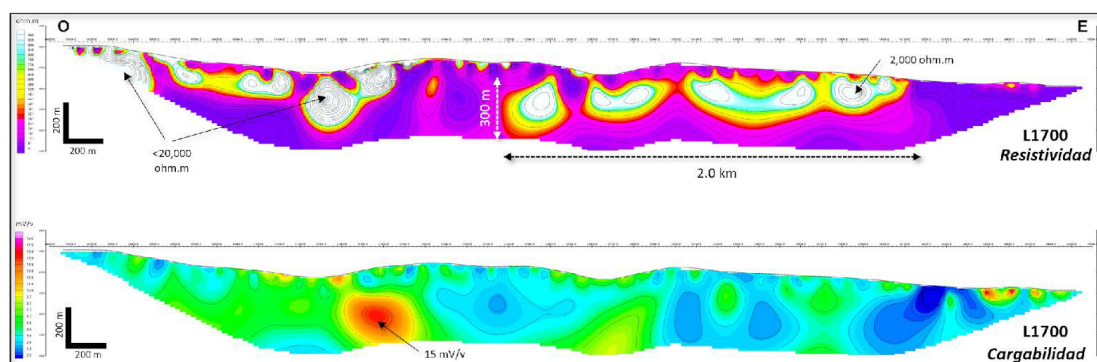


Figura 36. Estudio IP-Res - Línea L1700

Con respecto a la línea L2100. En el centro de la línea existe una local y moderada anomalía <750 ohm.m (la más prospectiva de esta línea), y hacia el sector oeste se presentan locales moderadas a fuertes anomalías resistivas que llegan a 1,000 ohm.m. En el sector central y oeste y a 200 m por debajo de la superficie se identificaron anomalías de cargabilidad <20 mV/v que indica que la posible mineralización económica en esta parte del proyecto podría estar contenida en sulfuros (ver Figura 375).

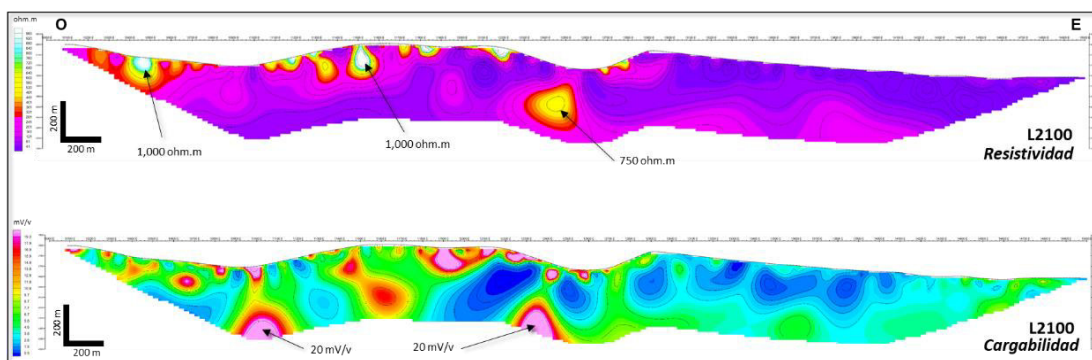


Figura 37. Estudio IP-Res - Línea L2100

En el sector central y oeste de la línea L2500 existen muy fuertes anomalías resistivas que llegan a 5,000 ohm.m, estas anomalías están expuestas en la superficie y no profundizan mucho, sin embargo son altamente prospectivas. En el sector oeste existe una local anomalía de cargabilidad menor a 20 mV/v que coincide con una fuerte anomalía resistiva (ver Figura 38).

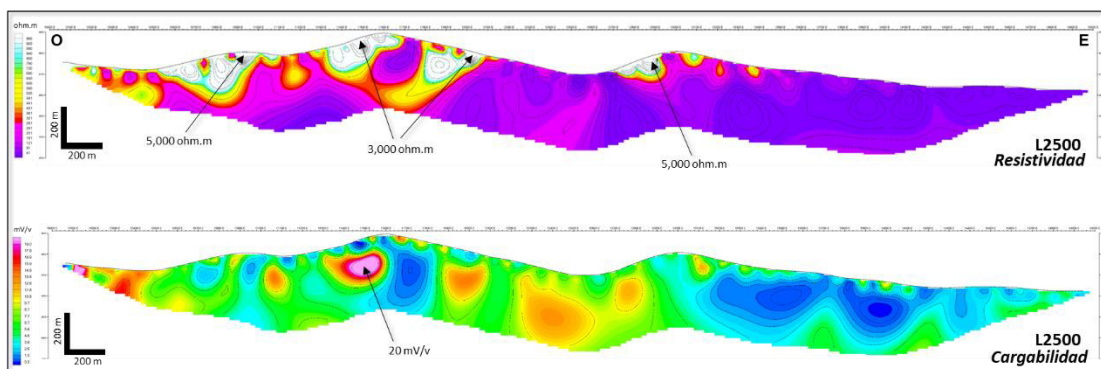


Figura 38. Estudio IP-Res - Línea L2500

Los depósitos epitermales de alta sulfuración se caracterizan por tener un control litológico donde se hospeda el mayor volumen de la mineralización económica del depósito. Pero también tienen un control estructural por donde ascienden los fluidos hidrotermales que provienen del sistema pórfido (Sillitoe, 2001). Ver Figura 39. Estas estructuras, alimentadores o comúnmente conocidos como feeders son muy importantes porque las mejores leyes auríferas vectorizan hacia ese sector, como por ejemplo en el yacimiento Quimsacocha en Ecuador (Viera, 2006). Ver Figura 40.

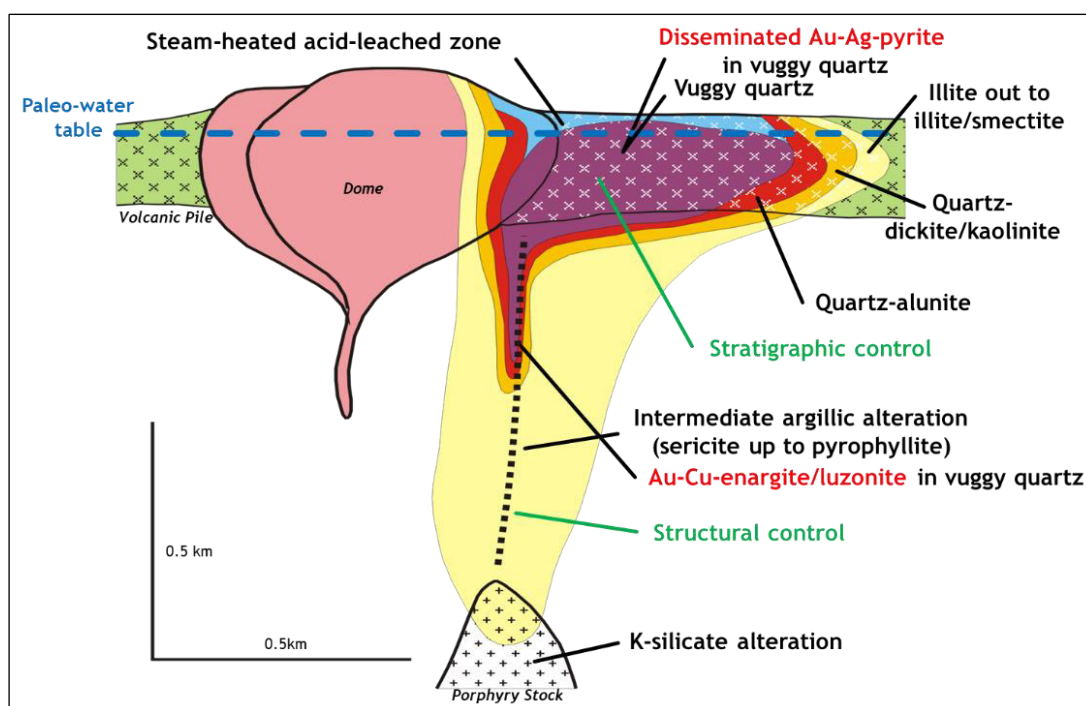


Figura 39. Esquema de un domo relacionado a un sistema epitermal de alta sulfuración y su separación espacial a un sistema pórfido

Fuente. Sillitoe, R. (2001)

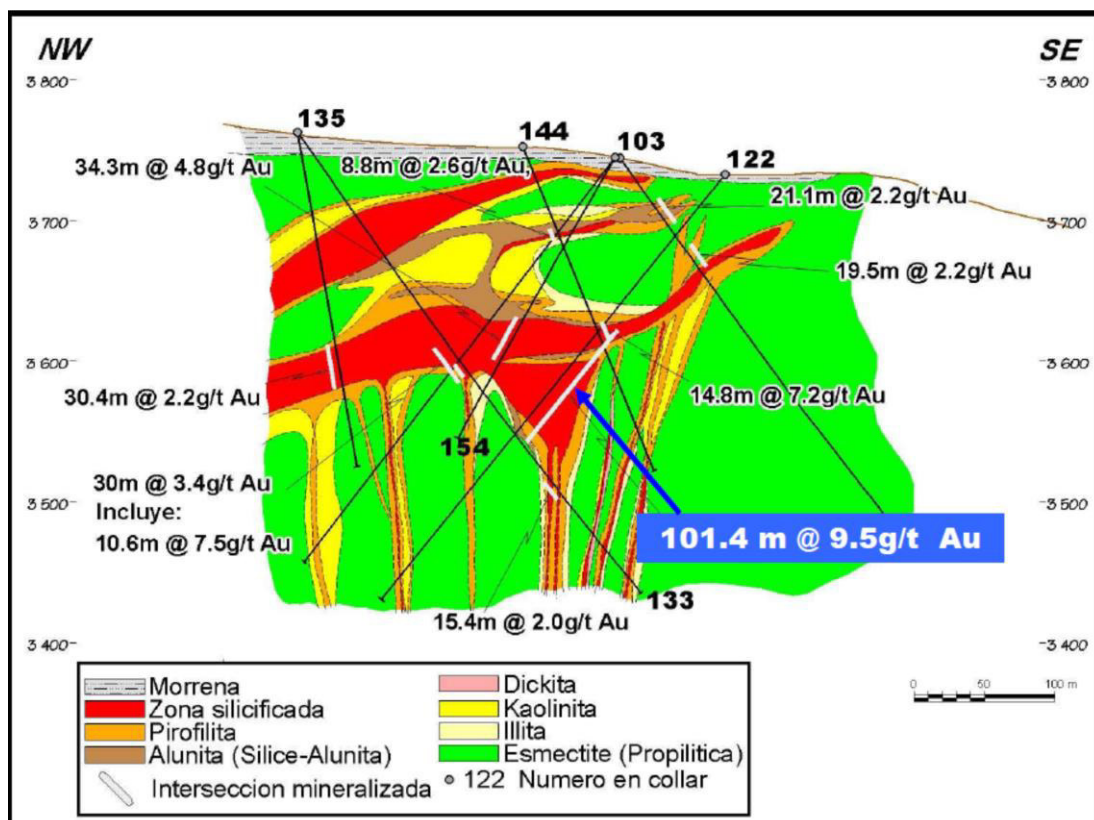


Figura 40. Sección típica de mineralización en el depósito Quimsacocha.

Fuente. Viera, F. (2006).

Por lo tanto, la identificación de estas estructuras (feeders) en la etapa temprana de exploración es importante para construir con mayor precisión el modelo geológico que nos permitirá identificar más eficientemente el verdadero potencial prospectivo del proyecto. En la figura 41, vemos que las anomalías resistivas identificadas con el método IP-Res no muestran claramente dónde podrían estar ubicados estos feeders y si hay otros horizontes resistivos y mineralizados que podrían estar hospedados en rocas más permeables como tobas.

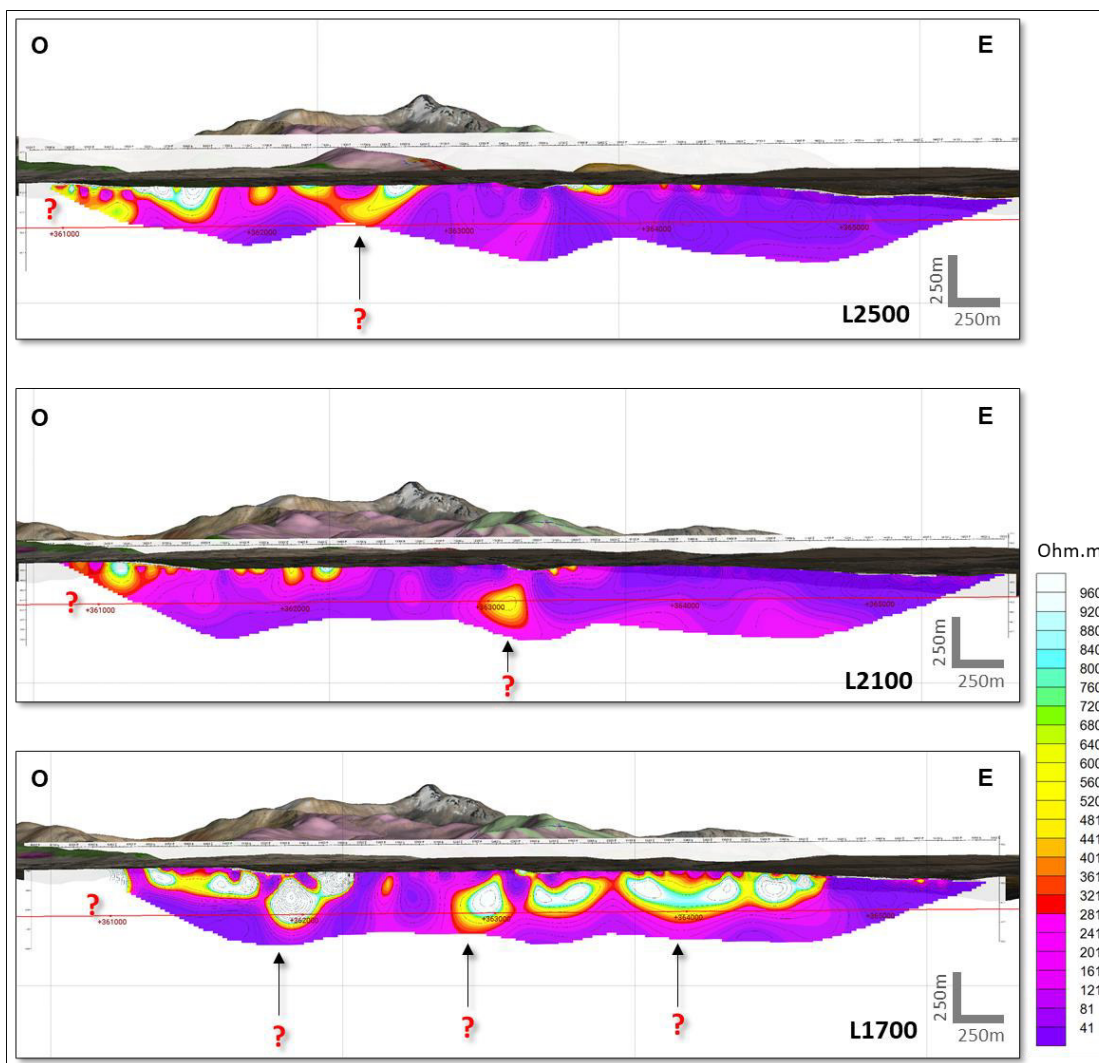


Figura 41. Estudio IP-Res – Anomalías de resistividad - Líneas L1700, L2100 y L2500

Discusión. Con respecto al método de polarización inducida-resistividad, Ponce (2017) en su investigación en el yacimiento Jesica en Puno, y Contreras (2017) en su investigación en el yacimiento Shahuindo en Cajamarca, tuvieron en sus resultados la misma carencia que mi investigación, en el sentido que las anomalías resistivas quedaron abiertas en profundidad y no se reconoció los feeders o alimentadores del sistema epitermal de alta sulfuración que nos permita modelar mejor el depósito mineral. Por otro lado, la investigación de Ponce (2017) identificó anomalías de cargabilidad que estuvieron asociadas a mineralización en sulfuros; del mismo modo en el proyecto Libertad también identifique anomalías de

cargabilidad hasta 20 mV/v, y es muy probable que parte de la mineralización en profundidad este contenida en sulfuros.

Es así como se determinó que era necesario la aplicación de un método geofísico que nos proporcione información resistiva más profunda (>300 m), confiable y con mayor resolución que el método IP-Res.

Por lo tanto, se analizó los métodos geofísicos cuyo producto son las anomalías de resistividad eléctrica con un alcance profundo y se determinó que el método más apropiado es el magnetotelúrico, y en específico para esta investigación su variante denominada audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT).

Uno de los principales antecedentes cercanos al proyecto Libertad y que aportó significativamente en la presente investigación, fue el estudio CSAMT realizado en el proyecto Querco ubicado en la región Huancavelica, con un similar marco geológico al proyecto Libertad y hospedado también en un sistema epitermal de alta sulfuración con un control estructural. Los resultados de la aplicación del estudio CSAMT en el proyecto Querco fueron eficientes y permitieron con un programa de perforación interceptar mineralización aurífera altamente prospectiva (Rengifo y Ojeda, 2018).

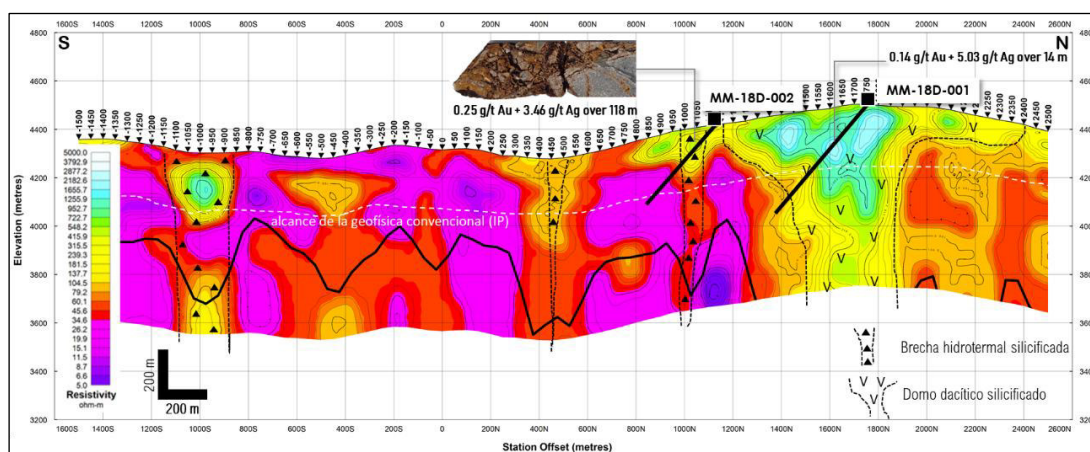


Figura 42. Proyecto Querco - Sección de resistividad (CSAMT) – Línea L20800.

Fuente: Rengifo, M. y Ojeda, F. (2018).

Nótese en la sección de resistividad (CSAMT) de la línea L20800 del proyecto Querco, el alcance en profundidad del estudio CSAMT es de aproximadamente 700 m. Este estudio permitió interpretar la continuidad vertical y las fuentes de la

mineralización y alteración del sistema epidermal de alta sulfuración asociado a estructuras semi verticales. Por otro lado, la resolución de la inversión es de buena calidad y se nota claramente los contrastantes de resistividad (ver Figura 42).

5.1.2. Aplicación del método CSAMT en el Proyecto Libertad

En el proyecto Libertad se ejecutó un estudio geofísico con el método Audio Magnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAMT) de 84.3 kilómetros, distribuidos en 15 líneas de dirección este – oeste (ver Figura 47), con las siguientes características:

Instrumentación:

- Receptor: Zonge GDP-32-II
- Transmisor: Zonge GGT-30
- Controlador de frecuencia: Zonge XMT-16
- Regulador de voltaje: Zonge VR1b
- Generador: Deutz 40 kVA
- Sensor magnético (bobina): Phoenix MTC-30
- Electrodo receptores: Varillas de acero inoxidable

Parámetros del Estudio

Configuración

- Técnica: Modo magnético transversal (TM), es decir, campos telúricos (E) medidos paralelos a la línea de levantamiento y campos magnéticos (H) ortogonales a la línea de levantamiento. Ver Figura 43.
- Configuración de la matriz: 6-1 (relación E-a-H por configuración) con bobina magnética ubicada en el centro de la matriz.
- Longitud del campo E (dipolo): 50 m.
- Frecuencias transmitidas: 1 Hz – 8192 Hz, pasos binarios de 2^n ($n = 0, 1, 2, \dots$).
- Frecuencias fundamentales: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192 Hz.
- Frecuencias armónicas: Se recogieron cinco armónicos impares para frecuencias fundamentales entre 1 Hz y 1024 Hz.
- Longitud bipolar nominal: 1,5 km, véase el Cuadro 5 para detalles del bipolo.

- Corrientes CSAMT: El Cuadro 6 muestra las corrientes típicas en los bipolos para las frecuencias fundamentales del estudio CSAMT.

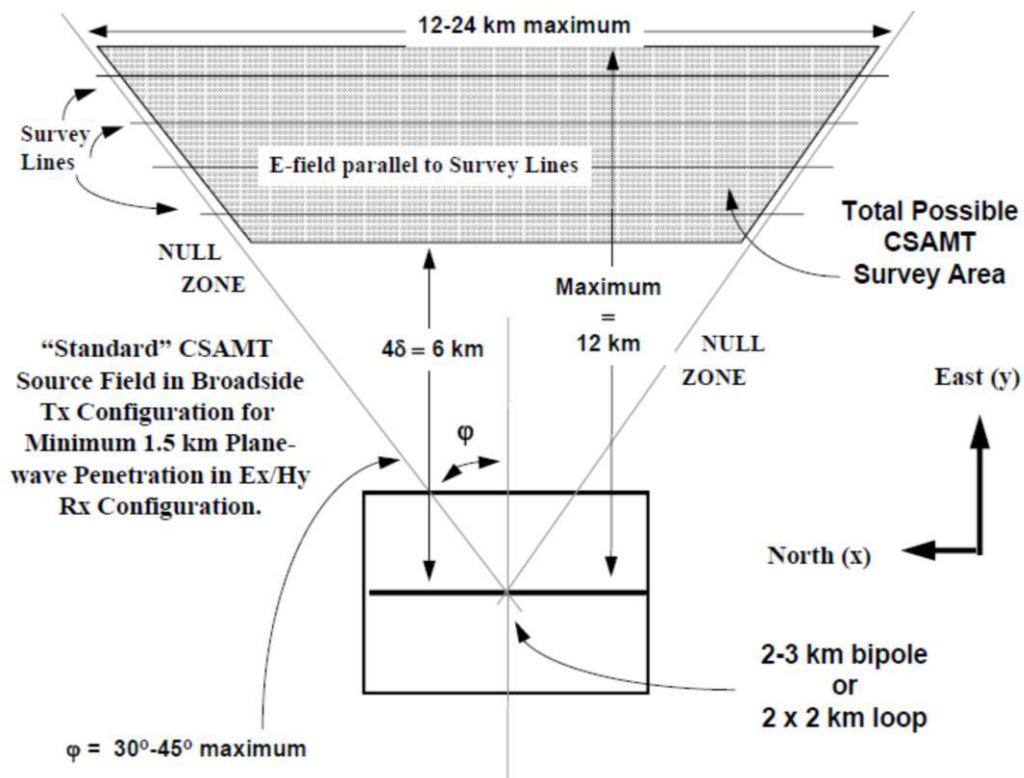


Figura 43. Configuración del estudio CSAMT

Fuente. Quantec Geoscience (2021).

Cuadro 5. Ubicación del Bipolo

Fuente. Quantec Geoscience (2021).

Bipole	(WGS84, Zone 19S)				Length (km)
	Start Easting	Start Northing	End Easting	End Northing	
BP01	361380	8136100	362554	8136100	1.2

Cuadro 6. Corrientes Típicas del Bipolo

Fuente. Quantec Geoscience (2021).

Frecuency (Hz)	1-256Hz	512	1024	2048	4096	8192
Typical Current (A)	29	27	23	16.5	10	5

Adquisición de Datos

Las mediciones de la resistividad aparente del CSAMT y la diferencia de fase se realizaron a intervalos de estación de 50 m en un rango de frecuencia de 1 a 9216 Hz. Sólo se midió el modo magnético transversal (TM). La matriz estándar de 300 m para 6 dipolos se utilizó para la adquisición, con el receptor y la bobina magnética ubicados en el centro de la matriz.

Se muestrearon 58 frecuencias (1 Hz - 9216 Hz, en pasos binarios con armónicos impares) por dipolo. Las lecturas fueron aceptadas o rechazadas de acuerdo con su repetibilidad y error estándar de medición (SEM). Se recogieron múltiples lecturas en cada frecuencia, particularmente las frecuencias altas más sensibles al ruido (4096 Hz - 9216 Hz).

Procesamiento de Datos

Para cada línea, los datos de campo sin procesar del CSAMT se clasificaron primero por estación y frecuencia utilizando el software propiedad de Quantec. Los datos falsos se descartan, y los datos restantes se promedian para producir resistividad aparente y valores de fase para cada frecuencia en cada estación.

Los datos se editan en cada estación para producir curvas suaves finales adecuadas para la inversión. Los datos finales se importan a AOA-Geotools para su inversión.

Resultados de Inversión

Generalidades. El método CSAMT es una técnica de teledetección y, como todas las técnicas eléctricas y electromagnéticas (sondeos IP/resistividad, TEM, VES), los factores más importantes que controlan la resistividad de las rocas son la porosidad y la salinidad de los fluidos porosos, no su composición mineral (excepto los sulfuros metálicos en volúmenes suficientemente grandes).

Los estudios CSAMT son generalmente excelentes herramientas de alta resolución para diferenciar zonas de estructura y geoquímica anómala. Sin embargo, características geológicas/geomorfológicas similares producen

firmas geofísicas similares que pueden conducir a desafíos en la interpretación.

Procedimientos. Las inversiones 1D de Occam se utilizaron primero para invertir los datos para producir una curva de resistividad/profundidad 1-D de capa suave para cada estación. Para evitar los efectos del campo cercano se debieron eliminar algunas frecuencias. Solo la resistividad aparente TM y los componentes de fase (es decir, E paralelo a la línea de levantamiento y H ortogonal a la línea de levantamiento) se consideraron en los siguientes pasos de procesamiento.

Para este estudio, el "notch" o zona de transición entre el campo lejano y el campo cercano ocurre entre 8 y 16 Hz. Todas las frecuencias por debajo del "notch" se consideraron en la zona de transición o campo cercano. La Figura 44 muestra los cambios de resistividad para diferentes frecuencias en una estación de muestreo y la zona de transición entre el campo lejano y cercano.

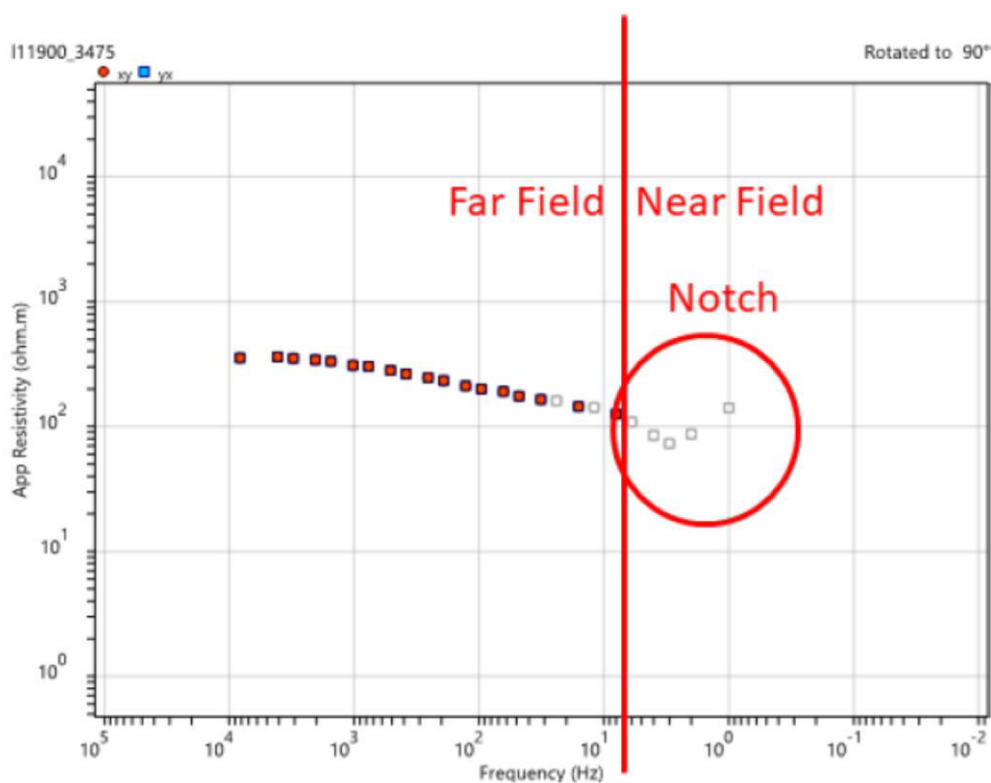


Figura 44. Zona de transición entre el campo lejano y cercano

Fuente. Quantec Geoscience (2021).

Una vez que se eliminaron los datos en el campo cercano a frecuencias por debajo del "notch", se realizó una inversión 1D de Occam que da como resultado un modelo 1D suave en cada estación (ver Figura 45). Los modelos 1D se interpolaron y suavizaron entre los sitios a lo largo de la línea para obtener una sección de modelo enlazada para cada línea (ver Figura 46). Ese "modelo suave" 1D enlazado preliminarmente es una primera aproximación del ajuste de datos y se utilizó como modelo de entrada a la inversión 2D.

La inversión 2D se realizó utilizando el código PWm2D propietario de Quantec. El modelo final para cada línea se exportó a Geosoft y se trazó como una sección de resistividad 2D. Cada sección se presentó con contornos espaciados logarítmicos, y se utilizó la misma distribución de color para todas las secciones.

Los resultados de la inversión de CSAMT se presentan de la siguiente manera:

- Secciones de resistividad / elevación de los modelos 1D y 2D enlazados.
- Segmentos de elevación de la vista en planta de resistividad de los datos invertidos 2D a intervalos seleccionados.

Todas las secciones y mapas de planta se presentaron con la misma distribución de colores para facilitar la interpretación.

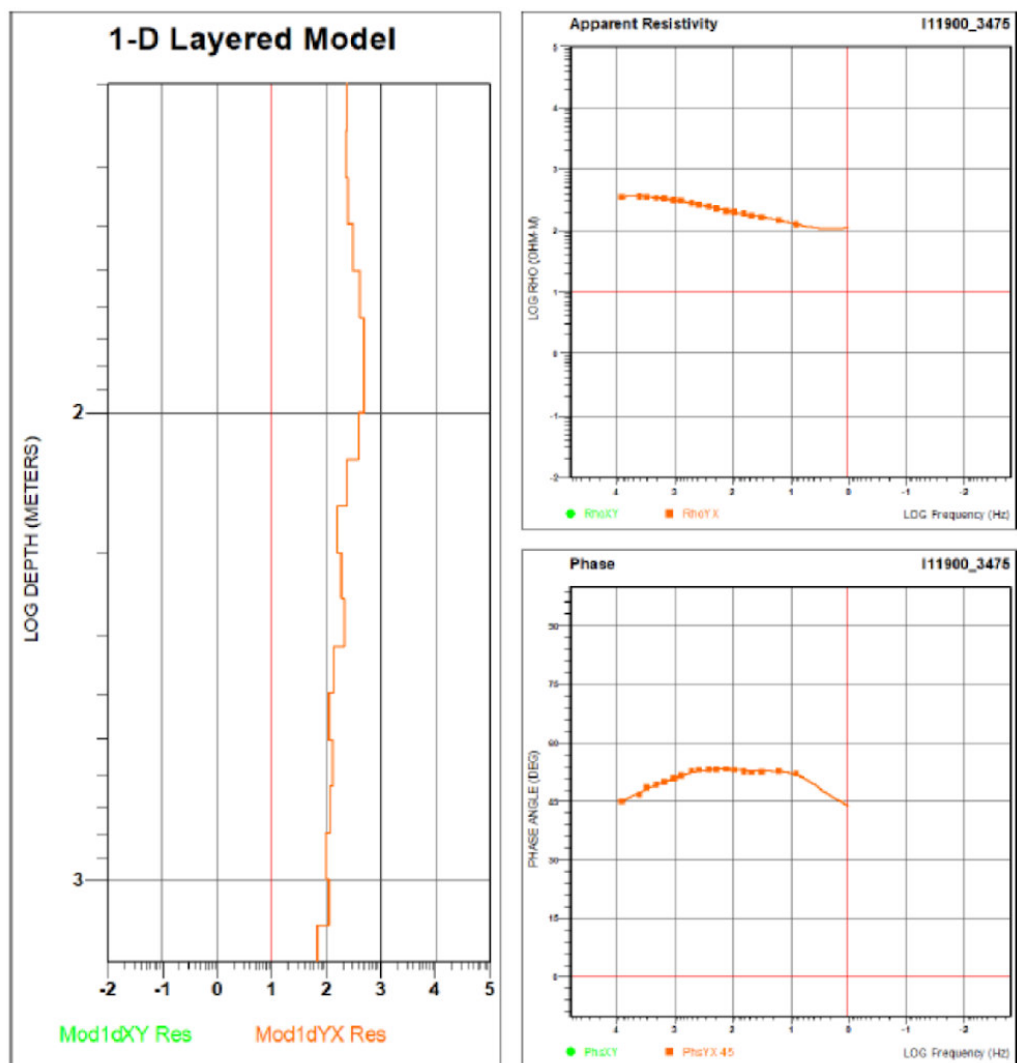


Figura 45. Modelo de capas 1D suave de Occam

Fuente. Quantec Geoscience (2021).

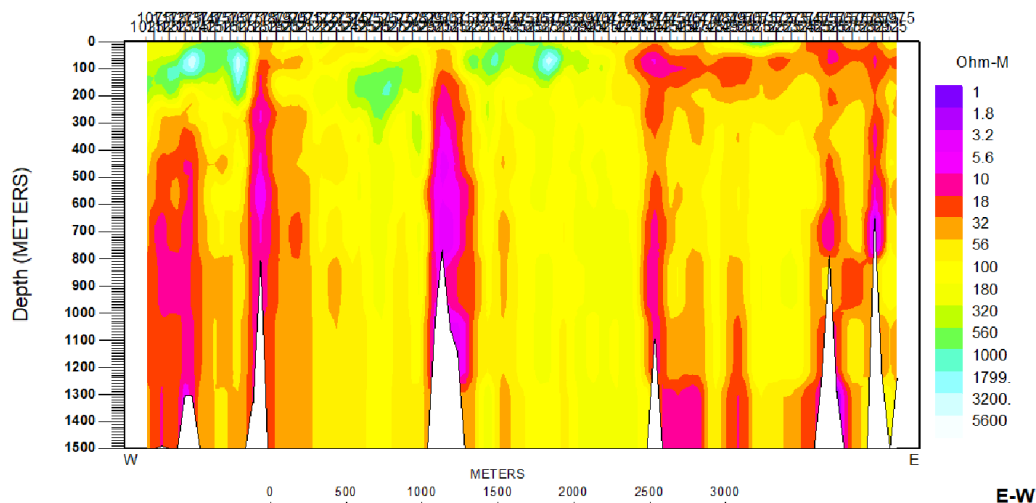


Figura 46. Sección de modelo 1D enlazado

Fuente. Quantec Geoscience (2021).

Resultados de Inversión. Todos los perfiles CSAMT se adquirieron con espaciamentos dipolo de 50 m y orientados a 90° verdaderos. Debido a las limitaciones de software, las inversiones para la mayoría de las líneas en este proyecto se completaron en dos partes superpuestas, y los modelos resultantes se fusionaron para proporcionar un modelo contiguo para cada línea.

Secciones y Mapas

Las secciones y mapas en planta de los resultados de las inversiones 2D se presentan en las Figuras 49 a 58. Las cuadrículas de los modelos de inversión se trazaron en los mapas de sección a una profundidad de 750 m; esto representa una aproximación práctica de la profundidad efectiva de exploración de la técnica CSAMT.

La profundidad Bostick calculada en cada estación se presentó en los mapas de sección como una línea negra pesada. Esta profundidad refleja una aproximación de la profundidad de investigación más confiable en cada estación, basada en las resistividades y frecuencias aparentes medidas en cada sitio.

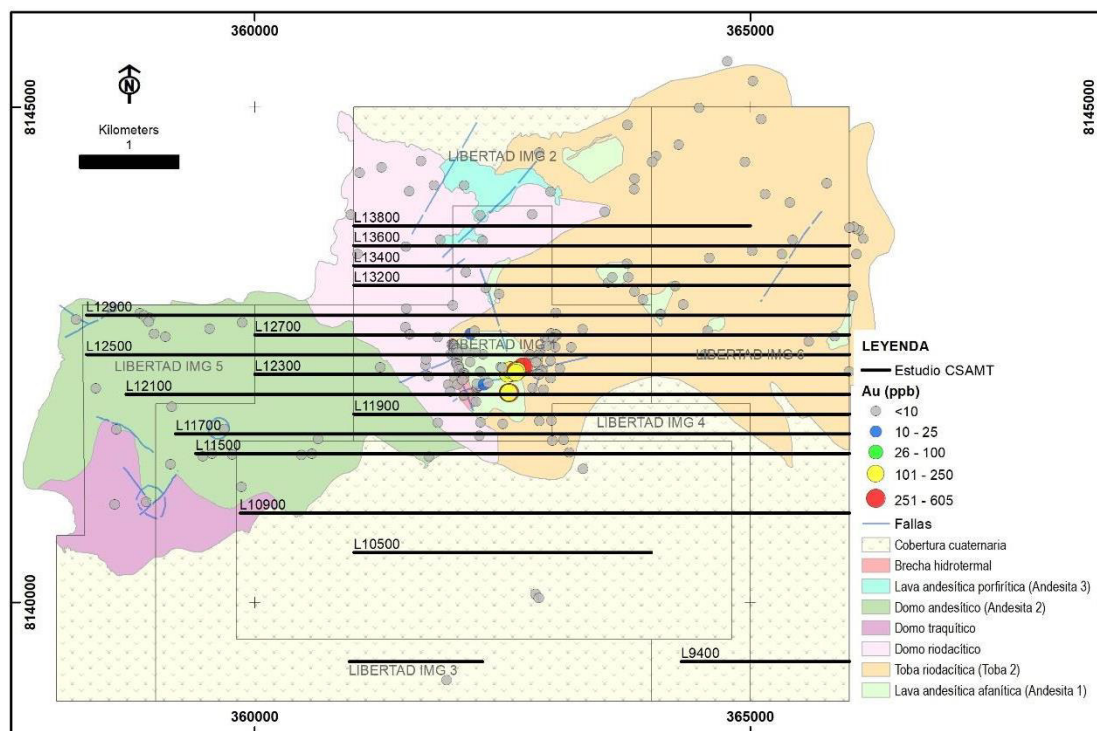


Figura 47. Ubicación de líneas del estudio CSAMT

En la Figura 47 se observa la ubicación y distribución de las líneas del estudio CSAMT. Las líneas tienen dirección este – oeste para cortar las estructuras de interés prospectivo y están separadas cada 200 metros en el área de mayor interés. La distribución de las líneas incluye principalmente a la zona con mayor alteración hidrotermal, así como, a las principales unidades litológicas del proyecto.

Las Figuras de la 49 a la 52 muestran los resultados de las inversiones en 2D, destacando anomalías de resistividad de interés prospectivo como es el caso de la Figura 51, donde la línea L11500 en las estaciones 0 y 600 muestran anomalías que alcanzan los 7,000 ohm.m y se extienden hasta profundidades de 600 metros aproximadamente.

Otra línea de interés es la L12500 en la Figura 50, donde se aprecia en que en la estación 4050 se interpreta un interesante cuerpo resistivo de hasta 1,000 ohm.m, buzando al oeste, esta anomalía resistiva queda abierta a una profundidad mayor a 700 metros.

Por lo tanto, y tomando como referencia la investigación de Goldie (2000) en el yacimiento aurífero Yanacocha, en el cual a través de diferentes métodos geofísicos incluido el CSAMT se determinó que el rango de resistividad de las rocas silicificadas (vuggy y granular) con contenido de mineralización aurífera está entre 1,000 ohm.m a ~10,000 ohm.m, confirmamos que en el proyecto Libertad existe anomalías resistivas con un alto potencial prospectivo que podrían constituir un depósito económico (ver Figura 48).

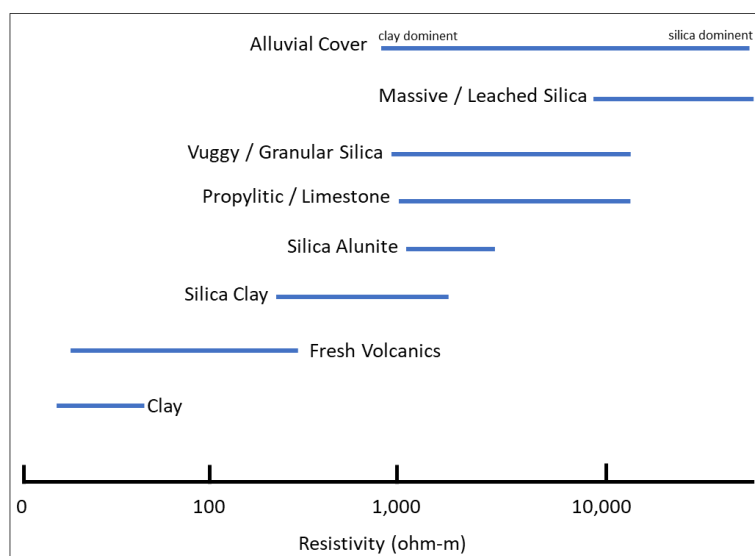


Figura 48. Rangos de resistividad de tipos de rocas en el yacimiento Yanacocha.

Fuente. Goldie, M. (2000).

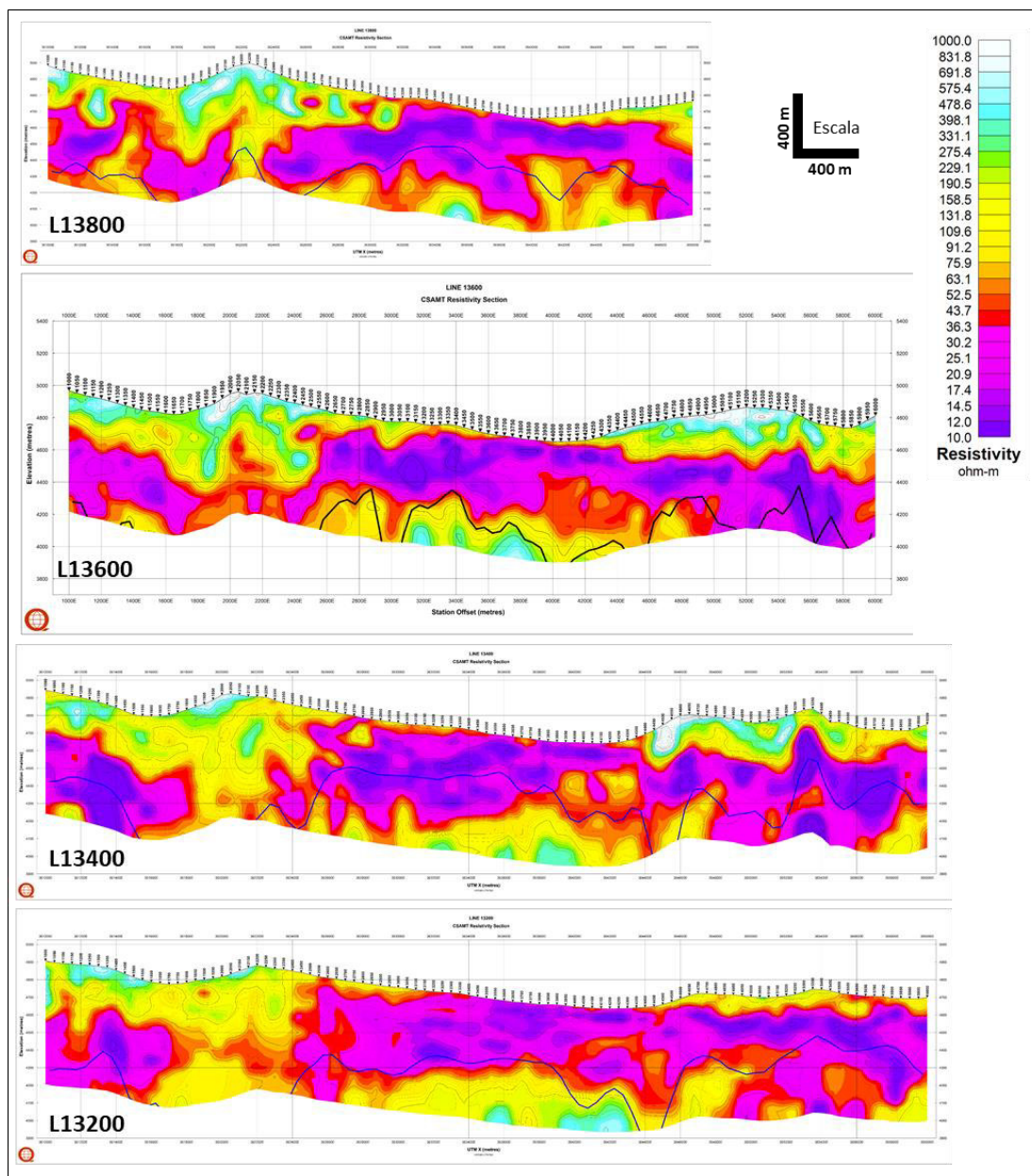


Figura 49. Secciones con inversión 2D de las líneas L13800, L13600, L13400 y L13200

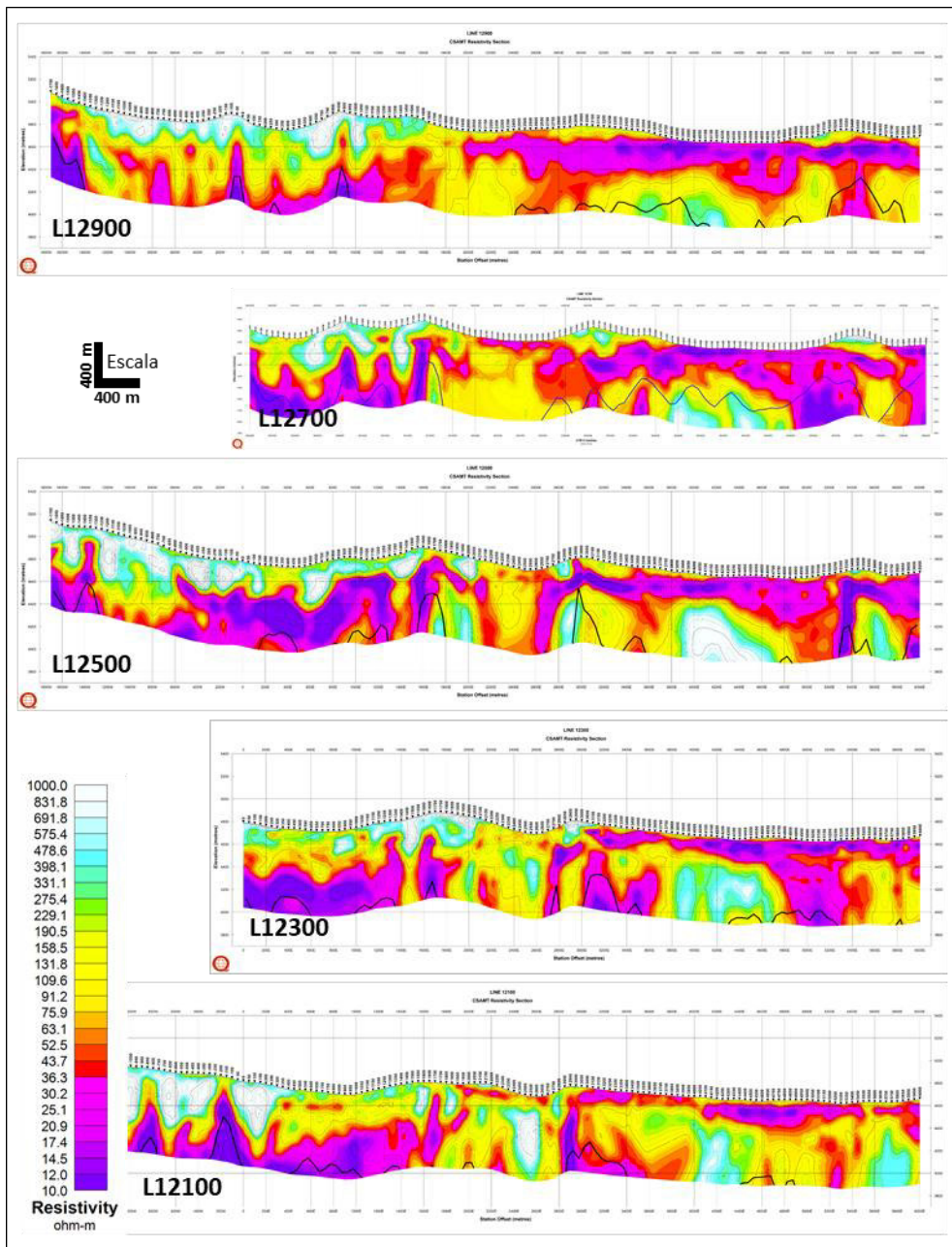
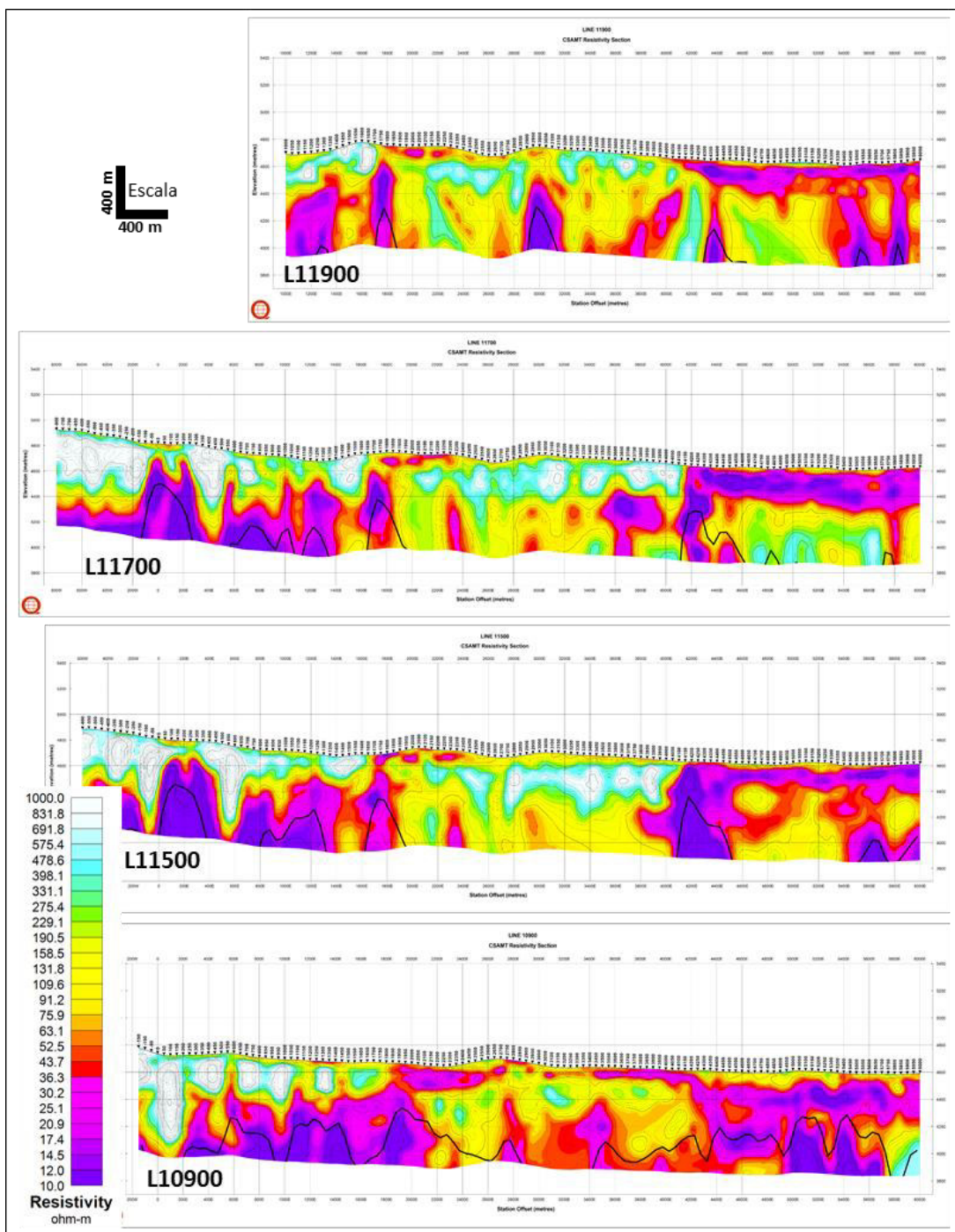


Figura 50. Secciones con inversión 2D de las líneas L12900, L12500, L12300 y L12100



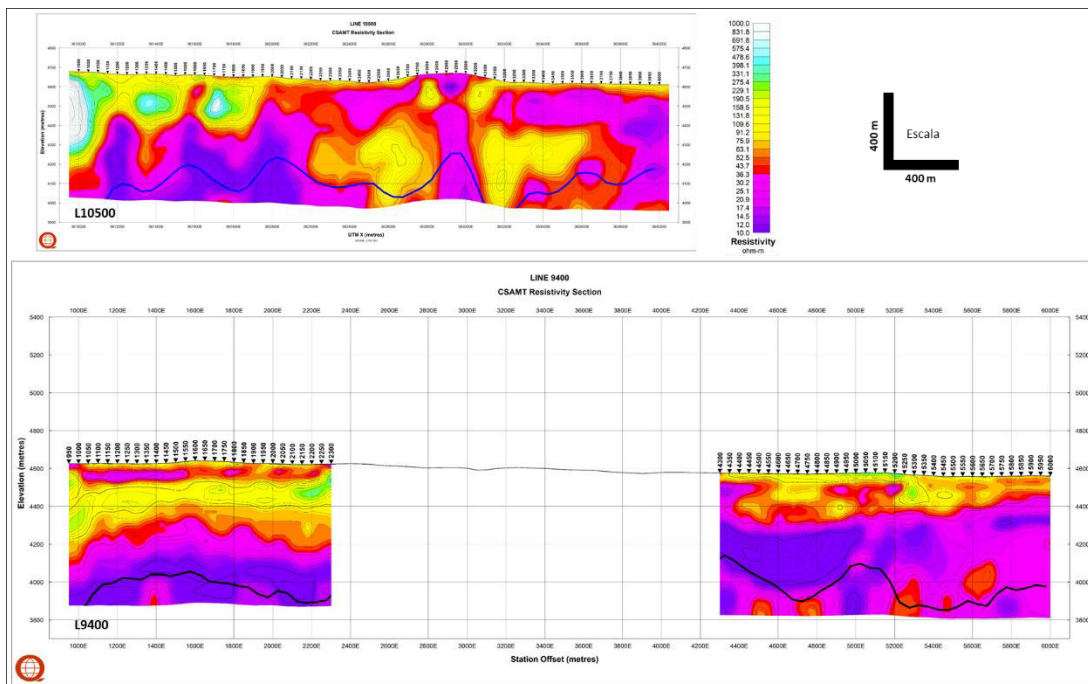


Figura 52. Secciones con inversión 2D de las líneas L10500 y L9400.

Las Figuras de la 53 a la 58 muestran los mapas de resistividad (CSAMT) a diferentes altitudes sobre el nivel del mar, donde se puede apreciar que las anomalías de resistividad (> 300 ohm.m) se distribuyen principalmente en la zona central y oeste del proyecto Libertad, con una dirección noroeste que coincide con las principales estructuras, donde se ubicaría el mayor potencial prospectivo del proyecto.

Se han identificado anomalías resistivas entre los 4,900 m s. n. m. y los 4,000 m s. n. m., demostrando la continuidad vertical de algunas anomalías resistivas y el gran alcance en profundidad del método geofísico CSAMT. La Figura 55 muestra las anomalías resistivas a 4,500 m s. n. m., donde se interpretó 3 áreas con anomalías de resistividad >300 ohm.m, que como se ve en la Figura 48 estarían asociadas a algún tipo de alteración hidrotermal, que vectorizan a zonas más silicificadas y a su vez prospectivas. En este mapa, también se interpretó el potencial prospectivo del proyecto asociado a las anomalías de resistividad en un área de 5.0 km x 2.0 km.

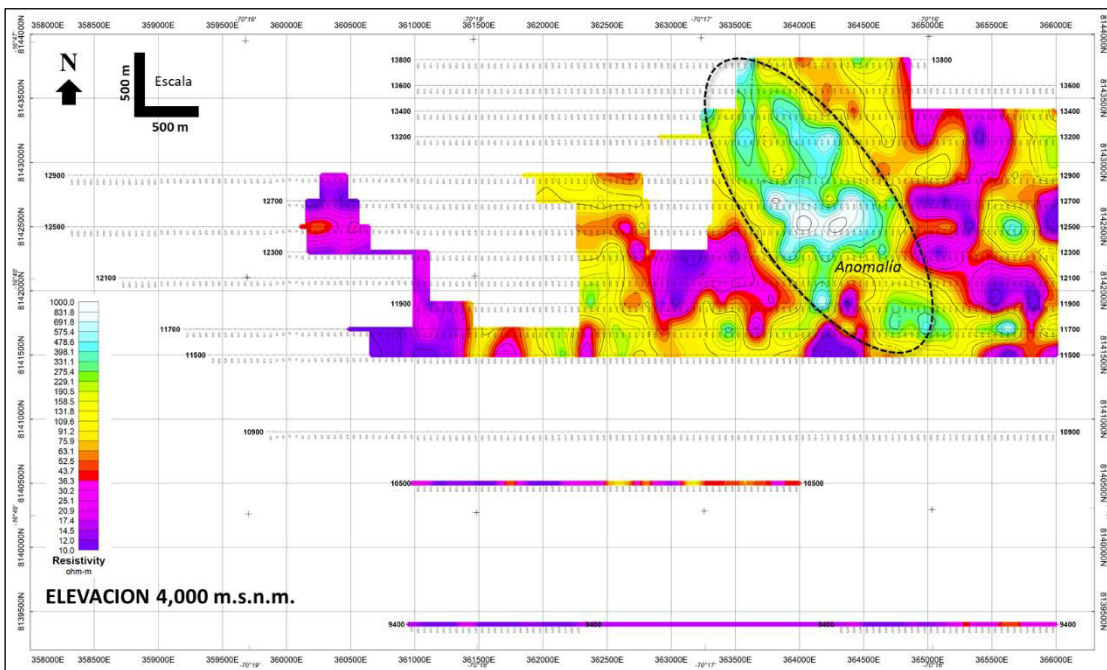


Figura 53. Mapa 4,000 msnm con anomalías resistivas.

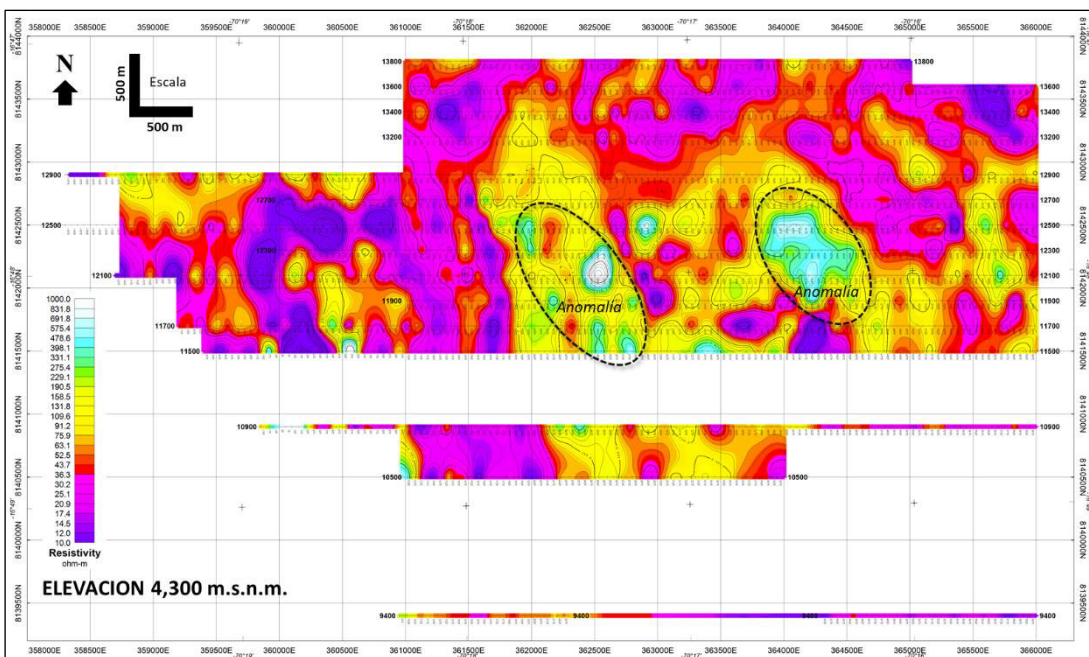


Figura 54. Mapa 4,300 msnm con anomalías resistivas.

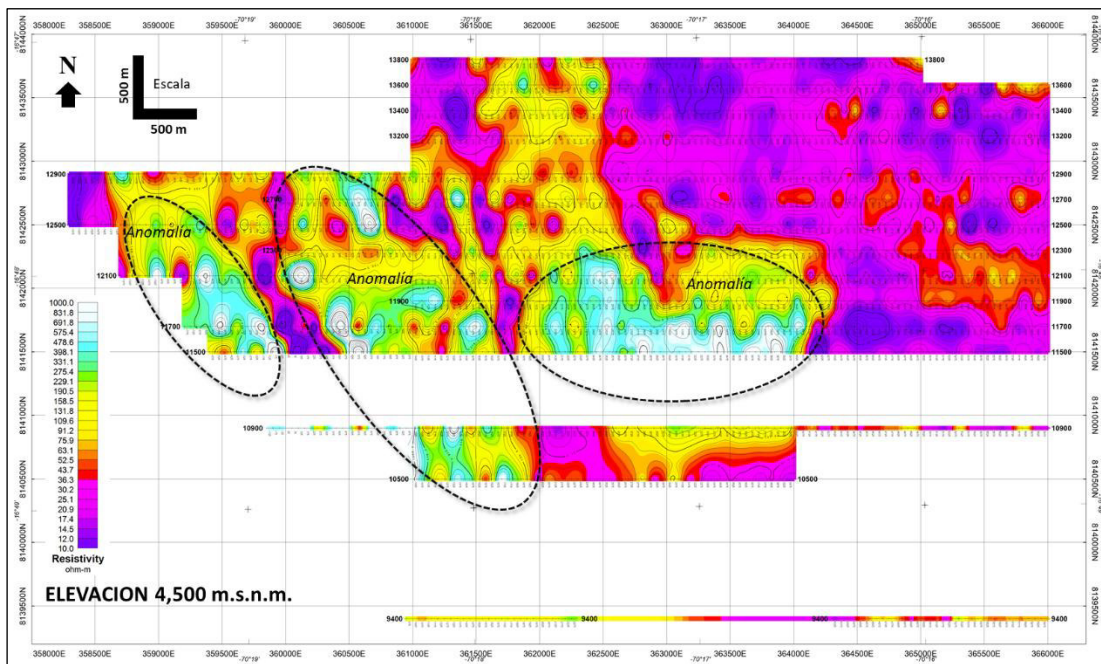


Figura 55. Mapa 4,500 msnm con anomalías resistivas.

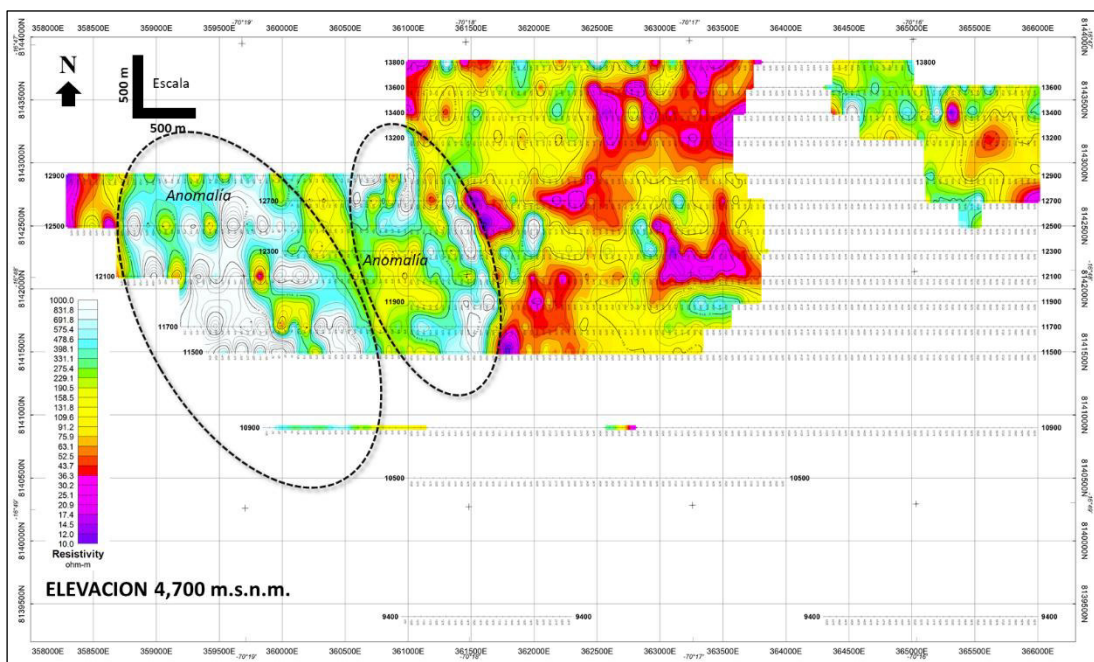


Figura 56. Mapa 4,700 msnm con anomalías resistivas.

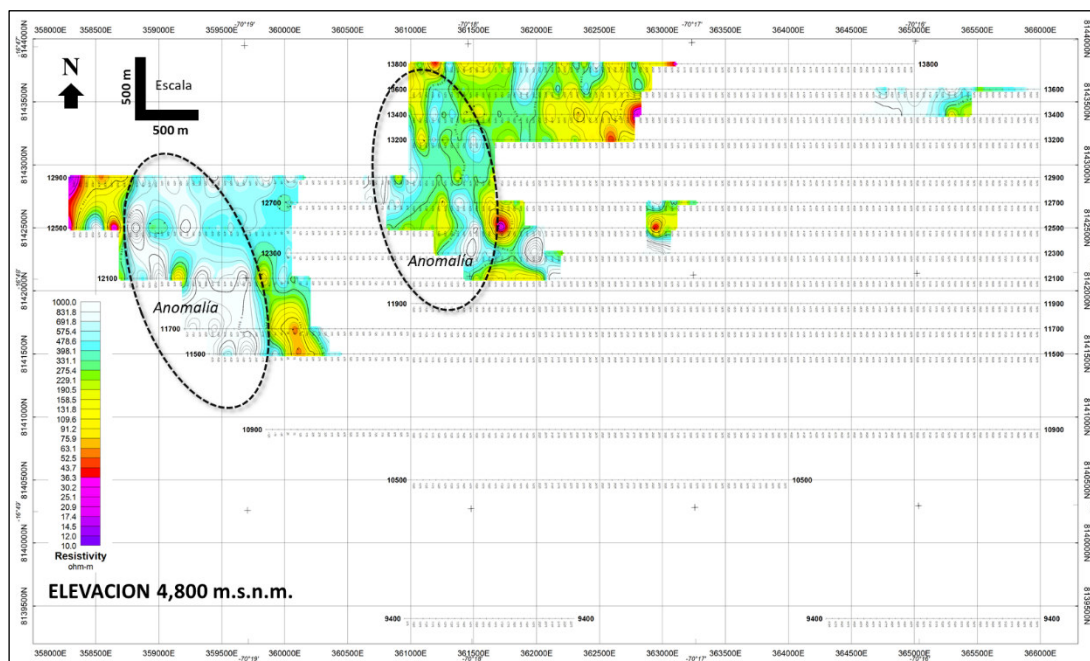


Figura 57. Mapa 4,800 msnm con anomalías resistivas.

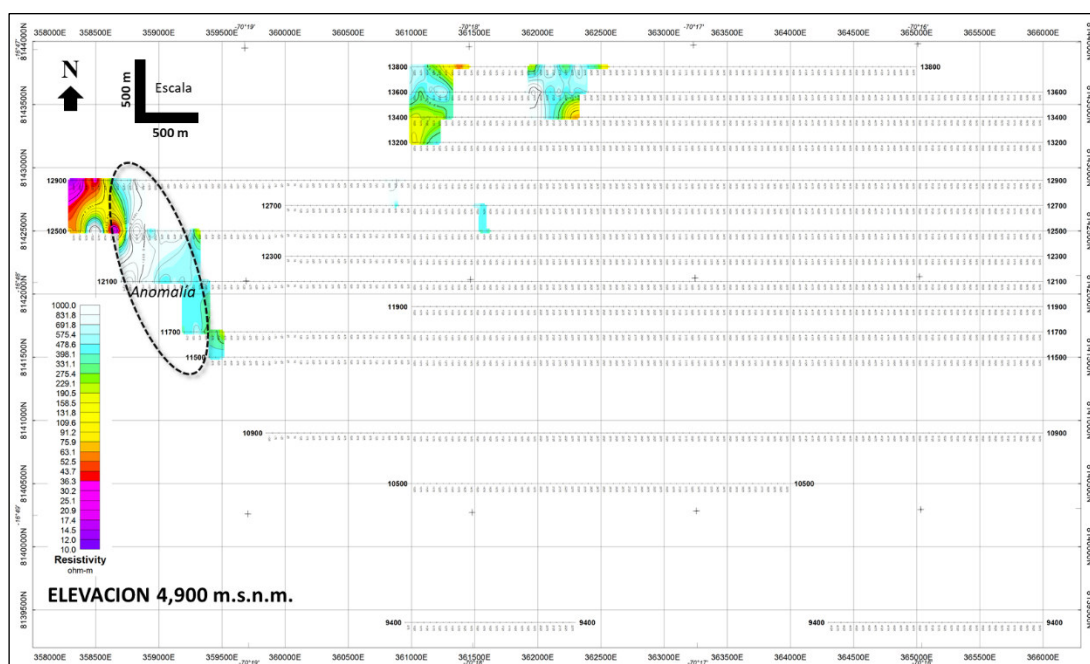


Figura 58. Mapa 4,900 msnm con anomalías resistivas.

En las Figuras 59 y 60, se comparan los resultados de los métodos IP-Res y CSAMT. En primer lugar se puede ver el alcance hasta 750m en profundidad del método CSAMT comparado con los 300 m del IP-Res. También el área de lectura, mientras que en IP-Res tiene la forma de un trapecio invertido, en el CSAMT los

extremos son verticales aumentando el área prospectada. Otro punto importante es la resolución y contraste entre la resistividad y conductividad. Con estas características se puede definir mejor los cuerpos resistivos y por tener un mejor alcance en profundidad se puede definir las anomalías profundas y los feeders por donde ascendieron los fluidos que contienen la mineralización económica.

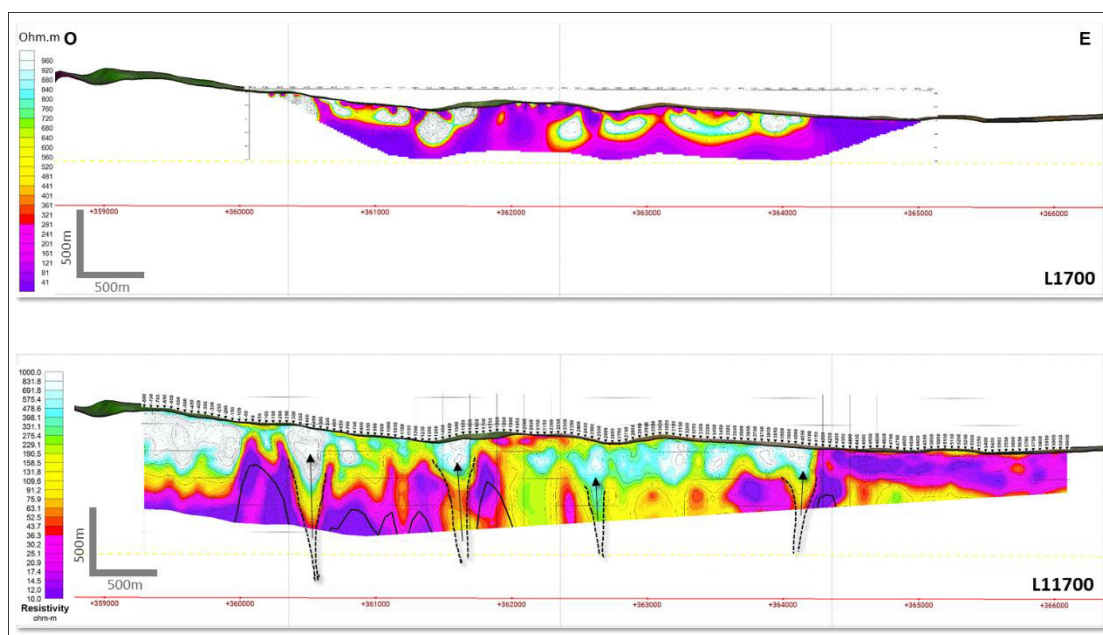


Figura 59. Comparación de las líneas L1700 (IP-Res) y L11700 (CSAMT)

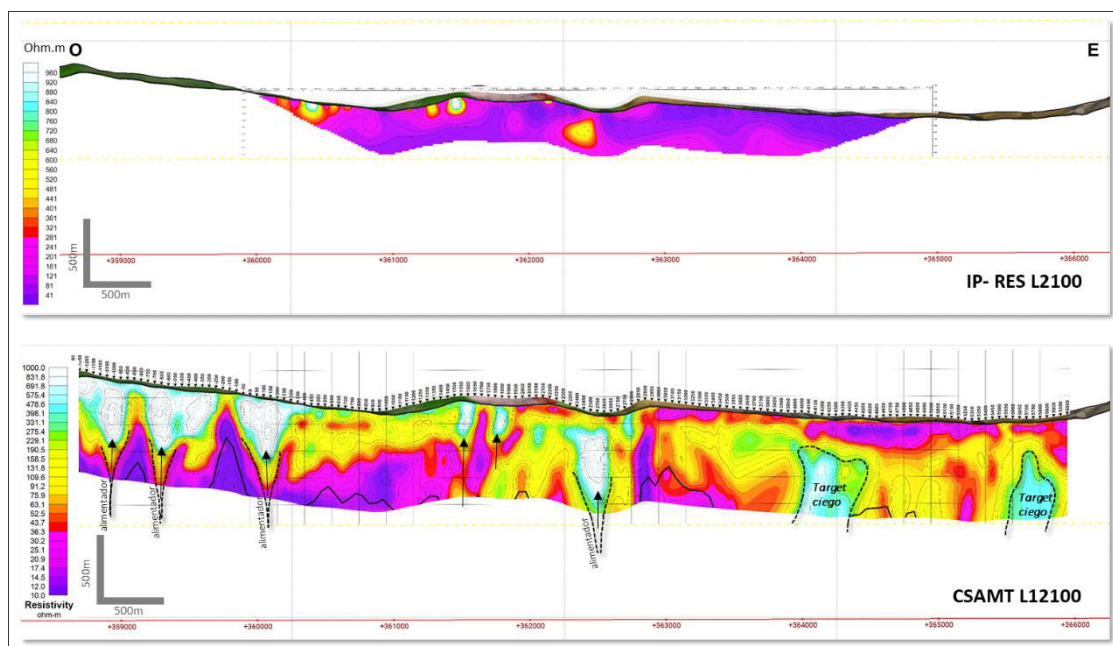


Figura 60. Comparación de las líneas L2100 (IP-Res) y L12100 (CSAMT)

Con la información colectada por el método CSAMT se construyó un modelo de resistividad con el programa Leapfrog que se muestra en la Figura 61, donde se puede apreciar las fuertes anomalías en el sector oeste del proyecto. También anomalías resistivas que afloran localmente en la zona central y coinciden con alteración argílica avanzada y anomalías geoquímicas de oro, así como anomalías resistivas profundas que se podrían considerar targets ocultos.

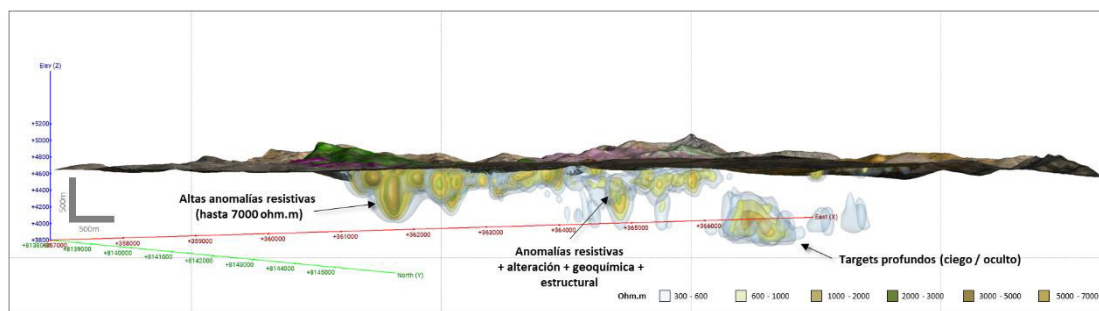


Figura 61. Modelo de resistividad (CSAMT)

Discusión. La utilidad y eficacia del método CSAMT ha sido demostrado en varias investigaciones como la de Song et al. (2021) en la península de Jiaodong; Zhang et al. (2020) en el depósito de Jinchuan; Guo et al. (2019) en el yacimiento Jianshui, Jian et al. (2020) en el área de Zhongxingtun y Yang et al. (2021) en el depósito de Layikeleke, todos ellos en China; así como en la de Goldie (2000) en el yacimiento Yanacocha en Perú.

Al igual que en el proyecto Libertad, el objetivo en las investigaciones de los yacimientos en China fue aplicar el método CSAMT sobre todo para explorar a grandes profundidades, tal es el caso de la investigación de Song et al. (2021) que alcanzó los 2,000 m de profundidad, mientras que en el proyecto Libertad la aplicación del método CSAMT alcanzó de forma confiable los 750 m de profundidad.

Por otro lado, las investigaciones realizadas en China estuvieron enfocadas en depósitos asociados a estructuras profundas con mineralización polimetálica y de oro contenida en sulfuros, como por ejemplo en las investigaciones de Zhang et al. (2020), Jian et al. (2020) y Yang et al. (2021), debido a ello no utilizaron la resistividad del método CSAMT, sino su contraparte que es la conductividad. En el proyecto Libertad las anomalías

resistivas del método CSAMT tienen similitudes con las identificadas por Goldie en el yacimiento Yanacocha, lo que fortalece mi hipótesis que la aplicación de este método geofísico mejora la exploración que resultará en el descubrimiento de mineralización económica.

La investigación de Yang et al. (2021) también demuestra que el método CSAMT necesita ser soportado por herramientas geológicas y geoquímicas, sobre todo cuando hay poca información de este tipo o se está explorando en áreas con bosques o cobertura cuaternaria. Por su parte en el proyecto Libertad el 70% del área de interés prospectivo está cubierto por material cuaternario, por lo que los pocos afloramientos con alteración hidrotermal y las locales anomalías de oro y elementos pathfinders fueron valiosas para diseñar la malla para los estudios geofísicos.

El modelo resistivo es demasiado alentador, por lo que surgió la interrogante si todas las anomalías resistivas del modelo se pueden asociar a cuerpos silicificados con mineralización aurífera, o pudiese haber otra litología o minerales que también podrían dar este tipo de anomalías resistivas. Revisando algunos antecedentes no publicados, se identificó que el proyecto Lucanas ubicado en Ayacucho, con similar marco geológico y donde también se realizó un estudio CSAMT, con un programa de perforación se determinó que parte de las anomalías resistivas más altas estaban relacionadas a domos andesíticos inalterados o débilmente propilitizados (Rengifo y Llerena, 2020).

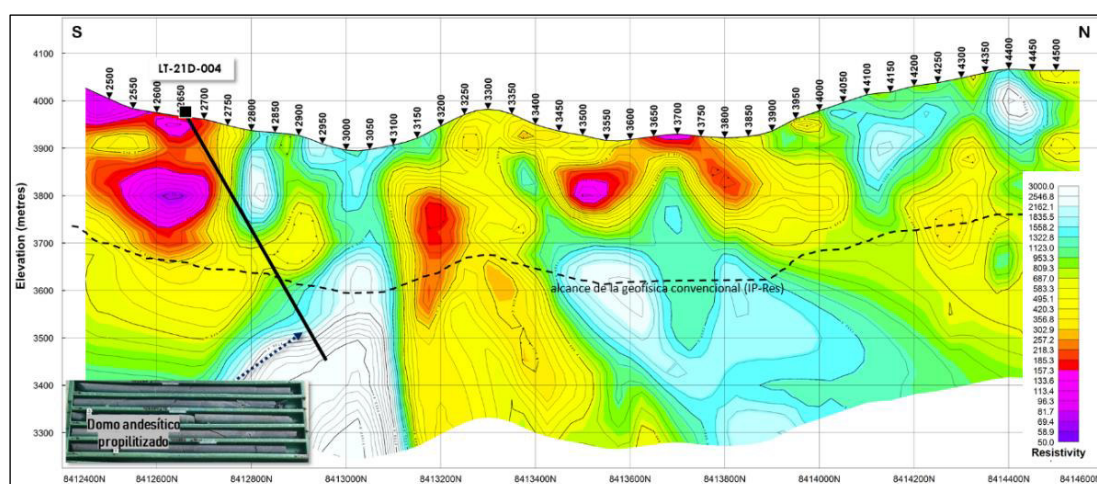


Figura 62. Proyecto Lucanas - Sección de resistividad (CSAMT) – Línea L7200.

Fuente: Rengifo, M. y Llerena, O., (2020).

En la Figura 62, las anomalías resistivas de la sección L7200 del proyecto Lucanas superaban los 3.000 ohmios, tenían una forma semi vertical y se pensaba que eran cuerpos silicificados conectados a la mineralización de Au-Ag. Sin embargo, el sondeo LT-21D-004, que se representa en la sección L7200, sólo interceptó un domo andesítico débilmente propilitizado sin interés prospectivos tras atravesar la anomalía resistiva de más de 3.000 ohm.m. Esto demuestra que las anomalías resistivas elevadas (de 1.000 ohm.m. a >5.000 ohm.m.) no siempre están asociadas a cuerpos silicificados.

Por lo tanto, se puso énfasis en la composición de los domos andesíticos (andesita 2) del Proyecto Libertad. Y se realizó un estudio petrográfico de la muestra LB-3 colectada en esta unidad litológica con los siguientes resultados:

- Litología: Andesita de estructura anisotrópica (lava)
- Alteración: Cloritas – Arcillas – Cuarzo > Hidróxidos de hierro
- Descripción petrográfica: Roca ígnea de textura porfídica conformada por fenocristales (38%) de plagioclasas I <4mm, y moldes de fenocristales de ferromagnesianos totalmente reemplazados por cloritas y minerales opacos; en una matriz incipientemente orientada de micro a criptocristalina de microlitos de plagioclasas II (alterados a arcillas), piroxenos, y minerales opacos (2%). Escasos hidróxidos de hierro como impregnaciones en general, incluye microfracturas (ver Figura 63).



Figura 63. Muestra LB-3. Lava andesítica fresca

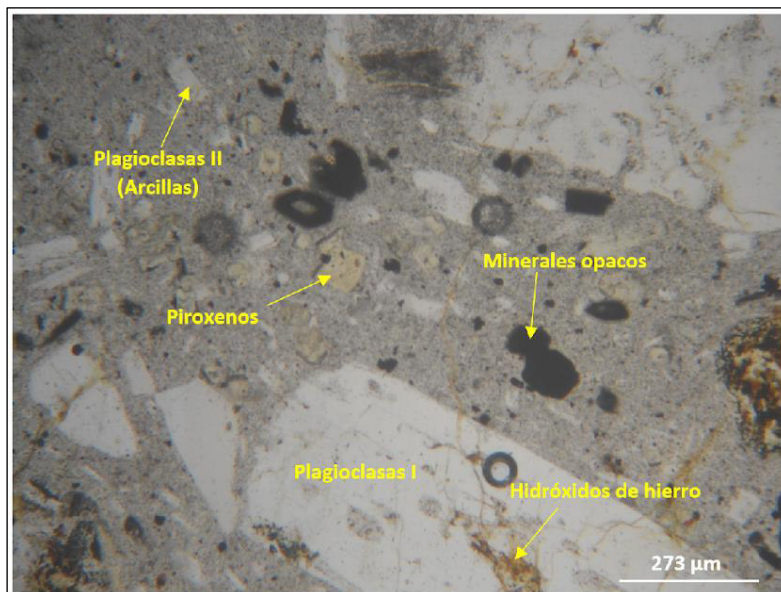


Figura 64. Muestra LB-3. Luz transmitida, nicole paralelos

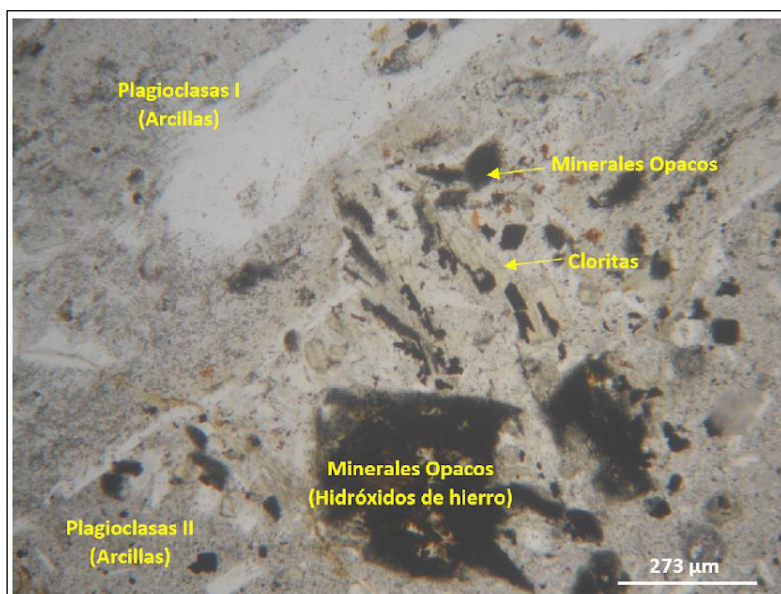


Figura 65. Muestra LB-3. Luz transmitida, nicole paralelos.

Como se observa en las Figuras 64 y 65, el estudio petrográfico confirmó la presencia de minerales opacos que incluye la magnetita, mineral característico en la composición de los domos andesíticos del proyecto Libertad. Por lo tanto, si los domos andesíticos inalterados del proyecto Libertad generan importantes anomalías de resistividad, se tuvo que

identificar un método geofísico para determinar la distribución lateral y vertical de esta unidad (Andesita 2) por debajo de la cobertura reciente. Es así como por el contenido de magnetita y ferromagnesianos de la unidad Andesita 2, se determinó que el método geofísico más apropiado para complementar al método CSAMT sería el método de magnetometría.

5.1.2. Aplicación del Método de Magnetometría en el Proyecto Libertad.

En el proyecto Libertad se realizó un estudio de magnetometría terrestre con un total de 293.9 km lineales, para descartar las anomalías resistivas que pudieran estar relacionadas a domos andesíticos o rocas máficas inalteradas. Como se observa en la Figura 66, las líneas tienen dirección este – oeste y están separadas cada 100 m, la distribución de la malla es similar y abarca a todas las líneas del método CSAMT.

Las especificaciones del estudio con el método de magnetometría fueron las siguientes:

Instrumentación

- Magnetómetro: GEM GSM-19W
- Tipo de sensor: Efecto Overhauser, montado en un bastón de 2 m.

Parámetros de levantamiento magnético

Geometría

- Configuración: Perfil de intensidad magnética total
- Intervalo de medición: 0.5 Hz

Parámetros de adquisición

- Parámetros medidos: Intensidad magnética total
- Unidades de datos: nanoTesla (nT)
- Reducción de datos: corrección diurna
- Datum magnético: 23216.4.7 nT
- Declinación magnética: -6.78 °

- Inclinación magnética: -11.31 °
- Ubicación de la estación base: 362292 E, 8136220 N (WGS84 – UTM19S)
- Muestreo de la estación base: intervalo de grabación de 3s, sincronizado con magnetómetros móviles.

Procesamiento de datos

Las mediciones de intensidad magnética total (TMI) de la estación base y los magnetómetros móviles se transfirieron a una computadora utilizando GEMLink 5.4. Los archivos de datos se editaron cuando fue necesario y luego se importaron a Geosoft Oasis Montaj™.

El procesamiento de los datos y la corrección de los datos se realizaron en los siguientes pasos:

- Los datos magnéticos brutos se corrigieron para la deriva diurna.
- Se eliminaron los picos y las caídas magnéticas.
- Se comprobaron las coordenadas GPS.
- Los productos de datos cuadrículados se calcularon:
 - Intensidad magnética total (TMI)
 - Reducción a Polo (RTP)
 - Derivada vertical (calculada a partir de RTP hacia arriba 10 m)
 - Derivada de inclinación (calculada a partir del RTP hacia arriba continuado 10 m)
 - Señal analítica (calculada a partir de 10 m hacia arriba TMI continua)

Precisión y repetibilidad de los datos magnéticos

La repetibilidad y la precisión del instrumento del magnetómetro se verificaron tomando mediciones repetidas de la estación de referencia al principio y al final de cada día de estudio. Se tuvo cuidado de garantizar la orientación correcta del sensor magnético en todo momento.

Como se aprecia en la Figura 68, las anomalías de alto magnético en el mapa de Señal Analítica donde se centra las anomalías, se encuentran principalmente en el sector oeste del proyecto.

En las Figuras 67 al 71, los resultados del estudio de magnetometría indican entre otros datos un rango de susceptibilidad magnética en el proyecto entre 23400 nT y 23060 nT, con una diferencia de 340 nT. Como se observa también en la Figuras 69 y 70 que corresponden a mapas Reducción al Ecuador y Magnético Total respectivamente, la zona oeste de la propiedad minera presenta altas anomalías magnéticas que bordean los 23400 nT y bajas anomalías por los 23050 nT, configurando dipolos que podrían ser los centros de emplazamiento de los domos andesíticos inalterados (Andesita 2) y localmente domos traquíticos también inalterados que se distribuyen en la zona, que a su vez correlacionan con fuertes anomalías de resistividad mayor a 1,000 ohm-m.

Por otro lado, como se aprecia en la Figura 67 (Señal Analítica) en la parte central de la propiedad minera se aprecia una zona con merma o pérdida de la susceptibilidad (*depletion*), y podría vincularse a la destrucción de las magnetitas litogénicas por oxidación. Esta zona presenta moderada a baja susceptibilidad magnética, rodeada por altos magnéticos, es de forma semicircular de 3.0 km x 1.7 km, que en superficie coincide con afloramientos de brecha hidrotermal, domo riódacítico, lavas andesíticas y tobas, todas estas unidades con alteración hidrotermal en diferentes intensidades.

Además como se ve en la Figura 72, esta zona de “depletion” coincide con las anomalías resistivas que no están vinculadas a domos andesíticos inalterados y las principales anomalías de Au y Ag. Por lo que este estudio fortalece la teoría de que esta área es la más prospectiva del proyecto.

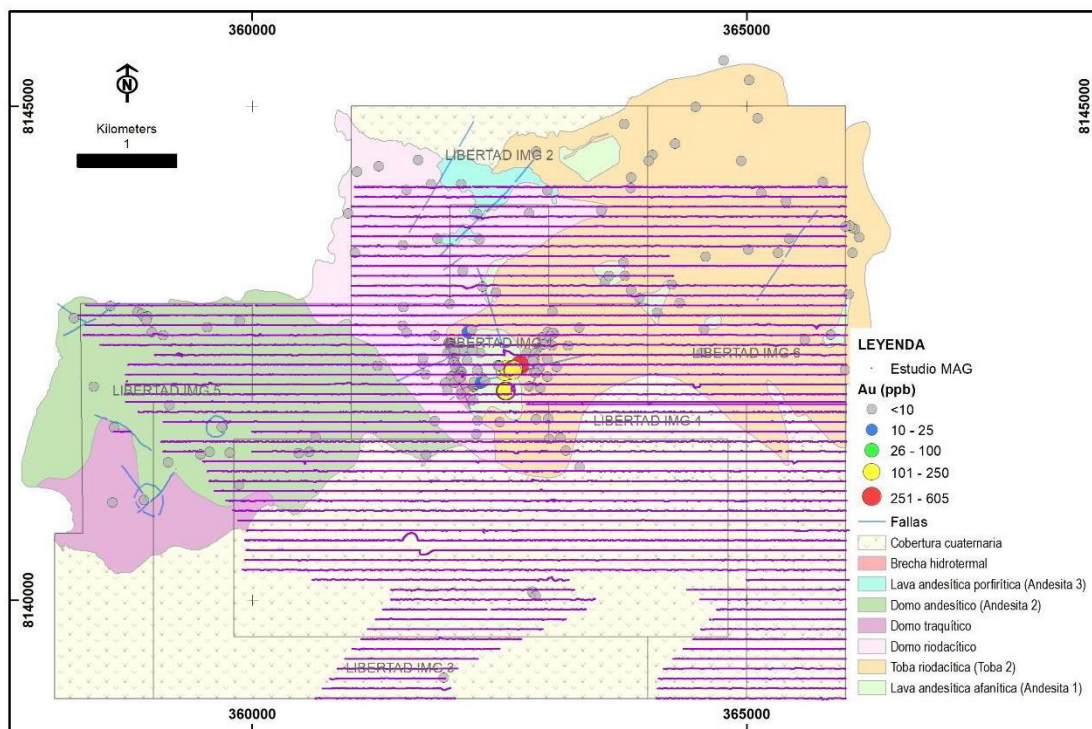


Figura 66. Estudio de magnetometría en el proyecto Libertad

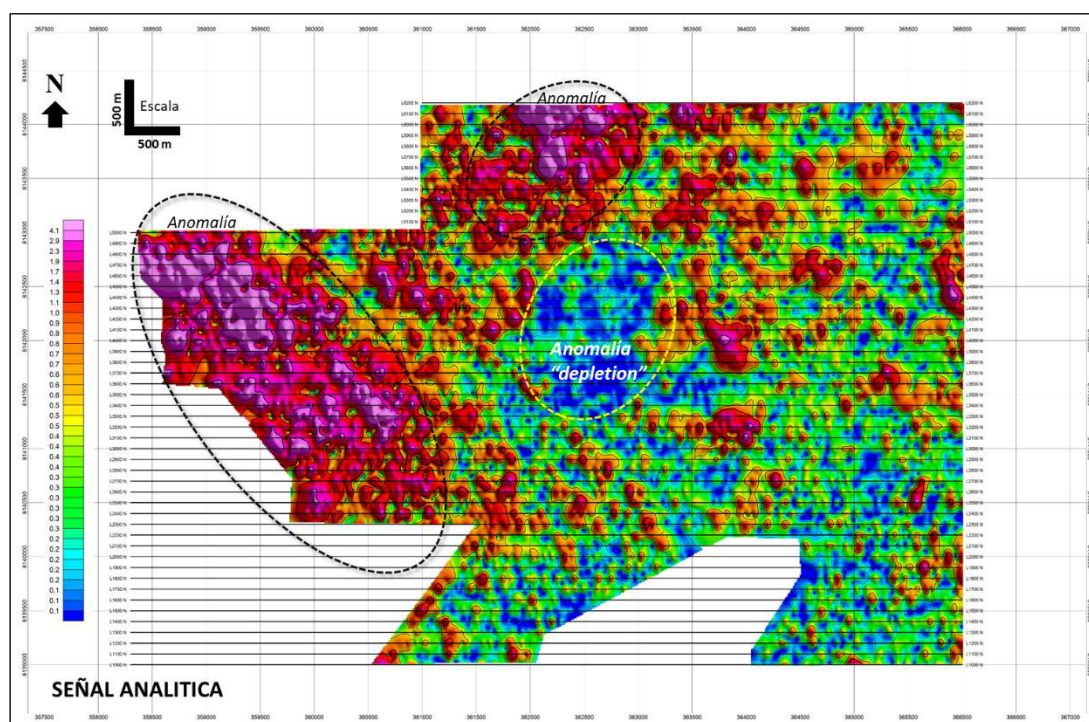


Figura 67. Magnetometría – Señal analítica

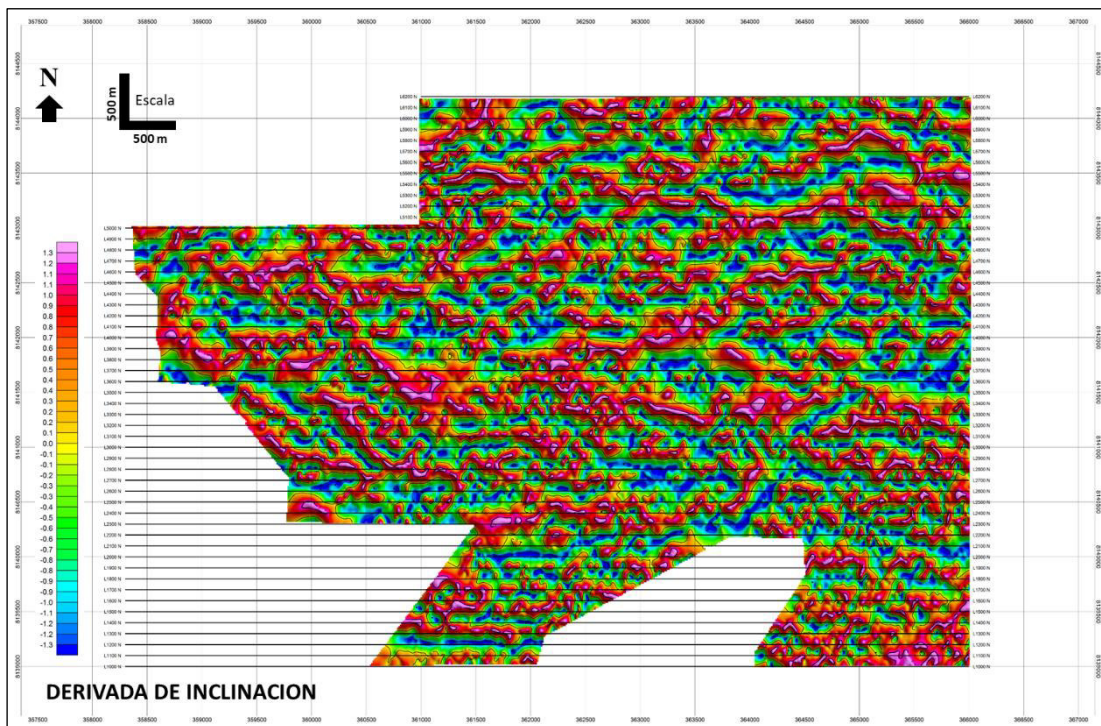


Figura 68. Magnetometría – Derivada de inclinación

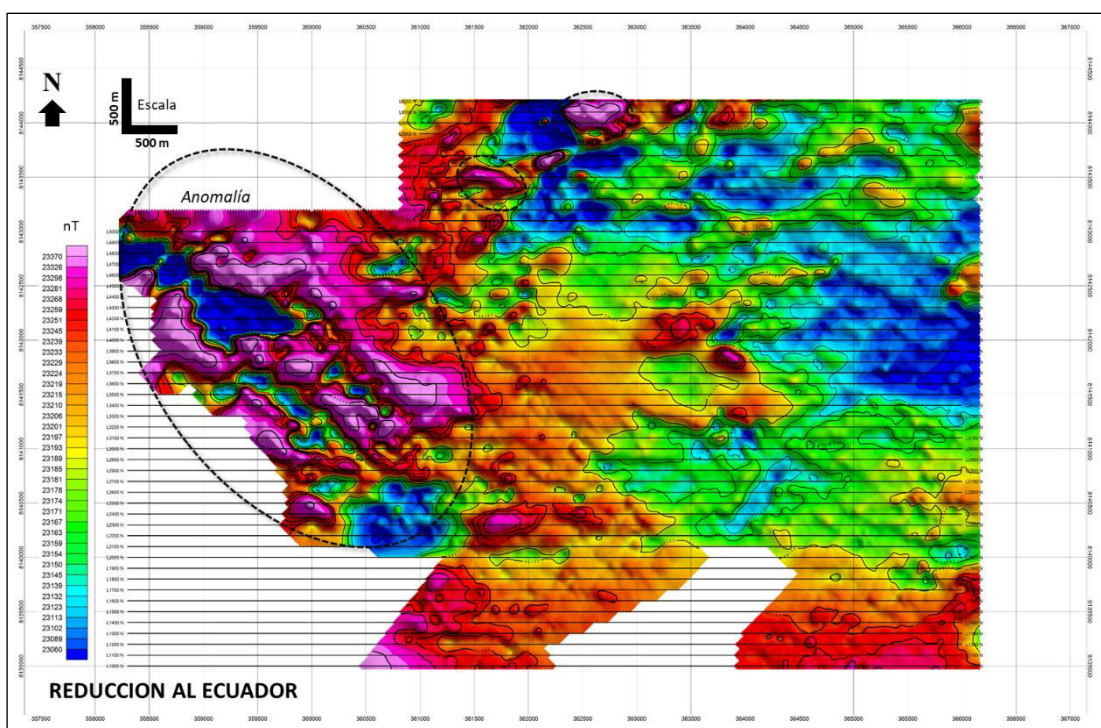


Figura 69. Magnetometría – Reducción al Ecuador

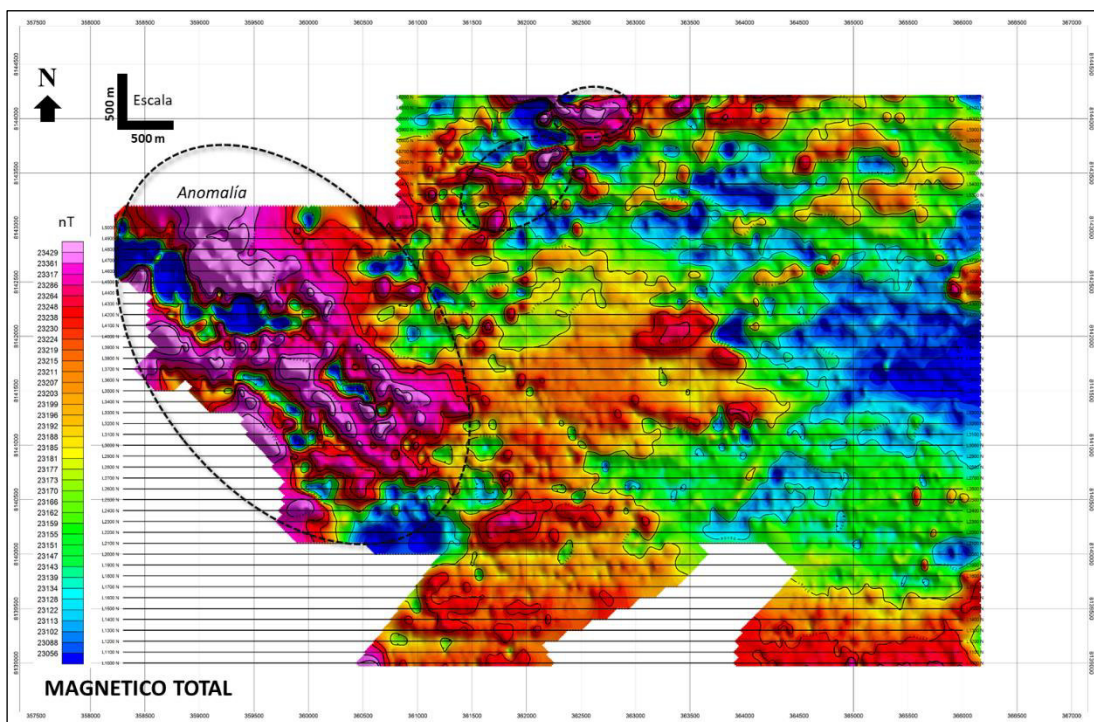


Figura 70. Magnetometría – Magnético total

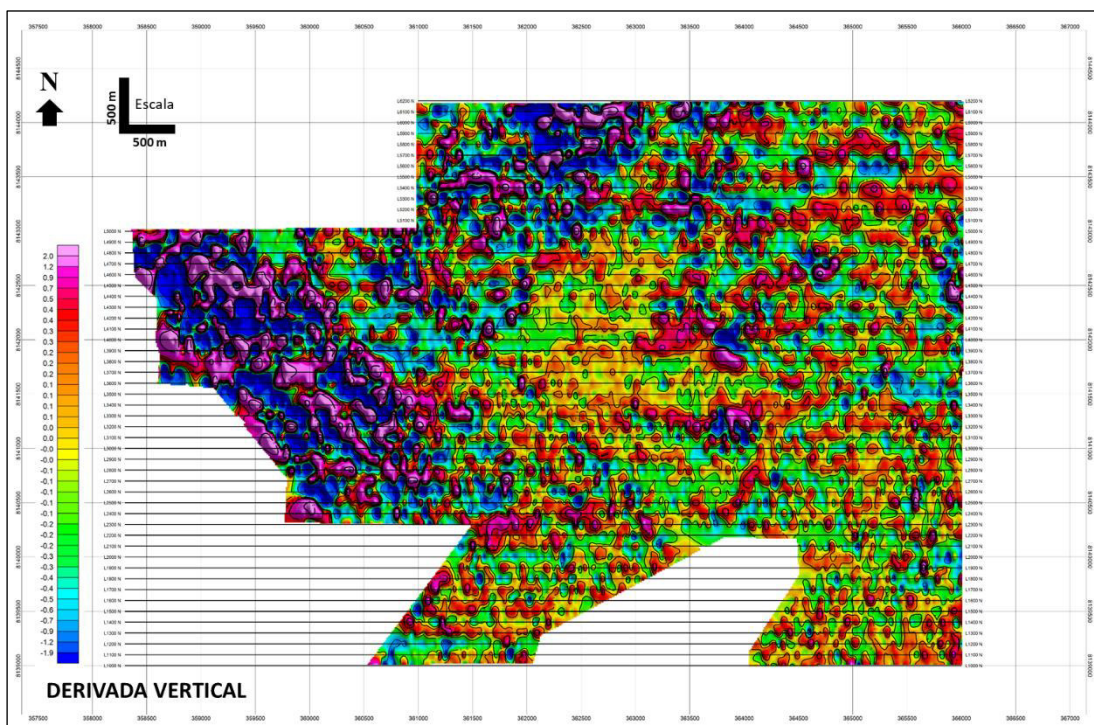


Figura 71. Magnetometría – Derivada vertical

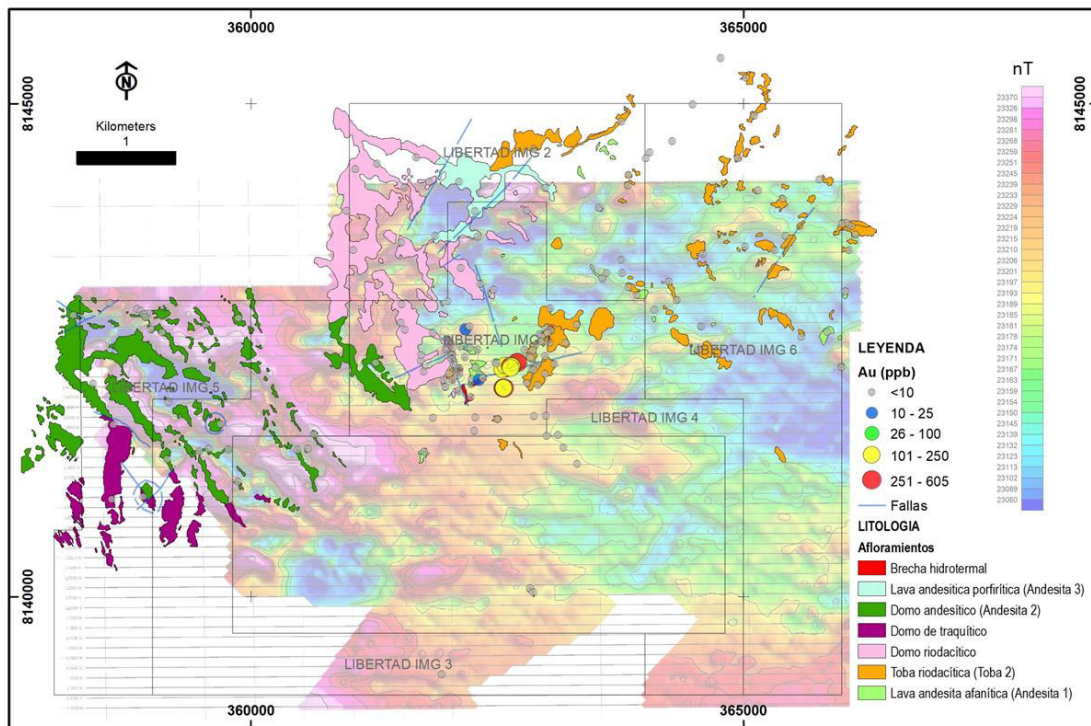


Figura 72. Litología vs Reducción al Ecuador (MAG)

En las Figuras 73 y 74 se observa la superposición de las anomalías resistivas con las anomalías de susceptibilidad magnética. En ambas figuras se determina que la zona A donde se distribuyen en superficie domos andesíticos inalterados (andesita 2) presentan una buena correlación y no tienen interés prospectivo. Mientras que las zonas B, C y D no presentan correlación, por lo tanto se demuestra que esos cuerpos resistivos no son domos andesíticos inalterados, y tienen mayor probabilidad de ser cuerpos silicificados (masiva, granular, vuggy, brecha hidrotermal, etc.) con un alto potencial prospectivo para ser probados por un programa de perforación.

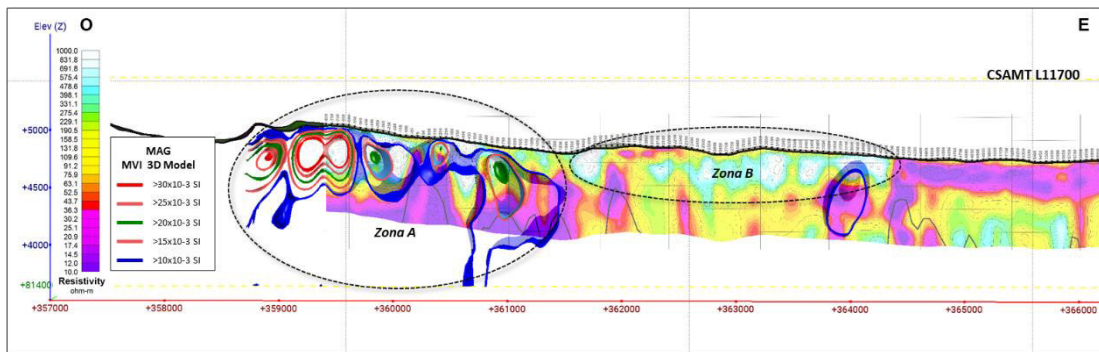


Figura 73. Línea L11700 – Anomalías de resistividad vs Susceptibilidad magnética

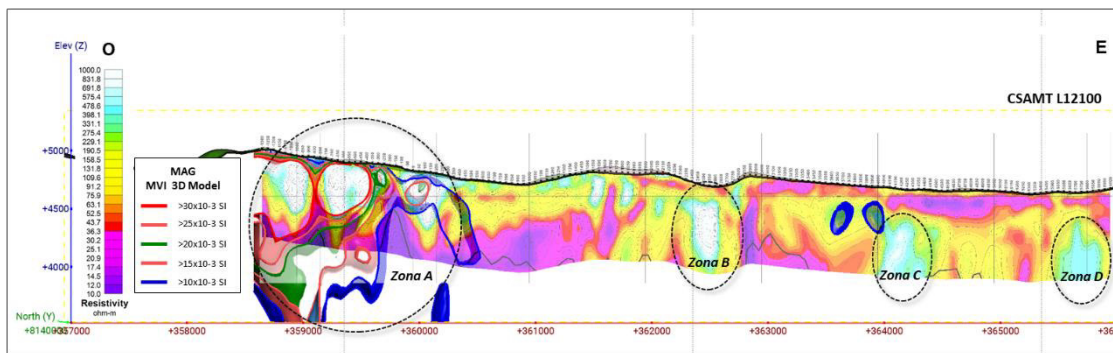


Figura 74. Línea L12100 – Anomalías de resistividad vs Susceptibilidad magnética

En el modelo Leapfrog de la Figura 75, se aprecia al oeste anomalías de susceptibilidad magnética asociadas a anomalías resistivas y domos andesíticos inalterados. Y hacia el este anomalías resistivas > 600 ohm.m que presentan interés prospectivo. Nótese que hay anomalías resistivas profundas identificadas con el método CSAMT.

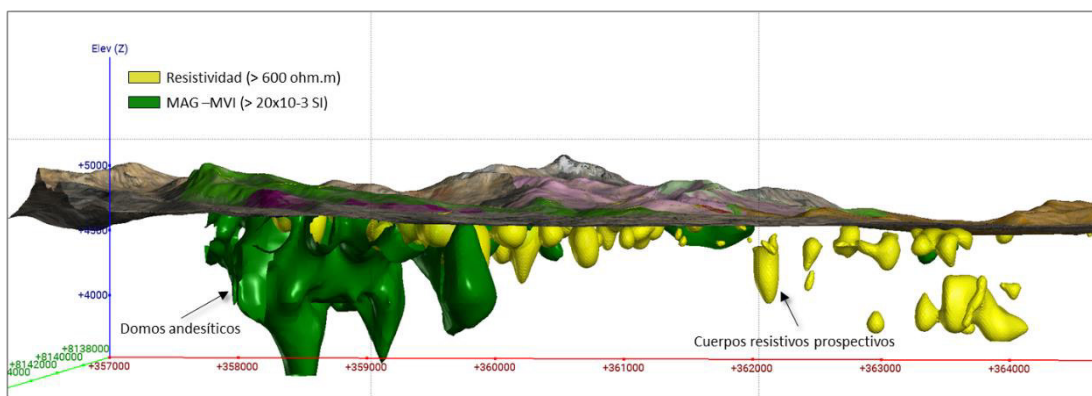


Figura 75. Modelo con anomalías de resistividad vs Susceptibilidad magnética

Discusión. El método CSAMT para una mayor eficacia en sus resultados también necesita ser complementado por otro método geofísico dependiendo del tipo de depósito mineral que se esté explorando. Por ejemplo, Zhang et al. (2020) lo complementaron con los métodos de gravimetría y magnetometría porque estaban explorando por mineralización en sulfuros; al igual que Yang

et al. (2021) que también estuvieron explorando mineralización polimetálica profunda en sulfuros.

En el proyecto Libertad, donde el tipo de depósito es diferente (epitermal de alta sulfuración) la mayor parte de la mineralización en profundidad debe estar en óxidos, tal como se reconoció en los locales afloramientos. Por lo tanto, por ahora no es prioritario aplicar un método IP-Magnetotelúrico que identifique en profundidad anomalías de cargabilidad, tal como sí lo hizo Bueno (2019) en el yacimiento Cerro Lindo donde aplicaron con éxito el método TITAN 24 para identificar los cuerpos de sulfuros económicos a profundidades mayores de 300 m.

La importancia del método de magnetometría en el proyecto Libertad fue que permitió discriminar las anomalías de resistividad asociadas a domos andesíticos inalterados, tomando como referencia los resultados de la investigación de Rengifo y Llerena (2020) en el proyecto Lucanas en Ayacucho.

5.2. Presentación de Resultados

5.2.1. Alteraciones Hidrotermales vs Anomalías Resistivas

En las figuras 76 y 77, Corbett, G. (2017) muestra el zoneamiento típico de la alteración hidrotermal en los depósitos epitermales de alta sulfuración y sus controles estratigráfico (litológico) y estructural para la concentración de mineralización económica. El proyecto Libertad presenta muchas de estas características, como los tufos que podrían hospedar la mineralización económica y los alimentadores (fallas / brechas) de mineralización que concentraría las leyes auríferas más altas.

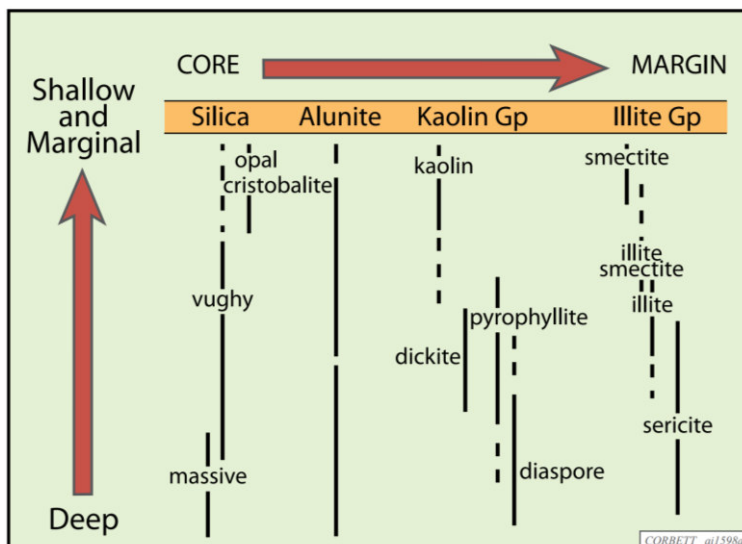


Figura 76. Zonamiento de alteración hidrotermal en depósitos epitermales de alta sulfuración

Fuente. Corbett, G. (2017)

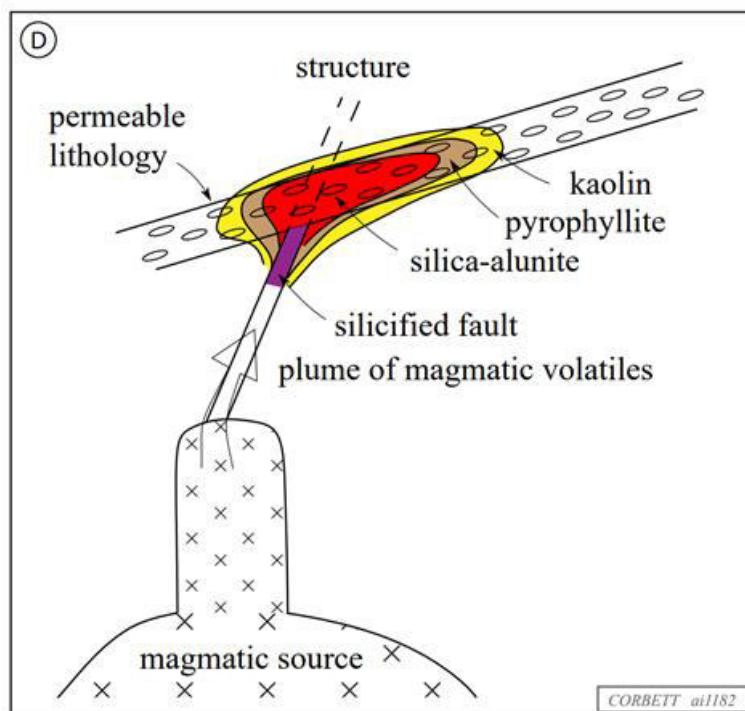


Figura 77. Modelo conceptual de alteraciones de la zona Reina Elizabeth en Chile.

Fuente. Corbett, G. (2017)

De acuerdo con el estudio de alteraciones hidrotermales que se detalló en el acápite 4.3.3. de esta investigación, se ha elaborado el modelo y las vectorizaciones de las alteraciones hidrotermales del proyecto Libertad. De la zona de menor a mayor temperatura se tiene: 1) caolinita- montmorillonita, 2) diquita, 3) alunita K/Na/Ca > Sílice, 4) sílica vuggy / masiva. (ver Figura 78).

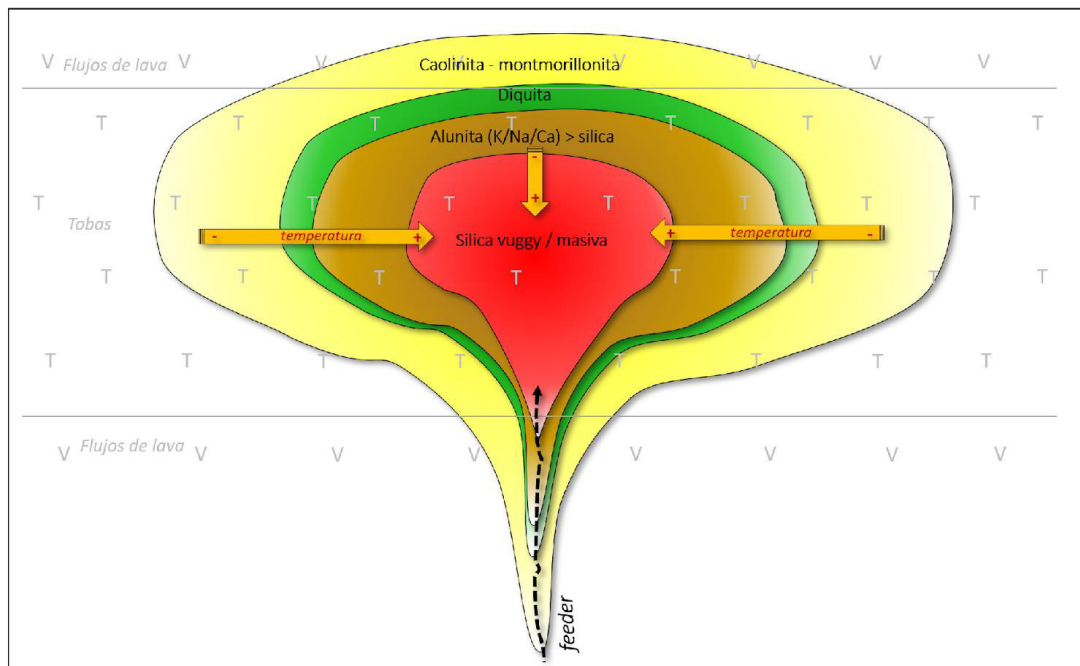


Figura 78. Modelo de alteraciones hidrotermales del proyecto Libertad.

Por otro lado, tomando como referencia el estudio realizado por Goldie (2000) y Ticona (2017), de los rangos de resistividad de los tipos de rocas en el yacimiento Yanacocha. Se realizó un procedimiento similar pero comparando las diferentes alteraciones hidrotermales que afloran con las medidas de resistividad en los perfiles o líneas del estudio CSAMT. De esta manera se determinó que los ensambles de alteración: 1) caolinita – montmorillonita, presentan un rango de resistividad entre 80 y 300 ohm.m, 2) alunita – diquita presentan un rango entre 300 y 750 ohm.m, 3) la sílice vuggy y masiva presentan un rango de resistividad de 750 a 4,000 ohm.m. También se determinó que los domos andesíticos inalterados presentan un rango de resistividad entre 500 y 7,000 ohm.m (ver Figura 79).

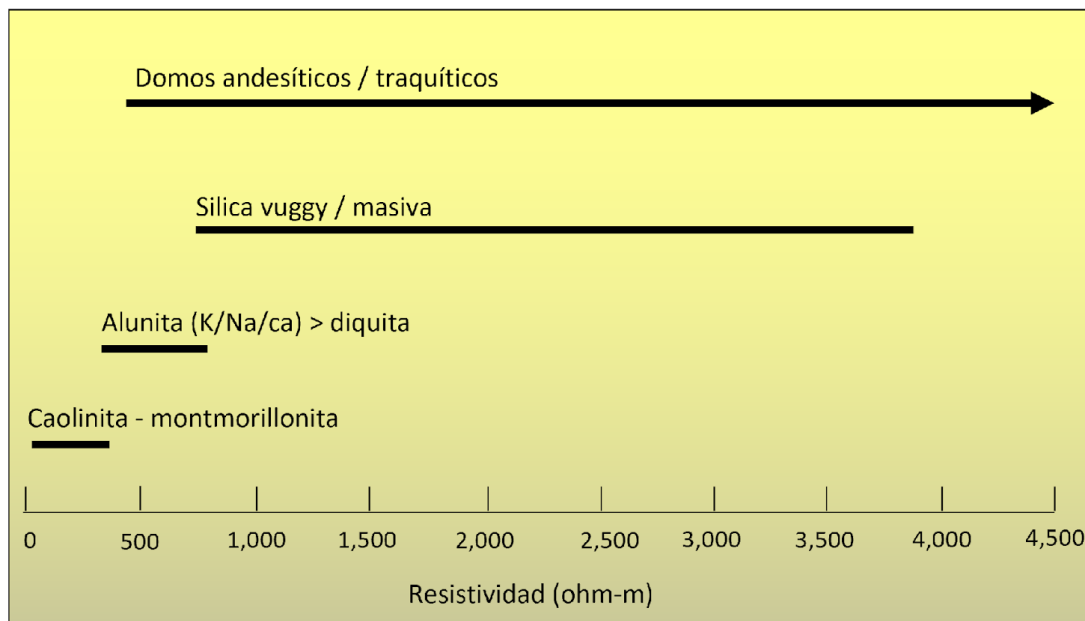


Figura 79. Rangos de Resistividad de las alteraciones hidrotermales del proyecto Libertad

Una vez determinados los rangos de resistividad para los diferentes ensambles de alteración, se procedió a delimitar los halos de alteración en las secciones de resistividad CSAMT. Como se observa en las Figuras 80 y 81, principalmente en el sector oeste existen altas anomalías de resistividad asociadas a domos andesíticos inalterados. Mientras que en los sectores central y este se ha delimitado los halos de alteración caolinita-montmorillonita circundando a la diquita y ésta su vez circundando a la alteración alunita > sílice con un centro de silicificación vuggy o masiva altamente prospectivas.

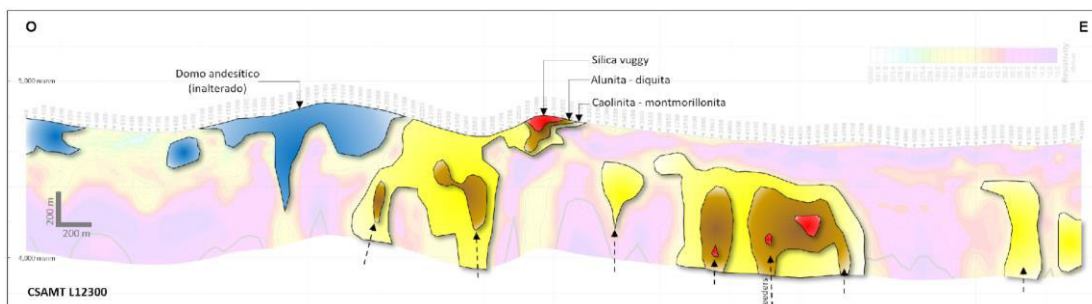


Figura 80. Línea CSAMT 12300 – Alteraciones hidrotermales vs Resistividad.

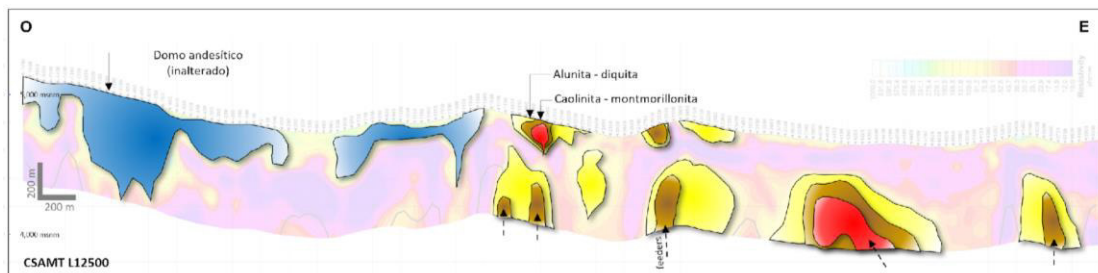


Figura 81. Línea CSAMT 12500 – Alteraciones hidrotermales vs Resistividad.

5.2.2. Modelos de Exploración.

En la Figura 82 se muestra el modelo geológico del proyecto Libertad sobre la línea L11700. El modelo sugiere la presencia de una unidad piroclástica que no aflora (Toba 1), intruída por domos andesítico y traquítico al oeste y andesítico al este. La unidad Toba 1 es la que principalmente hospedaría la mineralización diseminada en brechas hidrotermales o cuerpos silicificados asociados a un sistema epitermal de alta sulfuración. En la Figura 83 se muestra la unidad Toba 1, con dimensiones de 4.0 km de largo, 2.5 km de ancho y aproximadamente 0.6 km de espesor, con un volumen suficiente para hospedar cuerpos o mineralización económica mayor a 1.0 Moz Au.

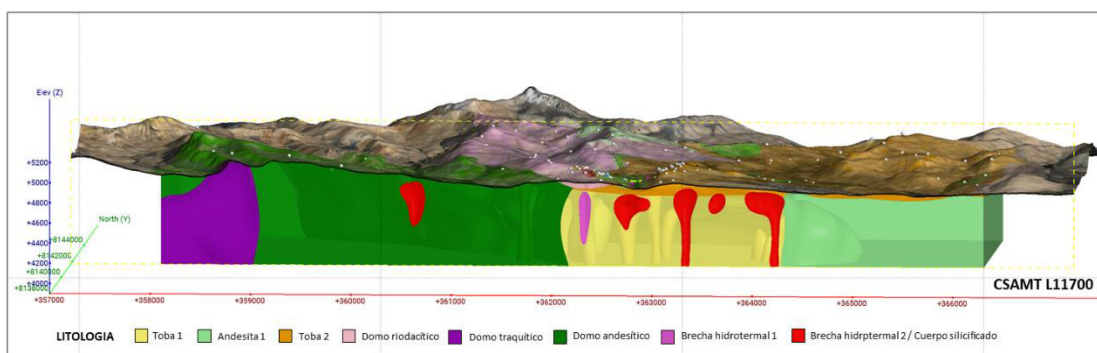


Figura 82. Modelo geológico del proyecto Libertad (Línea L11700)

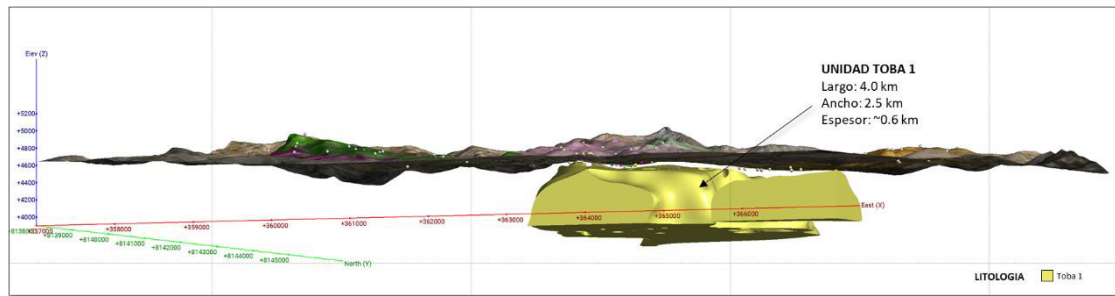


Figura 83. Modelo geológico del proyecto Libertad (Unidad Toba 1)

En las Figura 84 se muestra la distribución de los targets resistivos y prospectivos para un futuro programa de perforación en el proyecto Libertad. Los targets de la parte central y oriental están hospedados en la unidad Toba 1 y es donde se encuentra el mayor potencial exploratorio del proyecto, mientras que los targets de occidente se encuentran hospedados en la unidad Domo Andesítico con un menor potencial exploratorio.

En la Figura 85 se muestra el modelo con 10 targets resistivos y prospectivos del proyecto Libertad, donde se puede apreciar que hay un target que aflora (Brecha Hidrotermal 1) y según el modelo de resistividad profundiza más de 500 m. También hay targets resistivos someros que empiezan por debajo de los 100 m de la superficie que en conjunto forman un cuerpo tabular de 1.5 km de largo por 250 m de ancho con un espesor de 200 m, con varias raíces (feeders) que profundizan más de 600 m. Finalmente, también se identificó un gran cuerpo resistivo profundo que empieza por debajo de los 300 m, tiene una geometría semicircular de 600 m de radio y profundiza 450 m, quedando abierta en profundidad, solo esta anomalía tiene un volumen para albergar un potencial de 1.0 Moz Au.

El método geofísico magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT) combinado con el método de magnetometría han sido determinantes en la identificación de targets perforables que afloran, someros y sobre todo profundos que otro método geofísico resistivo convencional no lo habría logrado de manera precisa.

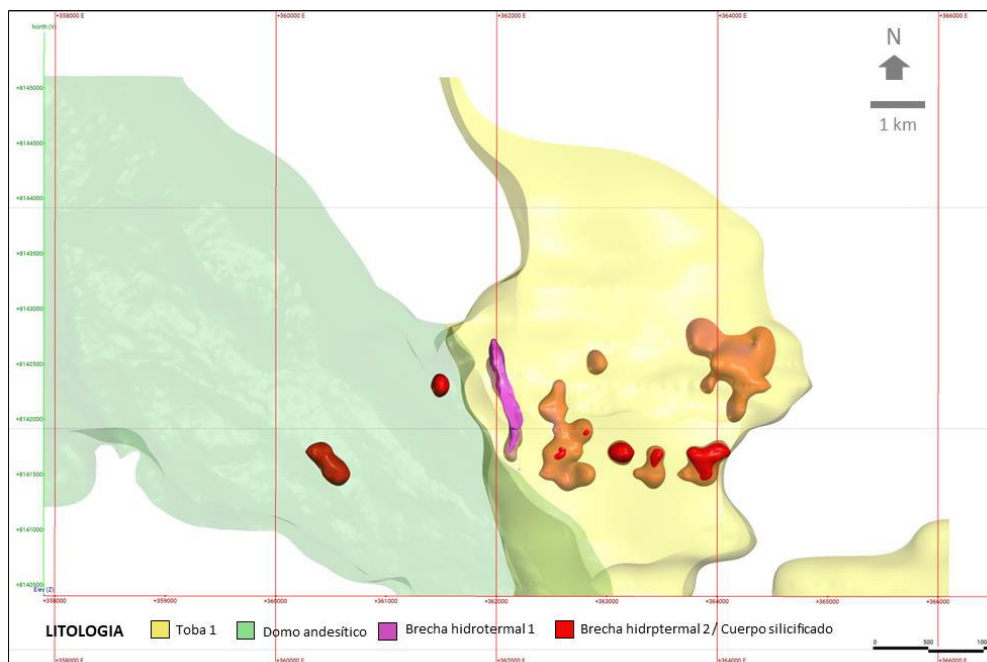


Figura 84. Distribución de targets resistivos vs litología

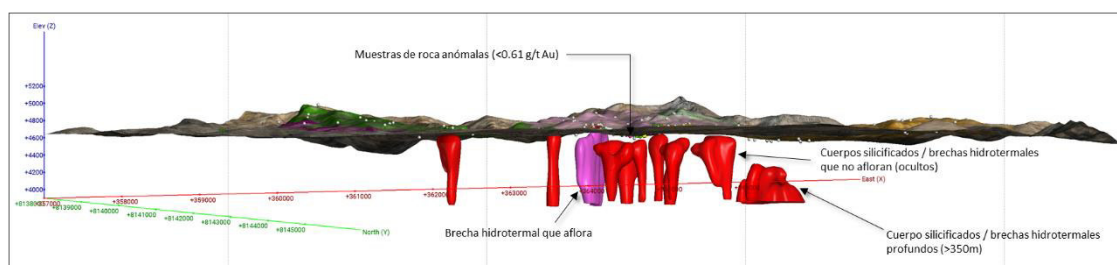


Figura 85. Modelo de targets resistivos prospectivos del proyecto Libertad

5.2.3. Programa de Perforación Propuesto.

Como menciona Kearey (2002), “la geofísica aplicada correctamente, puede optimizar los programas de exploración, para maximizar el área a explorar y minimizar los requerimientos de perforación”.

En base a la presente investigación, en el proyecto Libertad la geofísica y en especial la combinación de los métodos CSAMT y magnetometría ha sido la principal herramienta para centrar y definir un futuro programa de perforación (ver Figura 86). Como se observa en el Cuadro 7 el programa propuesto consiste en 4,000 metros de perforación diamantina, distribuidos en

7 sondajes profundos que van entre los 500 m a 800 m, con objetivos principalmente geofísicos, geoquímicos y geológicos en ese orden de prioridad.

En la Figura 87 se muestra el modelo de targets resistivos versus el programa de perforación propuesto, se puede apreciar los sondajes profundos orientados principalmente hacia las anomalías resistivas, destaca el sondaje 7 de 800 metros orientado hacia una anomalía resistiva profunda que un método geofísico resistivo convencional no lo hubiese podido identificar.

Cuadro 7. Programa de perforación propuesto

Sondaje	Este	Norte	Altura	Profundidad (m)	Objetivo
1	361945	8142496	4853	500	Geología (Hyd-Bx) & Geofísica (RES >2,000 ohm.m)
2	361408	8142241	4825	500	Geofísica (RES >2,000 ohm.m) & Geología (contacto domos)
3	362332	8142100	4766	650	Geoquímica Au, Geofísica (RES >2,000 ohm.m)
4	363100	8141700	4746	500	Geofísica (RES >1,000 ohm.m)
5	363421	8141717	4721	550	Geofísica (RES >1,000 ohm.m)
6	363700	8141700	4708	500	Geofísica (RES >1,000 ohm.m)
7	364169	8142821	4650	800	Geofísica (RES >1,000 ohm.m)
Total				4,000	

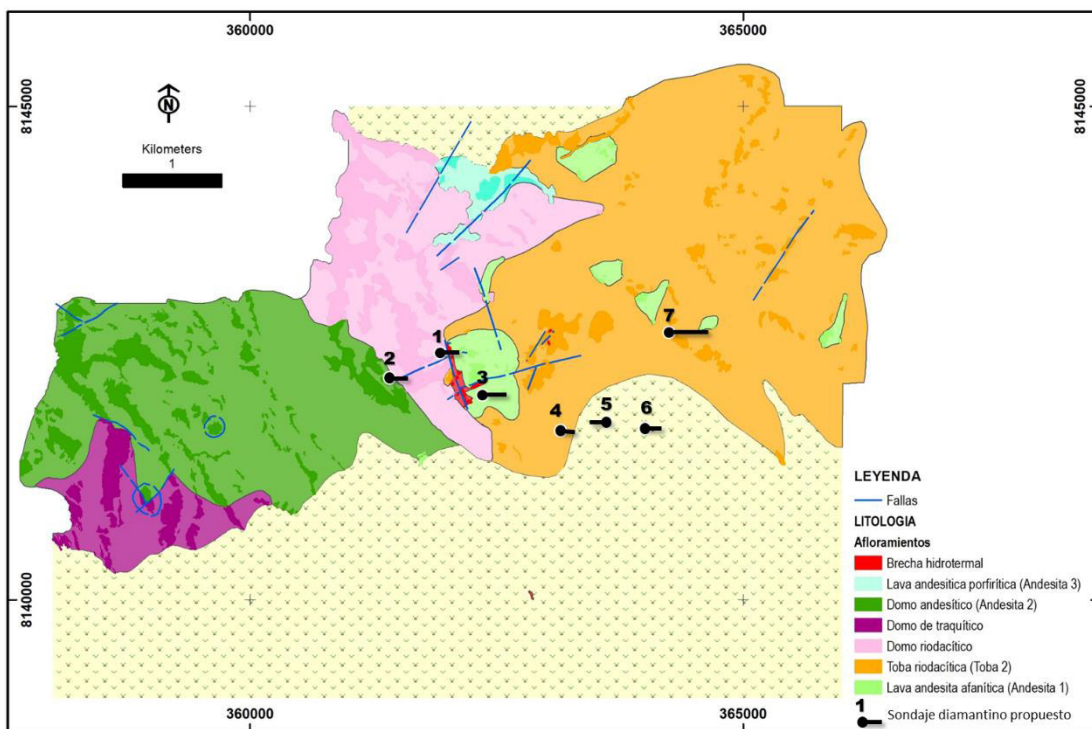


Figura 86. Programa de perforación propuesto

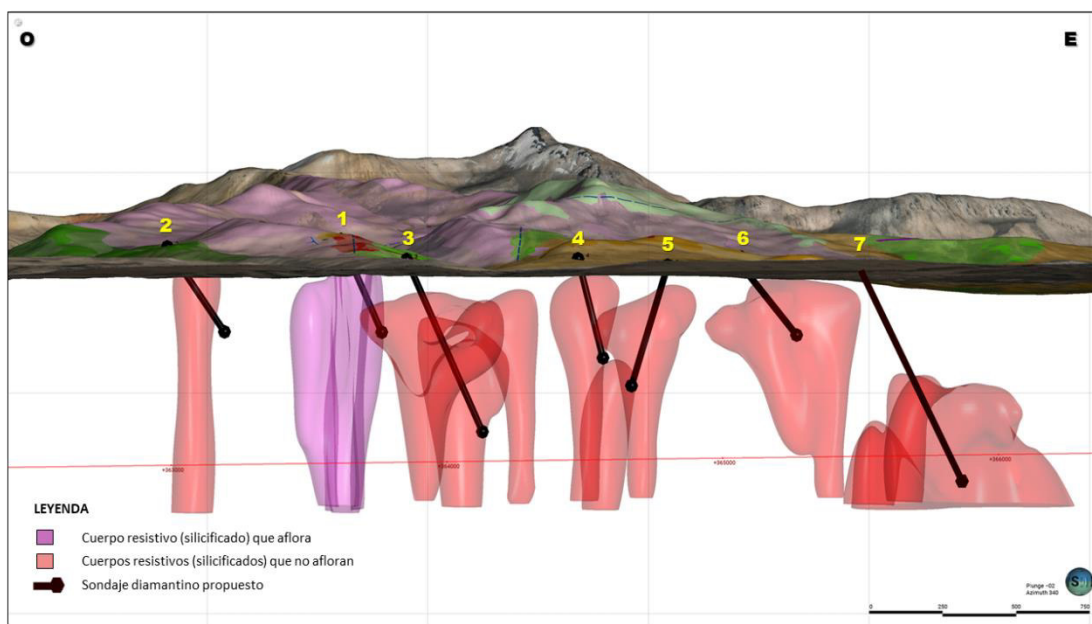


Figura 87. Modelo de targets resistivos con programa de perforación propuesto

5.3. Pruebas de Hipótesis

5.3.1. Hipótesis General.

La hipótesis general indica que, la aplicación del método geofísico audio magnetoteléurico de fuente controlada (CSAMT) contribuye significativamente en la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad

Los resultados de la investigación confirman que el método audio magnetoteléurico de fuente controlada (CSAMT), al ser una variante del método magnetoteléurico (MT) ofrece profundidades de investigación mayores a los métodos convencionales como la polarización inducida - resistividad. En el proyecto Libertad la profundidad del estudio llegó con confiabilidad hasta los 750 m en promedio, lo que permitió identificar cuerpos resistivos de interés por debajo de los 300 metros con un alto potencial prospectivo (ver Figura 85).

También el método CSAMT presenta buena resolución entre los valores de resistividad y conductividad lo que permitió delimitar y vectorizar las alteraciones hidrotermales hacia las zonas de mayor temperatura (feeders), de esta manera se optimizará la distribución, orientación y profundidad de los sondajes en un futuro programa de perforación (ver Figuras 87).

5.3.2. Hipótesis Específica 1

La hipótesis específica 1 indica que, el método geofísico magnético complementa al método CSAMT para que sus resultados en identificar depósitos epitermales de alta sulfuración profundos en el proyecto Libertad sean más eficientes.

Los resultados de la investigación indican que no todas las anomalías resistivas identificadas en el proyecto Libertad con el método CSAMT están asociadas a cuerpos silicificados, los domos andesíticos inalterados (Andesita

2) también presentan esta característica de alta resistividad hasta 7,000 ohm.m. Esta unidad andesítica al tener en su composición minerales magnéticos y ferromagnesianos fue muy bien identificada con el método magnético, determinándose su geometría y distribución en la propiedad minera del proyecto Libertad. De esta manera se pudo separar las anomalías resistivas asociadas a domos andesíticos sin potencial prospectivo, de las anomalías resistivas realmente asociadas a alteración hidrotermal de alta sulfuración y en especial a cuerpos silicificados con posible mineralización económica (ver Figuras 73 y 74).

5.3.3. Hipótesis Específica 2

La hipótesis específica 2 indica que, el método geofísico CSAMT infiere alteraciones hidrotermales que vectorizan a la identificación de los depósitos epitermales de alta sulfuración en el proyecto Libertad.

Efectivamente, tomando como referencia la investigación realizada por Goldie (2020) en el yacimiento Yanacocha, en el proyecto Libertad se determinó los rangos de resistividad que están asociadas a los diferentes tipos de alteración hidrotermal característicos del sistema epitermal de alta sulfuración del proyecto (argílica-montmorillonita / alunita-diquita / silicificación vuggy-masiva). Se realizó esta vectorización en los mapas resistivos y tuvo una buena correlación con las alteraciones mapeadas en los afloramientos, luego se realizó el mismo procedimiento en los perfiles resistivos logrando la vectorización de los ensambles de acuerdo con su temperatura hacia las zonas con silicificación (vuggy o masiva) y sus alimentadores (ver Figuras 80 y 81).

5.3.4. Hipótesis Específica 3.

La hipótesis específica 3 indica que, las herramientas geológicas y geoquímicas aplicadas en el proyecto Libertad apoyan al método geofísico CSAMT en la identificación de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos.

Los resultados de la investigación indican que el control estructural noroeste - sureste fue importante para el emplazamiento de los principales alimentadores de la mineralización. La unidad de tobas riódacíticas es una importante roca huésped para la mineralización diseminada. El estudio de espectrometría de onda corta del infrarrojo (SWIR) fue determinante para correlacionar con las anomalías resistivas CSAMT los halos de alteración y vectorización hidrotermal. También el índice composicional de las alunitas y cociente Pb/Sr, determinaron la vectorización de mineralización en profundidad y un área con mayor fertilidad respectivamente. Finalmente, con la geoquímica se identificaron moderadas anomalías de oro, plata, arsénico, mercurio y antimonio, típicos de un sistema epitermal de alta sulfuración y que coinciden con anomalías resistivas de interés (CSAMT). Ver Figuras 21, 23 y 29).

CONCLUSIONES

- Con la aplicación del método geofísico audio magnetotelúrico de fuente controlada (CSAMT) se encontró en el sector este del proyecto Libertad una anomalía resistiva mayor a 750 ohm.m asociada a cuerpos silicificados a profundidades mayores de 300 metros, con un volumen y potencial para albergar un depósito aurífero económico. La profundidad confiable de investigación del método CSAMT en el proyecto Libertad fue 750 metros, lo que permitió identificar las raíces o alimentadores de los fluidos hidrotermales de los depósitos mineralizados y permitió mejorar el modelo de exploración.
- Se determinó que el método geofísico de magnetometría es un excelente complemento para separar las anomalías de resistividad asociadas a domos andesíticos inalterados sin potencial prospectivo ubicadas al oeste del proyecto, de las anomalías resistivas asociadas a alteración hidrotermal con potencial prospectivo ubicadas en el centro y este del proyecto Libertad. Esto debido a que los domos andesíticos son magnéticos (>23250 nT, o $>10 \times 10^{-3}$ SI) y a su vez altamente resistivos, mientras que los cuerpos silicificados no son magnéticos y de moderada a altamente resistivos.
- Se aplicó el método CSAMT en el proyecto Libertad para identificar anomalías de resistividad asociadas a ensambles de minerales de alteración en un sistema epitermal de alta sulfuración: *i*) caolinita – montmorillonita presentan un rango de resistividad entre 80 y 300 ohm.m, *ii*) alunita – diquita presentan un rango entre 300 y 750 ohm.m, *iii*) sílice vuggy y masiva presentan un rango de resistividad de 750 a 4,000 ohm.m. A su vez estos ensambles de alteración vectorizan a las zonas de mayor interés exploratorio, definiendo targets para un programa de perforación. El método CSAMT también demostró que los domos andesíticos inalterados del sector oeste del proyecto presentan un rango de resistividad entre 500 y 7,000 ohm.m, pero sin potencial prospectivo.

- Se utilizó herramientas geológicas y geoquímicas que contribuyeron con la investigación y complementaron a los métodos geofísicos como, cartografiado geológico semi detallado a la escala 1:5,000, que identificó la litología y distribución de las unidades más receptivas (tobas) para la mineralización que coinciden con las anomalías resistivas de la parte central y este del proyecto; las estructuras y lineamientos de dirección N70° relacionadas a la mineralización aurífera en superficie y N20° relacionadas al emplazamiento de brechas hidrotermales. Otros estudios como la espectrometría de onda corta del infrarrojo (SWIR) que identificó minerales característicos de un sistema epitermal de alta sulfuración sobre las anomalías resistivas, así como, un estudio de petrografía que identificó minerales magnéticos fueron determinantes para lograr los objetivos de la investigación. Por otro lado, el análisis geoquímico de muestras de roca determinó que las anomalías geoquímicas (10 - 605ppb Au, 1.0 - 27.30ppm Ag, 1 – 47 ppm Hg, 100 – 4060 ppm As) se ubican en el sector central del proyecto. De esta manera, las herramientas geológicas y geoquímicas han complementado a los métodos geofísicos para definir que las áreas más prospectivas se encuentran en los sectores central y este del proyecto
- La aplicación del método CSAMT en el proyecto Libertad, contribuyó significativamente para la identificación de 10 targets altamente prospectivos que deben ser probados por un futuro programa de perforación.
- El uso de método geofísico no convencional CSAMT también es un reto económico para el descubrimiento de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos porque el costo es el doble e incluso el triple dependiendo de varios factores con respecto a los métodos tradicionales como el IP-Res. Sin embargo, los beneficios y sobre todo las oportunidades con respecto a las empresas competidores son significativas.

RECOMENDACIONES

- Ejecutar el programa de perforación propuesto en esta investigación, que consiste en 4,000 m de perforación diamantina, distribuidos en 7 sondajes profundos entre 500 y 800 metros cada uno.
- Después del programa de perforación hacer medidas de resistividad a los testigos de perforación, para ajustar los rangos de resistividad de los ensambles de alteración hidrotermal definidos en esta investigación.
- Tomar como una base sólida esta investigación, para adicionar otros métodos geofísicos no convencionales que pudieran optimizar aún más esta metodología.
- Replicar la metodología de esta investigación en otros proyectos epitermales de alta sulfuración, pero deben presentar marco geológico similar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astier, J. (1975). *Geofísica Aplicada a la hidrogeología*. Paraninfo, Madrid.
- 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., Rodríguez, 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.
- Contreras, R. (2017). Estudio magnético, Polarización Inducida y Resistividad en el Yacimiento Minero de Shahuindo: Adquisición, Procesamiento e Interpretación, Periodo 2002 – 2012, Región Cajamarca. [Tesis de Titulo, Universidad Nacional San Agustin de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2534>.
- Corbett, G. (2017). Epithermal Au-Ag and Porphyry Cu-Au Exploration – Short Course Manual: Unpublished, Sept 2017 edition. www.corbettgeology.com
- Chelloti, L., Acosta, N. y Foster, M. (2009). *Cátedra de Geofísica Aplicada, U.N.P.S.J.B., Chubut, Argentina*. [Archivo PDF]. <https://es.scribd.com/doc/102813774/La-Biblia-de-La-Geofisica>
- Garcia, W. (1978). *Geología del cuadrángulo de Puquina, Omate, Huaitire, Mazo Cruz, Pizacoma. Hojas: 34-t, 34-u, 34-v, 34-x, 34-y - [Boletín A 29]*. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/148>
- 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.

Jiang, C., Zhizhong, L., Bilin, T., Xiaoyan, C., Jun, Z., Chunpeng, Z., Weijun, Z. & Fan, Z. (2020). *Using the CSAMT method to predict deep mineralisation of copper and molybdenum: a case study of the Zhongxingtun area in Inner Mongolia, China*. *Exploration Geophysics* 51:2, 203-213. DOI: 10.1080/08123985.2019.1669441

Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science

Martinez, W., Marchera, A., Otero, J., Cervantes, J. y León, W. (2017). *Geología y controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfíricos en el Arco Magmático Occidental Sur del Perú*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Milsom, J. (2003). *Field Geophysics*. Chichester. Wiley

Oyarzún, J. y Oyarzun, R. (2014). *Léxico de Geología Económica: Términos de Uso Común en España e Iberoamérica*. GEMM.

Palacky, G. (1988). Resistivity Characteristics of Geologic Targets. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists.
<https://doi.org/10.1190/1.9781560802631.ch3>

Ponce, D. (2017). Estudio geológico y aplicación del método IP en la exploración del Yacimiento Jésica" (Ocuvi-Puno).[Tesis de Título, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa].
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_2e2cde3fa48fad05759f04af5b121cf7/Description

Quantec Geoscience (2020). Magnetotelluric Overview. [Archivo PDF].

Quantec Geoscience (2020). Logistics Report for a DCIP Pole-Dipole Survey. Libertad Project.

- Quantec Geoscience (2021). Logistics Report for a Controlled Source Audio-Magnetotelluric Survey, Libertad Project.
- Quantec Geoscience. (26 de octubre de 2021). *Veladero Discovery*.
<https://Valadero discovery – Quantec Geoscience>.
- Quantec Geoscience (2021). Logistics Report for a CSAMT (Controlled Source Audio-Magnetotelluric) Survey CSAMT. Proyecto Libertad.
- Quantec Geoscience (2021). Logistics Report for Ground Magnetic Survey. Proyecto Libertad.
- 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.
- Schodded, R. (2021), *Trends in Gold Exploration with a special focus on quantifying Discovery performance*. *MinEx Consulting*. PDAC Post Convention Programming Exploration success and strategy session.
- Sillitoe, R. (2001). Styles of High-Sulphidation Gold, Silver and Copper Mineralisation in Porphyry and Epithermal Environments. PACRIM'99. 305.
- 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.
- Tapia, M. & Mayorga, J. (2022). *Combinación de métodos geofísicos para la exploración de depósitos epitermales de alta sulfuración profundos*. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 2264-2280.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3679

- Ticona, A. (2014). Geología y Aplicación de Métodos de Resistividad en la Exploración de Oro en el Distrito de Yanacocha – Cajamarca. [Informe por Servicios Profesionales, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3258120>
- Viera, F. (2006). El depósito epitermal de Au, Cu, Ag Quimsacocha, provincia del Azuay, Ecuador. [Archivo PDF].
- West, D. & Witherly, K. (1995). *Geophysical Exploration for Gold in Deeply Weathered Terrains; Two Tropical Cases*. Exploration Geophysics. DOI: 10.1071/EG995124
- 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 Geophysics-Chinese Edition.
- Zhang, J., Zeng, Z., Zhao, X., Li, J., Zhou, Y. and Gong, M. (2020). Deep mineral exploration of the jinchuan cu–ni sulfide deposit based on aeromagnetic, gravity, and csamt methods. Minerals, 10(2) doi:10.3390/min10020168