

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Prospección geofísica de polarización inducida y descubrimiento de
zonas mineralizadas del proyecto Virgen del Carmen en Arequipa,
2023**

**Para optar el título profesional de:
Ingeniero Geólogo**

Autor:

Bach. Sebastián RAU UTIA

Asesor:

Mg. Eder Guido ROBLES MORALES

Cerro de Pasco – Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Prospección geofísica de polarización inducida y descubrimiento de
zonas mineralizadas del proyecto Virgen del Carmen en Arequipa,
2023**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Jorge Aladino CARUAJULCA LOMBARDI
PRESIDENTE

Dr. Tito Marcial ARIAS ARZAPALO
MIEMBRO

Dr. Favio Máximo MENA OSORIO
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 273-2025-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE POLARIZACIÓN INDUCIDA Y
DESCUBRIMIENTO DE ZONAS MINERALIZADAS DEL
PROYECTO VIRGEN DEL CARMEN EN AREQUIPA, 2023**

Apellidos y nombres del tesista

Bach. Sebastián RAU UTIA

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. Eder Guido ROBLES MORALES

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Geológica

Índice de Similitud

8 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 21 de mayo del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.05.2025 18:55:34 -05:00

DEDICATORIA

A Dios, quien siempre me guía y protege.

A mis queridos hermanos Ana y Enzo, quienes son mi fuente constante de inspiración. Gracias por ser mi apoyo incondicional y por motivarme a alcanzar mis metas con determinación y amor.

AGRADECIMIENTO

A Dios, cuya presencia ha sido constante en cada paso que he dado.

Quiero dedicar un especial reconocimiento a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han sido mi mayor fuente de apoyo y ejemplo de sacrificio abnegado. Les debo todo lo que he logrado y agradezco infinitamente su constante guía, enseñanzas y apoyo incondicional. Soy quien soy gracias a ellos.

Mi gratitud también se extiende a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, donde tuve el privilegio de formarme como profesional. En particular, quiero expresar mi sincero agradecimiento al Ing. Favio Máximo Mena Osorio, quien no solo me transmitió su pasión por la carrera, sino que también me llenó de orgullo por ser egresado de esta distinguida institución.

RESUMEN

La presente investigación lleva por título Prospección geofísica de polarización inducida y descubrimiento de zonas mineralizadas del proyecto Virgen de Carmen, tuvo como objetivo identificar zonas de anomalía geofísica que se encuentren asociados a la presencia de cuerpos mineralizados utilizando el método geofísico de IP en el proyecto Virgen del Carmen. Corresponde a una investigación básica, exploratoria, descriptiva y correlacional, de método lógico-deductivo, diseño no experimental, con una población de una concesión minera, la muestra consistió de 8 líneas geofísicas de IP. Se tomaron datos geofísicos mediante la configuración Polo – Dipolo, estos datos se descargaron del equipo Elrec Pro 100 mediante el programa Prosys II para su control y validación de los datos IP/Resistividad. Asimismo, se realizó la inversión de datos en el software Res2DInv 5.0, para obtener anomalías reales. Los resultados de la inversión, fueron exportados al software Oasis Montaj ver. 8.4. para generar secciones y mapas de resistividad y cargabilidad, para una interpretación y correlación geológica final. Los resultados muestran que el conglomerado y las tobas presentan están resistividades de 70 a 1000 Ohm*m mientras que la tonalita, granodiorita y monzonita valores de 500 a 4000 Ohm*m. Además, se han propuesto un total de 7 targets de perforación. En conclusión, el estudio de IP realizado en el proyecto Virgen del Carmen de Arequipa ha arrojado resultados positivos para poder inferir y reconocer un cuerpo mineralizado a profundidad con alto grado de cargabilidad de 20 mV/V y resistividad superiores a los 376 Ohm*m, lo que hace de este proyecto un buen candidato para una campaña de perforación y logueo.

Palabras clave: *geofísica, polarización inducida, anomalía, cargabilidad, resistividad, mineralización.*

ABSTRACT

This research, entitled Induced Polarization Geophysical Prospecting and Discovery of Mineralized Zones in the Virgen del Carmen Project, aimed to identify geophysical anomaly zones associated with the presence of mineralized bodies using the IP geophysical method at the Virgen del Carmen project. This research is a basic, exploratory, descriptive, and correlational study using a logical-deductive method and non-experimental design. The study included a mining concession population. The sample consisted of eight IP geophysical lines. Geophysical data were collected using a Pole-Dipole configuration and downloaded from the Elrec Pro 100 computer using the Prosys II software for control and validation of the IP/Resistivity data. Data was also inverted using Res2DInv 5.0 to obtain real anomalies. The inversion results were exported to Oasis Montaj version 8.4 to generate resistivity and chargeability sections and maps for final geological interpretation and correlation. The results show that the conglomerate and tuffs have resistivities ranging from 70 to 1000 Ohm*m, while the tonalite, granodiorite, and monzonite have resistivities ranging from 500 to 4000 Ohm*m. A total of seven drilling targets have been proposed.

In conclusion, the IP study carried out on the Virgen del Carmen project in Arequipa has yielded positive results for inferring and identifying a deep mineralized body with a high chargeability of 20 mV/V and resistivity greater than 376 Ohm*m, making this project a good candidate for a drilling and logging campaign.

Keywords: *geophysics, induced polarization, anomaly, chargeability, resistivity, mineralization.*

INTRODUCCION

La presente tesis intitulada “Prospección geofísica de polarización inducida y descubrimiento de zonas mineralizadas del proyecto Virgen del Carmen en Arequipa, 2023”, tuvo como propósito identificar áreas de anomalía geofísica vinculadas a la presencia de cuerpos mineralizados, esto se realizó con el propósito de llevar a cabo una campaña de perforación y logueo orientado al descubrimiento de yacimientos minerales. Es por ello que se planteó el siguiente problema, ¿Cómo identificar zonas de anomalía geofísica que se encuentren asociados a la presencia de cuerpos mineralizados utilizando el método geofísico de IP en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa?, y se tuvo como hipótesis general de la investigación, que con la aplicación del método geofísico de Polarización Inducida, se pretende encontrar anomalías que nos permitan identificar y discriminar zonas mineralizadas, delimitando así posibles targets de perforación en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa

Con el propósito de facilitar la comprensión del presente estudio, la tesis se ha organizado en cuatro capítulos, que se describe a continuación:

En el Capítulo I se aborda la identificación y definición del problema, junto con la delimitación y formulación del mismo. Además, se describen los objetivos de la investigación, su justificación y las limitaciones del estudio.

El Capítulo II presenta el marco teórico, donde se incluyen los antecedentes de diversas investigaciones, las bases teóricas que explican las variables a analizar, la definición de términos clave y las hipótesis del estudio.

El Capítulo III expone la metodología y las técnicas de investigación, detallando el tipo y nivel de investigación, el método y el diseño empleados, así como la población y muestra. Además, se describen las herramientas y técnicas para la recolección de datos, el procesamiento y análisis de la información, y el análisis estadístico.

El Capítulo IV presenta los resultados y la discusión, incluyendo la comprobación de las hipótesis. Al final, se exponen las conclusiones y recomendaciones del estudio, junto con las referencias bibliográficas utilizadas en la investigación.

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCION

INDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de la investigación.....	2
1.3. Formulación del problema:	3
1.3.1. Problema general.....	3
1.3.2. Problemas específicos	3
1.4. Formulación de objetivos:.....	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Justificación de la investigación.	4
1.6. Limitaciones de la investigación.....	4

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio	5
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	5
2.1.2. Antecedentes Nacionales	11
2.2. Bases teóricas – científicas	16

2.2.1. Métodos Geofísicos.....	16
2.2.2. Principios de polarización inducida	17
2.2.3. Yacimientos tipo IOCG.....	39
2.2.4. Rango de Anomalías para el efecto de IP y Resistividad.....	45
2.3. Definición de términos básicos	46
2.4. Formulación de hipótesis	47
2.4.1. Hipótesis general	47
2.4.2. Hipótesis Específicas	47
2.5. Identificación de Variables	47
2.5.1. Variable Independiente	47
2.5.2. Variable Dependiente.....	48
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	49

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de Investigación.....	50
3.2. Nivel de investigación.....	50
3.3. Métodos de investigación.....	52
3.4. Diseño de investigación	52
3.5. Población y muestra	52
3.5.1. Población.....	52
3.5.2. Muestra:.....	52
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	52
3.6.1. Técnicas.....	52
3.6.2. Instrumentos	54
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	55

3.8. Tratamiento Estadístico.....	56
3.9. Orientación, ética filosófica y epistémica	56

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	57
4.1.1. Caracterización del área de Estudio.	57
4.1.2. Clima	60
4.1.3. Geomorfología	60
4.1.4. Marco geológico regional	60
4.1.5. Geología Local	66
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.	72
4.2.1. Análisis de secciones IP/RES.....	73
4.2.2. Análisis de mapas IP/RES.....	87
4.2.3. Targets de perforación propuesta	106
4.3. Prueba de Hipótesis.....	115
4.3.1. Hipótesis Especificas	115
4.3.2. Hipótesis general	116
4.4. Discusión de resultados.....	117

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: <i>Clasificación de IOCG según depósitos de clase mundial o distritos mineros en función del tipo de magmatismo asociado y a la distancia a los magmas</i>	44
Tabla N° 2: <i>Rangos de anomalías de cargabilidad</i>	45
Tabla N° 3: <i>Rangos de anomalías de resistividad</i>	46
Tabla N° 4: <i>Operacionalización de la variable independiente y variable dependiente</i>	49
Tabla N° 5: <i>Equipos e instrumentos utilizados en la campaña geofísica</i>	54
Tabla N° 6: <i>Software utilizados en la campaña geofísica</i>	55
Tabla N° 7: <i>Accesorios utilizados en la campaña geofísica</i>	55
Tabla N° 8: <i>Coordenadas UTM de los vértices del proyecto Virgen de Carmen</i>	58
Tabla N° 9: <i>Vía de acceso del proyecto Virgen del Carmen</i>	60
Tabla N° 10: <i>Perforaciones propuestas del Proyecto Virgen del Carmen</i>	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: <i>La resistividad ρ es la resistencia R por unidad de volumen</i>	18
Figura N° 2: <i>Resistividad de las disoluciones de NaCl en función de su concentración</i>	20
Figura N° 3: <i>Influencia de la geometría de los poros en la longitud y la complejidad del trayecto de la conducción eléctrica, y su relación con el factor de formación</i>	22
Figura N° 4: <i>Valores de resistividad para algunos minerales comunes, tipos de rocas y materiales cercanos a la superficie</i>	23
Figura N° 5: <i>Diagrama de resistividad para distintos tipos de roca y minerales</i>	24
Figura N° 6: <i>Conductividad para varios tipos de rocas</i>	27
Figura N° 7: <i>Voltaje transitorio V_s del efecto IP después del corte de corriente de excitación I_p</i>	28
Figura N° 8: <i>Fenómeno de polarización de membrana de arcillas</i>	29
Figura N° 9: <i>Membrana polarizada asociada a la constricción entre el grano del mineral</i>	30
Figura N° 10: <i>Membrana polarizada asociada a la constricción entre el grano del mineral</i>	31
Figura N° 11: <i>Medida de la IP por medio del decaimiento del voltaje, usando la medida de Cargabilidad</i>	34
Figura N° 12: <i>Arreglo Polo-Dipolo</i>	37
Figura N° 13: <i>Ejemplo de Distribución no línea en cargabilidad respecto a la posición en el espacio</i>	38
Figura N° 14: <i>Ambiente tectónico de los IOCG</i>	41
Figura N° 15: <i>Modelo tectonomagmático de los diferentes estilos de yacimientos IOCG</i>	43

Figura N° 16: <i>Plano de ubicación del proyecto Virgen del Carmen</i>	58
Figura N° 17: <i>Plano topográfico del proyecto Virgen de Carmen</i>	59
Figura N° 18: <i>Plano satelital del proyecto Virgen del Carmen</i>	59
Figura N° 19: <i>Columna geológico regional</i>	67
Figura N° 20: <i>Columna estratigráfica regional</i>	68
Figura N° 21: <i>Plano geológico local del proyecto Virgen de Carmen</i>	69
Figura N° 22: <i>Plano de alteración del proyecto Virgen de Carmen</i>	71
Figura N° 23: <i>Líneas de polarización inducida y resistividad</i>	73
Figura N° 24: <i>Sección IP/RES – Línea 100</i>	75
Figura N° 25: <i>Sección IP/RES – Línea 200</i>	76
Figura N° 26: <i>Sección IP/RES – Línea 300</i>	79
Figura N° 27: <i>Sección IP/RES – Línea 400</i>	80
Figura N° 28: <i>Sección IP/RES – Línea 500</i>	81
Figura N° 29: <i>Sección IP/RES – Línea 600</i>	84
Figura N° 30: <i>Sección IP/RES – Línea 700</i>	85
Figura N° 31: <i>Sección IP/RES – Línea 800</i>	86
Figura N° 32: <i>Mapa IP/RES – Cota 1850 (-250)</i>	88
Figura N° 33: <i>Mapa IP/RES – Cota 1850 (-200)</i>	89
Figura N° 34: <i>Mapa IP/RES – Cota 1850 (-150)</i>	90
Figura N° 35: <i>Mapa IP/RES – Cota 1850 (-100)</i>	91
Figura N° 36: <i>Mapa IP/RES – Cota 1850 (-50)</i>	93
Figura N° 37: <i>Mapa IP/RES – Cota 1700</i>	94
Figura N° 38: <i>Mapa IP/RES – Cota 1650</i>	95
Figura N° 39: <i>Mapa IP/RES – Cota 1600</i>	96
Figura N° 40: <i>Mapa IP/RES – Cota 1550</i>	98

Figura N° 41: <i>Mapa IP/RES – Cota 1500</i>	99
Figura N° 42: <i>Mapa IP/RES – Cota 1450</i>	100
Figura N° 43: <i>Mapa IP/RES – Cota 1400</i>	101
Figura N° 44: <i>Mapa IP/RES – Cota 1350</i>	103
Figura N° 45: <i>Mapa IP/RES – Cota 1300</i>	104
Figura N° 46: <i>Mapa IP/RES – Cota 1250</i>	105
Figura N° 44: <i>Ubicación de target de perforación de primer orden, línea 200</i>	109
Figura N° 45: <i>Ubicación de target de perforación de primer orden, línea 300</i>	110
Figura N° 46: <i>Ubicación de target de perforación de primer orden, línea 100</i>	111
Figura N° 47: <i>Ubicación de targets de perforación de segundo orden, línea 600</i>	113
Figura N° 48: <i>Ubicación de targets de perforación de segundo orden, línea 700</i>	114

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La exploración de minerales a lo largo del tiempo ha ido adquiriendo una creciente complejidad, lo que ha llevado a la utilización de diversos métodos indirectos para su localización. Entre estos métodos se encuentran los enfoques geofísicos, que permiten identificar estructuras vinculadas a la mineralización del subsuelo, basándose en la detección de propiedades físicas que las distinguen del entorno circundante, como ocurre en el caso del proyecto Virgen del Carmen en Arequipa.

La exploración minera en el área del Proyecto Virgen del Carmen, ubicado en la región de Arequipa, Perú, enfrenta diversos desafíos importantes. En este sentido, la Cía. Minera Cuántica Mining busca conocer la existencia de mineralización a mayor profundidad, ya que los mapeos superficiales han revelado la presencia de minerales en vetas cupríferas asociadas a rocas intrusivas, como la monzonita (Tucto, 2022). A pesar del reconocido potencial geológico de la región, la falta de información precisa sobre la ubicación exacta

de estas zonas mineralizadas constituye un obstáculo significativo para el progreso de los proyectos de exploración minera.

En este contexto, la técnica de polarización inducida (IP) se presenta como un método geofísico clave. La IP ha demostrado ser efectiva en la detección de anomalías subterráneas vinculadas a la mineralización. Su uso ofrece la posibilidad de reducir significativamente los costos de exploración, al proporcionar datos precisos sobre la distribución, profundidad, continuidad y tamaño de las mineralizaciones.

Esta investigación se enfoca en utilizar el método polarización inducida para identificar, de manera indirecta y en base a sus propiedades físicas, nuevas zonas mineralizadas a mayor profundidad en el Proyecto Virgen del Carmen.

1.2. Delimitación de la investigación

Este estudio se enfocará en el Proyecto Virgen del Carmen, ubicado en el distrito de Acarí, provincia de Caravelí, región de Arequipa, Perú.

La delimitación temporal para el presente estudio comprendió el periodo de agosto del 2023 hasta agosto del 2024.

La polarización inducida/Resistividad 2D se empleó como el método principal de prospección geofísica para identificar áreas subterráneas potencialmente mineralizadas. Se utilizó la configuración de electrodos tipo polo-dipolo con el fin de garantizar una cobertura adecuada y una alta resolución en la detección de anomalías.

1.3. Formulación del problema:

1.3.1. Problema general

¿Cómo identificar zonas de anomalía geofísica que se encuentren asociados a la presencia de cuerpos mineralizados utilizando el método geofísico de IP en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la respuesta geofísica tanto en resistividad como cargabilidad de las formaciones geológicas y cuerpos mineralizados en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa?
- b. ¿Cuáles son los posibles targets de perforación sobre zonas de interés en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa?

1.4. Formulación de objetivos:

1.4.1. Objetivo general

Identificar zonas de anomalía geofísica que se encuentren asociados a la presencia de cuerpos mineralizados utilizando el método geofísico de IP en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Delimitar las formaciones geológicas y posibles zonas de interés (mineralización) en el subsuelo, mediante las secciones y mapas de cargabilidad y resistividad del proyecto Virgen de Carmen, Arequipa.
- b. Proponer targets de perforación sobre posibles zonas de interés (mineralización), a partir de los modelos 2D de cargabilidad y resistividad del proyecto Virgen de Carmen, Arequipa.

1.5. Justificación de la investigación.

El objetivo principal de este estudio fue realizar una interpretación geológica de la zona de interés mediante el uso del método de Polarización Inducida. La técnica de IP ha sido comprobada en diversos estudios como una herramienta eficaz para la detección de mineralización subterránea. El propósito fue determinar la presencia o ausencia de zonas mineralizadas y comprender la continuidad de la mineralización. Este análisis proporciona una visión preliminar de la configuración de la mineralización, lo que facilitará la planificación y ejecución de futuras actividades exploratorias de manera más eficiente. Además, los resultados de este estudio podrán contribuir al desarrollo de la metodología geofísica aplicada a la exploración minera.

1.6. Limitaciones de la investigación.

La investigación enfrenta limitaciones debido a la extensión y accesibilidad de las áreas de estudio, las cuales están considerablemente influenciadas por la topografía y el acceso al terreno. Estas restricciones pueden afectar la cobertura espacial. Además, las condiciones climáticas y la disponibilidad de recursos logísticos podrían haber influido en la frecuencia y duración de las mediciones geofísicas, lo que potencialmente impacta la resolución y precisión de los resultados. Para abordar estos desafíos, se implementó estrategias como la selección de ventanas de tiempo óptimas para la recolección de datos y el uso de equipos de alta precisión.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Saparun et al. (2022) en su artículo científico: *“aplicación de la polarización inducida y la resistividad a la determinación de la ubicación de minerales en zonas de roca extrusiva, montañas del sur de Java. Indonesia”*, los investigadores “realizaron mediciones geofísicas usando el método de Polarización Inducida (IP) en el área donde se sospechaba la presencia de mineralización. Se anticipa que el método de inducción de polarización revelara la existencia de una zona mineralizada en el área de Pacitan. Según de los resultados obtenidos, las líneas 1, 4, 5, 6 y 7 mostraron altos valores de cargabilidad, lo que sugirió que estas áreas tienen una alta probabilidad de mineralización. Además, se observó que las zonas con alta resistividad y alta cargabilidad coinciden con áreas mineralizadas. Al analizar las condiciones geológicas en la superficie, también se identificaron afloramientos que indican la presencia de intrusiones y evidencias de alteración. Por lo tanto, los

investigadores concluyeron que el área presenta una mineralización considerable. Al correlacionar las anomalías magnéticas con los datos de IP, los resultados se respaldan mutuamente, lo que confirma que la zona es mineralizada, según los parámetros de resistividad y cargabilidad.”

Ohta et al. (2024) en su artículo titulado: *“Correlación entre la polarización inducida y el contenido de sulfuro en muestras de rocas obtenidas de montículos hidrotermales del fondo marino en la fosa de Okinawa, Japón”*, el cual sostuvieron por objetivo, “Correlacionar la polarización inducida y los sulfuros en rocas obtenidas de montículos hidrotermales del fondo marino en la fosa de Okinawa”. “En este estudio, los investigadores realizaron mediciones de conductividad complejas, análisis de concentración elemental e identificación de contenido mineral en muestras de roca de las zonas hidrotermales activas de la depresión de Okinawa en Japón. Se observó una conductividad compleja significativamente alta, con un componente imaginario pronunciado y un amplio rango de frecuencia, lo cual se atribuye a la polarización inducida que excede el rango de medición disponible. Las muestras de roca contenían una alta concentración de minerales de sulfuro conductores, como pirita, calcopirita y galena. Utilizando el modelo de físico de rocas de Cole-Cole, se estableció una correlación entre la capacidad de carga de la roca y el coeficiente de tiempo de relajación con la fracción de volumen de minerales de sulfuro conductores, lo que mostró una desviación respecto a estudios previos. La intensidad de la polarización inducida resultó ser considerablemente mayor que la esperada según estudios previos con muestras artificiales. Además, se observó una clara correlación positiva entre el coeficiente de tiempo de relajación y el aumento del volumen de sulfuro, probablemente relacionado con las características

geométricas de los minerales de sulfuro. Finalmente, los investigadores sugieren que las rocas en montículos de sulfuro masivos pueden formar cúmulos de sulfuro que alargan la ruta conductora del portador eléctrico.”

Adrian et al. (2022) en su investigación: *“Exploración de un yacimiento de mineral de cobre en Elbistan/Turquía mediante inversión 2D de datos de polarización inducida en el dominio del tiempo mediante una malla no estructurada”*, los cuales sostuvieron por objetivo, “estudiar la resistividad de corriente continua (CC) y polarización inducida en el dominio del tiempo (TDIP) que explora un depósito de mineral de cobre en Elbistan/Turquía.”. “El depósito de mineral se extiende debajo de un valle y presenta una forma diseminada con contenido de sulfuro. Los datos de CC e IP fueron adquiridos utilizando la configuración de matriz polo-dipolo en ocho perfiles paralelos que cruzan el valle de manera perpendicular. Cada perfil tuvo una longitud de 300 m, con una distancia entre perfiles de aproximadamente 50 m. La interpretación de los datos se realizó mediante un algoritmo de inversión DC/TDIP 2D desarrollado recientemente. Este algoritmo de elementos finitos utiliza una regularización local restringida por suavidad en mallas no estructuradas. La solución directa de elementos finitos, así como el problema inverso, se resolvió mediante un solucionador conjugado preacondicionado iterativo. La profundidad de investigación (DOI) se determinó a partir de las sensibilidades acumuladas de los resultados del algoritmo de inversión 2D. Debido a la diseminación del mineral, la inversión 2D de los datos de DC fue ambigua: Sin embargo, debido al contenido de sulfuro, se detectó una fuerte anomalía de cargabilidad asociada con el cuerpo mineralizado. Los autores demostraron que las anomalías de cargabilidad pueden detectarse incluso en ausencia o presencia de anomalías de

resistividad correspondientes. Esta estructura altamente cargable estaba confinada lateralmente. Aunque el límite inferior de la estructura no pudo resolverse con la configuración de campo aplicada, se obtuvo una estimación aproximada de este límite a una profundidad de 90 m mediante un análisis de modelado sintético. Los modelos de cargabilidad 2D son consistentes con la información de pozos existentes.”

Aedo (2022) en su trabajo “*Caracterización de estructuras mineralizadas en el yacimiento vetiforme María Elena mediante magnetometría terrestre, ERT e IP, región de Atacama, Chile*” tiene por objetivo “identificar blancos de perforación de mineralización de Cu en la propiedad minera donde se encuentra el yacimiento María Elena a partir de estudios de magnetometría terrestre, ERT e IP”. “Con el fin de alcanzar este objetivo, el autor llevó a cabo un levantamiento geológico en la zona de estudio, además de realizar dos campañas de terreno destinadas a la obtención de bases de datos magnéticos y de ERT/IP. Posteriormente, dichas bases de datos fueron procesadas para elaborar un mapa de anomalías magnéticas, un modelo tridimensional de susceptibilidades magnéticas y modelos bidimensionales de resistividad.”

“Los mapas magnéticos facilitaron la descripción cualitativa de las fuentes magnéticas y de los lineamientos estructurales presentes en el área de estudio. A partir de esta información, se delimitaron cuatro zonas en las que se planificó la adquisición de datos de ERT e IP. No obstante, la presencia de una capa de suelo extremadamente seca provocó altas resistencias de contacto, lo que resultó en una baja intensidad de corriente inyectada y, en consecuencia, en una reducción en la calidad de los datos obtenidos. Frente a esta situación, se elaboró un modelo tridimensional que permitió estimar numéricamente los valores de la

magnitud de la susceptibilidad magnética de las rocas, a través de un proceso de inversión 3D. Este modelo permitió identificar cuatro cuerpos con baja susceptibilidad magnética, los cuales fueron considerados como objetivos de perforación, ya que las zonas con mineralización de cobre conocidas en el área se encuentran asociadas a este tipo de anomalías. En base a esto, se plantea que, de existir otros cuerpos mineralizados en la región, estos deben presentar una firma geofísica similar a la observada en los cuerpos previamente identificados.”

“En conclusión, la magnetometría terrestre se ha demostrado como una herramienta eficaz para la caracterización de este tipo de yacimientos, ya que sus resultados permiten identificar cuerpos desmagnetizados como posibles blancos de perforación. Este enfoque representa una innovación dentro de este tipo de estudios, dado que el método magnético suele emplearse para detectar zonas con alta susceptibilidad magnética, y no para lo contrario, como se ha hecho en este caso. Por otro lado, el método ERT/IP, bajo las condiciones en las que fue aplicado, no arrojó resultados satisfactorios. Debido a ello, el tesista propuso como alternativa para estudios futuros la aplicación del método electromagnético transitorio (TEM), el cual permitiría superar la limitación impuesta por la presencia de una capa superficial de alta resistividad que dificulta la inyección de corriente en el subsuelo.”

Rojas (2018) en su tesis *“Magnetometría terrestre de alta resolución y polarización en la búsqueda de sistemas de vetas mineralizadas en la laguna verde. Región de Aysén, Chile”* tiene por objetivo “identificar zonas dentro del área de Laguna Verde, donde pueda existir presencia de vetas o sistemas de vetas que pueden estar reflejadas en la ocurrencia de anomalías de contraste magnéticas, en función de toda la información previa disponible y de la

información generada en este proceso de investigación”. “La exploración llevada a cabo por el investigador se estructuró principalmente en cuatro etapas. La primera consistió en evaluar la factibilidad de aplicar el método magnetométrico, considerando los posibles errores asociados a factores ambientales o las condiciones propias del trabajo de terreno. La segunda etapa implicó la planificación logística y la adquisición de datos, calculando en el análisis previo para definir una estrategia concreta de medición. En la tercera etapa se procedió al procesamiento de los datos, aplicando correcciones estándar para este tipo de medición, junto con transformaciones y filtros utilizados para respaldar la interpretación. Finalmente, la cuarta etapa correspondió a la interpretación de los datos procesados, enmarcada dentro de un contexto geológico previamente definido.”

“Como resultado de la exploración, se presenta una extensa serie de mapas de anomalías de contraste magnético, los cuales están proyectados sobre la topografía y el mapa geológico del área de estudio, correspondiente al sector de Cerro Bayo. Estos se acompañan de los filtros y transformaciones aplicados durante el procesamiento de datos. En cuanto a la tomografía de resistividad eléctrica, se exhiben los modelos procesados e invertidos de resistividad y cargabilidad. El tesista concluye que la magnetometría terrestre de alta densidad, aplicada a pequeña escala, puede ser comparable en términos de utilidad y resolución a la aplicación clásica del método aeromagnético a gran escala. En particular, se identificaron anomalías de contraste magnético similares a las observadas en zonas de vetas ya conocidas, las cuales también se presentan en otras áreas, convirtiendo a estas últimas en potenciales blancos de exploración. Asimismo, se identifican lineamientos e intrusiones en distintas zonas de la

cuenca de la Laguna, que coinciden con rasgos topográficos o batimétricos evidentes, como islas. También se detectaron respuestas aisladas cuya interpretación aún permanece abierta.”

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Montalvo (2021), en su tesis profesional *“Modelamiento 3D de datos geofísicos de polarización inducida y resistividad para la caracterización de un yacimiento tipo pórfido en el proyecto Tarata, Tarma Junín.”* el cual tuvo como objetivo general “identificar zonas de anomalía geofísica que se encuentren asociados a la presencia de cuerpos mineralizados utilizando el modelamiento 3D a partir de los métodos geofísicos de IP y Resistividad”. “La metodología empleada en el estudio se basó en la recolección de datos utilizando el arreglo Polo-Dipolo a lo largo de 13 líneas con orientación oeste-este. Posteriormente, dicha información fue procesada mediante el software RES2DINV, lo que permitió generar secciones, mapas y modelos tridimensionales utilizando la plataforma Oasis Montaj. Además, se llevó a cabo un modelado geológico con el objetivo de identificar la distribución de las unidades y estructuras litológicas asociadas a la mineralización. Los resultados obtenidos sugieren que la mineralización está controlada por un sistema de fallas con rumbo N 30° O, el cual afecta principalmente a la secuencia carbonatada de la Formación Copacabana. Esta formación, debido a su textura porosa, constituye un control litológico favorable para la concentración de cuerpos mineralizados. Finalmente, el tesista señala que los contrastes elevados de cargabilidad (>20 mV/V) junto con altas resistividades (>1000 Ohm*m) podrían estar asociados a zonas con vetas, stockworks y cuerpos de reemplazamiento caracterizados por silicificación”.

Salazar (2021), en su investigación “*Evaluación geofísica de polarización inducida IP resistividad y refracción sísmica del proyecto Las Águilas*”, planteo como objetivo general “evaluar las características geológicas del área de interés, determinando la presencia de anomalías geofísicas asociadas a concentraciones de minerales, definir el contacto entre suelo y roca, y establecer la posición donde deben concentrarse los trabajos de exploración.”. “El presente estudio consistió en la obtención de datos de resistividad y cargabilidad, así como la elaboración de un perfil de profundidad a partir del procesamiento de la información recopilada. Este trabajo fue precedido por un reconocimiento geológico y topográfico, que permitió establecer un esquema metodológico adecuado a los objetivos planteados y a las técnicas propuestas. La finalidad principal fue optimizar la calidad y cantidad de información relativa a las propiedades físicas del subsuelo, específicamente resistividades y velocidades de ondas "P". Durante el desarrollo del estudio, se consideraron diversos factores que influyen en la calidad de los resultados, tales como la amplitud de las anomalías, la relación señal/ruido, posibles efectos de acoplamiento electromagnético, la profundidad de investigación, la resolución vertical y horizontal, la sensibilidad al ruido geológico y la presencia de coberturas conductivas. Los resultados obtenidos a partir del manejo del equipo transmisor y receptor indican que, en la mayoría de las secciones, las resistividades moderadas a altas se asocian de acuerdo con la información geológica disponible a depósitos de morrenas. Estas presentan velocidades sísmicas entre 1.5 y 2.5 km/s y un espesor aproximado que varía entre 10 y 80 metros, sugiriendo materiales de compactación media. Por otro lado, las velocidades inferiores a 1 km/s se corresponden con materiales coluviales considerados fácilmente

excavables (Ripabilidad Excavable). Las velocidades entre 1 y 2 km/s indican la presencia de materiales moderadamente compactos y ripables. Aquellos con velocidades entre 2 y 3 km/s reflejan materiales con alteraciones y fracturamientos, caracterizados por una ripabilidad marginal. Finalmente, velocidades superiores a 3 km/s se atribuyen a materiales altamente compactados, posiblemente roca, cuya ripabilidad es considerada volable”.

Contreras (2017), en su tesis profesional *“Estudio magnético, polarización inducida y resistividad en el yacimiento minero de Shahuindo: adquisición, procesamiento e interpretación, periodo 2002 -2012, región Cajamarca”* el cual tuvo como objetivo general “efectuar estudios geofísicos en el yacimiento Shahuindo para determinar la posible presencia de zonas con presencia de mineralización y efectuar una interpretación integrando los métodos geofísicos.”. “La metodología aplicada en el estudio comprendió la recopilación de información, el reconocimiento del área de estudio, la instalación de equipos y materiales, la adquisición de datos, el control de calidad en campo, el procesamiento de la información recolectada y la posterior presentación e interpretación de los resultados”. “En cuanto al estudio magnético, este permitió identificar anomalías con alta susceptibilidad magnética en los corredores mineralizados Norte, Central, Sur y Noroeste del yacimiento Shahuindo. Dichas anomalías se encuentran controladas por fallas inferidas con direcciones predominantes NW-SE, NE-SW y N-S. Asimismo, se detectaron lineamientos y contactos magnéticos relevantes. Estas anomalías estarían asociadas a zonas con elevado contenido de material ferromagnético, lo que sugiere la presencia de minerales de interés económico”. “Por otro lado, los resultados obtenidos a través de los métodos de Polarización Inducida (IP) y Resistividad permitieron

caracterizar la litología y mineralización del yacimiento. Se identificaron zonas con alta cargabilidad, con valores superiores a 14 mV/V, en los corredores mencionados anteriormente. Estas zonas estarían vinculadas a procesos de oxidación y mineralización con alto contenido de sulfuros, y fueron clasificadas como IP-1 a IP-7. En contraste, se localizaron áreas con resistividades elevadas, mayores a 200 Ohm-m, las cuales estarían relacionadas con procesos de silicificación”. “La integración de los resultados magnéticos, de Polarización Inducida y Resistividad permitió delimitar con mayor precisión los corredores mineralizados, destacando principalmente el corredor Central. Finalmente, el investigador concluye que el yacimiento Shahuindo presenta evidencias superficiales de mineralización, manifestadas a través de zonas de oxidación y afloramientos con estructuras de interés económico.”

Prado (2018), en su tesis titulada “*Prospección geológica y geofísica en los sectores de Patara y Coricancha – unidad minera Huachocolpa Uno, subunidad Buenaventura*”, el cual sostuvo por objetivo “interpretar y explicar la relación de la litología, geoquímica, alteraciones y estructuras con las anomalías magnéticas y de cargabilidad al extremo NE en los sectores de Patara y Coricancha”. “La metodología desarrollada por el investigador se estructuró en tres etapas principales. La primera consistió en el mapeo geológico de la veta Bienaventurada, ubicada al noreste del yacimiento en el nivel 4480, donde se logró identificar fenómenos de disturbación, empobrecimiento, fallamiento y un posible desplazamiento de la estructura vetiforme. La segunda etapa correspondió al cartografiado geológico superficial en los sectores de Patara y Coricancha, zonas donde se proyecta la continuidad de la veta en superficie. Durante esta fase, se reconocieron afloramientos de vetas silíceas, rocas volcánicas, así como lutitas

y calizas pertenecientes al Grupo Pucará, además de intrusivos o domos subvolcánicos de composición monzodiorítica. La tercera etapa comprendió la prospección geofísica realizada por la empresa especializada GEOMAD E.I.R.L., que incluyó estudios de magnetometría y polarización inducida/resistividad en 3D. Estos trabajos se llevaron a cabo en un total de 24 líneas geofísicas trazadas en los sectores de Patara y Coricancha, abarcando aproximadamente 58,750 metros lineales de lectura, empleando la metodología de Lateral Offset con configuración Polo-Dipolo. Como resultado, el investigador logro identificar cuatro zonas con anomalías destacadas por valores de cargabilidad superiores a 25 mV/V; tres de estas se ubican en el sector de Patara y una en el sector de Coricancha”.

Fuentes (2017), en su tesis profesional *“Reconocimiento de mineralización profunda de carácter polimetálico mediante métodos de exploración gamma ray y polarización inducida en el proyecto Ichuña – Moquegua.”* El cual sostuvo por objetivo “reconocer la presencia de cuerpos intrusivos profundos con presencia de mineralización de carácter polimetálico utilizando los métodos de exploración Geofísica de Gamma Ray y Polarización Inducida”. “La metodología implementada se centró en la caracterización geológica a partir de un muestreo previo, el levantamiento topográfico del área de estudio, la instalación de la instrumentación correspondiente, la definición del sistema de referencia espacial, así como el diseño y dimensiones de la malla utilizada. Además, se consideraron las propiedades físicas medibles aplicables tanto al método de espectrometría Gamma Ray como al método de polarización inducida (IP)”. “El autor propuso, dentro de esta metodología, el reconocimiento y análisis del control estructural mediante estudios basados en Gamma Ray, con

el objetivo de definir tipos y límites de contacto relacionados con procesos de alteración hidrotermal. Este enfoque permitiría identificar zonas afectadas por lixiviación hidrolítica, indicativas de áreas de oxidación. A su vez, se buscó reconocer contactos relacionados con procesos de silificación, los cuales podrían estar asociados a la presencia de pórfidos a mayor profundidad.” “Una vez determinadas las anomalías mediante Gamma Ray, se procedió con estudios de polarización inducida para confirmar la existencia de estructuras polimetálicas con un alto grado de mineralización, permitiendo además su modelamiento y la identificación de su orientación”. “Finalmente, el investigador concluyó que los estudios de Polarización Inducida arrojaron resultados favorables, al evidenciar un cuerpo con altos valores de cargabilidad y resistividad a profundidad. Esta respuesta geofísica es característica de sistemas porfiríticos mineralizados, lo cual posiciona al proyecto como un candidato sólido para la ejecución de una futura campaña de perforación y logueo.”

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Métodos Geofísicos.

Zhdanov (2021) menciona que “la geofísica de exploración cumple una función esencial en la identificación de reservas minerales. Se reconoce ampliamente que numerosos yacimientos minerales de gran tamaño, caracterizados por firmas geofísicas marcadas, ya han sido localizados. Sin embargo, los descubrimientos futuros implican retos significativos, ya que suelen encontrarse en zonas cubiertas, remotas y con señales geofísicas menos evidentes. Ante estos desafíos, la exploración actual exige el desarrollo de nuevas metodologías geofísicas que incrementen la eficacia del proceso y faciliten el hallazgo de nuevos yacimientos”.

Por otro lado, Eldosouky et al. (2023) manifiestan que “las técnicas geofísicas, como las sísmicas, magnéticas, gravimétricas, entre otras, han sido ampliamente utilizadas en la detección de recursos minerales. La combinación de dos o más conjuntos de datos geofísicos permite ampliar significativamente los límites del conocimiento sobre las estructuras geológicas subterráneas, superando las limitaciones de trabajar con un único tipo de dato. La integración de distintas propiedades geofísicas facilita la generación de imágenes más precisas de la geología profunda, al superponer los resultados obtenidos dentro de un mismo sistema de coordenadas.”

2.2.2. Principios de polarización inducida

Método Geoelectrico

Orellana (2005) menciona que “el método geoeléctrico se basa en la realización de mediciones en la superficie del terreno con el fin de analizar la distribución en profundidad de ciertas magnitudes electromagnéticas.” Aunque es posible trabajar con distintas variables, combinado se emplea la distribución de la resistividad eléctrica aparente (ρ) como parámetro principal para este tipo de estudios. Dentro de los métodos más utilizados se encuentran los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), las Calicatas Eléctricas (CE) y las Tomografías eléctricas, también conocidas como Perfilaje Continuo.

Resistencia eléctrica

Bérubé (1997) señala que “la ley de Ohm, habitualmente aplicada en circuitos eléctricos, constituye el principio físico fundamental en el que se sustentan todos los métodos geoeléctricos.”

$$\Delta V = R.I$$

Dónde: ΔV , es la diferencia de potencial (en voltios);

I , es la corriente (en amperios)

R , es la resistencia eléctrica en ohm (Ω)

La resistencia es entonces la relación del voltaje sobre la corriente:

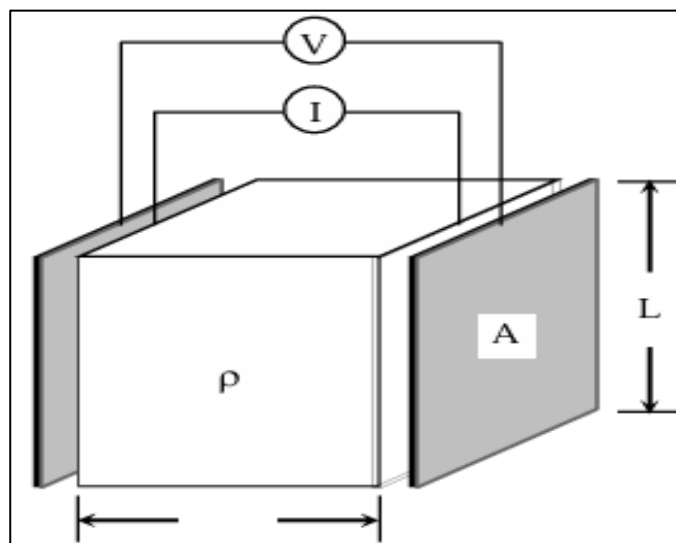
$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Resistividad

Bérubé (1997) indica que “la resistencia, por sí sola, no proporciona información sobre las dimensiones ni sobre la naturaleza del material que atraviesa la corriente eléctrica. Para caracterizar adecuadamente la propiedad física de un medio tridimensional, es necesario introducir el concepto de resistividad. La resistencia de un medio varía de forma directamente proporcional con la longitud “ L ” del trayecto recorrido por la corriente, y de manera inversamente proporcional al área “ A ” de la sección transversal atravesada.” Ver figura 1.

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

Figura 1: La resistividad ρ es la resistencia R por unidad de volumen



Fuente: Pierre Bérubé, (1997)

“Donde la constante de proporcionalidad es la resistividad ρ “Rho”. Esta nos muestra la dificultad de la corriente en atravesar el medio:”

$$P = R \cdot \frac{A}{L} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L} \text{ (en } \Omega\text{m)}.$$

Resistividad aparente

Bérubé (1997) define a la “en un suelo homogéneo, la medición sencilla sería suficiente para determinar su resistividad. Sin embargo, dado que esta condición no se presenta en los suelos naturales, la resistividad obtenida puede variar dependiendo de la ubicación del levantamiento o de la profundidad alcanzada. Por esta razón, se introduce el concepto de resistividad aparente, la cual se calcula utilizando la fórmula correspondiente, bajo el supuesto de que el suelo es homogéneo. Cabe señalar que la resistividad aparente no refleja necesariamente los valores reales de resistividad de los distintos componentes del suelo, ni representa un promedio directo de estos. Más bien, actúa como un valor normalizado que depende de la geometría del sistema de medición.

La resistividad aparente está definida por:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \text{ (en } \Omega\text{m)}$$

Donde K es el factor geométrico de la configuración de electrodos utilizado (polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, etc.) para realizar la medición (unidad: m²/m ó m).

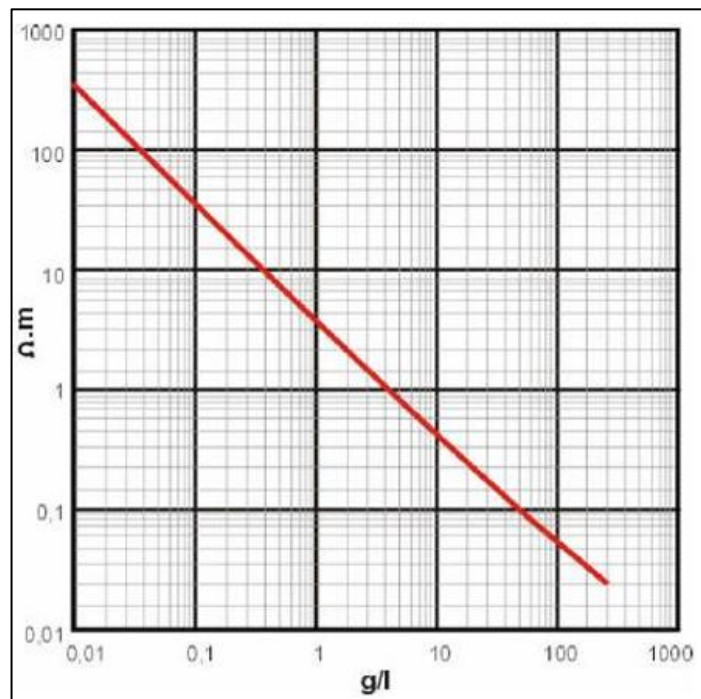
Resistividad de materiales geológicos

Villareal et al. (2016) define que “las rocas, entendidas como un conjunto de agregados minerales, suelen comportarse como materiales aislantes en la mayoría de los casos, debido a que sus componentes están formados predominantemente por el grupo de los silicatos (SiO₄). No obstante, existe una

excepción representada por aquellas rocas que contienen minerales semiconductores, como las menas metálicas, cuya presencia en la Tierra es relativamente escasa.”

Carrasco (2023) indica que “la resistividad de las rocas es uno de los parámetros físicos que muestra mayor variabilidad en comparación con otros parámetros empleados en los estudios geofísicos. Factores como el grado e intensidad de fracturación, la porosidad, el nivel de saturación con agua y la presencia de sales disueltas en distintas litologías influyen significativamente en los valores de resistividad (ver figura 2). Es importante considerar que las rocas no están formadas únicamente por un esqueleto sólido mineral, sino que también contienen líquidos y gases en su estructura.”

Figura 2: Resistividad de las disoluciones de NaCl en función de su concentración



Fuente: Carrasco, (2023)

Dentith & Stephen (2014) hace mención que “las porosidades primarias, correspondientes a la porosidad natural, y las secundarias, como fracturas y

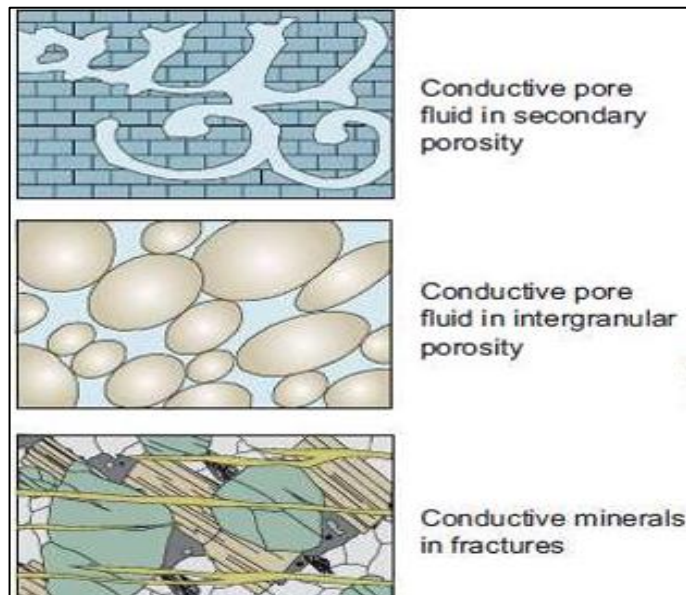
diacclasas, presentes en las distintas litologías, suelen encontrarse total o parcialmente ocupadas por líquidos, principalmente soluciones acuosas con diversas sales minerales, siendo el cloruro de sodio (NaCl) una de las más comunes. La cantidad de humedad y el contenido de sales en los poros de las rocas desempeñan un papel fundamental en la variación de la resistividad de los materiales.” ver figura 3.

La variación de la resistividad en las rocas depende, en términos generales, de varios factores fundamentales entre los cuales se destacan:

- Resistividad de los minerales que componen la roca.
- La resistividad de los fluidos presentes en los poros del material rocoso.
- El nivel de humedad contenido en la roca.
- El grado de porosidad.
- La textura granular de la roca.

La presencia de impregnaciones de minerales metálicos en las rocas puede reducir significativamente su resistividad, generando variaciones notables en la roca encajante. Por el contrario, la presencia de minerales no metálicos como el cuarzo tiende a incrementar los valores de resistividad, especialmente en procesos geológicos como la silicificación.

Figura 3: *Influencia de la geometría de los poros en la longitud y la complejidad del trayecto de la conducción eléctrica, y su relación con el factor de formación*



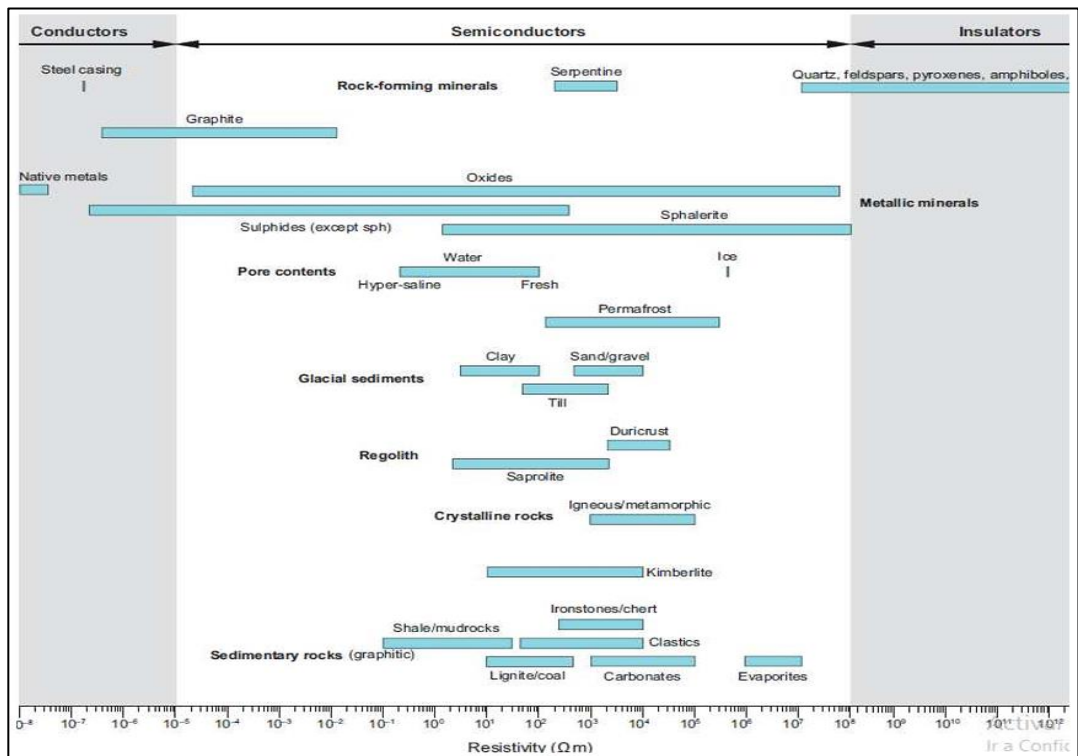
Fuente: Dentith & Stephen (2014)

Castilla (2024) indica que las “rocas sedimentarias, se caracterizan en general por presentar bajos valores de resistividad y alto contenido de humedad elevada, lo cual las diferencia de otros tipos de rocas.”

En contraste, las rocas ígneas, “exhiben resistividades elevadas, atribuibles a su naturaleza cristalina y a la escasa porosidad intergranular que poseen. No obstante, esta condición puede modificarse significativamente cuando dichas rocas contienen fracturas o discontinuidades, ya que estas estructuras facilitan la circulación de fluidos, lo que conlleva una disminución de su resistividad.”

Por su parte las rocas metamórficas “muestran resistividades intermedias, situadas entre las de las rocas ígneas y sedimentarias. En este caso, la resistividad está fuertemente influenciada por el grado de metamorfismo: a mayor grado metamórfico, mayor será la resistividad, como ocurre con los gneises; mientras que grados más bajos, como en los esquistos, presentan resistividades menores.

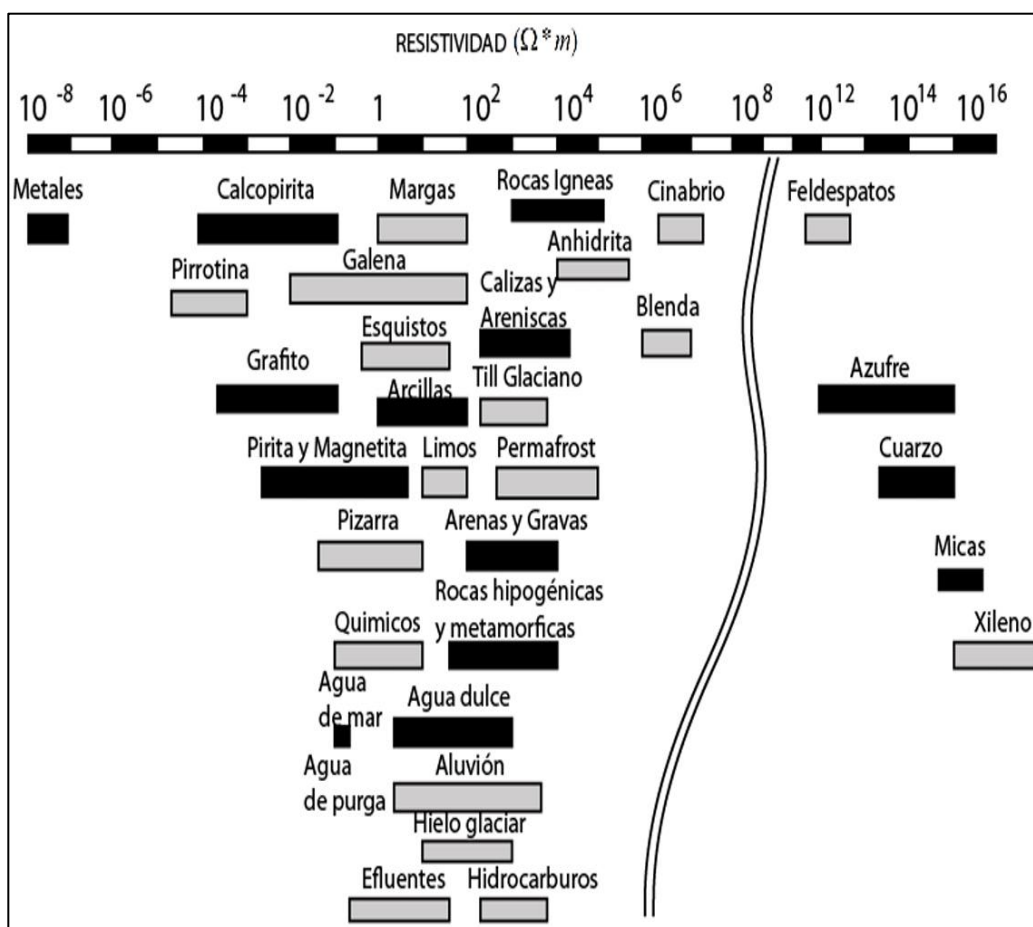
Figura 4: Valores de resistividad para algunos minerales comunes, tipos de rocas y materiales cercanos a la superficie



Fuente: Dentith & Stephen (2014)

Orellana (1982) “muestra en un diagrama de la variación de resistividades controladas por factores como tipo de roca, contenido de agua, fracturación o alteración, y la presencia de minerales metálicos, en su mayoría sulfuros, que son buenos conductores de electricidad.” ver figura 5.

Figura 5: Diagrama de resistividad para distintos tipos de roca y minerales



Fuente: Orellana (1982)

Por otro lado, Telford et. al. (1990) menciona que “existen cuatro tipos de conductores: los metales y los semiconductores, que presentan una conductividad de tipo electrónico; y los dieléctricos junto con los electrolitos, cuya conductividad es de naturaleza iónica. Los tipos de conductores más comunes, así como los minerales con los que se asocian, son los siguientes:”

- “Metales (Au, Ag, Cu, Sn, grafito): resistividades extremadamente bajas.”
- “Semiconductores (calcopirita, bornita, pirita, magnetita, pirrotina): requieren la aplicación de un campo eléctrico intenso para que se produzca la conducción.”

- “Dieléctricos (micas, feldespatos, cuarzo, calcita, silicatos en general): Presentan resistividades de unos $10^7 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.”
- “Electrolitos (solución salina): La conducción eléctrica en estos casos es facilitada por los iones positivos (cationes) y negativos (aniones) disueltos en el medio acuoso. La resistividad de un electrolito se define como la resistencia eléctrica ofrecida por un volumen cúbico de un metro de lado, al establecerse una diferencia de potencial de un voltio entre dos caras opuestas del cubo. de electrolitos de forma cúbica y un metro de lado cuando se establece una diferencia de potencial de un voltio entre dos caras opuestas”.

Conductividad eléctrica

Castilla (2024) define que “los materiales geológicos que conforman la corteza terrestre exhiben una amplia variedad de propiedades eléctricas. Entre estas, la conductividad eléctrica se destaca como un parámetro de gran relevancia en los estudios de prospección geofísica. Esta propiedad es la magnitud inversa a la resistividad, y se representa mediante la expresión: $\gamma = 1/\rho$ donde la unidad de medida es el siemens por metro (Sm/m). La conductividad eléctrica describe el grado de facilidad con el que una corriente eléctrica puede desplazarse a través de un determinado medio.”

Propiedad de conductividad en los materiales geológicos

Aguilef, (2012) indica que “los elementos presentes en las rocas o suelos que permiten la conducción de corriente eléctrica poseen dicha capacidad debido a que pueden transportar cargas eléctricas a través de electrones o iones.” La mayor parte de los materiales que conforman la corteza terrestre presentan una baja conductividad, por lo que los electrolitos que ocupan los poros de las rocas

adquieren un papel fundamental. En este contexto, se distinguen dos formas de conductividad: la electrónica y la iónica.

Conductividad electrónica:

Metales: Estos materiales se distinguen por su elevada conductividad, característica propia de minerales nativos como el oro (Au), la plata (Ag), el cobre (Cu) y el estaño (Sn), cuyos valores de resistividad se encuentran en el rango de 10^{-8} a 10^{-7} ohm*m. Esta alta conductividad se debe a que su estructura cristalina permita el libre desplazamiento de electrones.

Semiconductores: La resistividad de estos minerales está influenciada por la cantidad de impurezas presentes. Generalmente, no se encuentran de forma aislada, sino asociados a minerales no metálicos conocidos como ganga. En su mayoría, se trata de sulfuros metálicos como la pirita, calcopirita, calcosina, bornita, pirrotita o galena, cuyos valores de resistividad varían entre 10^{-5} y 1 ohm*m.

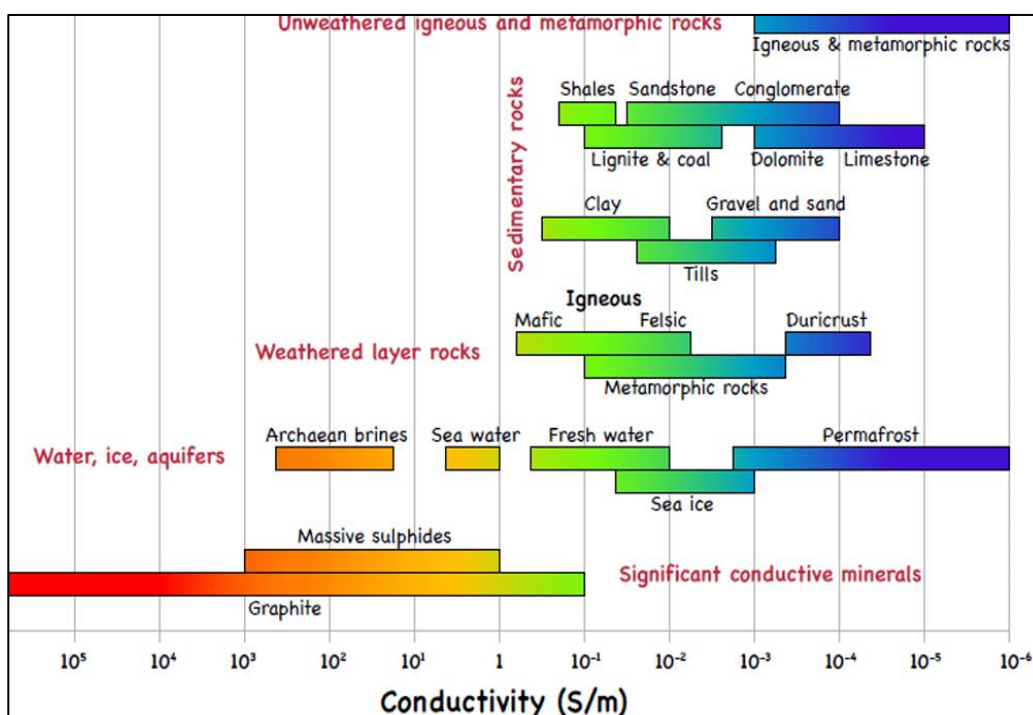
Conductividad iónica:

Dieléctricos: Estos materiales presentan una alta resistividad, e incluso pueden comportarse como aislantes, debido a que sus electrones están fuertemente ligados a los átomos. Se caracterizan por tener enlaces no metálicos, como es el caso del cuarzo, las micas, el azufre, los feldespatos y los anfíboles, con resistividades cercanas a 10^{-8} ohm*m.

Electrolitos: La conductividad en disoluciones acuosas se produce por el movimiento de electrones, siendo los cationes y aniones los principales portadores de carga eléctrica. Las aguas presentes en la corteza terrestre contienen una gran variedad de iones, entre los que destacan el cloruro (Cl^-) y el sodio (Na^+).

Sus valores de resistividad son altamente variables y dependen, principalmente, del contenido de agua y del nivel de salinidad.

Figura 6: Conductividad para varios tipos de rocas

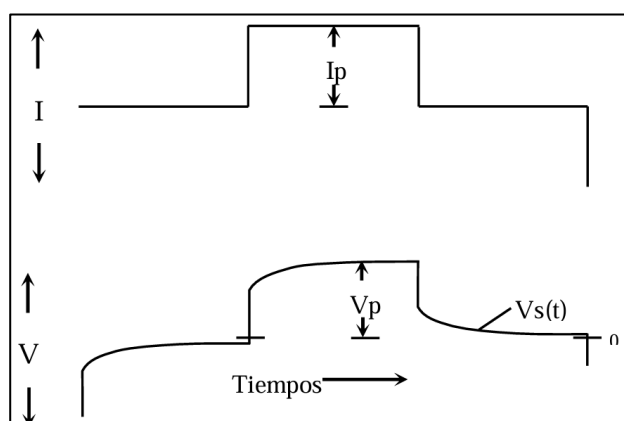


Fuente: Akram, Attia, & Selim (2022)

Fenómeno de polarización inducida

Bérubé, (1997) indica que “el fenómeno de polarización inducida en el dominio del tiempo se evidencia a través de una disminución del potencial presente en el suelo una vez interrumpida la corriente de excitación.”

Figura 7: *Voltaje transitorio V_s del efecto IP después del corte de corriente de excitación I_p .*



Fuente: Pierre Bérubé, (1997)

Además, menciona que “Al inyectar una corriente eléctrica I en el suelo mediante un par de electrodos de inyección, la diferencia de potencial resultante ΔV en los electrodos de detección, guarda una relación proporcional con la resistividad r de las formaciones geológicas analizadas. Fue Conrad Schlumberger quien, en 1910, observó por primera vez que dicha diferencia de potencial no se anulaba completamente tras interrumpir la corriente. Esta persistencia puede explicarse por dos fenómenos principales de polarización: la polarización de electrodos, asociada a minerales con brillo metálico, y la polarización de membrana, característica de minerales arcillosos.”

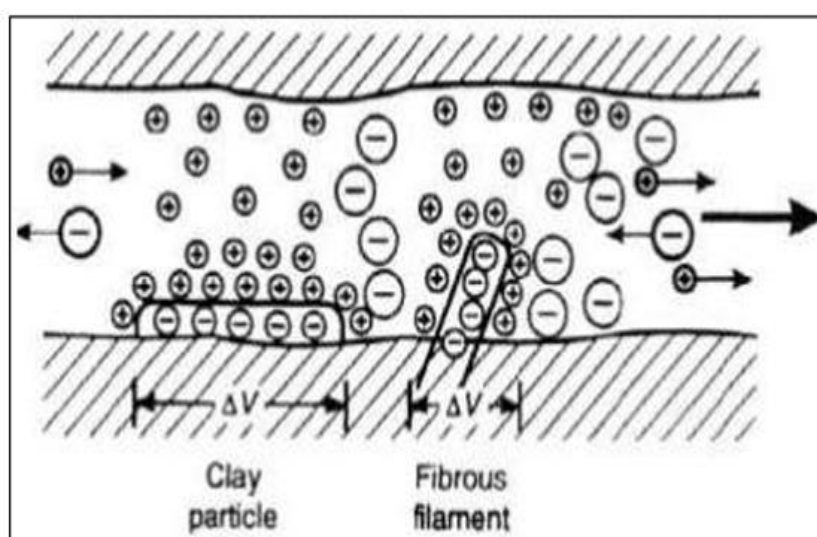
Dos tipos de polarización han sido identificados: Polarización de Membrana y Polarización Electrónica.

Telford et al. (1990) indica que “la **polarización por membrana** se refiere a la formación de una barrera originada por la acumulación de iones en las cercanías de una carga de signo opuesto presente en las paredes de materiales porosos. Este fenómeno se presenta, por ejemplo, en formaciones con presencia de arcillas, las cuales suelen estar cargadas negativamente. Esta carga negativa

atrae cationes, generando una zona que dificulta el paso libre de las cargas eléctricas.”

Reynolds (1997), hace referencia que “al aplicar una corriente eléctrica, los iones positivos tienden a desplazarse, y al cesar dicha corriente, estos iones se redistribuyen. Este proceso provoca una tensión entre los dos electrodos en contacto con la arcilla.” ver figura 8.

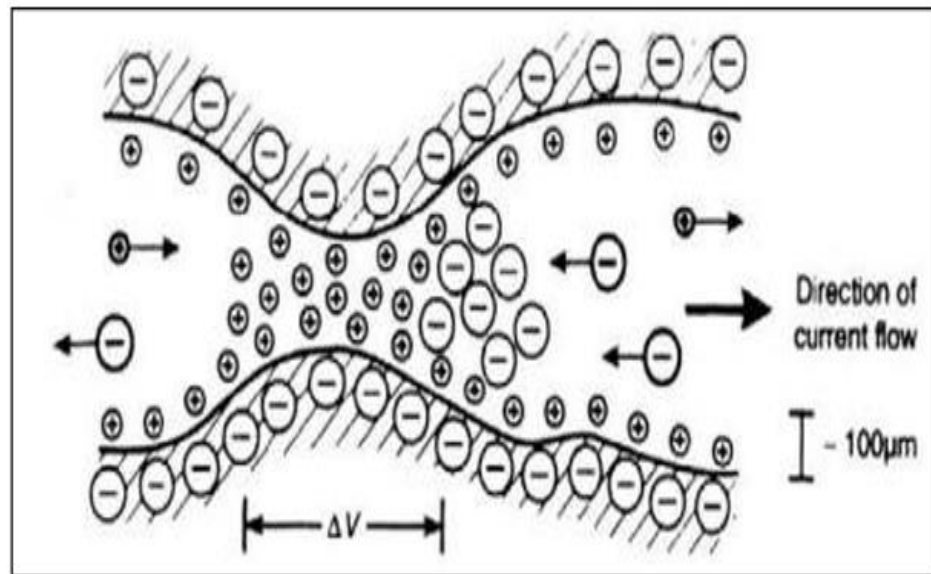
Figura 8: *Fenómeno de polarización de membrana de arcillas*



Fuente: Reynolds, (1997)

Asimismo, indica “que la polarización de membrana es la constricción que se produce dentro de la garganta del poro de un grano mineral. En este caso, la carga negativa se distribuye en la interfaz entre el mineral y el fluido contenido en los poros, a su vez la carga positiva endicho fluido es atraída por la superficie de la roca, mientras que las cargas negativas son repelidas. Al aplicar un voltaje, se observa una reducción en el diámetro de la garganta del poro (constricción). Como resultado, los iones negativos se alejan de la zona estrechada, mientras que los iones positivos aumentan su concentración en esa región, generando así una diferencia de potencial a lo largo de la obstrucción.” Ver figura 9.

Figura 9: *Membrana polarizada asociada a la constricción entre el grano del mineral*

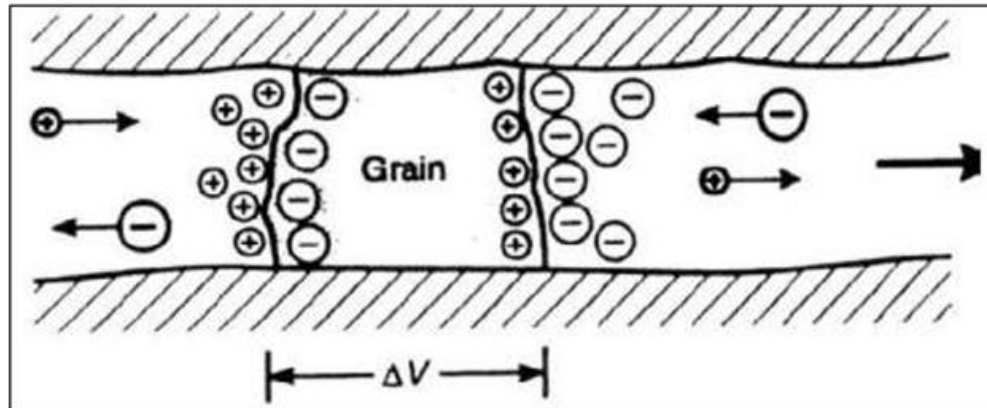


Fuente: Reynolds, (1997)

Parasnis (1997) menciona que la “**polarización electródica** es un tipo de polarización que se manifiesta por la presencia de granos metálicos en los conductos porosos del medio. En este contexto, las cargas iónicas se acumulan en la interfaz entre el electrolito y las partículas metálicas, generan una tensión que se opone al flujo eléctrico. Cuando se interrumpe la corriente, queda un potencial residual, producto de las cargas que han quedado retenidas en esa región. Con el tiempo, este potencial disminuye de manera continua debido a la difusión de las cargas a través del electrolito en los poros.”

Por otro lado, Reynolds (1997) da un “ejemplo clásico de este fenómeno se observa en los pórfidos cupríferos, donde los sulfuros diseminados tienden a acumularse o depositarse en zonas con circulación de fluidos. Al aplicar una diferencia de potencial, los granos metálicos presentes se polarizan electrónicamente, actuando como una barrera que limita la movilidad de los iones en el medio poroso.” Ver figura 10.

Figura 10: *Membrana polarizada asociada a la constricción entre el grano del mineral*



Fuente: Reynolds, (1997)

“Ambos efectos de polarización suelen coexistir en entornos donde predomina la conducción electrolítica. No obstante, a partir de las observaciones realizadas, no es posible diferenciar claramente entre uno y otro fenómeno.”

“La magnitud del efecto de polarización está influenciada por diversos factores, tanto internos como externos al propio fenómeno. Entre los más relevantes se encuentra la corriente eléctrica I , la cual es proporcional al voltaje aplicado; por lo tanto, una mayor corriente genera un efecto de polarización más intenso. Al tratarse de un fenómeno que ocurre en la superficie de contacto, su impacto es más significativo en minerales diseminados que en aquellos de tipo masivo, debido a la mayor superficie disponible para la interacción. Asimismo, se ha comprobado que la polarización es sensible a la frecuencia de la fuente aplicada: a frecuencias más altas, el efecto disminuye, lo que conlleva una reducción en la resistividad media, atribuida a la mayor movilidad de los iones en solución a través de las barreras. Esta propiedad es aprovechada en los estudios de prospección en el modo de frecuencia, donde se mide la resistividad aparente utilizando dos frecuencias distintas.”

“Una propiedad adicional del efecto de polarización está relacionada con la porosidad de la roca huésped. A medida que la porosidad aumenta, el efecto de polarización disminuye, ya que existe un mayor número de conductos para la migración de partículas cargadas a través del fluido. Esta relación sugiere que el efecto de polarización es más pronunciado en cuerpos ígneos, que son más densos que las rocas estratificadas. Sin embargo, esta condición no es absoluta, ya que al reducirse la porosidad hasta un punto en el que la movilidad de las partículas tiende a cero, la conducción electrolítica también disminuye excesivamente. Además, la proporción de arcillas influye en el efecto de polarización inducida y en el tipo de polarización por membrana, ya que las arcillas actúan como superficies acumuladas de iones positivos debido a su capacidad para distribuir cargas negativas en su superficie externa. Es decir, a mayor proporción de arcillas, el efecto de polarización aumenta. No obstante, si la proporción de arcillas es demasiado alta, se pueden formar barreras continuas que dificultan la movilidad de los iones y su posterior acumulación.”

Prospección mediante IP

Kenneth et al, (2009) indica que “la Polarización Inducida (IP) ha sido utilizada en una variedad de aplicaciones desde la década de 1950. Inicialmente, se aplicó principalmente para la detección de sulfuros en la exploración de pórfidos de cobre. Sin embargo, en la actualidad, se emplea para el mapeo de sulfuros diseminados y alteraciones asociadas a metales preciosos.”

“La exploración de metales preciosos se realiza utilizando dispositivos tetra-electródicos, dependiendo de los objetivos de la prospección. Para la identificación de objetivos pequeños, el arreglo Wenner es el que ofrece una cobertura adecuada en términos de profundidad. No obstante, las observaciones

de anomalías se ven limitadas por la profundidad alcanzada por cada tipo de disposición eléctrica. El arreglo dipolo-dipolo, por su parte, proporciona una excelente combinación de velocidad, cobertura lateral y vertical, así como una mayor densidad de datos para su interpretación posterior. Por lo tanto, el arreglo dipolo-dipolo es probablemente el más utilizado en la prospección mediante Polarización Inducida (IP) en la actualidad.”

Zonge et al, (2005) menciona que *“las mediciones de Polarización Inducida (IP) se expresan en términos de resistividades y polarización aparentes. El término "aparente" se utiliza para indicar que el valor obtenido depende de los arreglos geométricos empleados en la medición, y no refleja el valor real del punto muestreado.”*

Además, Chelotti et al., (2010) indica “que normalmente, las mediciones de Polarización Inducida (IP) se realizan mediante calicatas a varias profundidades de interés, al igual que en las tomografías eléctricas (TE). Sin embargo, a partir del impulso que estos métodos recibieron en 1948 por parte de Newmont Exploration en los Estados Unidos, surgieron variantes prospectivas que operan en dos dominios distintos.”

A continuación, se describen estos dominios:

a. Por Dominio de tiempo

Chelotti et al., (2010) hace referencia que el dominio de tiempo “se refiere a un proceso en el que se aplica una corriente continua al terreno y se registra el descenso del voltaje en un par de electrodos de potencial después de interrumpir la inyección de corriente.”

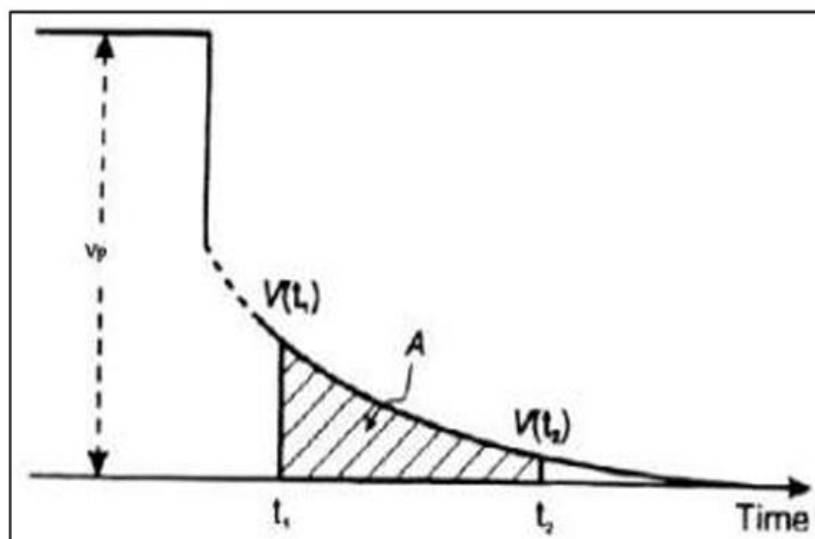
Telford et al., (1990) menciona que la medida de efecto de IP es la cargabilidad “m” y se expresa usualmente como:

$$m = \frac{V_s}{V_p} \left(\frac{mV}{V} \right)$$

Donde V_p , representa del voltaje normal mientras la corriente fluye y V_s es el voltaje residual en un instante especificado t después de interrumpir la corriente. Obtener la medida de decaimiento de V_s de forma directa resulta complicado desde un punto de vista instrumental. Por esta razón, se registra la curva de descenso durante un intervalo de tiempo determinado y se calcula el área comprendida entre dos límites temporales (t_1 , t_2). Al dividir este resultado por el potencial normal V_p se obtiene la medida de la integral de tiempo de la IP, en algunos textos llamada Cargabilidad (m) con unidades de tiempo (milisegundos), ver figura 11. La ecuación se expresa como:

$$m = \frac{1}{V_p} \int_{t_2}^{t_1} V_s(t) dt$$

Figura 11: Medida de la IP por medio del decaimiento del voltaje, usando la medida de Cargabilidad



Fuente: Reynolds, (1997)

b. Por Dominio de frecuencia

Fuentes (2017) indica que “cuando se realizan mediciones de Polarización Inducida (IP) utilizando corriente alterna, se dice que se está trabajando en el dominio de frecuencias. El principio fundamental de este enfoque es que los fenómenos de polarización, tanto "de electrodos" como "de membrana", requieren un tiempo específico para desarrollarse. Así, al aplicar una corriente sinusoidal a un terreno polarizable, se observará un desfase entre la tensión medida entre los electrodos M Y N, en comparación con la intensidad que fluye a través de los electrodos A y B. Cuando se emplea un dispositivo tetraelectródico en un terreno polarizable, la resistividad aparente observada disminuirá conforme aumenta la frecuencia de la corriente aplicada.”

Telford t al., (1990) menciona que “la variación de la resistividad en función de la frecuencia es más pronunciada cuando esta es inferior a 103 Hz. A este fenómeno se le conoce como el efecto de frecuencia (FE).”

Este efecto se expresa por la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{V_{lo} - V_{hi}}{V_{hi}}$$

Donde V_{hi} (high) y V_{lo} (low) son las respuestas del estado de voltaje en el lugar de alta y baja de frecuencias filtrada respectivamente.

Además, Telford t al., (1990) indica que “la resistividad aparente a baja frecuencia (ρ_{lo}) es mayor que la resistividad aparente a alta frecuencia (ρ_{hi}), debido a que las resistividades en las rocas tienden a disminuir conforme aumenta la frecuencia de las corrientes alternas. Así, ambas resistividades aparentes se emplean para calcular el efecto de frecuencia (FE), el cual puede expresarse como un porcentaje (PFE).”

$$PFE = FE * 100\%$$

Telford et al., (1990) señala que “el Factor Metálico (MF) es otro parámetro utilizado en el método del dominio de frecuencia, el cual corrige la influencia de la resistividad de la roca caja. Se define como el efecto de frecuencia (FE) dividido por la resistividad aparente a baja frecuencia (ρ_0). Sin embargo, el resultado de esta división es muy pequeño, por lo que se multiplica por $2\pi * 10^5$. Dado que la resistividad se expresa en Ω metro, la unidad del factor metálico es mhos por pie, aunque se prefiere expresarlo en mhos por metro.”

El Factor Metálico se expresa como:

$$MF = 2\pi * 10^5 \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a0} \cdot \rho_{a1}} = 2\pi * 10^5 \frac{FE}{\rho_{a0}}$$

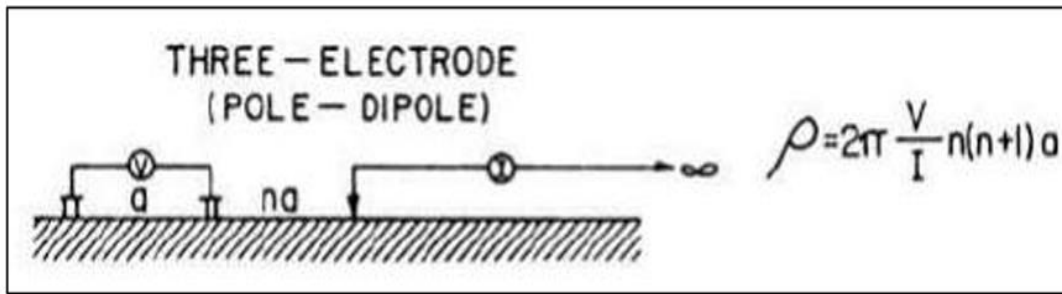
Donde ρ_0 y ρ_1 son las resistividades aparentes; $\rho_0 > \rho_1$.

Arreglo de sensores para obtención de medidas IP

a. Arreglo Polo – Dipolo

Zonge et al, (2005) describe que el arreglo polo-dipolo “ofrece una mejor calidad de señal en comparación con el arreglo dipolo-dipolo. Sin embargo, presenta mayores dificultades en el análisis e interpretación de las pseudosecciones”. Ver figura 12.

Figura 12: *Arreglo Polo-Dipolo*



Fuente: Sumner et al., (1980)

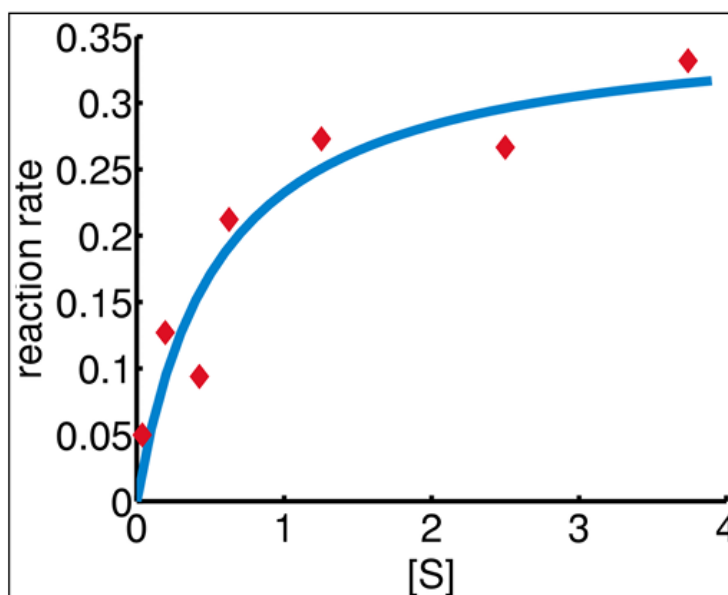
b. Modelamiento de inversión IP

Fuentes (2017) indica que “el modelamiento por inversión de datos de IP, dada la presencia de una topografía no uniforme, es necesario invertir los datos de resistividades aparentes y cargabilidad con el fin de obtener secciones representativas de resistividad y cargabilidad reales. Para ello, se empleó modelado numérico utilizando el software Geotomo RES2DINV/RES3DINV. Durante el proceso de inversión, se prestó especial atención a la elección de los algoritmos de inversión, así como a la consistencia y repetibilidad de los resultados obtenidos.”

Asimismo, añade que “este proceso se basa principalmente en el uso del algoritmo de Gauss-Newton para mínimos cuadrados, empleado en la resolución de problemas no lineales. En este contexto, los resultados obtenidos para la cargabilidad y la resistividad aparente pueden presentar un desfase con respecto al relieve topográfico, lo que implica que los valores resultantes no sean simétricos ni reflejen su ubicación real sobre el terreno. Para corregir esta discrepancia, se recurre a un ajuste mediante sistemas no lineales y mínimos no cuadrados. En el siguiente esquema, se presenta la

modulación aplicada a cada ventana de resistividades, como parte del proceso de corrección.” Ver figura 13.

Figura 13: *Ejemplo de Distribución no línea en cargabilidad respecto a la posición en el espacio*



Fuente: Sumner et al., (1980).

Nuevo diseño de estudio en polarización inducida y resistividad

Contreras (2017) menciona que “la Polarización Inducida y Resistividad (IP/RES) ha demostrado ser una herramienta eficaz para el mapeo de la litología, alteraciones y mineralización conductora. Su aplicación más común en la exploración minera emplea arreglos de dipolo-dipolo o polo-dipolo, utilizando una longitud de dipolo "a" y seis factores de separación ($n = 1$ a 6). Con una longitud de dipolo fija, se debe elegir entre la resolución lateral y profundidad de detección. Los estudios más profundos suelen verse limitados por una resolución lateral deficiente en 2D a lo largo de las líneas de levantamiento.”

Asimismo, indica que “los resultados de IP/RES suelen invertirse en 2D y se presentan en secciones de profundidad trazadas a lo largo de la topografía. Es importante señalar que las secciones de cargabilidad y resistividades

confiables dependen en gran medida de la calidad de los datos obtenidos en el campo, así como de la densidad y abundancia de las mediciones realizadas.”

Limitaciones de la prospección IP

Fuentes (2017) indica que “la polarización inducida permite detectar propiedades eléctricas y de polarización, aunque experimenta una pérdida de resolución a medida que aumenta la profundidad. Las penetraciones típicas oscilan entre 200 y 400 metros en sistemas tradicionales, y de 500 a 800 metros en sistemas de última generación. Además, en ambientes altamente resistivos pueden surgir problemas con la inyección de corriente. En cuanto a los costos, estos oscilan entre US\$ 800 y US\$ 1.000 por kilómetro en sistemas convencionales, mientras que en los sistemas de última generación los costos pueden superar los US\$ 2.000 por kilómetro. La viabilidad del uso del método IP/RES depende del objetivo de la exploración, ya que es posible discriminar tanto la cargabilidad como la resistividad, siempre y cuando se tenga un enfoque claro en el objetivo de prospección.”

2.2.3. Yacimientos tipo IOCG

Definición.

Hitzman et. al., (1992) indica que “los depósitos de hierro, cobre y oro (IOCG) son yacimientos de cobre y/o oro que contienen abundantes óxidos de hierro, como magnetita y/o hematita.” Muchos sistemas minerales se agrupan bajo la clasificación de depósitos de óxido de hierro-cobre-oro (IOCG) en función de una definición empírica, que se basa principalmente en características geoquímicas sin especificar el ambiente tectónico, geológico o las fuentes de fluidos que forman los minerales, metales o componentes minerales adicionales. Estos depósitos suelen tener cobre, con o sin oro, como los metales económicos,

y presentan estilos de mineralización hidrotermal con un fuerte control estructural. Además, se caracterizan por la presencia abundante de magnetita y/o hematita, óxidos de hierro con Fe/Ti, y la ausencia de una relación espacial clara con intrusiones ígneas, a diferencia de lo que ocurre con los depósitos de pórfido o de skarn.”

Origen y marco tectónico

Hidrotermal asociado a actividad magmática.

Los magmas asociados con estos depósitos presentan una afinidad petrológica variable que incluyen tipos calco alcalinos, shoshoníticos, alcalinos.

Magmas relativamente oxidados, alta razón SO_4 / H_2S , ricos en CO_2 , Cl, F, P.

Los depósitos se encuentran en áreas que corresponden a entornos de margen cratónico o continental durante el Proterozoico inferior y medio. En muchos casos, estos depósitos están espaciales y temporalmente asociados con procesos de tectónica extensional.

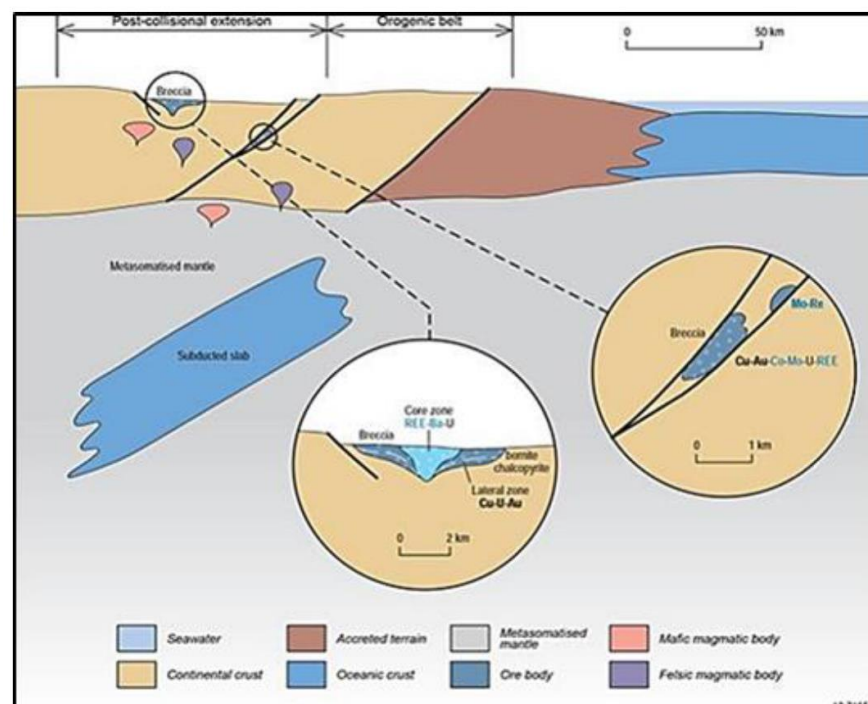
La mayoría de los distritos de depósitos se encuentran a lo largo de las principales zonas estructurales, y muchos de estos depósitos tienen una disposición alargada, paralela a las tendencias estructurales regionales o locales. Las rocas huésped pueden ser tanto ígneas como sedimentarias; sin embargo, muchos de los depósitos se encuentran dentro de rocas ígneas intermedias de tipo anorogénico. No obstante, en varios casos, la mineralización de estos depósitos no muestra una relación directa y clara con la actividad ígnea en el nivel estructural donde ocurre la mineralización.

Ambiente tectónico

- Rift intracontinental.

- Márgenes continentales.
- Asociados a ambientes extensionales.
- Asociados a sistemas de fallas regionales.
- Estos depósitos se encuentran ubicados en márgenes continentales o cratónicos del Proterozoico, y con frecuencia, están espaciales y temporalmente asociados con fenómenos de tectónica extensional.
- Estos depósitos pueden originar en numerosos ambientes geológicos y tectónicos donde se ha producido extensión cortical, alto flujo calórico y actividad ígnea.

Figura 14: *Ambiente tectónico de los IOCG*



Fuente. Tomado de <http://www.ga.gov.au/data-pubs/online-tools>

Control estructural

- Los depósitos fanerozoicos se encuentran principalmente asociados a ambientes de arco continental, así como a zonas de extensión tras-arco.
- En la mayoría de los depósitos se observa un fuerte control estructural.

- Típicamente se localizan a lo largo de estructuras subsidiarias asociadas a sistemas de fallas mayores de carácter cortical.
- Fallas reactivadas durante la formación del depósito de Cu-Au
- Ocurren a lo largo de intersección de lineamientos estructurales mayores.

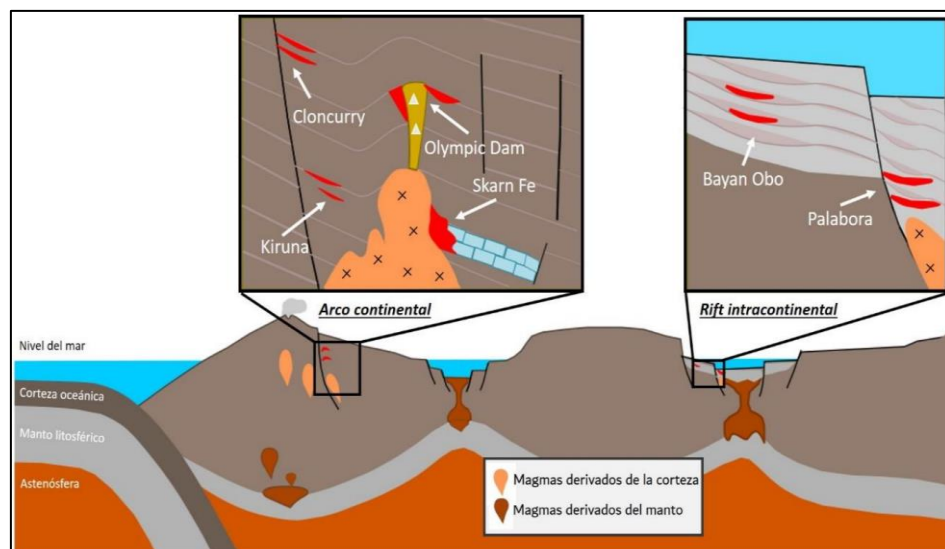
Características

- Depósitos epigenéticos caracterizados por contener grandes cantidades de óxidos de Fe principalmente magnetita y hematita los cuales están asociados a sulfuros de Fe, Cu \pm Au, Ag, U, REE1, CO₃, F, Ba, Mo, Bi, Co.
- Relacionados con magmatismo de afinidad calco alcalina y alcalino-carbonatitas.
- Asociados con plutones dioríticos oxidados. No obstante, en ciertos yacimientos, como el de Candelaria, no se observa una relación directa a nivel de mineralización.
- Firma geoquímica de Cu-Au-Co-Ni-As-Mo-U.
- Fluidos acuosos hipersalinos (> 30% ClNa) con temperaturas > 250°C, a veces ricos en CO₂. La magnetita indica temperaturas de precipitación > 500°C.
- En Sudamérica los depósitos económicos son del Jurásico medio al Cretácico Inferior.
- Se ha planteado un modelo en el cual los fluidos y azufre provenientes de secuencias de evaporitas calentadas por una intrusión ígnea, actuarían como la fuente de los fluidos hidrotermales responsables de la formación de depósitos IOCG.

Clasificación

La clasificación de los depósitos IOCG propuesta por Gandhi (2004) y Corriveau y Goodfellow (2007) se fundamenta en la identificación de yacimientos y distritos mineros de clase mundial, considerando las particularidades de cada uno y la distancia relativa de los yacimientos a los tipos de magmas asociados. (1) calcoalcalinos: tipo skarn de Fe, Kiruna, Olympic Dam y Cloncurry, y (2) alcalinos: Palabora y Dayan Obo. Ver tabla 1 y figura 15.

Figura 15: *Modelo tectonomagmático de los diferentes estilos de yacimientos IOCG*



Fuente: Gandhi, (2004) y Corriveau y Goodfellow, (2007).

Tabla 1: *Clasificación de IOCG según depósitos de clase mundial o distritos mineros en función del tipo de magmatismo asociado y a la distancia a los magmas*

Clasificación IOCG				
Magmas calcoalcalinos				
	Origen	Proximal		Distal
Tipo	Skarn Fe	Kiruna	Olympic Dam	Cloncurry
Mineralización	Magnetita - granates- piroxenos masivos	Magnetita - apatito - actinolita masivos	Brecha de magnetita - matriz de hematita y sulfuros	Óxidos de Fe y Fe, masivos y diseminados
Morfología	Estratoligados y cuerpos irregulares en contacto al intrusivo	Tabular, forma de pipas, cuerpos irregulares y vetas	Forma de pipa, brechas, cuerpos irregulares y vetas	Estratoligados brechas y vetas
Elementos de interés económico	Monometalicos de Fe y depósitos de óxidos de Fe-Cu-Au asociados	Monometalicos de Fe y depósitos de Fe-Cu asociados tipo pórfidos	Polimetálicos de Fe, Cu, Au, Ag, U, Th y REE	Polimetálicos de Fe, Cu, Au, Ag, Bi, Co y W
Alteración dominante	Alteración sódica	Alteración sódica	Alteración potásica	Alteración potásica
Ejemplo	Magnitogorsk (Rusia)	Kiruna (Suecia)	Olympic Dam (Australia)	Osborne (Australia)

Magmas alcalinos – carbonatitas			
	Origen	Proximal	Distal
Tipo	Skarn Fe	Olympic Dam	
Mineralización	Magnetita, apatito, flogopita, fluorita, carbonatos, sulfuros de Cu-Fe y uranotorianita diseminados dentro o al margen del intrusivo	Magnetita, hematita, flogopita, óxidos de Fe-Ti, Cr-Nb, fluorita y carbonatos semimasivos	
Morfología	Vetas y mantos	Vetas, mantos y estratoligados	
Elementos de interés económico	Polimetálicos de Fe, Ti, Cu, PGE, Au, Ag, U, Th y F	Polimetálicos de Fe, óxidos de Fe-Ti-Cr-Nb y F	
Alteración dominante	Alteración sódica y potásica	Alteración sódica y potásica	
Ejemplo	Palabora (Sudáfrica)	Bayan Obo (China)	

Fuente: Gandhi (2004)

2.2.4. Rango de Anomalías para el efecto de IP y Resistividad

Cargabilidad

OpenAI, (2024). “En geofísica, la cargabilidad es un parámetro clave en los estudios de polarización inducida (IP), utilizado para evaluar la capacidad del subsuelo para retener y liberar carga eléctrica después de la aplicación de una corriente. Su unidad típica es milivoltios por voltio (mV/V) o milisegundos (ms)”.

“Los valores de cargabilidad pueden clasificarse en rangos aproximados, dependiendo del tipo de material geológico y su contenido mineralógico”.

Tabla 2 Rangos de anomalías de cargabilidad

Rangos de Anomalías de Cargabilidad		
Tipo de anomalía	Rango aproximado (mV/V o ms)	Interpretación geológica
Baja	< 5 mV/V (< 10 ms)	Suelos arenosos, gravas, rocas limpias sin mineralización, sedimentos no consolidados
Moderada	< 5-20 mV/V (< 10-50 ms)	Rocas con contenido moderado de sulfuros diseminados, arcillas, lutitas, filitas
Alta	20-50 mV/V (50-100 ms)	Presencia de sulfuros, mineralización diseminada de pirita, calcopirita, esfalerita, galena
Muy alta	> 50 mV/V (< 100 ms)	Depósitos masivos de sulfuros, zonas de grafito, cuerpo de mineralización metálica significativa

Fuente: OpenAI, (2024)

Resistividad

OpenAI, (2024). “El rango de anomalías de resistividad depende del tipo de material del subsuelo y del contexto geológico o geotécnico en el que se este midiendo. En estudios geofísicos, las anomalías de resistividad suelen identificarse comparando los valores medidos con los valores típicos esperados para un determinado tipo de suelo o roca.”

Tabla 3: Rangos de anomalías de resistividad

Rangos de Anomalías de Resistividad		
Tipo de anomalía	Rango aproximado (Ohm*m)	Interpretación geológica
Muy baja	< 10 Ohm*m	Arcillas saturadas
Baja	10 - 100 Ohm*m	Suelos arenosos, gravoso y areniscas
Moderada	100 - 1000 Ohm*m	Granito, basalto, mármoles, etc.
Alta	1000 - 10000 Ohm*m	Cuarzo
Muy alta	> 10000 Ohm*m	-

Fuente: OpenAI, (2024)

2.3. Definición de términos básicos

- **Depósito mineral:** Concentración local de una o más sustancias minerales con valor económico y de aprovechamiento rentable. Dávila (2006, pág. 398)
- **Prospección:** Es la investigación de una región específica mediante trabajos geológicos, mineros, geoquímicos, con el propósito de identificar concentraciones de minerales de interés comercial o de recursos petrolíferos. Dávila (2006, pág. 485).
- **Polarización inducida:** El efecto de la Polarización inducida se produce al aplicar electrodos a una superficie, donde se mide tanto la resistividad como el decaimiento del voltaje. Dávila (2006, pág. 477)
- **Cargabilidad:** Es un parámetro eléctrico que define el límite térmico, dado en capacidad de corriente, para componentes como líneas de transporte de energía, transformadores, etc. Portaelectricos (2019, pág. 4)
- **Resistividad:** Es la resistencia que presenta un cubo de dimensiones unitarias de un material específico al paso de una corriente eléctrica. Dávila (2006, pág. 506).

- **Anomalía geofísica:** es la diferencia entre el valor observado (medido) del campo geofísico o estudio y el valor que se registraría en el mismo lugar si la Tierra fuera más uniforme de lo que efectivamente es. Lyatsky (2004, pág. 2).
- **Campo Eléctrico:** Es un campo físico representado mediante un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica. OpenAI. (2024).

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Con la aplicación del método geofísico de Polarización Inducida, se pretende encontrar anomalías que nos permitan identificar y discriminar zonas mineralizadas, delimitando así posibles targets de perforación en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa

2.4.2. Hipótesis Específicas

- a. Los modelos de cargabilidad y resistividad 2D permiten delimitar las formaciones geológicas y posibles zonas de interés económico (mineralización) en el proyecto Virgen del Carmen en Arequipa, proporcionando una herramienta efectiva para la exploración.
- b. Los datos obtenidos mediante la prospección geofísica de polarización inducida facilitan la proposición de targets de perforación sobre posibles zonas de interés económico (mineralización) en el Proyecto Virgen del Carmen en Arequipa.

2.5. Identificación de Variables

2.5.1. Variable Independiente

- Polarización inducida

2.5.2. Variable Dependiente

- Zonas mineralizadas

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 4 Operacionalización de la variable independiente y variable dependiente

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Variable Independiente Polarización Inducida	Es un método activo que generalmente junto con la resistividad. Se utiliza para medir las variaciones transitorias en el potencial. Este método se emplea específicamente para detectar concentraciones de barro y granos metálicos conductores de electricidad en minerales.	La información se obtiene mediante el uso de instrumentos especializados, ubicados en el campo que son capaces de medir las variaciones de los parámetros físicos.	Cargabilidad	Cargabilidad > 20 mV/V	Mapas geológicos Mapa de líneas geofísicas.
			Resistividad	Resistividad por el orden de 250 a 500 Ohm*m	Receptor Iris Elrec Pro 10 canales Transmisor Hunttec
Variable Dependiente Zonas mineralizadas	Son áreas que inicialmente se consideran estériles, pero que poseen el material de contener yacimientos económicamente explotables.	Son áreas de interés que se identifican mediante la presencia de anomalías y eléctricas y resistivos	Zonas de interés	Anomalías eléctricas resistivos	Mapa de líneas geofísicas IP/Res

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de Investigación

“La investigación básica tiene como objetivo generar conocimiento. Se enfoca en explorar las relaciones entre variables, probar y adaptar teorías, así como en desarrollar nuevas maneras de comprender los fenómenos sociales. En su proceso, también construye y adapta instrumentos de medición.” Vara (2012).

Por esta razón, el tipo investigación es de tipo básica, ya que se utilizó el conocimiento de la geofísica para probar la hipótesis. El objetivo fue examinar, describir, evaluar, comparar e interpretar los resultados, con el fin de identificar la presencia de zonas mineralizadas en el Proyecto Virgen del Carmen en Arequipa.

3.2. Nivel de investigación

“El nivel de investigación se considera exploratorio, ya que se aplica generalmente cuando se busca examinar un tema o problema que ha sido poco estudiado o que no ha sido abordado previamente. Al mismo tiempo, es de carácter descriptivo, ya que pretende medir y evaluar distintos aspectos,

dimensiones o componentes del fenómeno investigado, entendiendo que, desde el enfoque científico, describir implica medir. Finalmente, también es correlacional, dado que tiene como finalidad medir dos o más variables en los mismos sujetos para analizar si existe una relación entre ellas.” Hernández et al. (1997).

En este contexto, el nivel de investigación aplicado es de tipo exploratorio, debido a la necesidad de llevar a cabo una exploración geológica detallada en el Proyecto Virgen del Carmen, ubicado en Arequipa, mediante la aplicación del método de polarización inducida (IP). El objetivo principal fue identificar nuevas áreas de interés y comprender la distribución y características de las zonas mineralizadas presentes en el área. A su vez, la investigación presentó un carácter descriptivo, ya que se enfoca en la recopilación de datos precisos sobre la distribución, extensión y propiedades de dichas zonas mineralizadas, utilizando la técnica de IP. Esta fase descriptiva permitió presentar los resultados obtenidos de manera clara, facilitando una comprensión profunda y detallada sobre la naturaleza y el alcance de la mineralización en la zona de estudio. Finalmente, se consideró también una investigación correlacional, dado que se analizan los resultados derivados de la prospección geofísica mediante IP en el proyecto. En esta etapa, se busca identificar patrones y relaciones significativas en los datos recolectados, lo que permite una mejor interpretación de la naturaleza de las zonas mineralizadas detectadas. Dicho análisis contribuye a generar conclusiones relevantes respecto a la distribución y el potencial de dichas mineralizaciones, orientando así futuras actividades de exploración, como la ubicación de sondajes y el desarrollo del proyecto

3.3. Métodos de investigación

Se utilizó el método de investigación lógico-deductivo, ya que se empleó el razonamiento y el análisis en el proceso. Además, es deductivo porque se parte de principios generales para desarrollar aplicaciones específicas. En este caso, los principios generales son las propiedades físicas de las rocas y suelos, particularmente aquellas relacionadas con las características eléctricas y resistivas, las cuales se consideran para llevar a cabo el estudio.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de la investigación no es experimental y descriptivo, ya que no se realiza una manipulación deliberada de la variable. En lugar de ello, se observa el fenómeno en su entorno natural. El objetivo es describir la relación entre la polarización inducida y las zonas mineralizadas del Proyecto Virgen del Carmen, dentro de un tiempo determinado.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población ha estado conformada por el área de estudio que comprende una (01) concesión minera, que cuenta con un área de 250.00 hectáreas en total.

3.5.2. Muestra:

La muestra estuvo representada por la ejecución de 8 líneas geofísicas de IP sobre el proyecto Virgen del Carmen con una profundidad de investigación de hasta 300 metros.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.6.1. Técnicas

En la investigación del proyecto Virgen del Carmen en Arequipa se emplearon diversas técnicas para la recolección de datos geofísicos. A continuación, se describen las principales técnicas utilizadas:

Técnicas Utilizadas:

- **Revisión Documental**

La revisión documental implicó la recopilación y análisis de información existente sobre la geología y el potencial mineralógico del área de estudio.

- **Observación de Campo**

La observación de campo se llevó a cabo mediante inspecciones directas in situ, considerando las propiedades físicas del subsuelo en el área de estudio. Los datos recolectados en el terreno fueron esenciales para complementar y validar la información obtenida a través de los métodos geofísicos aplicados.

- **Levantamiento topográfico**

Los trabajos de topografía se ejecutaron de forma simultánea con las actividades geofísicas, utilizando una estación total para el replanteo de las estaciones, las cuales fueron marcadas a intervalos de 50 metros.

- **Toma de datos en campo**

El estudio se llevó a cabo utilizando el método de Polarización Inducida/Resistividad 2D con configuración Polo - Dipolo, abarcando una extensión de 10 km. Se programaron un total de 8 líneas, con espacios variables entre las líneas, de 100 a 200 m, y estaciones dispuestas cada 50 m. La profundidad alcanzada en el estudio fue aproximadamente de 300 m.

- **Procesamiento de datos geofísicos**

En esta etapa de la investigación, se procedió con el ordenamiento, análisis y control de calidad de la nube de datos adquiridos por el equipo. Para analizar y aprobar los parámetros de cargabilidad y resistividad obtenidos mediante el equipo Iris Elrec Pro 10 canales, se utilizó el software

Prosys II. Posteriormente, los datos fueron editados en un nuevo formato con sus respectivos encabezados, para ser ingresados al software Oasis Montaj versión 8.4. Ver Anexos.

Así mismo se utilizó el software Oasis Montaj ver. 8.4 para la generación de secciones, mapas y modelos 2D de cargabilidad y resistividad.

- **Interpretación y presentación de resultados.**

La interpretación de los datos geofísicos obtenidos se correlacionó con la geología local, a través del análisis de secciones y mapas 2D basados en los valores de resistividad y cargabilidad del área de estudio. El objetivo principal fue identificar posibles zonas de mineralización presentes en el subsuelo.

3.6.2. Instrumentos

Para llevar a cabo el proyecto de investigación, se emplearon los siguientes equipos, software y accesorios:

Tabla 5: *Equipos e instrumentos utilizados en la campaña geofísica*

EQUIPOS / INSTRUMENTOS	
Receptor Iris Elrec Pro 10 canales (Equipo Receptor)	Verificar la calidad de data durante la adquisición, también muestra la curva de caída de IP en tiempo real.
Huntec 5000 (Equipo Transmisor)	Transmitir corriente
Motor Generador Kholer	Fuente de energía
Estación total Topcon	Levantamiento topográfico
GPS Garmin	Coordenadas UTM Y Cota

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: *Software utilizados en la campaña geofísica*

SOFTWARE	
Prosys II	Control de calidad y validación de los datos IP/RES
Res2DInv 5.0	Inversión de datos con el objetivo de obtener resistividades, cargabilidades y profundidades reales de las anomalías.
Oasis Montaj ver. 8.4	Obtener secciones y mapas para la resistividad y cargabilidad a diferentes cotas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: *Accesorios utilizados en la campaña geofísica*

ACCESORIOS
Cables de corriente eléctrica (2 y 8 km)
Electrodos acerados (40)
Combas (6)
Cinta aislante, corta cable
Radios (20)
Laptop TOSHIBA

Fuente: Elaboración propia.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Con el propósito de obtener los resultados que serán interpretados para establecer las conclusiones y recomendaciones de la tesis, el trabajo desarrollado contempla los siguientes elementos y pasos correspondientes:

- **Procesamiento e Inversión de datos IP/Resistividad.**

Una vez recolectados los datos, estos fueron descargados desde el equipo Elrec Pro 100 mediante el software Prosys II, con el fin de llevar a cabo el control de calidad y la validación de los datos de IP/Resistividad. Posteriormente, se realizó la inversión de los datos utilizando el software Res2DInv versión 5.0, con el objetivo de obtener valores reales de resistividad, cargabilidad y profundidad de las anomalías detectadas, permitiendo correlacionar con la geología del área de estudio. Finalmente,

los datos procesados fueron exportados al software Oasis Montaj versión 8.4, a fin de generar secciones y mapas de resistividad y cargabilidad a diferentes niveles, facilitando así una interpretación y correlación geológica más precisa.

- **Análisis de datos**

La técnica empleada para el análisis de los datos fue la estadística descriptiva básica, cuyos resultados serán presentados mediante gráficos, con el fin de facilitar su interpretación correspondiente.

3.8. Tratamiento Estadístico.

El tratamiento estadístico de los datos se realizó en los siguientes softwares:

- Oasis Montaj ver. 8.4 (Gráficos)
- Microsoft Excel 2019 (Tablas)

3.9. Orientación, ética filosófica y epistémica

En el desarrollo de la investigación se practicó el valor de la honestidad, desde la recolección de información, el análisis e interpretación de los resultados.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

En esta etapa se llevó a cabo una inspección de toda la zona de estudio, así como la caracterización geográfica y geológica de la misma. Además, se realizó la recolección de datos de campo mediante el estudio geofísico de polarización inducida y resistividad desarrollado por la empresa GEOMAD SG EIRL en el sector “Bella Unión” para la Cía. Minera Cuántica Mining.

4.1.1. Caracterización del área de Estudio.

Ubicación Política

El proyecto Virgen de Carmen se encuentra ubicado en el departamento de Arequipa, provincia de Caravelí, distrito de Bella Unión.

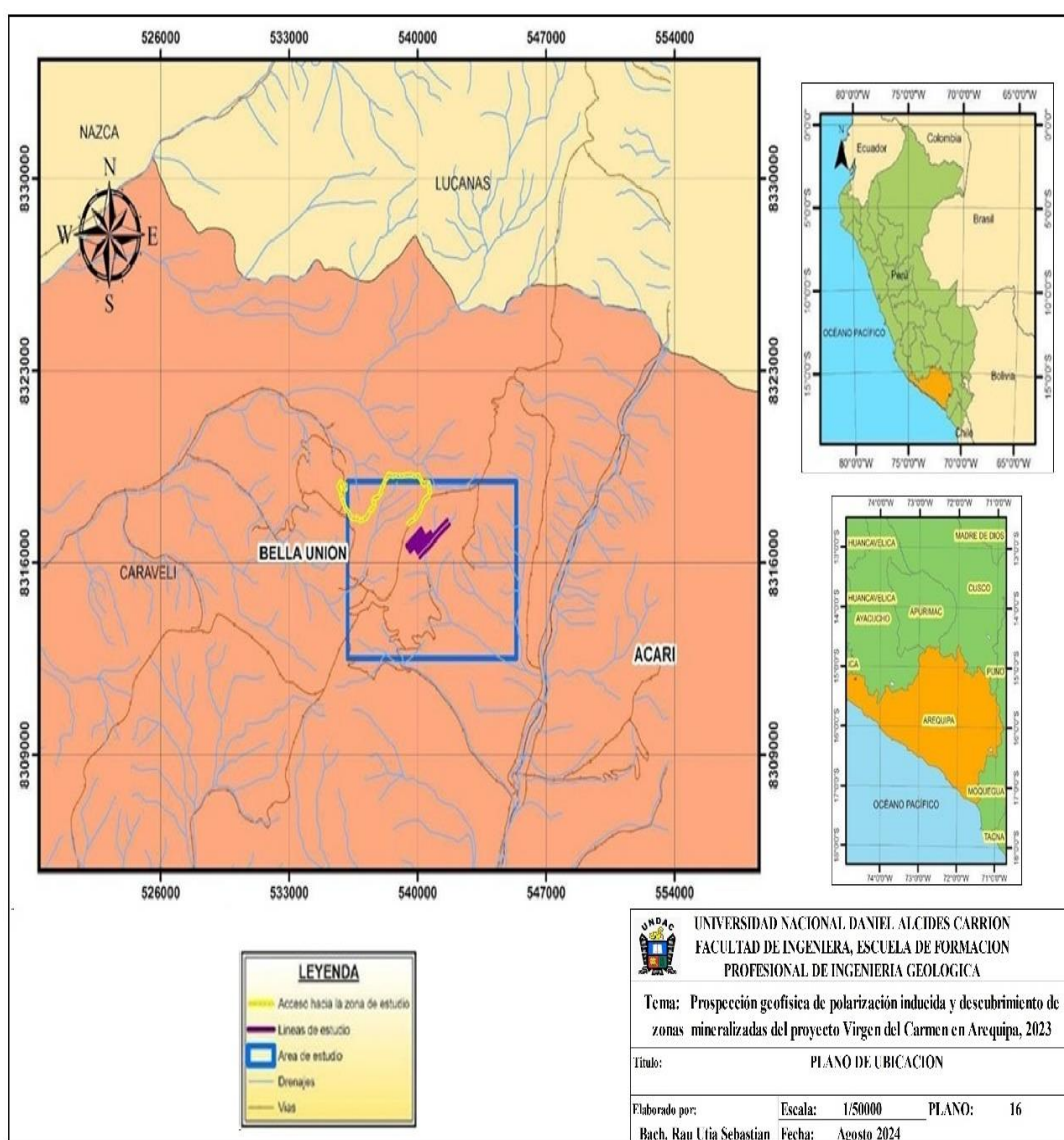
Ubicación geográfica.

Tabla 8: Coordenadas UTM de los vértices del proyecto Virgen de Carmen

Ubicación geográfica – Proyecto Virgen del Carmen		
VÉRTICES	COORDENADAS UTM	
	ESTE	NORTE
1	539586,26	8316420,17
2	540143,46	8316843,87

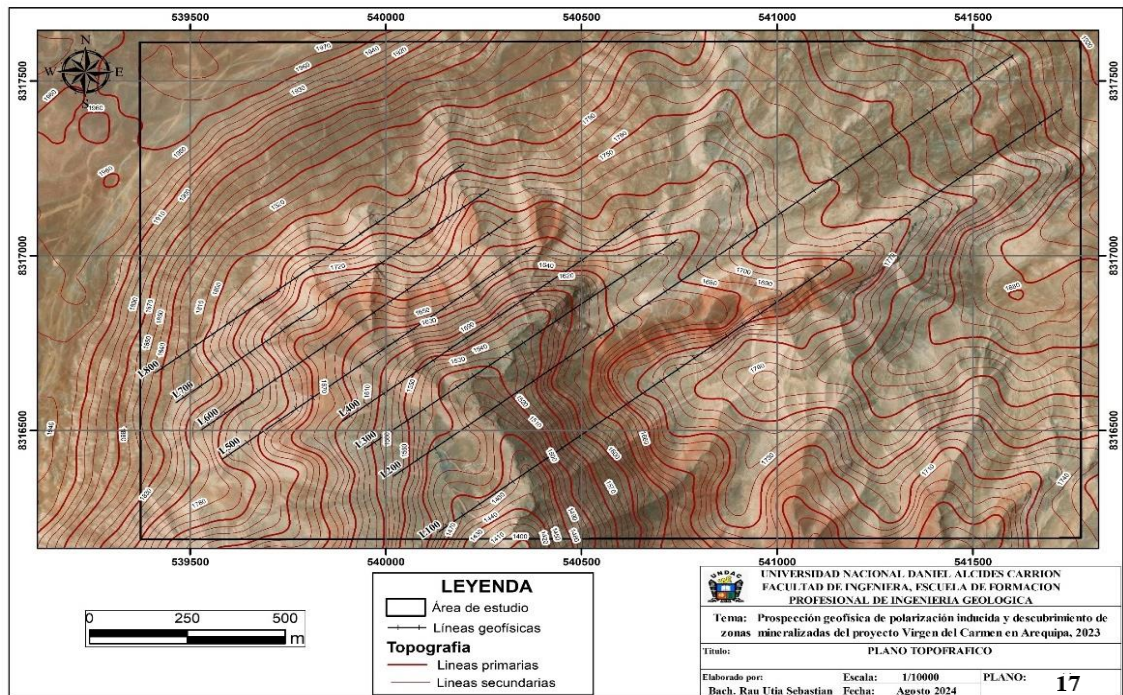
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 16: Plano de ubicación del proyecto Virgen del Carmen



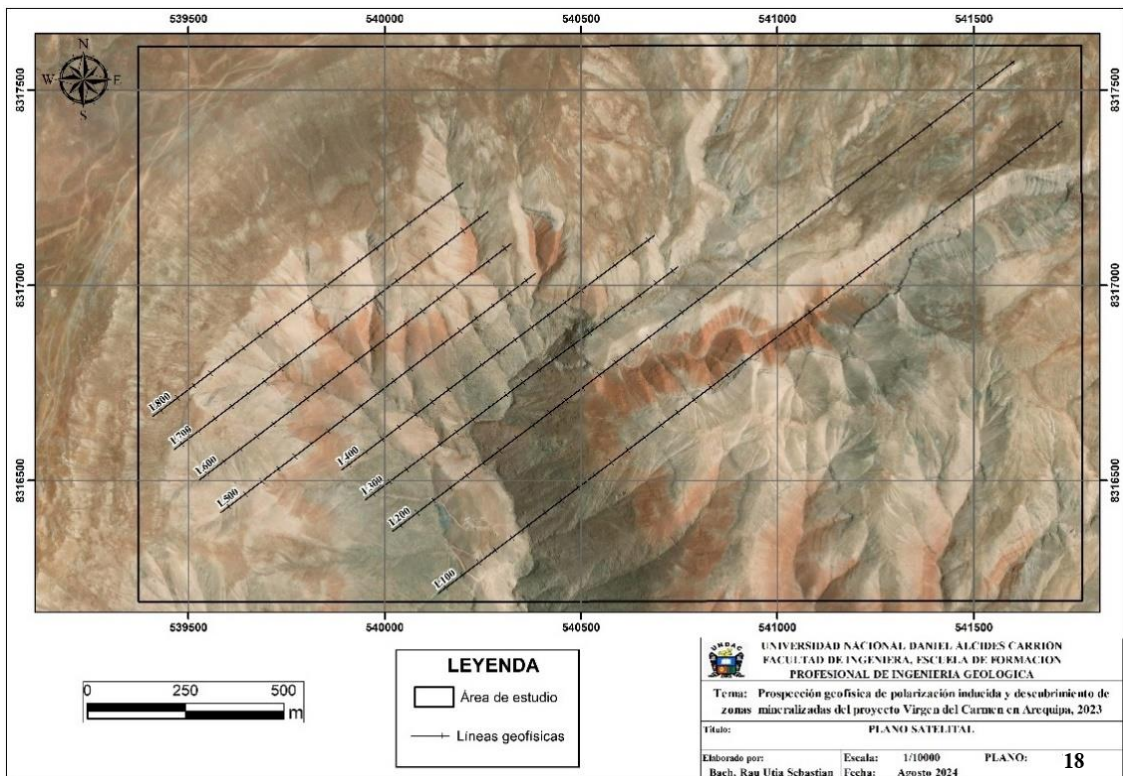
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 17: Plano topográfico del proyecto Virgen de Carmen



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Plano satelital con líneas geofísicas del proyecto Virgen del Carmen



Fuente: Elaboración propia.

Accesibilidad

El acceso hacia la zona de investigación, se realizó desde la capital Lima

Tabla 9 *Vía de acceso del proyecto Virgen del Carmen*

Vía de Acceso – Proyecto Virgen de Carmen				
Ruta	Distancia (Km)	Vía	Estado	Tiempo
Lima – Kilometro. 493.5	493.5	Asfaltada	Bueno	7h 15min
Kilometro. 493.5 – Proyecto Virgen del Carmen	43.3	Trocha	Bueno	2h 0min

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Clima

El clima de la zona del proyecto se clasifica como preárido a semi-cálido, con una precipitación total anual que varía entre 2.4 y 5.1 mm y una temperatura promedio anual de 21.6° (Onern, 1971). La vegetación en el área es prácticamente inexistente, salvo en algunas zonas de lomas, en periodos excepcionales, se presenta vegetación herbácea de tipo estacional.

4.1.3. Geomorfología

El proyecto Virgen de Carmen se encuentra dentro de la Unidad Peneplanicie pliocénica, esta unidad está conformada por estribaciones erosionadas, por el continuo proceso geológico con leve inclinación lo que atestigua que hubo una abrasión marina. Asimismo, el proyecto se encuentra a una altitud de 1700 msnm.

4.1.4. Marco geológico regional

En el presente capítulo se incluye el marco geológico a nivel regional, la información descrita está tomadas de la bibliografía existente en el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), corresponde al Boletín N° 30

titulado “Geología de los Cuadrángulos de San Juan, Acarí y Yauca (Hoja 31-m, 31-n, 32-n).

Estratigrafía

a. Precambriano

- **Complejo Basal de la Costa**

Desde el punto de vista litológico, está conformada por esquistos, metaarcosas, gneises, granitos potásicos y migmatitas. Los esquistos representan las unidades más restringidas dentro del conjunto de rocas metamórficas que afloran en este sector del Complejo Basal de la Costa, y corresponden a la fase más reciente del metamorfismo regional. En cuanto a los gneises, se observan principalmente ortogneises graníticos de tonalidades gris-rosadas, los cuales, en algunas zonas, presentan relictos de metaarcosas, lo que sugiere que podrían tratarse en parte de paragneises.

- **Formación Chiquerio**

La serie se encuentra en discordancia angular sobre gneises y granitos pertenecientes al complejo metamórfico subyacente. Desde el punto de vista litológico, está compuesta por paraconglomerados o fangolitas guijosas laminadas, formadas por delgadas laminaciones oscuras de fangolitas con espesores variables entre 0,5 mm y 10 mm. Estas se alternan con capas delgadas de limos y areniscas, las cuales pueden distinguirse gracias a la erosión diferencial que las resalta, así como por el efecto del lavado en los acantilados.

- **Formación San Juan**

En aparente contacto gradacional sobre la Formación Chiquerío, se encuentra una secuencia predominantemente calcárea que ha experimentado recristalización debido a un metamorfismo térmico, el cual se impone a un metamorfismo regional de bajo grado. Esta secuencia está litológicamente compuesta por esquistos calcáreos, mármoles dolomíticos y calizas dolomíticas.

b. Paleozoico Inferior

- **Formación Marcona**

La formación Marcona está compuesta por hornfels conglomerádico, los cuales contienen clastos redondeados de mármoles dolomíticos en una proporción predominante. Estos clastos se consideran provenientes de la Formación San Juan, que yacen en discordancia angular sobre los esquistos y filitas antes descritas. El espesor de la Formación Marcona se estima en 1500 m.

- **Mesozoico**

Entre las formaciones Marcona y Río Grande se observa un hiato estratigráfico, resultado de los diversos movimientos tectónicos y ciclos de erosión asociados. Durante el Jurásico superior, el mar cubrió completamente la región, dando inicio a una acumulación clástica acompañada de un intenso magmatismo, predominantemente andesítico. A nivel regional, se identifican dos ambientes de acumulación clástica bien definidos: uno en la facies occidental, correspondiente al margen de cuenca, que es mayormente calcáreo en las porciones inferiores y arenolimoso en las superiores, acompañado de flujos volcánicos que forman

las formaciones Río Grande, Jahuay y Yauca; y otro en la facies oriental, que corresponde a una cuenca de naturaleza areno-arcillosa y está asociada al Grupo Yura.

c. Terciario

- **Formación Pisco**

Desde el punto de vista litológico, la sección inferior está compuesta por areniscas conglomerádicas de grano grueso, de tonalidades amarillentas, dispuestas en bancos anchos. Estos bancos presentan horizontes conchíferos, los cuales han sido bastante triturados por el oleaje y están cementados por soluciones del mismo material calcáreo. Hacia la parte superior de la sección, se encuentran areniscas amarillas finas con capas ferruginosas, que están cruzadas por un sistema complejo de venillas de yeso fibroso, cuyas ramificaciones son comunes en todos los niveles de la formación. Además, se observan capas de diatomitas blancas, junto con tufos y cenizas re TRABAJADAS, que son livianas y frágiles.

- **Volcánico Sencca.**

La formación está compuesta principalmente por tufos de colores blanco, gris claro o ligeramente rosados, que tienen una naturaleza predominantemente dacítica o riolítica. Estos tufos se encuentran en bancos tabulares bastante compactos, los cuales varían hacia ignimbritas con disyunción columnar o en pseudoestratificaciones. La superficie de estos tufos es generalmente rugosa, con tonalidades marrones a rojizas debido a la meteorización, y cubren las pampas de la planicie. En cuanto a su textura, los tufos son mayormente porfiríticos, con fenocristales de

cuarzo hialino, cristales escasos de ortosa o plagioclasa, y pequeñas placas de biotita, todo ello dentro de una matriz feldespática alterada.

d. Cuaternario

- **Depósitos de Terrazas Marinas**

Los depósitos de las terrazas marinas están formados por capas de conglomerados dentro de una matriz arenosa, intercaladas con lentes de areniscas y areniscas bioclásticas. También se observan algunas intercalaciones de areniscas amarillentas, así como tufos y cenizas retrabajadas, que provienen tanto de un vulcanismo pleistocénico como de sedimentos piroclásticos más antiguos.

- **Flujos de barro volcánico**

Está compuesto por una mezcla de tufos y cenizas, junto con limos y arcillas de color gris-blanquecino. Estas formaciones son blandas y fácilmente friables

- **Depósitos clásticos recientes**

Este tipo de formación geológica se compone de conglomerados y fanglomerados que contienen una mezcla de cantos redondeados y angulosos provenientes de rocas de naturaleza heterogénea. La matriz en la que se encuentran estos cantos es predominantemente areno-limosa, lo que indica una mezcla de partículas finas de arena y limo. Además, se encuentran intercalados lentes de areniscas sucias, lodolitas y materiales tufáceos.

- **Dunas y Cubiertas eólicas**

Compuesta por arenas, limo y minerales pesados (magnetita e ilmenita)

e. Rocas Intrusivas

- **Batolito San Nicolas**

Durante la fase principal de emplazamiento de un plutón magmático, las rocas se desarrollaron en una disposición concéntrica alrededor del centro de la intrusión, lo que dio lugar a tres tipos de rocas: un núcleo de **adamelita** compuesto por 35% de plagioclasa, 30% de ortosa y 20% de cuarzo, con accesorios de 5-10% de hornblenda de color gris rosado de grano grueso. Una parte intermedia de **granodiorita**, una roca gris-mesócrata de grano grueso, su composición mineralógica es 40-42% de plagioclasas bastante alteradas, 15-18% de ortosa perfitica y 15-20% de cuarzo. Entre los minerales accesorios se cuentan 10-20% de hornblenda verde, pequeñas cantidades de minerales opacos y zircón. Y una parte marginal de **diorita-gabro**, la composición mineralógica general es: 70% de plagioclasa alterada, 18% de clinopiroxeno en unos casos y 28% de hornblenda verde en otros.

f. Intrusiones Volcánicas

- **Intrusivo Volcánico Bella Unión**

Está constituido por andesitas y dacitas porfiríticas marrones o violáceas, con tonos que varían a gris-verdes por alteración hidrotermal. El feldespato principal es la andesina, los accesorios son clinopiroxenos, presentándose raras veces hornblenda, tienen abundantes minerales opacos y los minerales secundarios son sericita, hematita, calcita y cuarzo.

- **Batolito de la Costa**

Compuesto por diorita de grano fino, gris-verdosa, está compuesta por plagioclasas o curas (80-85%), clinopiroxenos (6%), a veces hornblenda, titanio y minerales opacos. Las plagioclasas generalmente contienen inclusiones sólidas y los clinopiroxenos se encuentran a veces recrystalizados. Asimismo, tonalita gris-leucócrata de grano grueso, compuesta principalmente por plagioclasa blanca, cuarzo hialino y biotita, es la roca principal y de mayor volumen.

4.1.5. Geología Local

Estratigrafía

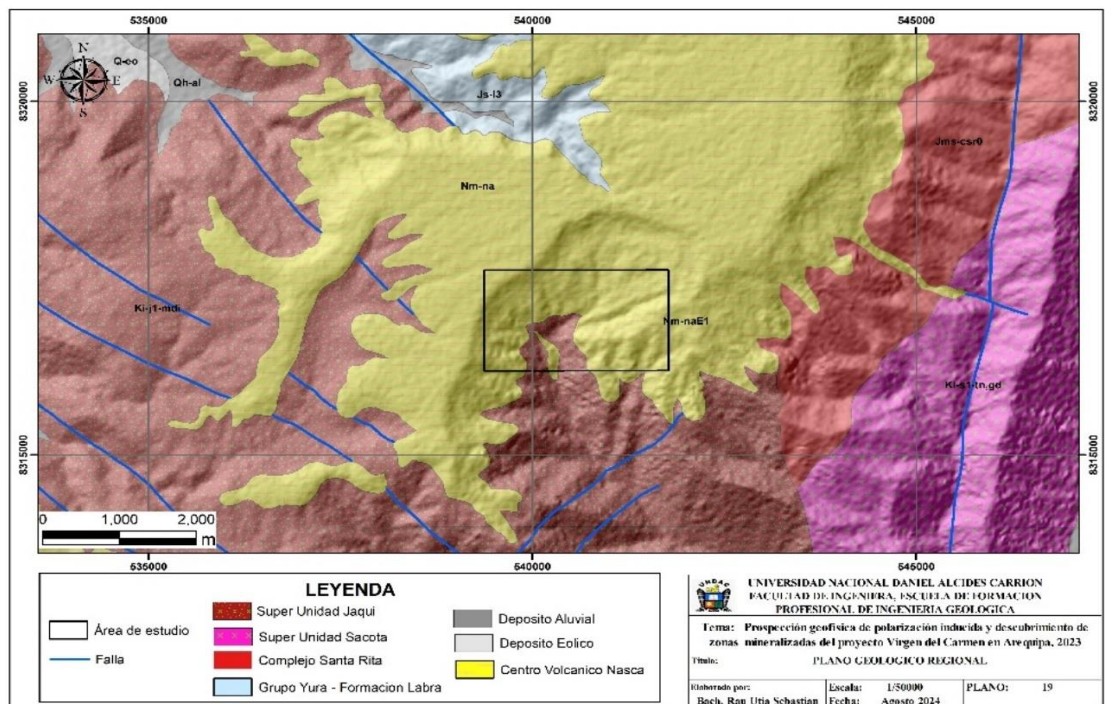
a. Grupo Nasca (Nm-na/agl)

Comprende una secuencia de rocas volcánicas de naturaleza tobácea y aglomerádica, que cubren una superficie de erosión

b. Grupo Maure (Nm-na/tbk)

La formación normalmente aparece estratificada. Los bancos de tufos contienen gran cantidad de fragmentos de lapilli y pómez, donde se hallan horizontes lapillíticos y aglomerádicos compuestos mayormente de pómez.

Figura 19: Plano geológico regional



Fuente: Elaboración propia

Rocas intrusivas

a. Super Unidad Tiabaya:

Perteneciente al Batolito de la Costa. Su litología consiste en la tonalita central gris leucócrata de grano grueso, compuesta principalmente por plagioclasa blanca, cuarzo hialino y biotita, también presenta granodiorita.

b. Super Unidad Linga:

También perteneciente al Batolito de la Costa. La litología predominante es la monzonita, pero tiene variaciones locales con textura granular variable, feldespato potásico y poca biotita.

Figura 20: Columna estratigráfica regional

EDAD	FORMACION	COLUMNA ESTRATIGRAFICA	DESCRIPCION	ESPESOR EN MTS
Reciente			Depósitos eólicos compuestos por dunas y cubiertas de arena limo y polvo. Conglomerados y fanglomerados con matriz arena-limoso.	± 300
Pleistoceno			Terrazas marinas sedimentarias formadas por conglomerados y arenas lapsonalizadas y tufos redepositados, flujos de barro de origen volcánico consistentes en materiales tufáceos, cenizas con limos y arcillas grises.	± 50
Plioceno	Volcánico Senncco		Tufos riolíticos y dacíticos blanco-rosados en bancos tabulares, variando a ignimbritas con inclusiones recostas y vidrio volcánico.	± 50
Mio-Plioceno	Fm. Millo		Conglomerados y areniscos poco compactados, variando a facies marinas en sus límites occidentales.	± 3
Mioceno	Fm. Pisco		Areniscos amarillentos intercalados con tufos y cenizas redepositados en el mar, margas y calizas bioclásticas, arcillas bentónicas, diatomitos, conglomerados coquíferos, areniscos ferruginosos y coquinas en la base.	± 500
Albiano	Fm. Copara		Potentes aglomerados dacíticos y andesíticos gris-morados, tufos rojos y brechas volcánicas y grauvas	± 1000
Aptiano			Interposiciones de areniscos y grauvas volcánicas, lutitas rojas astilladas y dacitos tufáceos gris-azulados a marrones. Calizas fosilíferas con abundantes nodulos de chert. Alternancia de dacitos porfiríticos marrones con areniscos rojos, lavas afaníticas con estructura fluidal.	
Neocomiano	Fm. Yauca		Batolito de la Costa Cuarcitas blancas rosadas con estratificación cruzada intercalados con lutitas rojas, verdes y gris-negras, derrames andesíticos gris-azulados. Secuencia monótona constituida por alternancia de areniscos cuarcíticos blancos y lutitas multicolores fácilmente fisibles, abundantes restos de plantas fósiles. Delgadas capas de calizas azuladas.	± 1,500
Titoniano	Fm. Jahuary		Intrusiones volcánicas y demás hipabisales Gruesas areniscos calcáreos, conglomerados y potentes calizas fosilíferas con lentes de areniscos y conglomerados. Areniscos y conglomerados rajados, calizas violáceas alternados con flujos andesíticos gris verdosos y afanitos epidotizados. Calizas gris-marrones con sillis de andesito porfirítico. Aglomerados volcánicos y lavas brechoides en la base.	± 1,000
Oxfordiano	Fm. Río Grande		Areniscos marrones y calizas morados intercalados con brechas volcánicas de materiales afaníticos rojos y verdes, areniscos feldespáticos gris-verdes y lutitas rojas. Frecuentes alternancias de grauvas. Calizas areniscas y areniscos calcáreos de tonos beige intercalados por brechas y grauvas, flujos brechoides verdes y lavas afaníticas. Conglomerados intraformacionales, areniscos y lutitas rojas. Calizas morados y areniscos calcáreos gris-verdes con abundantes tabulados, braquiolados, lamelibranchios y restos de corales.	± 4,000
Caloviano			Calizas violáceas areniscos feldespáticos y lutitas rojas alternados con lavas andesíticas grises. Lavas andesíticas y dacíticos marrones porfiríticos intercalados con calizas fosilíferas. Derrames morados amigdaloides con hematita y calcita. Conglomerado hornfelsico.	
Paleozoico inf?	Fm. Marcona		Disc. ANG. Rocas de metamorfismo de contacto: hornfels filíticos, cuarcitas azuladas, calizas areniscas silicificadas morados en bancos potentes alternando con pizarras. Hornfels conglomerádicos con cantos calcáreos.	± 1,500
Precambriano	Fm. San Juan		Disc. ANG. Calizas blancas dolomíticas en capas delgadas con alternancias de esquistos biolíticos. Esquistos aloríticos y talcosos. Gruesos paquetes dolomíticos y calizas marmolizadas y zonas granitizadas.	± 3,000
	Fm. Chiquerio		Disc. EROS. Tillolites con bloques de rocas del complejo y dolomitas tectónicamente deformadas matriz yesosa predominante.	
	Complejo Basal de la Costa		Disc. ANG. Orthogneis, paragneis, migmatitas, esquistos y meta-arcosas. Granitos miloníticos (augen gneises). Batolito de San Nicolás. Varios fases de metamorfismo regional.	

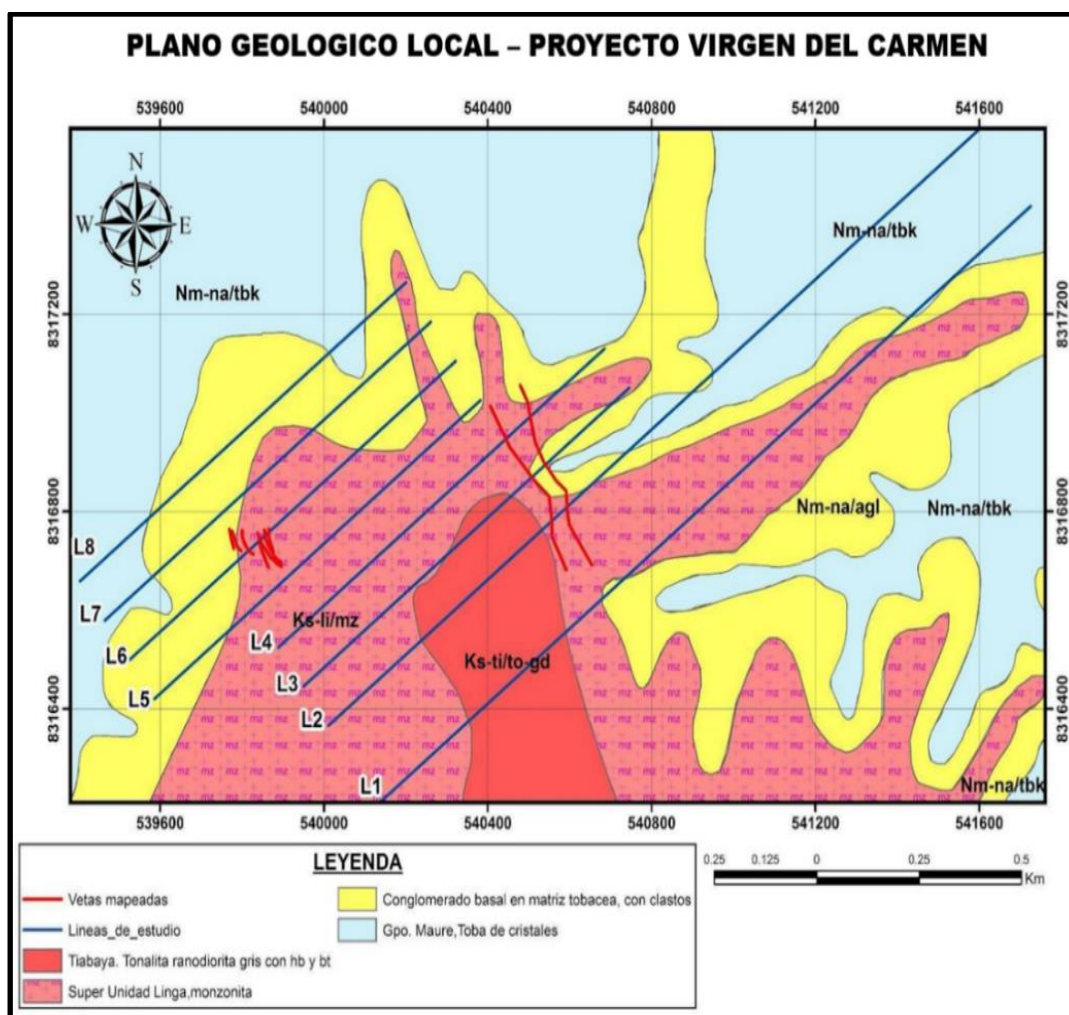
Fuente: Boletín N°30. INGEMMET. Caldas Vidal. J. (1978).

Geología estructural

El control estructural tiene gran importancia debido a que las estructuras mineralizadas son rellenos de fallas y fracturas. Regionalmente, el área ha sido afectada por una tectónica de ruptura frágil caracterizando un fallamiento en bloques (Olchauski, 1980).

En superficie se evidencia un sistema principal de fracturamiento y fallamiento: NO SE, estando mineralizado en casi toda su extensión. Las zonas de cimoides es la que probablemente alberga la mineralización económica.

Figura 21: Plano geológico local del proyecto Virgen de Carmen



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Geología económica

En este sector del proyecto se han identificado al extremo Oeste un set de 11 venillas con rumbos NW-SE, semiparalelas entre sí, tienen algunas anomalías de Cu y venillas de calcita. Mas al Este se tiene 2 estructuras identificadas con rumbos NW-SE, todas estas estructuras de este sector se encuentran emplazadas en rocas intrusivas (Monzonitas).

Mineralización y alteraciones hidrotermales.

La mineralización característica del proyecto consiste en yacimiento de cobre vetiforme caracterizados por su geometría en rosario, rumbo NW-SE (dirección andina), buzamientos subverticales y con espesores variables que oscilan entre 0.20 m. a 0.50 m. En todo el yacimiento se tienen identificadas 13 estructuras. Estas estructuras vetiformes generalmente se presentan en filones emplazados en rocas intrusivas (monzonitas).

Los minerales de las vetas cupríferas presentan cuarzo, OxFe (limonitas y magnetita), calcita, pirita, calcopirita, en menores proporciones especularita (esto fue observado en piques realizados probablemente por mineros artesanos).

Las alteraciones hidrotermales presentes son:

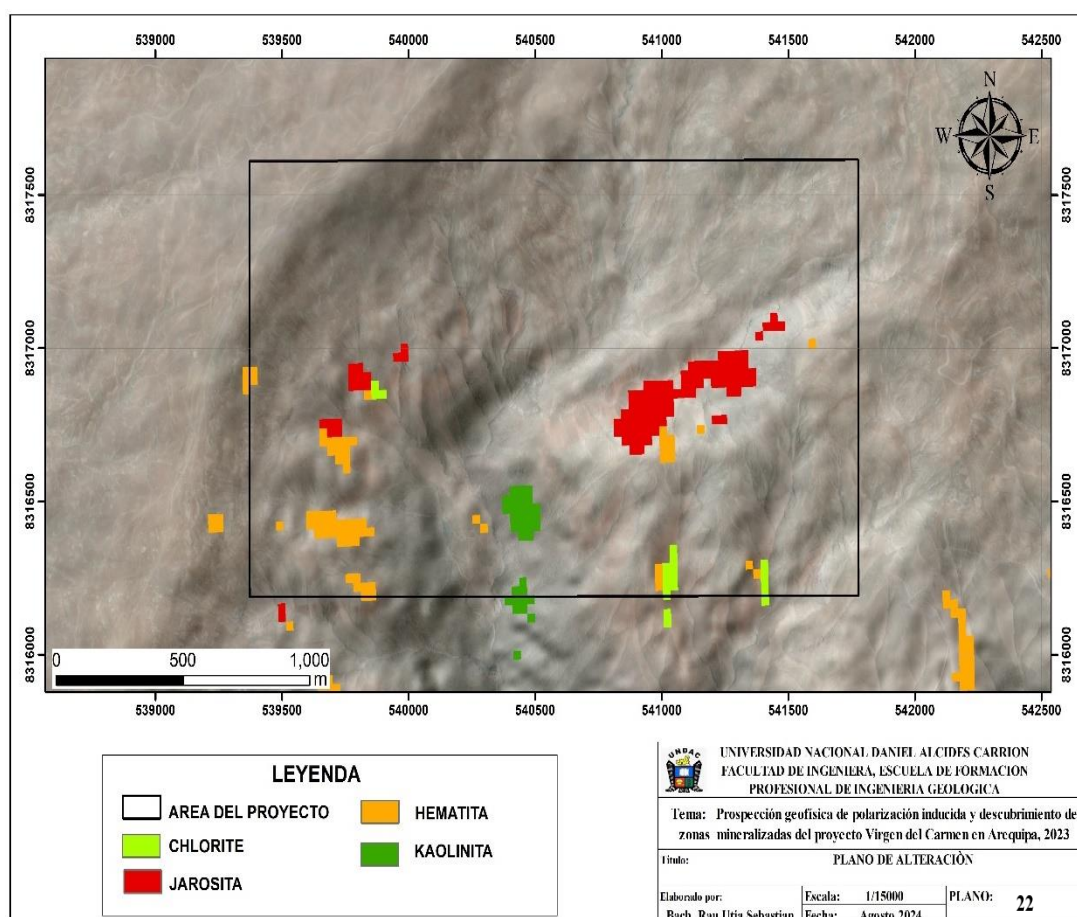
Alteración Potásica, caracterizada por la presencia de feldespato potásico secundario; zona de alta temperatura. En líneas generales la Alteración Potásica está caracterizada por la presencia de feldespato potásico secundario y/o biotita secundaria (anhidrita también puede estar presente). En términos fisicoquímicos esta alteración se desarrolla en presencia de soluciones casi neutras y a altas temperaturas (400°- 600°C).

Alteración Argílica, se caracteriza por la presencia de minerales arcillosos como el caolín con diferentes cantidades de cuarzo. Al tener

metasomatismo de H⁺ intenso y lavados con pH muy ácidos, varía gradualmente hacia las partes internas en zonas filicas y externamente hacia alteraciones propiliticas. Esta alteración resulta muy útil como guía de mineralización y sus ambientes principales son sistemas epitermales y pórfidos.

Metalogénicamente, el proyecto “Virgen del Carmen” se encuentra en la VIII Franja Metalogénica de Depósitos de Hierro (Fe), Cobre (Cu) y Oro (Au) – IOCG, del Cretácico Superior.

Figura 22: *Plano de minerales de alteración hidrotermal del proyecto Virgen de Carmen*



Fuente: Elaboración propia

Tipo de Yacimiento

Por las características descritas en las secciones de la geología local, litología, el estilo de alteración hidrotermal, mineralización, así como el contexto

geológico regional y metalogenético distrital del proyecto Virgen del Carmen, puede definirse como un yacimiento del tipo “Iron Oxide Copper Gold”.

Así como ciertos depósitos epitermales de alta sulfuración gradan a pórfidos de Cu, los depósitos del tipo IOCG pueden dar una transición a depósitos tipo Kiruna (Óxido de Hierro y Apatito), estudios confirman que las zonas de apatito están presentes en depósitos de Chile y también se han encontrado en Olympic Dam (yacimiento modelo de un IOCG).

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

La interpretación de los resultados obtenidos en el levantamiento geofísico de Polarización Inducida y Resistividad para el proyecto Virgen de Carmen, se basa en el proceso de inversión en 2D, los cuales se muestran en secciones y mapas.

En el estudio geofísico, fueron planteados y realizados 8 líneas de IP/RES, con un distanciamiento entre líneas de 100 a 200 metros en IP/RES y una distancia entre electrodos de 50 metros. Cuyos resultados de cargabilidad y resistividad en cada línea fueron interpretadas en términos geológicos.

A continuación, se realiza una descripción de los horizontes geoelectricos, con la finalidad de identificar zonas mineralizadas.

Figura 23: Líneas de polarización inducida y resistividad



Fuente: GEOMAD SG EIRL.

4.2.1. Análisis de secciones IP/RES

Sección – Línea 100

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 200 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 325 a 450 Ohm*m, Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 380 a 1715 Ohm*m, y el Grupo Maure (tobas de cristales) con resistividades de 70 a 200 Ohm*m, ver figura 24.

En dirección SW de la sección, se observa una anomalía de interés, con cargabilidad alta que van de 20 a 50 mV/V, y resistividades de 376 a 2059 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 24.

A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, el conglomerado basal en matriz tobacea y tobas de cristales, la zona mineralizada está representada por el color rojo, ver figura 24.

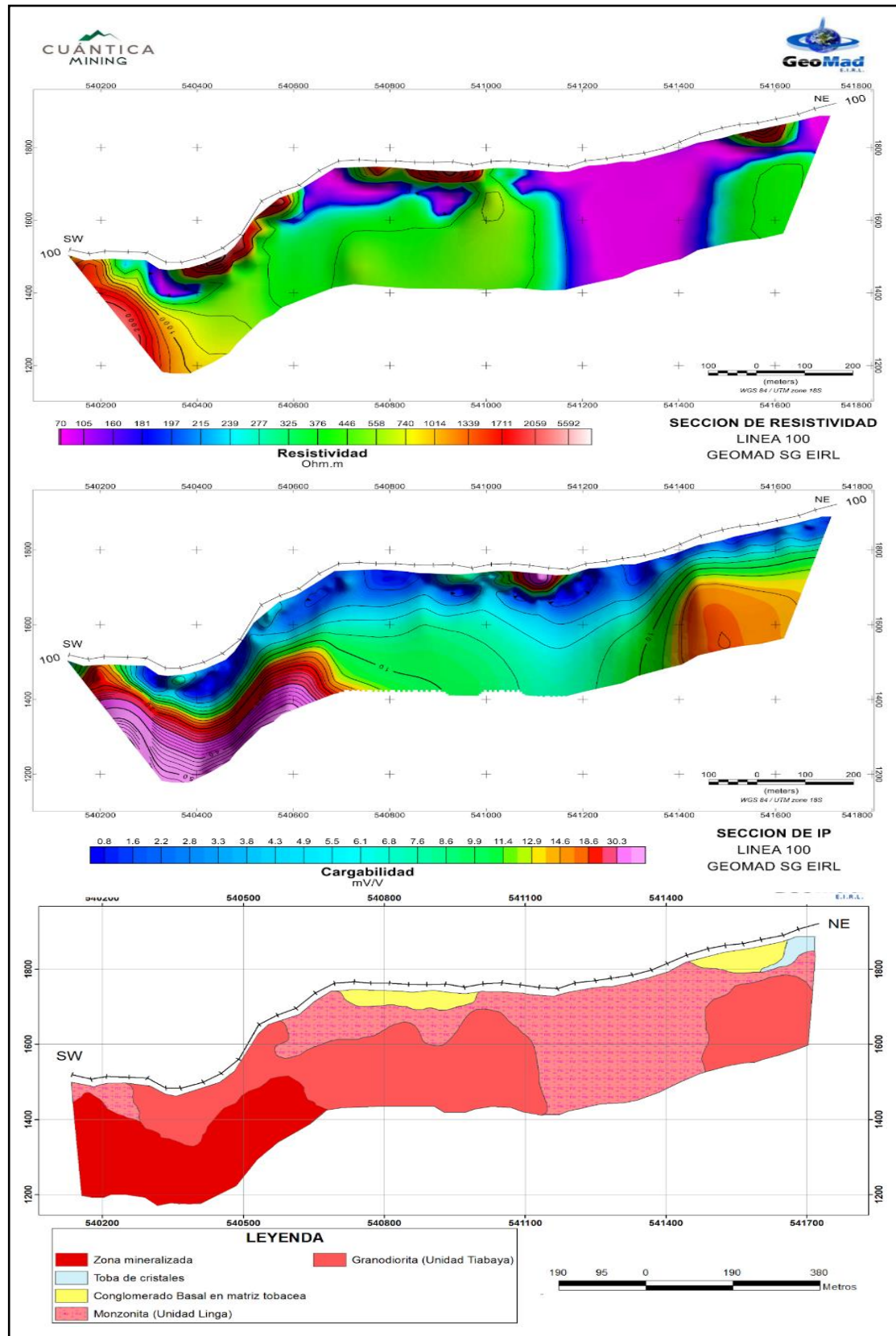
Sección – Línea 200

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 325 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 70 a 480 Ohm*m, Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 70 a 376 Ohm*m, y el Grupo Maure (tobas de cristales) con resistividades de 70 a 180 Ohm*m, ver figura 25.

En dirección SW de la sección, se observa una anomalía de interés, con cargabilidad alta que van de 20 a 45 mV/V, y resistividades de 239 a 1800 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 25.

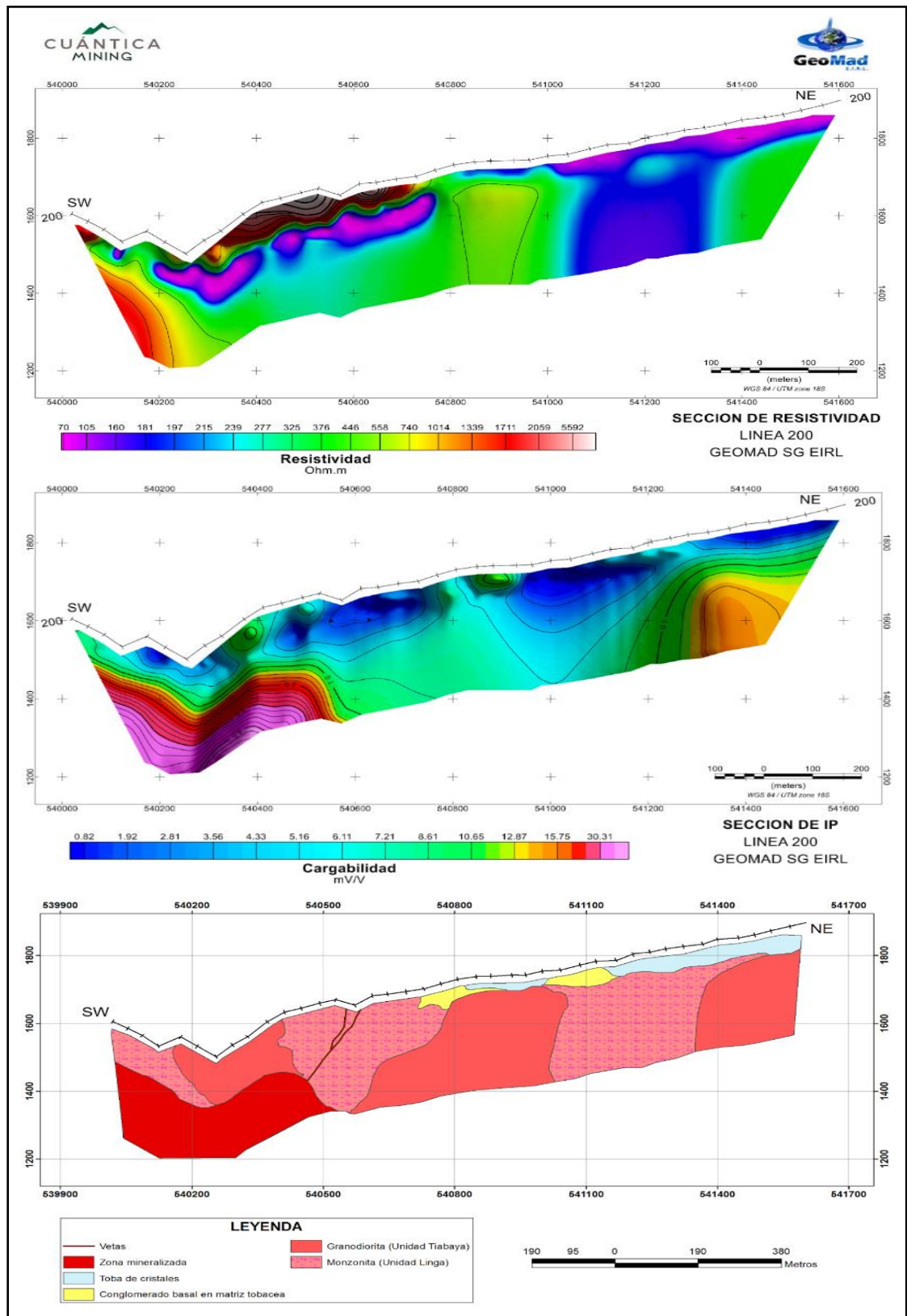
A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, el conglomerado basal en matriz tobacea y tobas de cristales, la zona mineralizada está representada por el color rojo, y las vetas de color marrón, ver figura 25.

Figura 24: Sección IP/RES – Línea 100



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 25: Sección IP/RES – Línea 200



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Sección – Línea 300

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 400 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 376 a 6000 Ohm*m, y el Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 380 a 4000 Ohm*m, ver figura 26.

En dirección SW hacia el centro de la sección, se observa una anomalía de interés, con cargabilidad de moderada a alta que van de 18 a 38 mV/V, y resistividades de 70 a 2000 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 26.

A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, y el conglomerado basal en matriz tobacea, la zona mineralizada está representada por el color rojo, y las vetas de color marrón, ver figura 26.

Sección – Línea 400

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 7000 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 70 a 900 Ohm*m, y el Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 70 a 160 Ohm*m, ver figura 27.

En la parte central de la sección, se observa una anomalía de interés, con cargabilidad de moderada a alta que van de 10 a 26 mV/V, y resistividades de 70 a 600 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 27.

A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, y el conglomerado basal en matriz tobacea, la zona

mineralizada está representada por el color rojo, y las vetas de color marrón, ver figura 27.

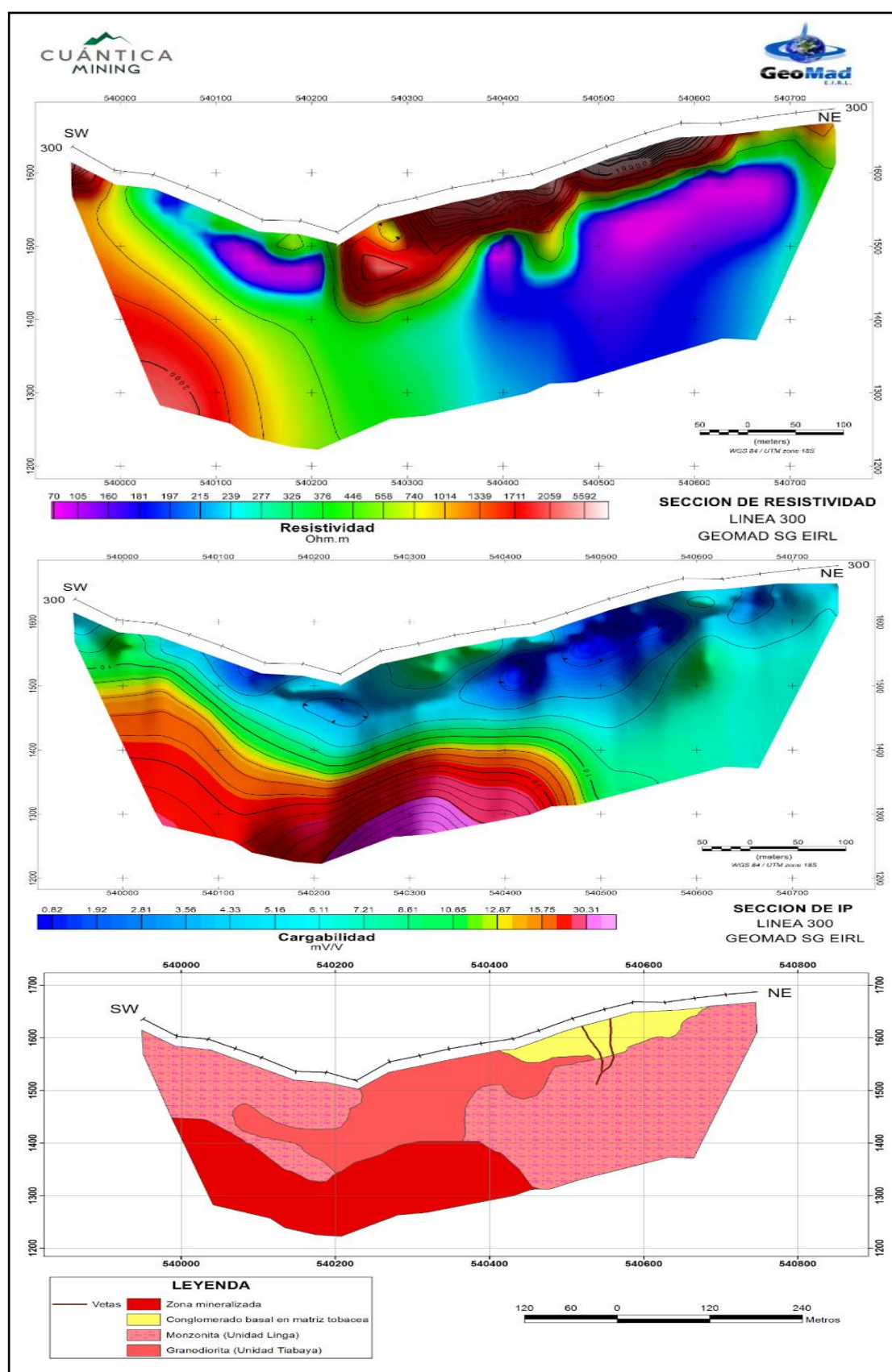
Sección – Línea 500

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 2000 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 270 a 2000 Ohm*m, y el Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 180 a 1700 Ohm*m, ver figura 28.

En esta línea se observa 2 anomalías; en dirección SW de la sección, se observa anomalía de interés, con cargabilidad moderada que van de 8 a 14 mV/V, y resistividades de 70 a 270 Ohm*m. Y en dirección NE de la sección, se observa otra anomalía de interés, con cargabilidad moderada que van de 8 a 14 mV/V, y resistividades de 70 a 250 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 28.

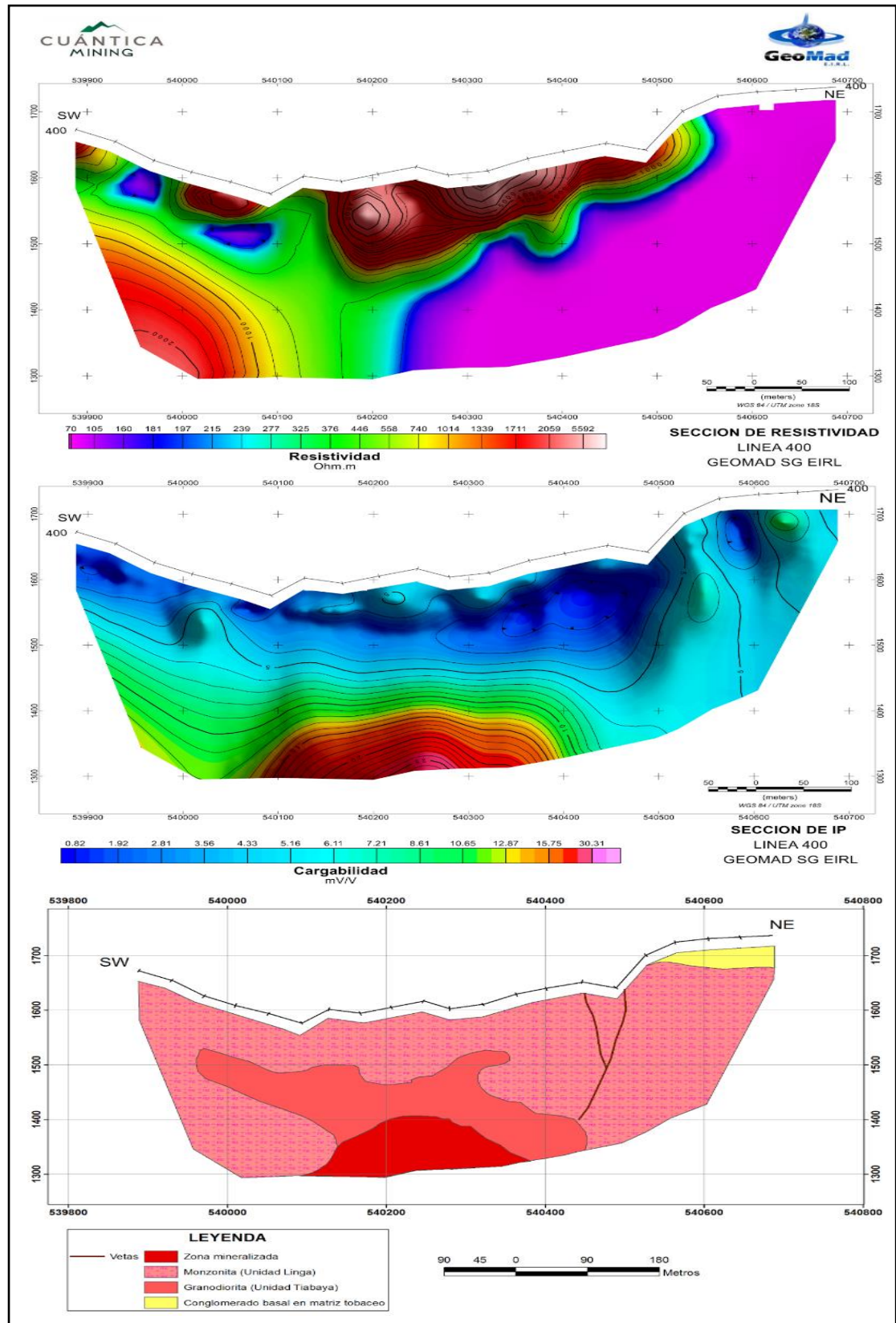
A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, y el conglomerado basal en matriz tobacea, la zona mineralizada está representada por el color rojo, y las vetas de color marrón, ver figura 28.

Figura 26: Sección IP/RES – Línea 300



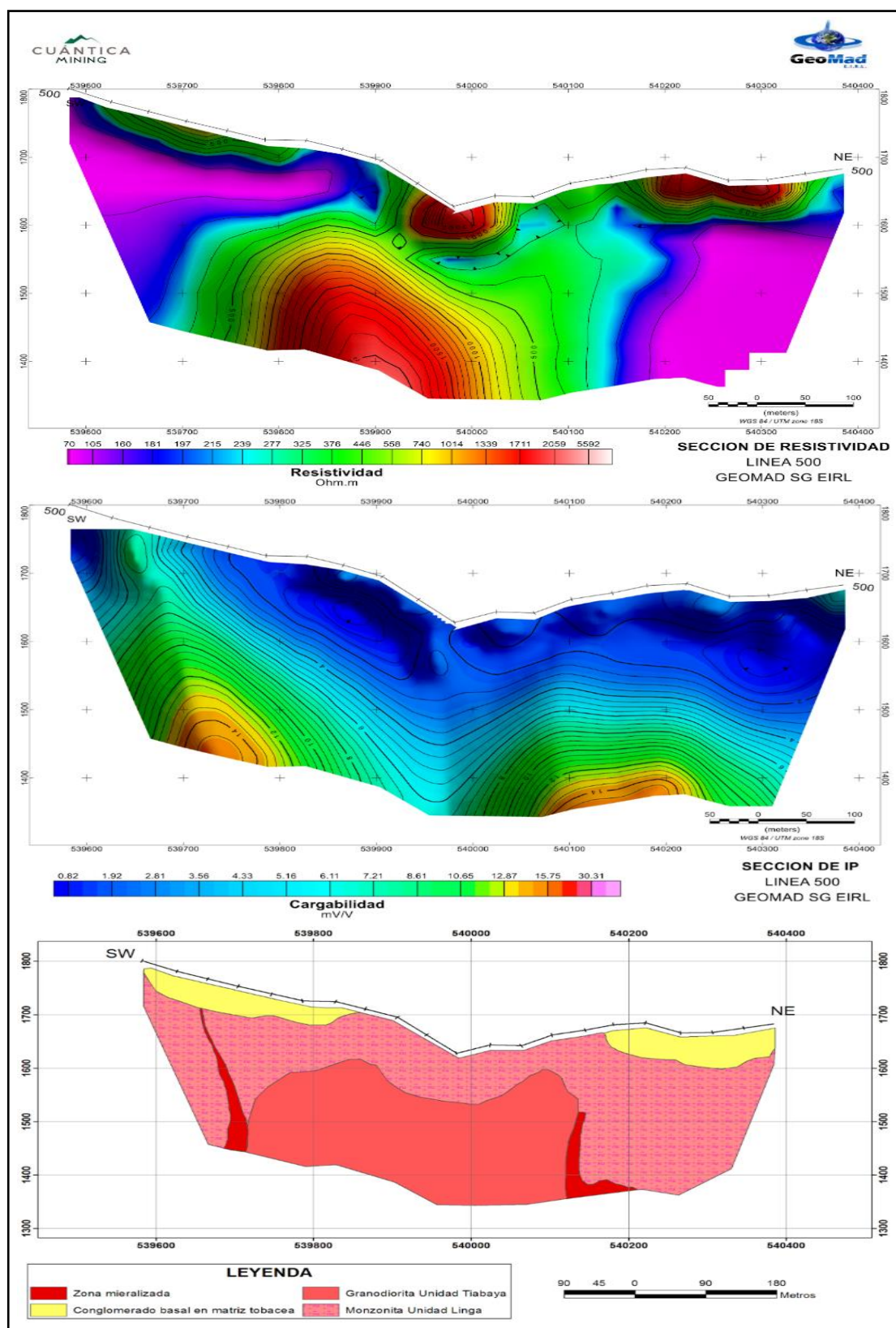
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 27: Sección IP/RES – Línea 400



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 28: Sección IP/RES – Línea 500



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Sección – Línea 600

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 2000 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 180 a 2000 Ohm*m, y el grupo Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 70 a 190 Ohm*m ver figura 29.

En dirección SW de la sección, se observa una anomalía de interés, con cargabilidad moderada que van de 6 a 14 mV/V, y resistividades de 70 a 215 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 29.

A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, y el conglomerado basal en matriz tobacea, la zona mineralizada está representada por el color rojo, y las vetas de color marrón, ver figura 29.

Sección – Línea 700

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 500 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 500 a 1900 Ohm*m, Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 350 a 2500 Ohm*m, y Grupo Maure (tobas de cristales) con resistividades de 180 a 400 Ohm*m, ver figura 30.

En esta línea se observa 2 anomalías; en dirección SW de la sección, se observa anomalía de interés, con cargabilidad moderada que van de 6 a 17 mV/V, y resistividades de 70 a 300 Ohm*m. Y en el centro de la sección, se observa otra anomalía de interés, con cargabilidad moderada de 8 mV/V, y resistividades de 240 a 325 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 30.

A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, el conglomerado basal en matriz tobacea y tobas de cristales, la zona mineralizada está representada por el color rojo, y las vetas de color marrón, ver figura 30.

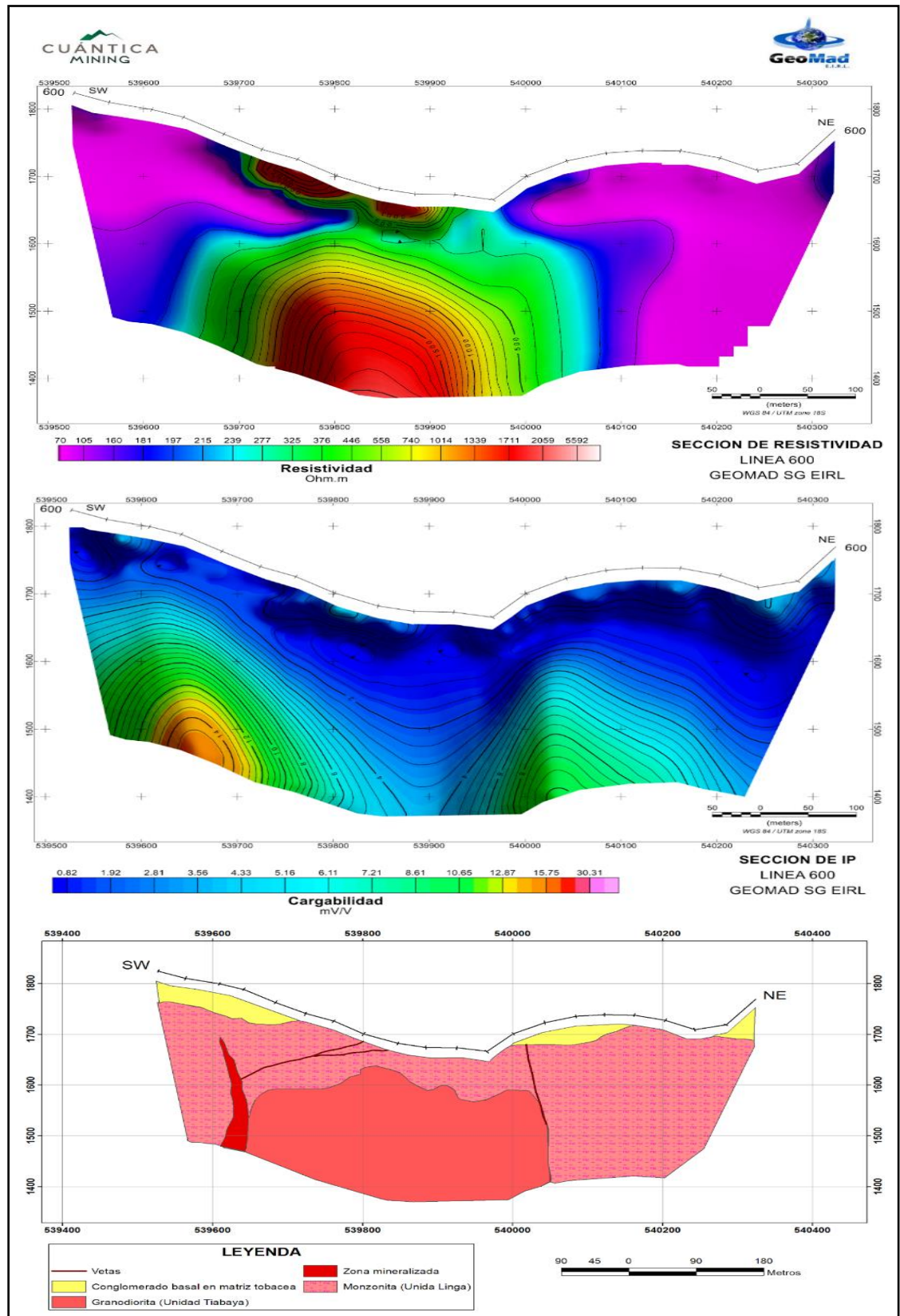
Sección – Línea 800

En esta línea se ha identificado a la Unidad Linga (monzonita) con resistividades de 70 a 215 Ohm*m, la Unidad Tiabaya (granodiorita) con resistividades de 30 a 1800 Ohm*m, Grupo Nasca (conglomerado basal en matriz tobacea) con resistividades de 160 a 400 Ohm*m, y Grupo Maure (tobas de cristales) con resistividades de 70 a 200 Ohm*m, ver figura 31.

En dirección SW de la sección, se observa una anomalía de interés, con cargabilidad moderada que van de 6 a 20 mV/V, y resistividades de 70 a 105 Ohm*m, esta característica de la anomalía indica la presencia de una zona mineralizada, ver figura 31.

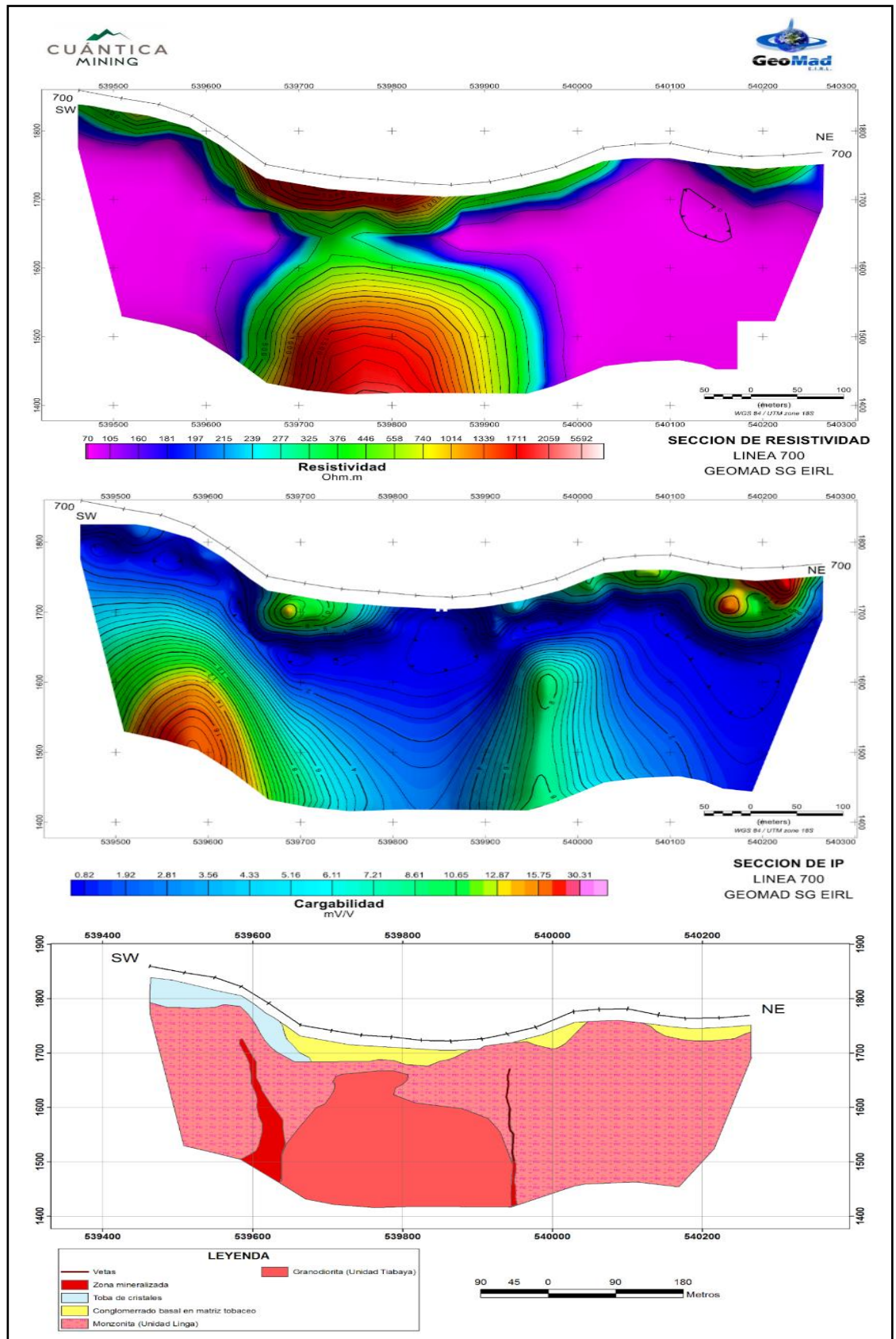
A si mismo se presenta una sección interpretada donde se aprecian la monzonita, granodiorita, el conglomerado basal en matriz tobacea y tobas de cristales, la zona mineralizada está representada por el color rojo, y las vetas de color marrón, ver figura 31.

Figura 29: Sección IP/RES – Línea 600



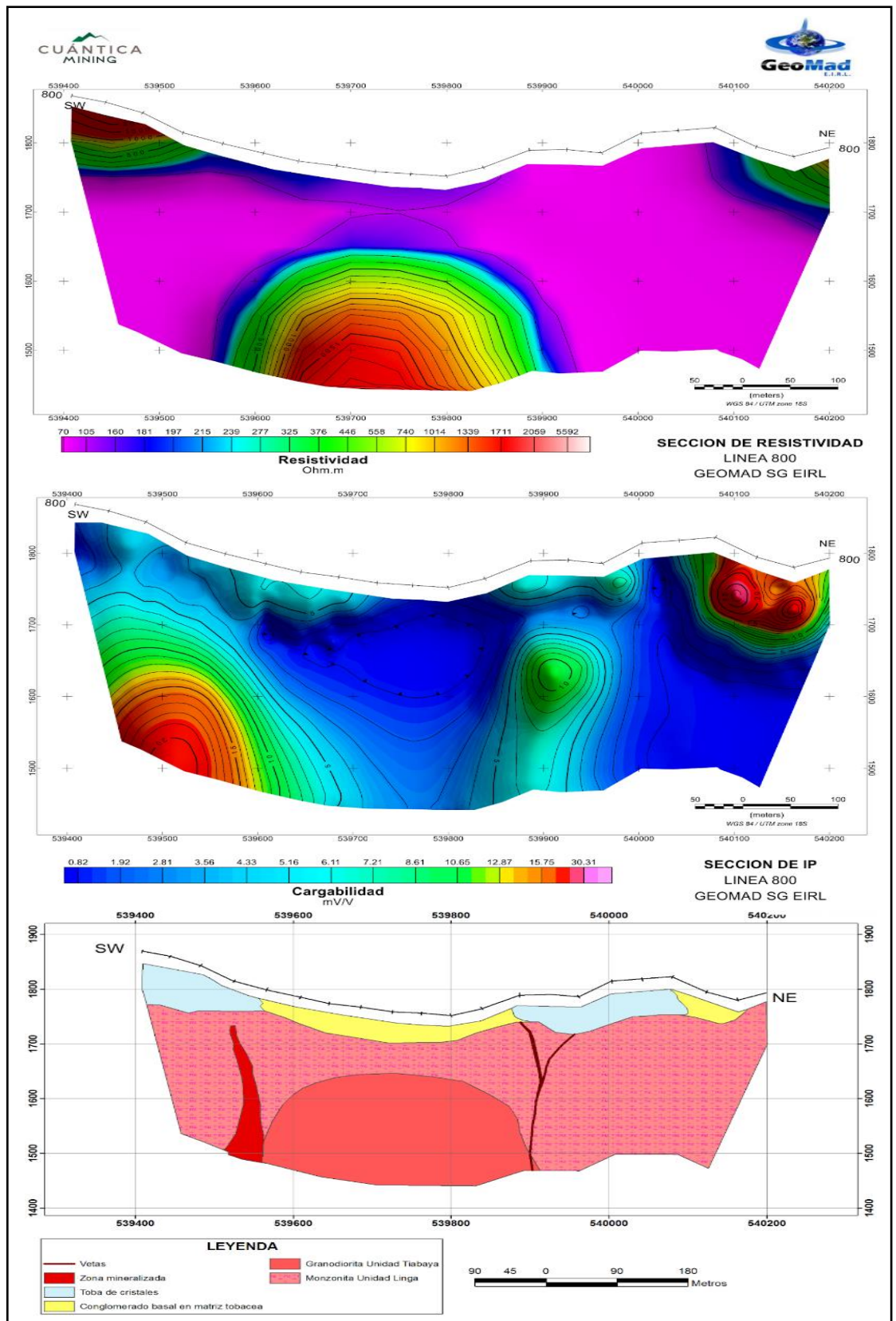
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 30: Sección IP/RES – Línea 700



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 31: Sección IP/RES – Línea 800



Fuente: GEOMAD SG EIRL

4.2.2. Análisis de mapas IP/RES

Mapa – Cota 1850 (-250)

Considerando la parte más superficial, se aprecia una zona concentrada de cargabilidad con valores entre los 13 a 30 mV/V, que posiblemente se trataría de vetas de sulfuros que afloran en la superficie. Las resistividades son moderadas entre los 300 a 800 Ohm*m, esta zona se trataría de intrusivos (monzonita, tonalita y granodiorita), ver figura 32.

Mapa – Cota 1850 (-200)

En este mapa se muestra cargabilidades con valores superan los 12 mV/V y resistividades entre los 200 a 1000 Ohm*m, estas anomalías se encuentran desplazadas hacía el SW respecto al mapa de cota 1850 (-250), la cual indicaría cierto buzamiento del sistema de vetas, ver figura 33.

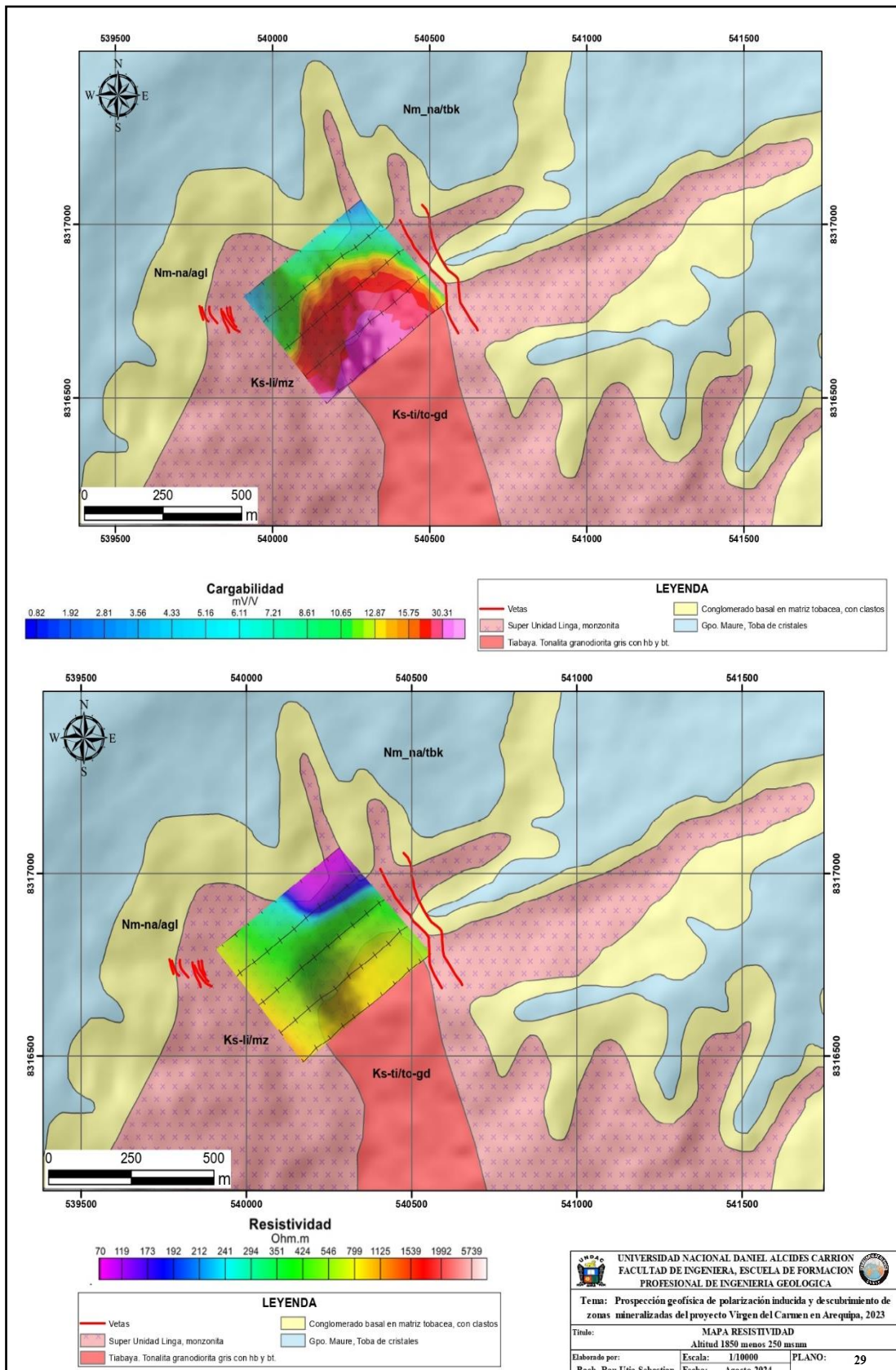
Mapa – Cota 1850 (-150)

En este mapa la anomalía de cargabilidad continúa desplazándose hacia el SW con valores de entre 12 a 31 mV/V mientras que las resistividades van de los 80 a 1100 Ohm*m, ver figura 34.

Mapa – Cota 1850 (-100)

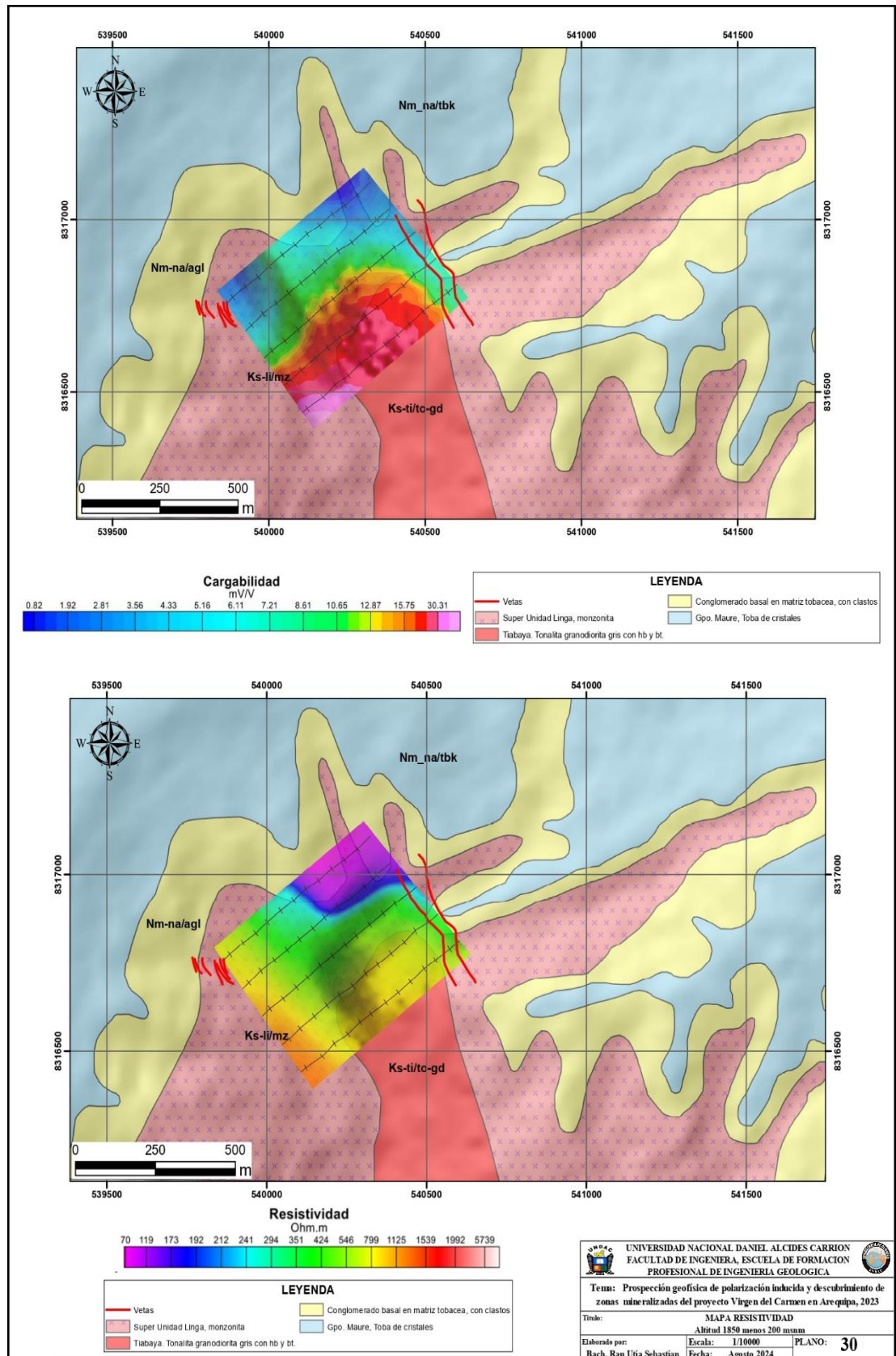
Sobre este mapa la anomalía de cargabilidad sigue mostrando la tendencia SW con cargabilidades de entre 15 a 30 mV/V mientras que las resistividades moderadas a altas que van desde 100 a 1500 Ohm*m, que estarían relacionadas a vetas de sulfuros y cuerpos intrusivos (monzonita, tonalita y granodiorita) respectivamente, ver figura 35.

Figura 32: Mapa IP/RES – Cota 1850 (-250)



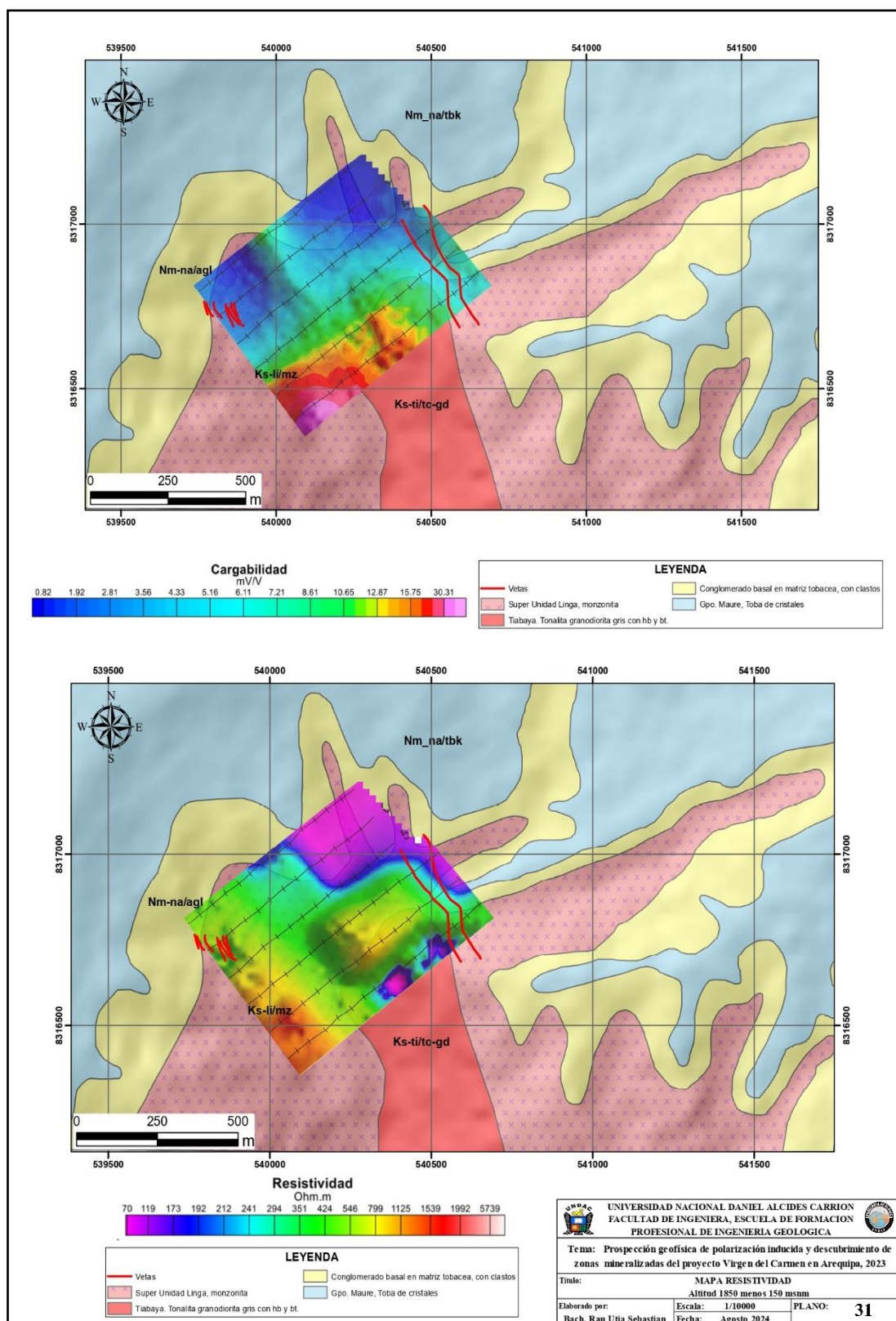
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 33: Mapa IP/RES – Cota 1850 (-200)



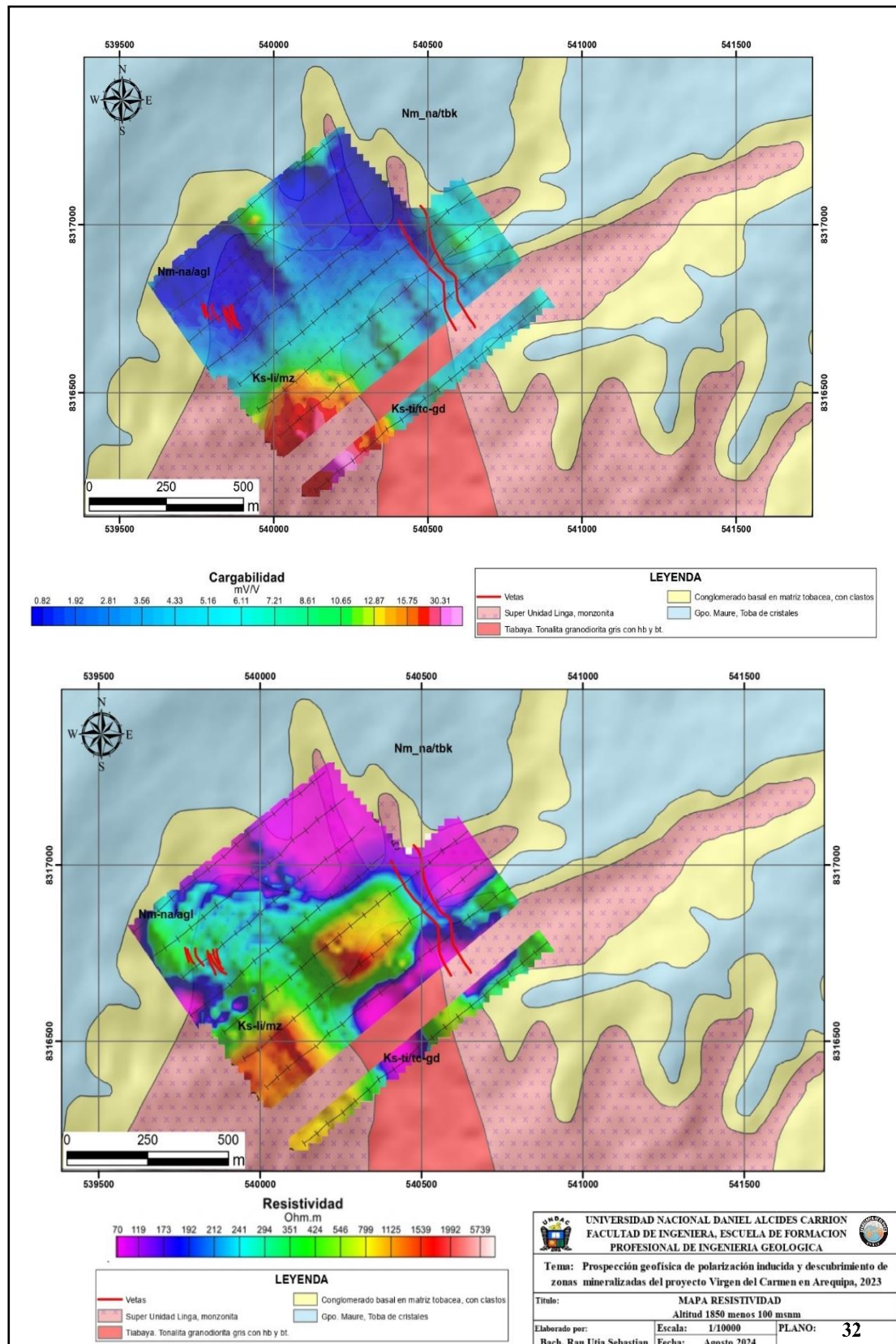
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 34: Mapa IP/RES – Cota 1850 (-150)



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 35: Mapa IP/RES – Cota 1850 (-100)



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Mapa – Cota 1850 (-50)

En este mapa se observa dos anomalías muy pequeñas, la primera que es la continuación de la cota 1850 (-100) con valor de cargabilidad de 13 a 23 mV/V, y la otra anomalía de cargabilidad en el lado NW con valores de 12 a 30 mV/V. Las resistividades varían desde los 700 hasta los 1500 Ohm*m, ver figura 36.

Mapa – Cota 1700

En este mapa se observa anomalías muy pequeñas de cargabilidad moderada de 12 a 20 mV/V. Las resistividades son de bajas a moderadas que varían desde los 70 hasta los 350 Ohm*m, lo que denotaría la presencia de conglomerados y tobas, ver figura 37.

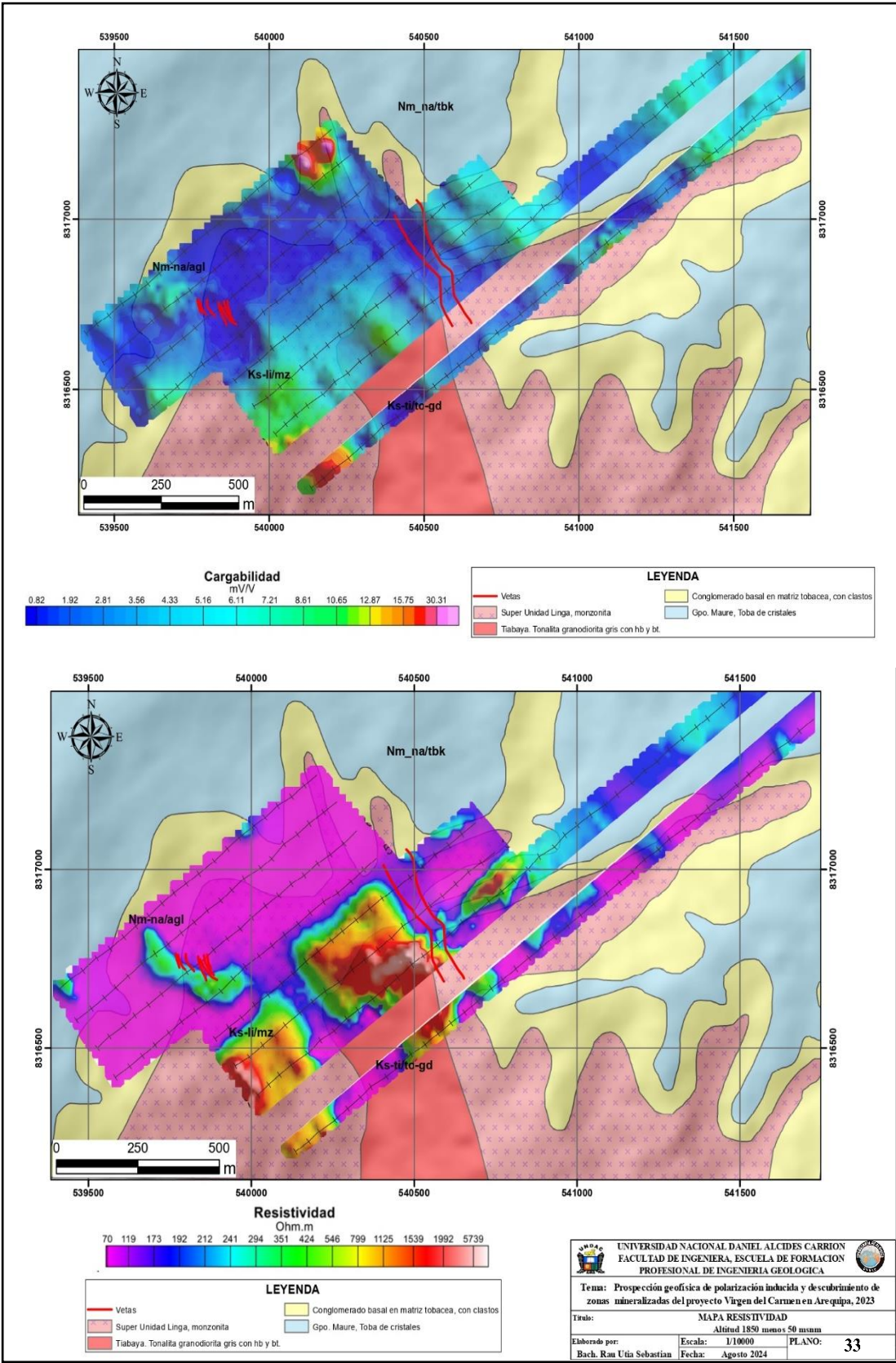
Mapa – Cota 1650

No observa anomalías altas. Las resistividades son similares a la cota 1700 con valores de 70 a 350 Ohm*m, lo que indicaría la presencia de conglomerados y tobas, ver figura 38.

Mapa – Cota 1600

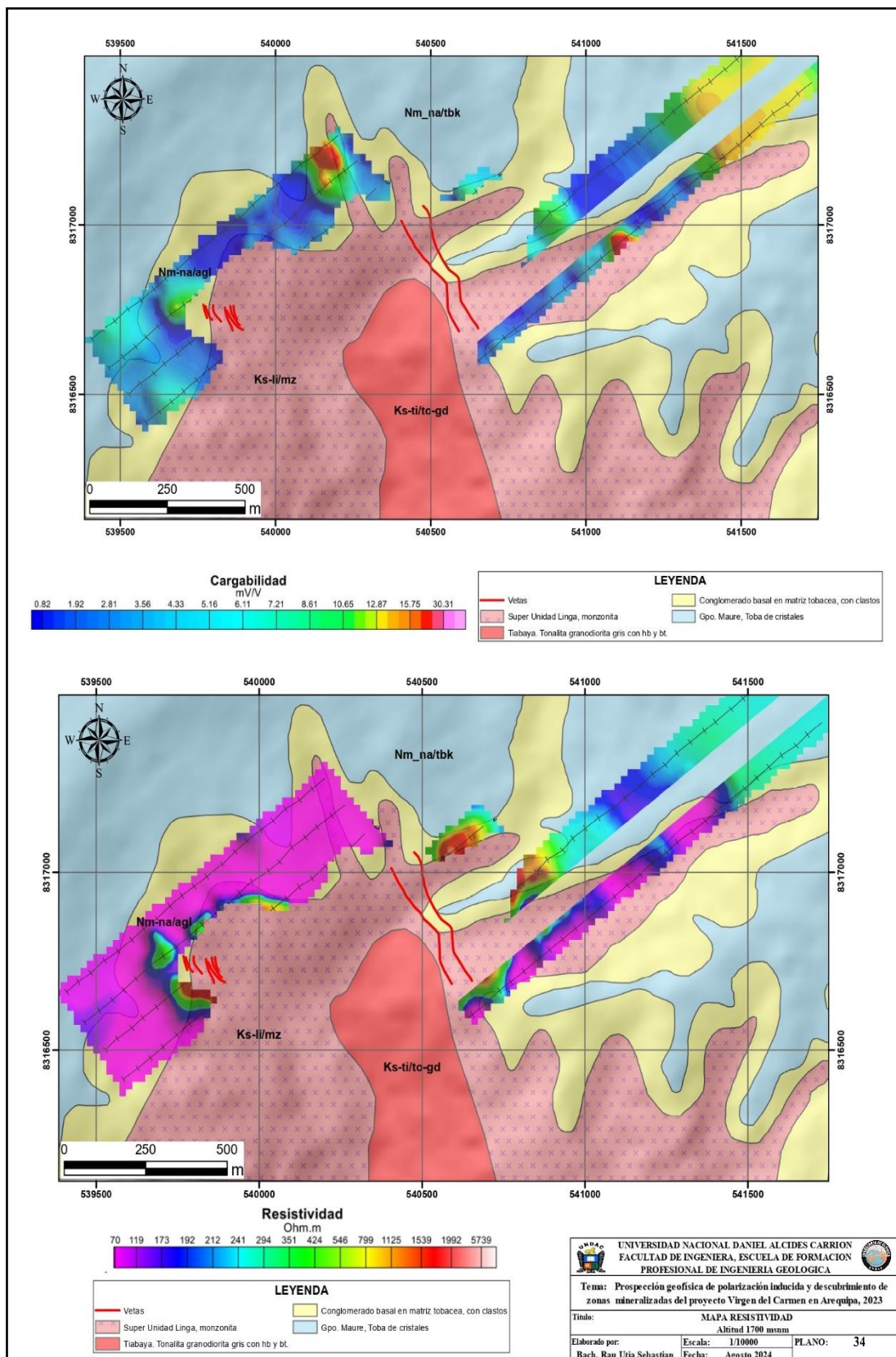
En este mapa se observa una pequeña anomalía de cargabilidad moderada en lado W que va desde 12 a 15 mV/V. Y las resistividades presentan valores de 70 a 450 Ohm*m, lo que señalaría la presencia de conglomerados y tobas, ver figura 39.

Figura 36: Mapa IP/RES – Cota 1850 (-50)



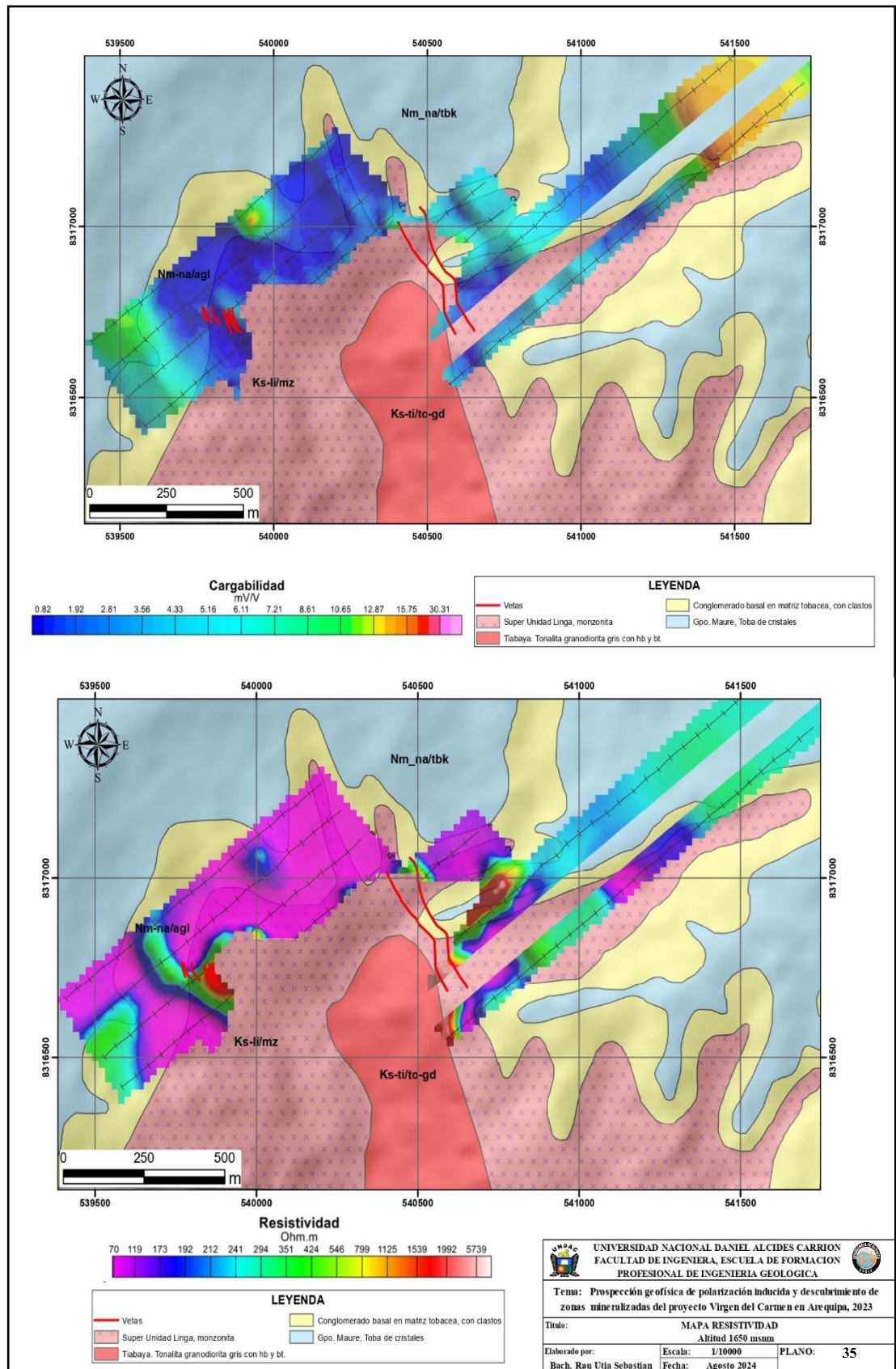
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 37: Mapa IP/RES – Cota 1700



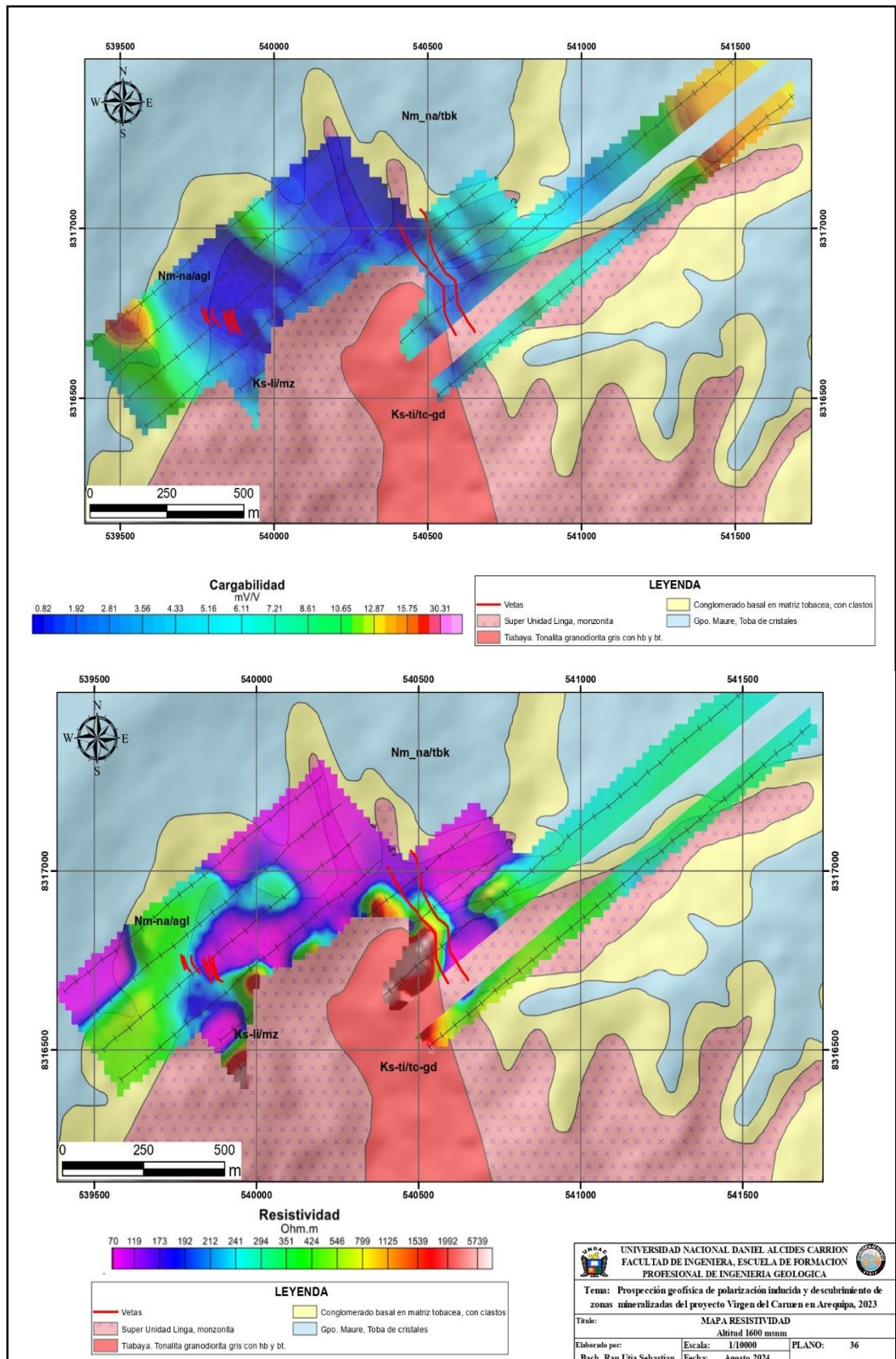
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 38: Mapa IP/RES – Cota 1650



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 39: Mapa IP/RES – Cota 1600



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Mapa – Cota 1550

En este mapa se observa en el lado W la continuación de la anomalía de la Cota 1500 con cargabilidad que va desde 13 a 25 mV/V lo que señalaría la presencia de minerales sulfurados. Y las resistividades presentan valores de 70 a 1500 Ohm*m, lo que mostraría probablemente la presencia de conglomerados y tobas y posiblemente algún intrusivo, ver figura 40.

Mapa – Cota 1500

Sobre este mapa no se logra observar una anomalía de carga alta. Las resistividades presentan valores 70 a 1520 Ohm*m, lo que mostraría posiblemente la presencia de conglomerados y tobas y algún intrusivo, ver figura 41.

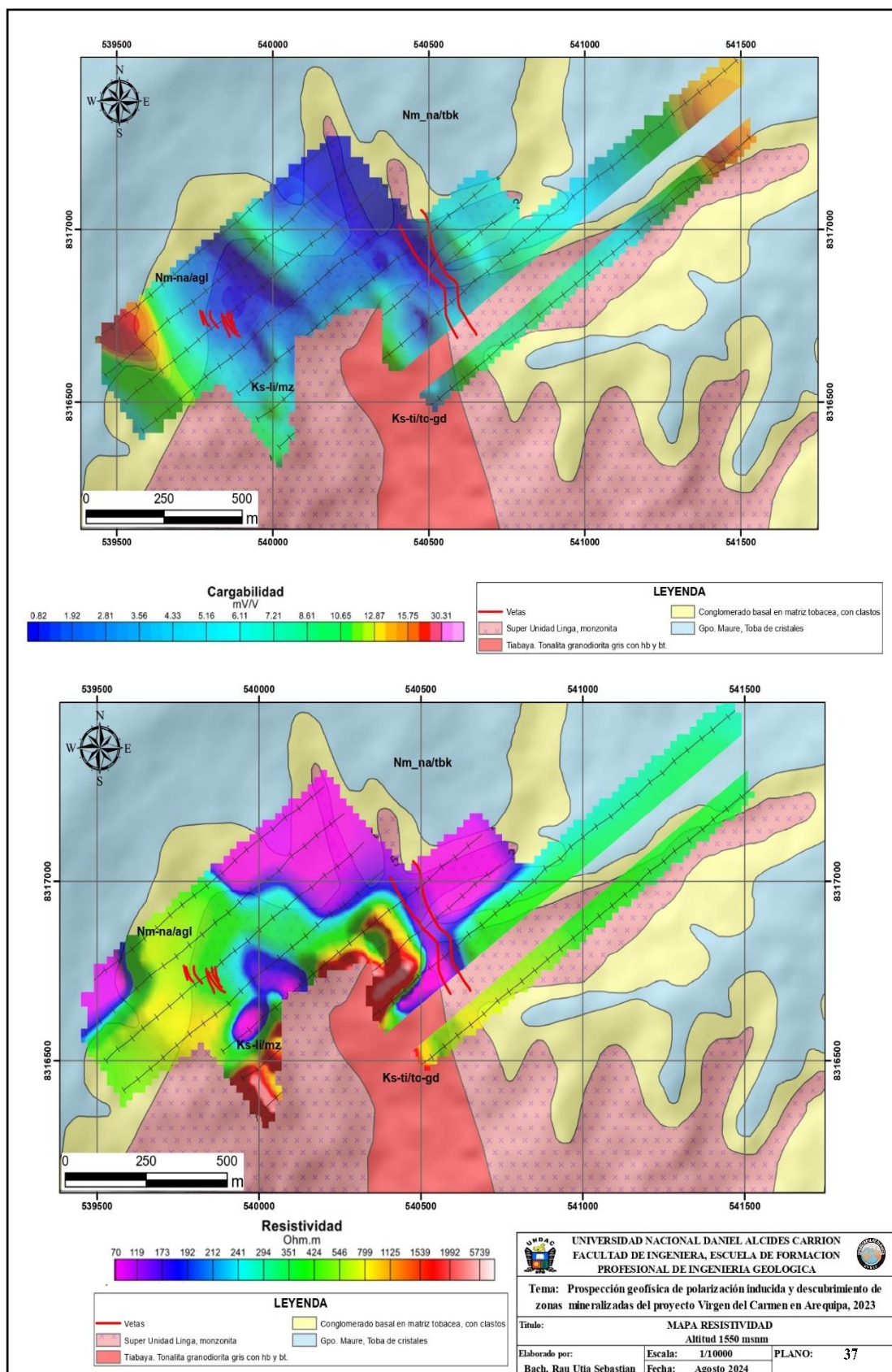
Mapa – Cota 1450

En este mapa se observa dos anomalías, con cargabilidades que van de 15 a 29 mV/V lo que posiblemente indicaría la presencia de minerales de sulfuro. Asimismo, las resistividades varían desde los 70 hasta los 1000 Ohm*m, lo que probablemente sean conglomerados, tobas e intrusivos ver figura 42.

Mapa – Cota 1400

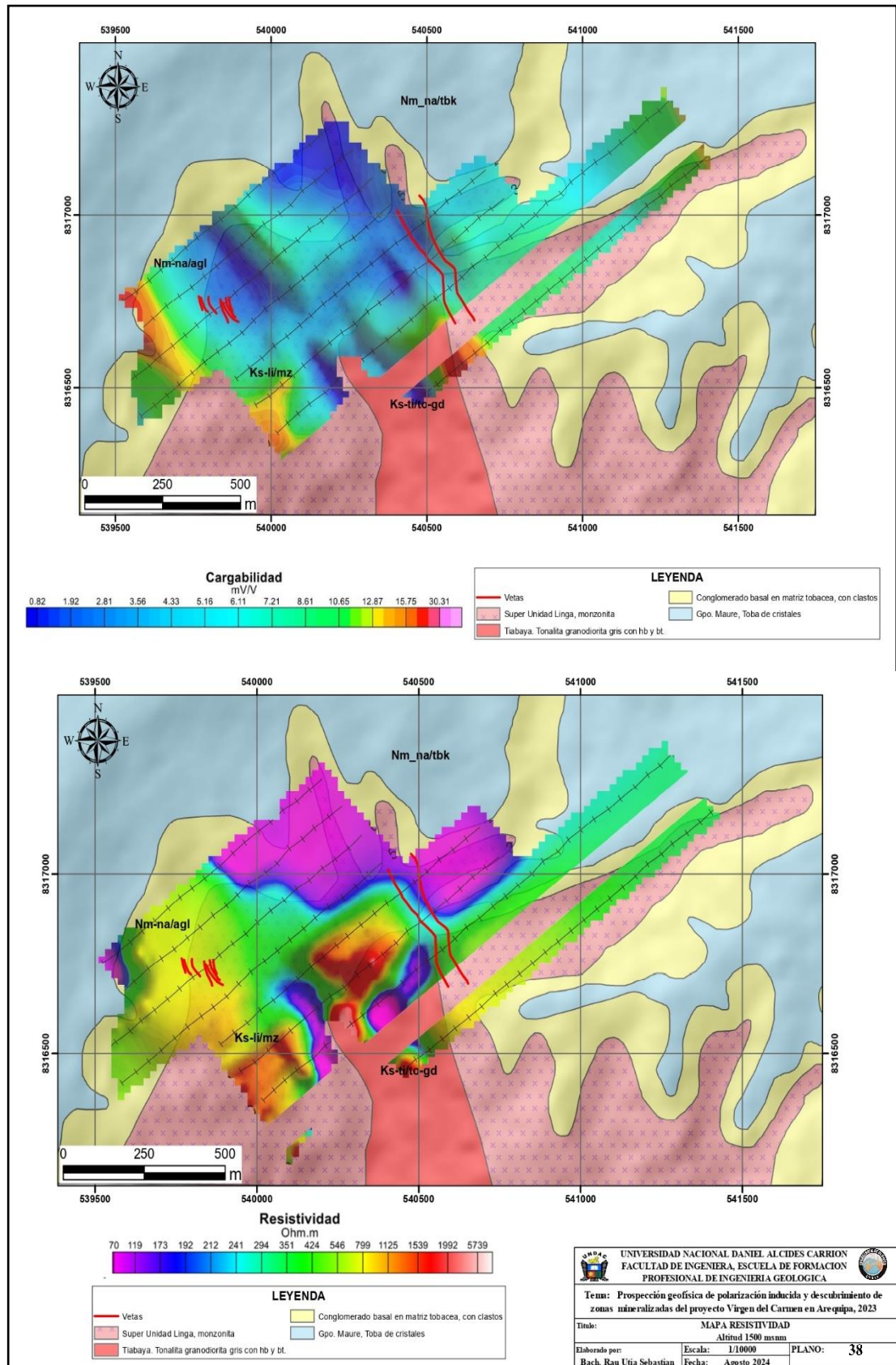
Sobre este mapa se observa dos anomalías, con cargabilidades que van de 15 a 35 mV/V lo que probablemente sean minerales de sulfuro. Además, las resistividades varían desde los 70 hasta los 1000 Ohm*m, lo que probablemente sean conglomerados, tobas e intrusivos ver figura 40.

Figura 40: Mapa IP/RES – Cota 1550



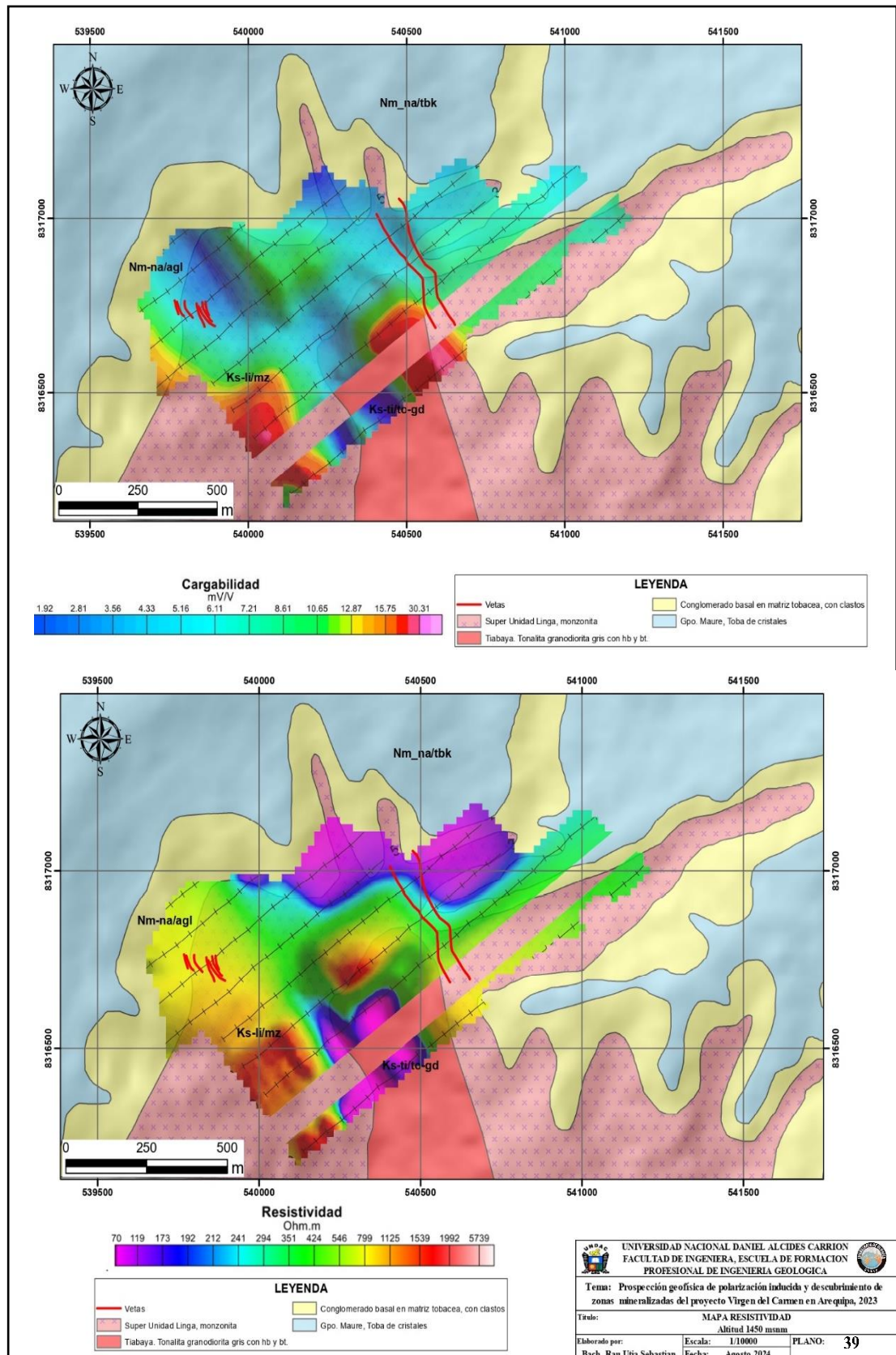
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 41: Mapa IP/RES – Cota 1500



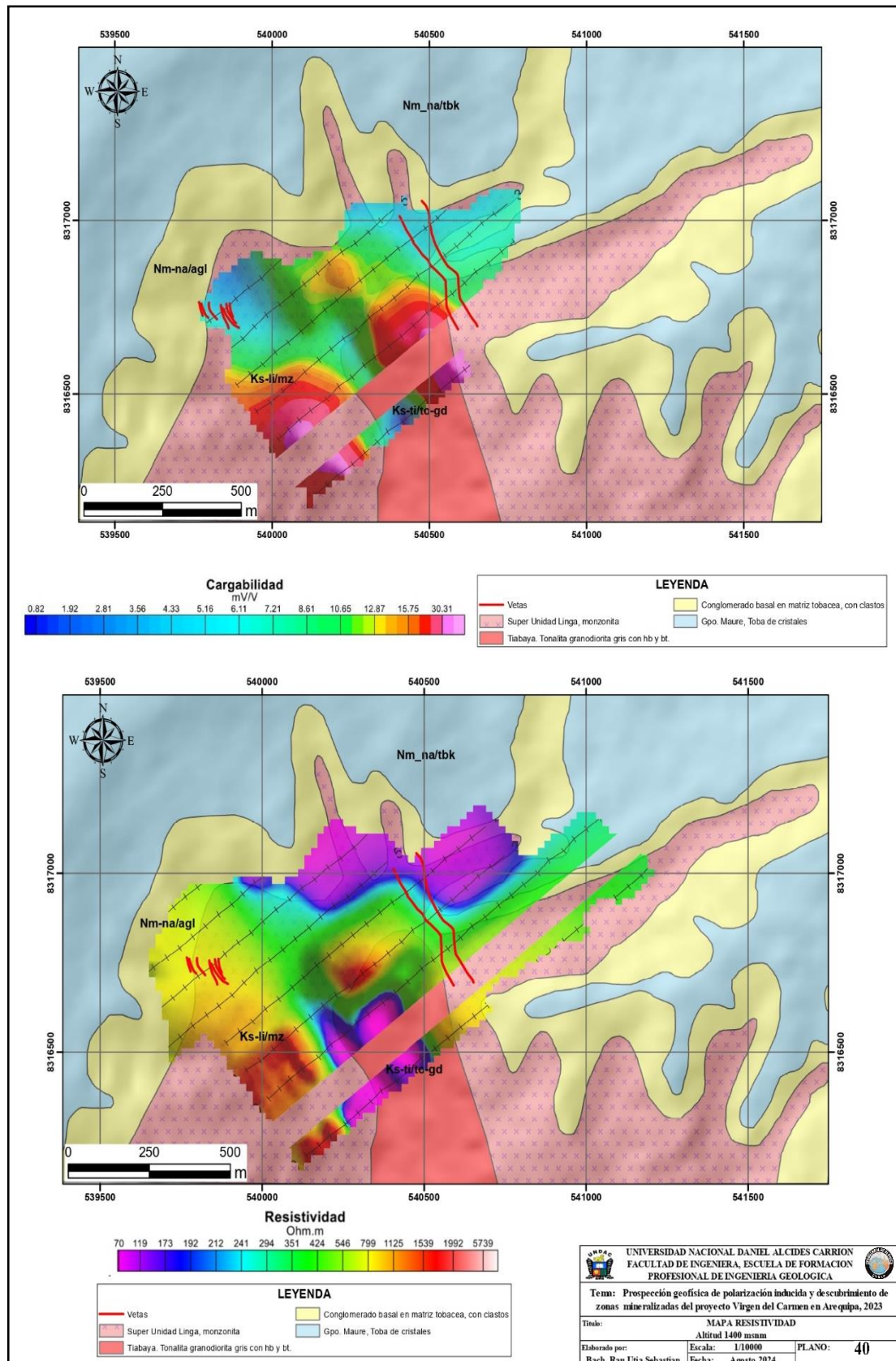
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 42: Mapa IP/RES – Cota 1450



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 43: Mapa IP/RES – Cota 1400



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Mapa – Cota 1350

En este mapa se observa dos anomalías, con cargabilidades altas que van de 15 a 31 mV/V lo que posiblemente indicaría la presencia de minerales de sulfuro. Asimismo, las resistividades son moderadas varían desde los 350 hasta los 800 Ohm*m, ver figura 43.

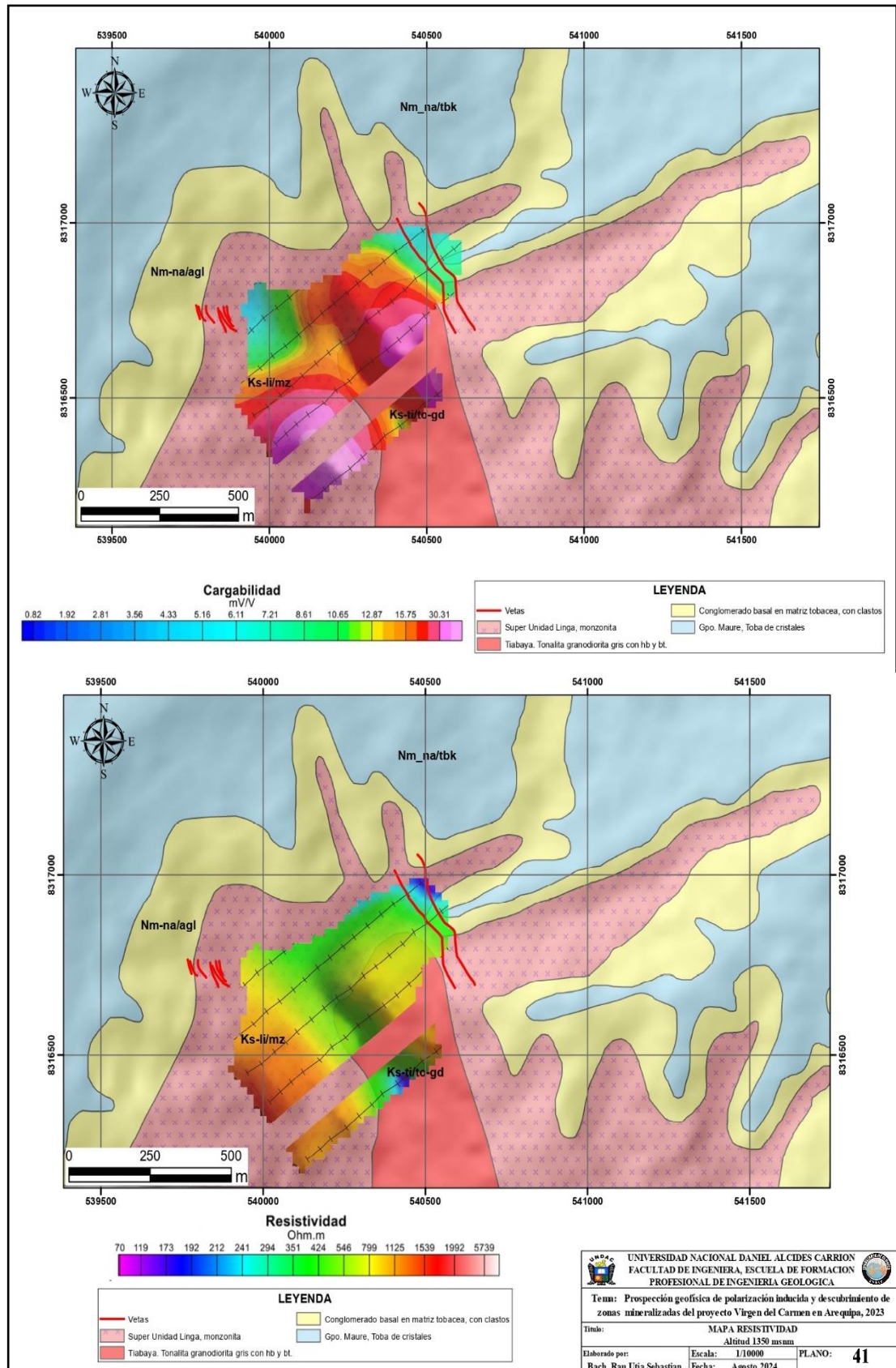
Mapa – Cota 1300

En este mapa se observa que la anomalía presenta cargabilidad que va desde 15 a 35 mV/V lo que señalaría la presencia de minerales sulfurados. Y las resistividades son moderadas con valores de 400 a 950 Ohm*m, ver figura 44.

Mapa – Cota 1250

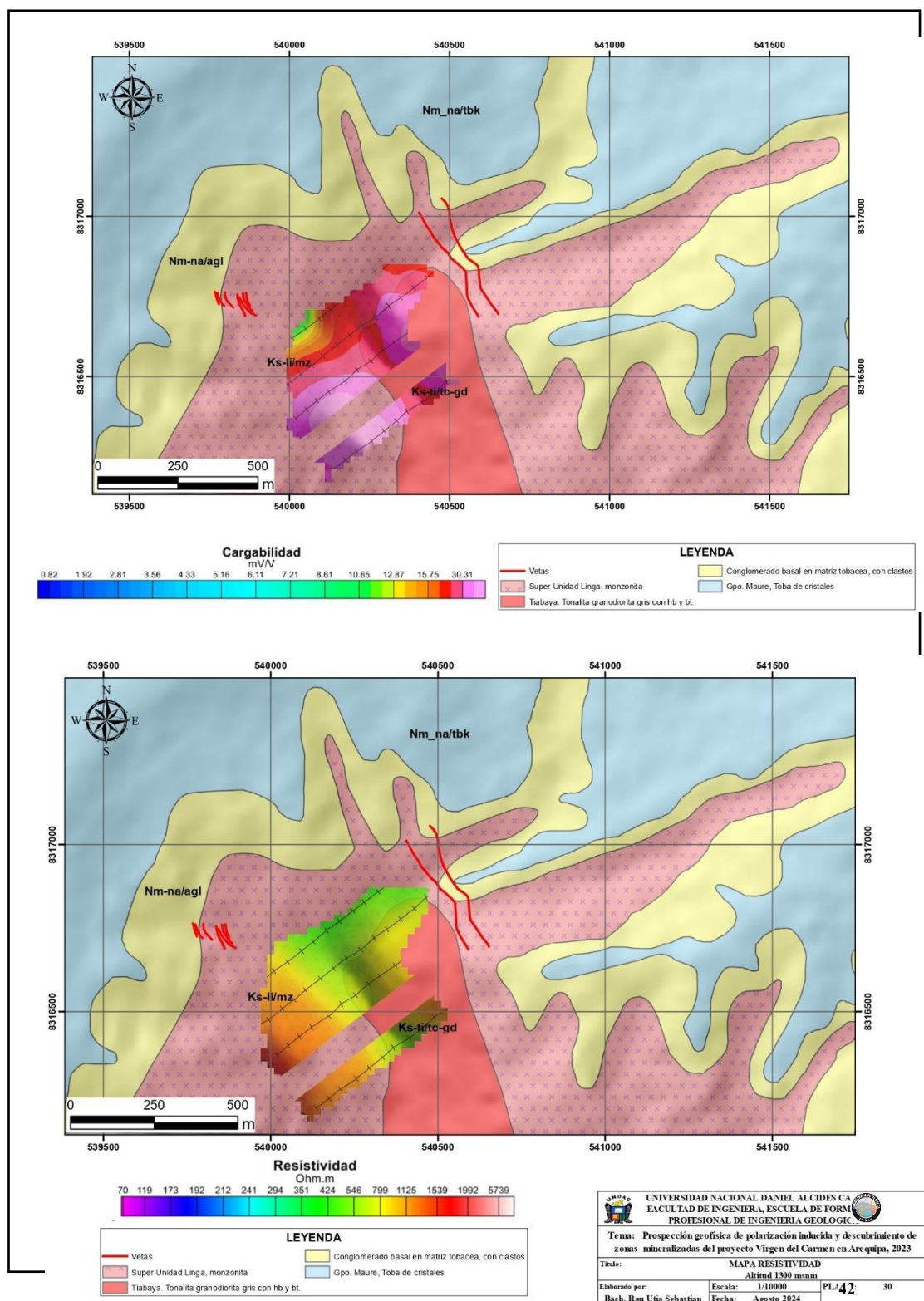
Sobre este mapa se observa anomalía de carga alta que va desde 20 a 35 mV/V lo que señalaría claramente la presencia de minerales sulfurados. Las resistividades presentan valores 450 a 100 Ohm*m los cuales son moderadas, ver figura 45.

Figura 44: Mapa IP/RES – Cota 1350



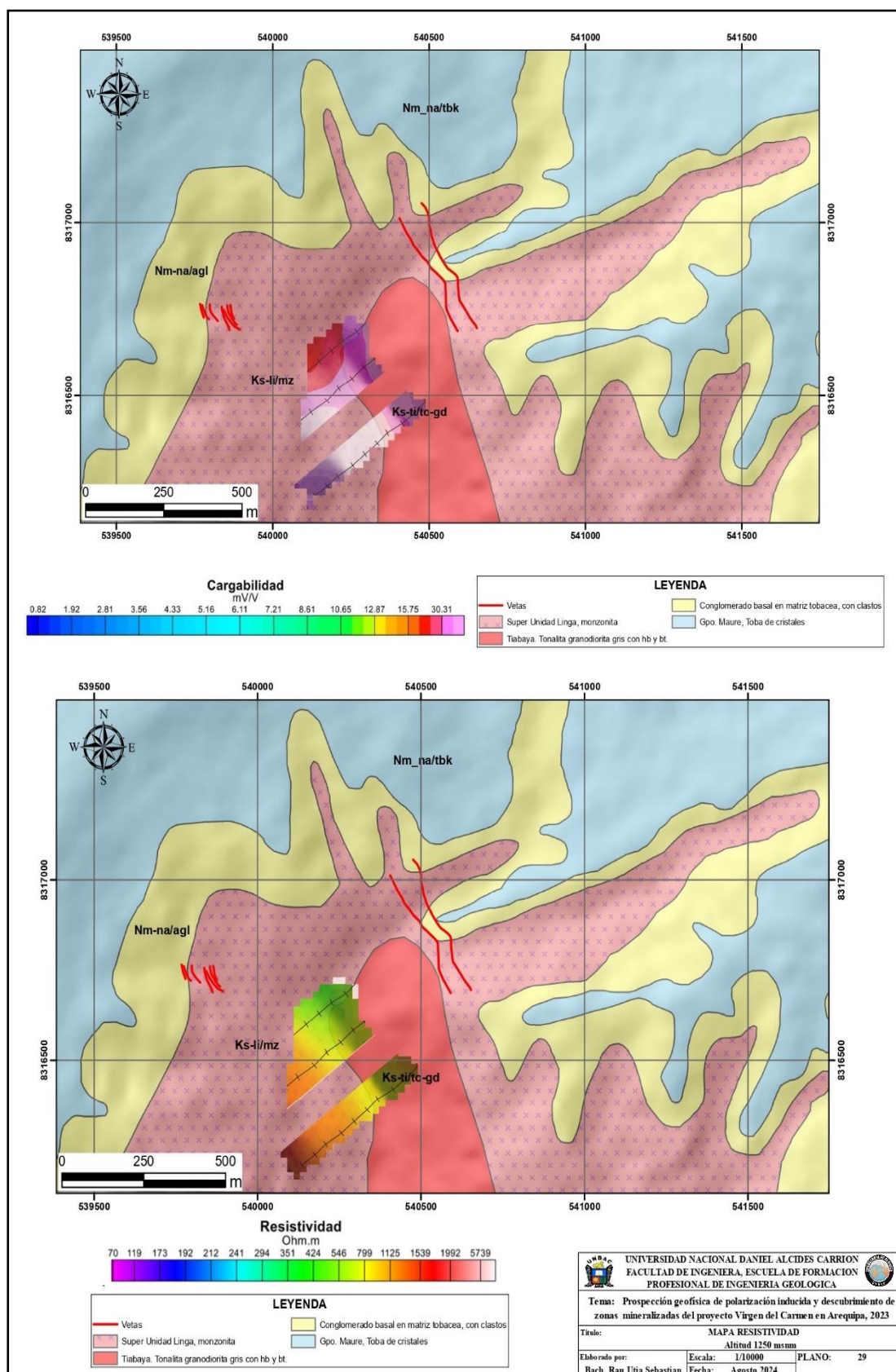
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 45: Mapa IP/RES – Cota 1300



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 46: Mapa IP/RES – Cota 1250



Fuente: GEOMAD SG EIRL

4.2.3. Targets de perforación propuesta

Para la determinación de los targets de perforación se realizó en función de las secciones de Cargabilidad y Resistividad e interpretación geológica.

Se han propuesto un total de 7 taladros exploratorios, como están determinados en la Tabla 7. y así una vez perforado se llegará a conocer las leyes del contenido mineral existente en la zona de trabajo del proyecto Virgen de Carmen.

Tabla 10 *Perforaciones propuestas del Proyecto Virgen del Carmen*

Drillhole	Easting	Northing	Elevation	Azimuth	Dip	Target Depth (m)
hole001	540256.57	8316552.6	1508.35	53°	60°	300
hole003	540226.85	8316659.3	1529.19	53°	65°	320
hole004	540450.15	8316448.4	1534.15	53°	70°	300
hole005	539801.71	831671.9	1693.15	233°	35°	350
hole006	539925.66	8316806.2	1675.51	50°	50°	320
hole007	539704.88	8316764.6	1728.83	233°	40°	340
hole008	539905.97	8316911.5	1708.81	53°	55°	300

Fuente: GEOMAD SG EIRL

En el presente estudio se consideraron siete targets, los cuales se presentan en función de secciones de cargabilidad y resistividad. Las zonas con potencial de mineralización responden a altos valores de cargabilidad y, en general, a bajos valores de resistividad. Sin embargo, esta relación no puede considerarse completamente concluyente, ya que depende tanto de la morfología de la mineralización como del tipo de yacimiento que se esté analizando. En cuanto a las perforaciones propuestas, la profundidad mínima contemplada es de 300 metros, mientras que la máxima alcanza los 350 metros.

Los siete targets propuestos han sido clasificados en dos categorías: de primera y de segunda prioridad. Para determinar si un objetivo corresponde a una u otra categoría, se han considerado diversos factores. Entre ellos destaca la intensidad de la respuesta geofísica del terreno, la cual se manifiesta de forma indirecta en los mapas y secciones de cargabilidad y resistividad eléctrica. Asimismo, se han evaluado la profundidad de las anomalías detectadas. Es importante tener en cuenta que, al tratarse de un método indirecto, la geofísica puede mostrar anomalías de gran tamaño y con señales intensas que no necesariamente corresponden a cuerpos o estructuras con un alto contenido de mineralización.

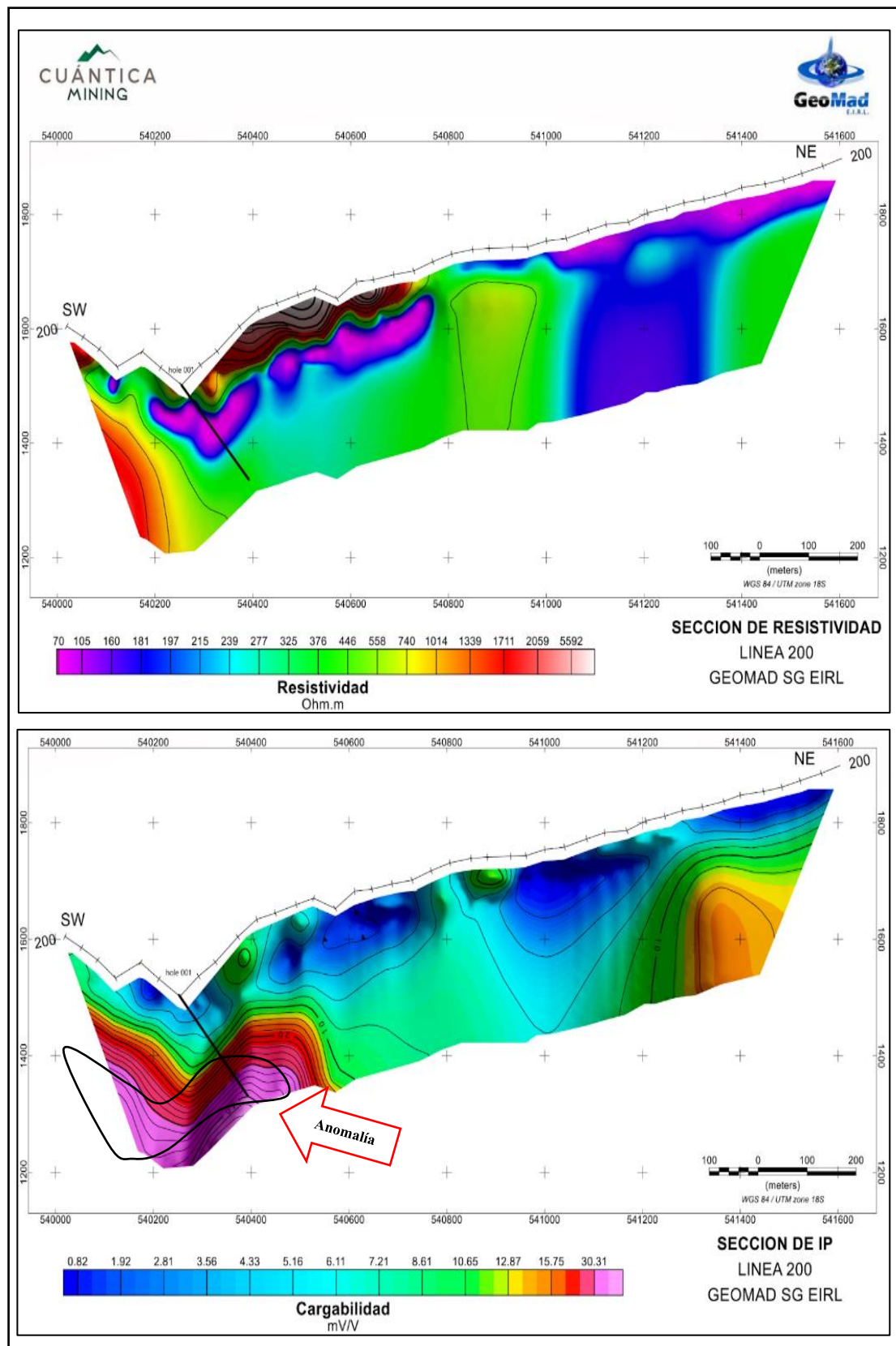
Targets de primera prioridad

En los targets de primera prioridad se han considerado un total de 3 perforaciones. Así tenemos los targets hole001, hole003 y hole004

En las figuras 44 a 46 se presentan los targets considerados de primera prioridad, debido a que reúnen características geofísicas favorables. Estos se distinguen principalmente por exhibir altas cargabilidades, junto con resistividades moderadas a elevadas. Las cargabilidades registradas se encuentran en un rango de 18 a 50 mV/V, mientras que las resistividades varían entre 210 y 2059 Ohm·m. Estos valores podrían estar indicando la presencia de zonas con potencial mineralización del tipo IOCG, especialmente al ser analizados en conjunto con la geología local previamente cartografiada. Otro factor relevante en esta clasificación es la dimensión de la anomalía, la cual sugiere una posible concentración de minerales sulfurados, potencialmente en forma de filones alojados en cuerpos intrusivos, como las monzonitas.

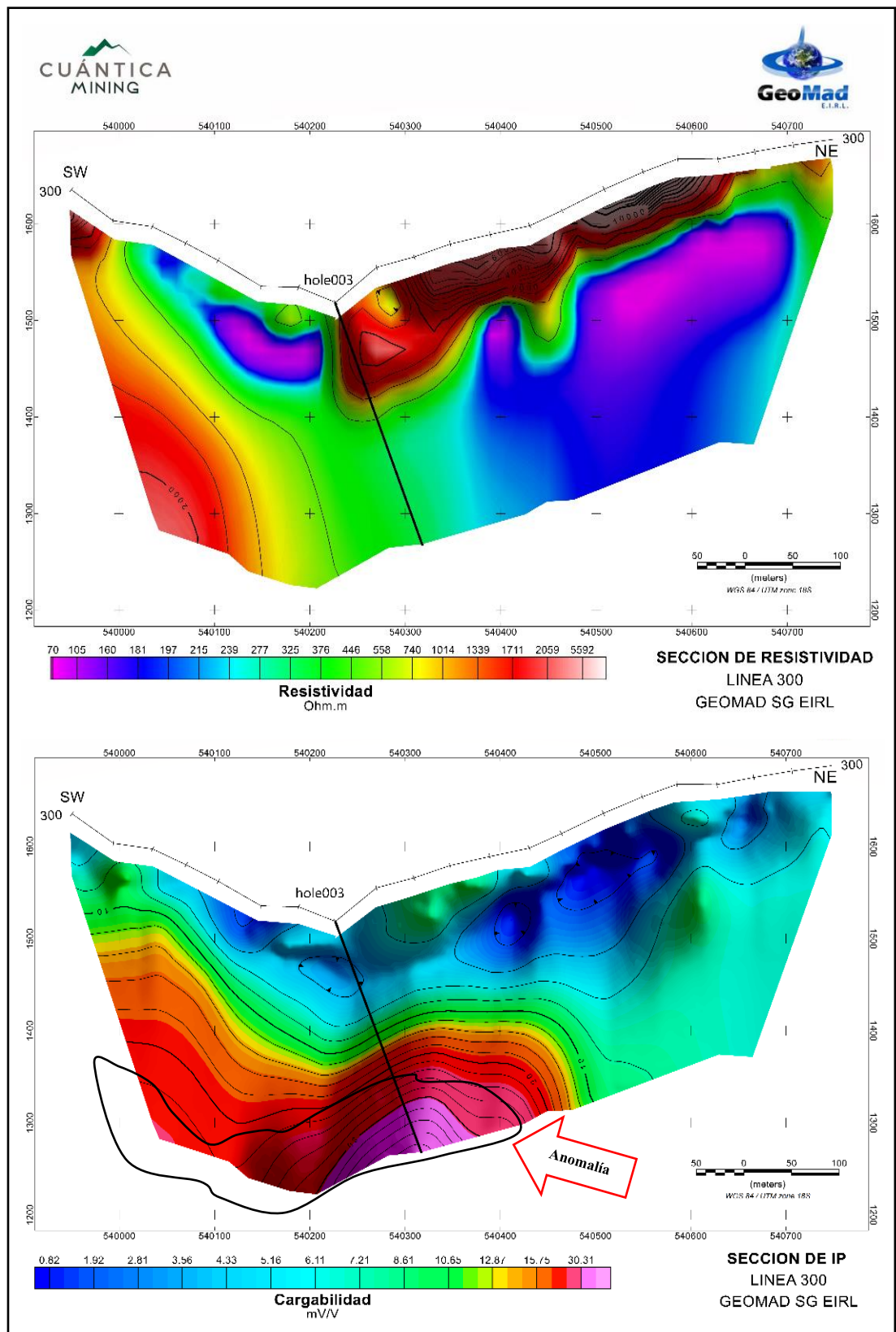
Es importante considerar que la ubicación de los taladros propuestos ha sido determinada a partir de un análisis previo que incluyó la interpretación y clasificación geológica de las anomalías identificadas en las distintas secciones y mapas correspondientes al área de estudio.

Figura 44: *Ubicación de target de perforación de primer orden, línea 200.*



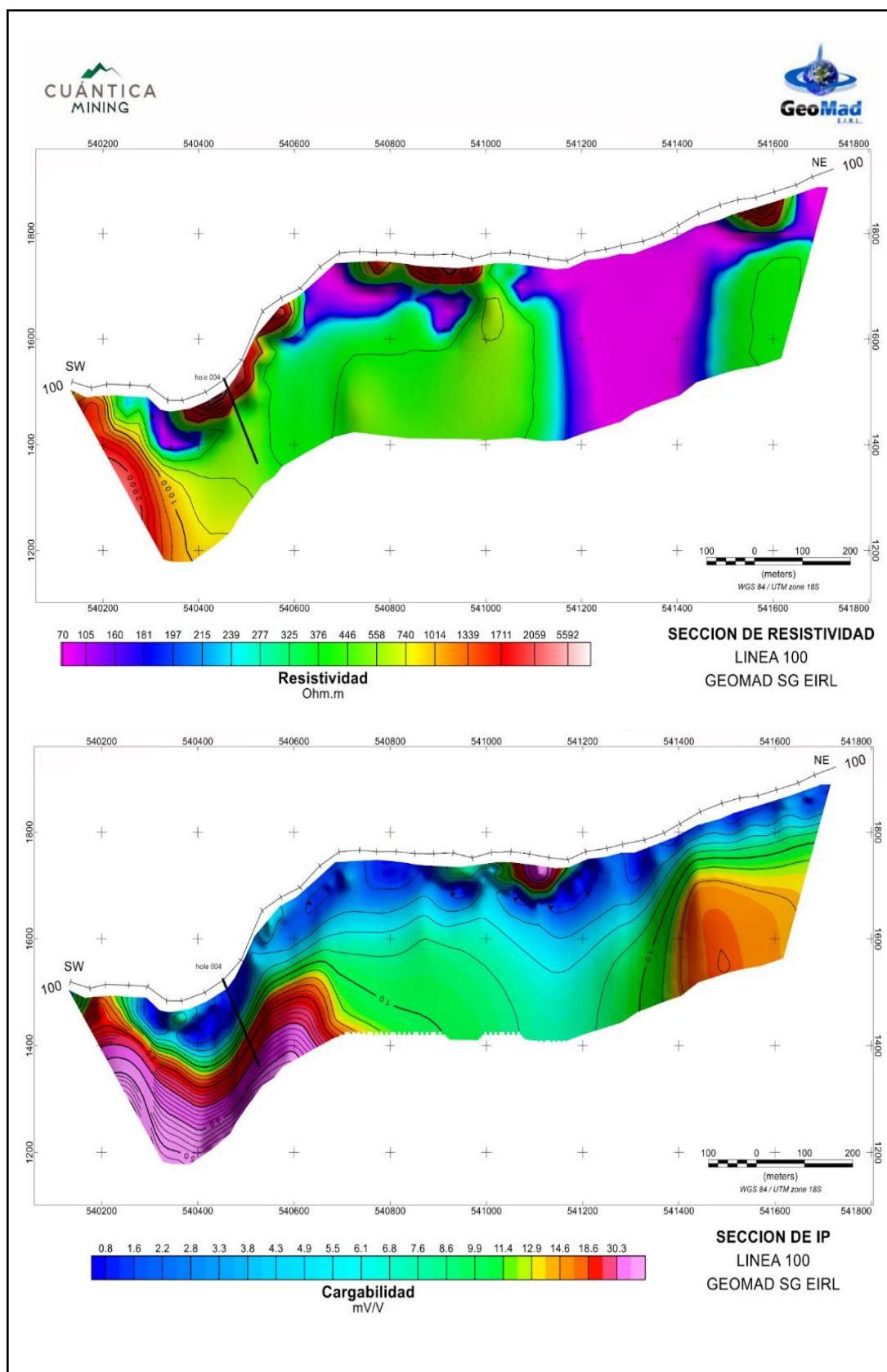
Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 45: Ubicación de target de perforación de primer orden, línea 300.



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 46: Ubicación de target de perforación de primer orden, línea 100.



Fuente: GEOMAD SG EIRL

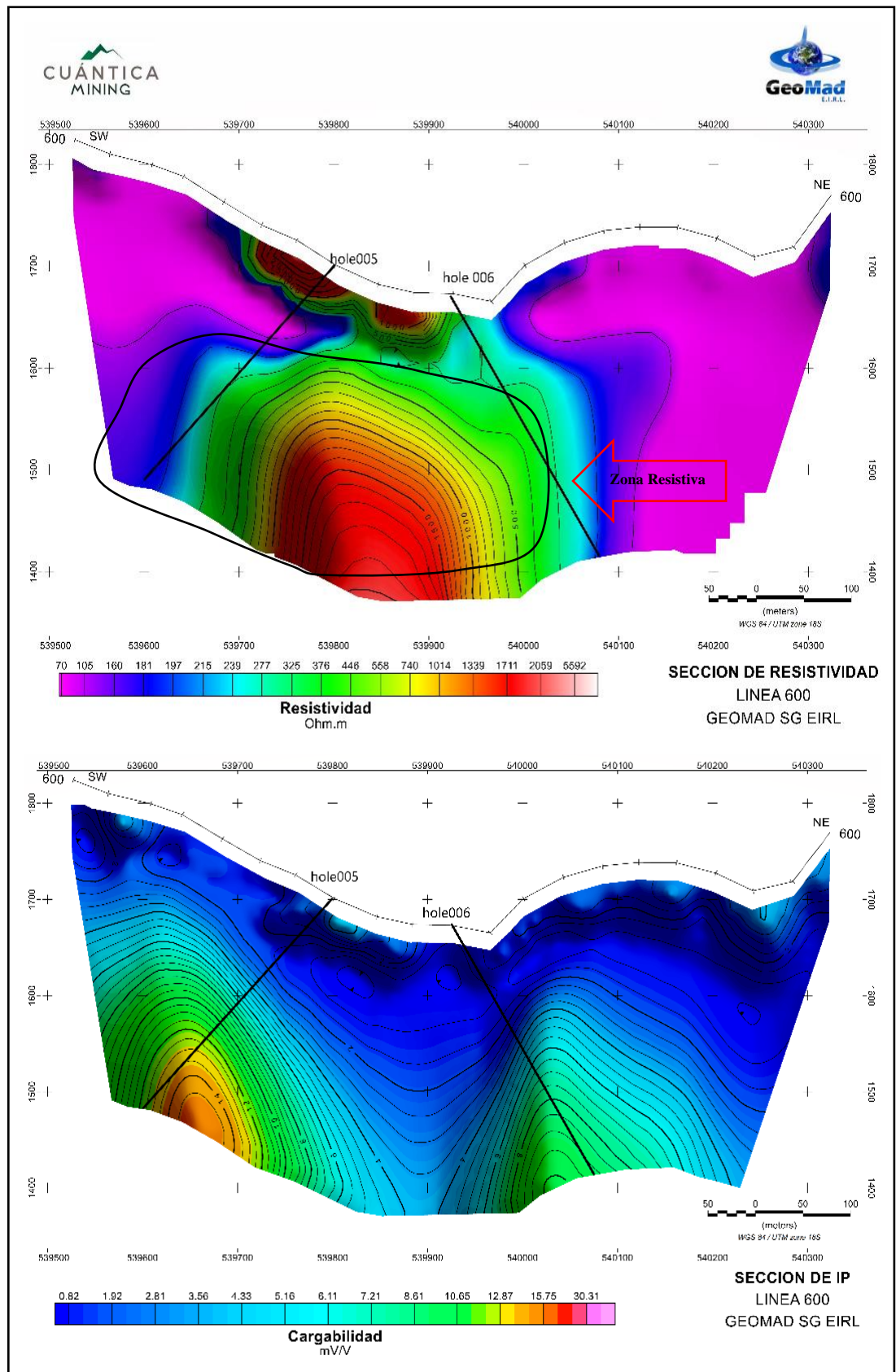
Targets de segunda prioridad

Se han considerado un total de 4 targets de segunda prioridad, entre los que se encuentran los targets hole005, hole006, hole007 y hole008.

Los targets clasificados como de segundo orden han sido definidos de esta manera debido a que, al igual que los de primer orden, presentan zonas anómalas de interés. Sin embargo, la diferencia principal radica en que las anomalías asociadas a estos targets muestran cargabilidades de magnitud baja a moderada y resistividades elevadas. Las cargabilidades oscilan entre 2 y 17 mV/V, mientras que las resistividades se sitúan en un rango de 400 a 2000 Ohm·m. Estos valores elevados de resistividad sugerirían la presencia de cuerpos intrusivos monzoníticos, caracterizados por su alta compacidad y escaso grado de alteración, los cuales podrían corresponder a la roca caja del área de interés.

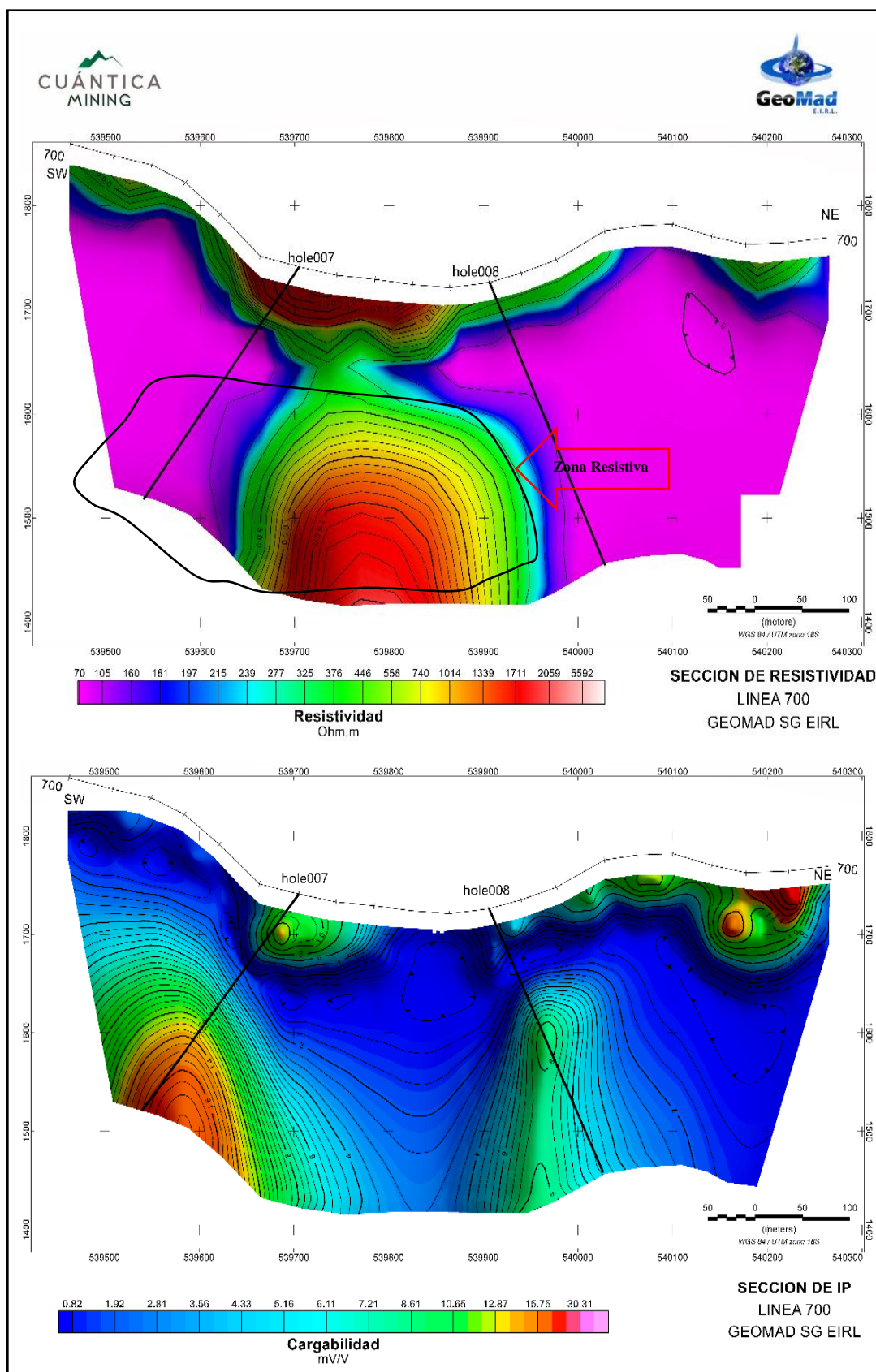
Aunque la geofísica, al tratarse de un método indirecto, no permite confirmar con certeza la ley ni el tipo de mineral presente en profundidad ya sea cuarzo, limonita, magnetita, pirita, calcopirita, entre otros, resulta ser una herramienta valiosa para identificar, a partir de los contrastes de cargabilidad y resistividad, zonas con posible presencia de mineralización metálica y cuerpos intrusivos. En las figuras 47 y 48 se presenta la ubicación de algunos targets de perforación clasificados como de segundo orden.

Figura 47: Ubicación de targets de perforación de segundo orden, línea 600



Fuente: GEOMAD SG EIRL

Figura 48: Ubicación de targets de perforación de segundo orden, línea 700.



Fuente: GEOMAD SG EIRL

4.3. Prueba de Hipótesis

4.3.1. Hipótesis Específicas

Primera hipótesis

Los modelos de cargabilidad y resistividad 2D permiten delimitar las formaciones geológicas y posibles zonas de interés económico (mineralización) en el proyecto Virgen del Carmen en Arequipa, proporcionando una herramienta efectiva para la exploración.

Los resultados de la prospección geofísica por el método geoelectrico del proyecto Virgen del Carmen están representadas en secciones y mapas (ver 4.2.1. y 4.2.2), a su vez delimitadas geológicamente y con la identificación de zonas mineralizadas.

La distribución de los valores de resistividad, desde bajos hasta altos, permitió delimitar las formaciones geológicas, considerando a los intrusivos con resistividades moderadas (100 a 1000 Ohm*m) a altas (mayor a 1000 Ohm*m). Asimismo, las tobas y conglomerados con resistividades que varían de bajas (10 Ohm*m a 100 Ohm*m) a moderadas (100 Ohm*m a 1000 Ohm*m).

La distribución de los valores de cargabilidad, permitió delimitar las zonas mineralizadas, considerando como una anomalía de interés, a valores superiores a los 20 mV/V.

Segunda hipótesis

Los datos obtenidos mediante la prospección geofísica de polarización inducida facilitan la proposición de targets de perforación sobre posibles zonas de interés económico (mineralización) en el Proyecto Virgen del Carmen en Arequipa.

La interpretación de las secciones en función de valores de cargabilidad, resistividad e interpretación geológica, permitió la determinación de 7 targets de perforación clasificados en dos categorías:

La de Primera prioridad corresponde a las líneas 100, 200 y 300, consideradas por sus valores altos de cargabilidad, que varían entre 18 a 50 mV/V, como se observa en las figuras del 44 al 46. Esto podría indicar la posible mineralización de sulfuros emplazados en la monzonita, es concordancia con la cartografía de la geología local.

La de Segunda prioridad corresponde a las líneas 600 y 700, consideradas por sus valores de moderadas a altas resistividades, que varían entre 400 a 2000 Ohm*m, como se observa en las figuras del 47 y 48. Estos valores de resistividad alta, indicarían la posible presencia de cuerpos intrusivos monzoníticos muy compacto y de baja alteración, y estaría representando a la roca caja de la zona de interés. Además de otros intrusivos como la tonalita y granodiorita.

4.3.2. Hipótesis general

Con la aplicación del método geofísico de Polarización Inducida, se pretende encontrar anomalías que nos permitan identificar y discriminar zonas mineralizadas, delimitando así posibles targets de perforación en el proyecto Virgen del Carmen, Arequipa.

Con la aplicación del método geoelectrico de polarización inducida, se afirma que al conocer los valores de cargabilidad y resistividad se determinaron las posibles zonas de mineralización y se delimitaron las formaciones geológicas. Por tanto, se corrobora la hipótesis general planteada para el presente estudio. Indicando que la técnica de polarización inducida ha demostrado ser una

herramienta muy interesante en la búsqueda de anomalías geofísicas los cuales son indicadores de zonas mineralizadas en el proyecto Virgen del Carmen.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados revelan que el proyecto Virgen del Carmen de Arequipa posee un potencial atractivo hacia la exploración geológica, así mismo los mapas y secciones geofísicas muestran la presencia de anomalías de cargabilidad alta y resistividades de moderadas a altas.

Primer objetivo específico

En este estudio, se identificaron cuatro 4 formaciones geológicas; Grupo Nazca (Conglomerado), Grupo Maure (Tobas), Unidad Tiabaya (Tonalita y Granodiorita) y Unidad Linga (Monzonita). Desde un punto de vista geoelectrico los valores de baja a moderada resistividad indican la presencia de conglomerados y tobas, y para valores de moderadas a altas indican la presencia de intrusivos (tonalita, granodiorita y monzonita). Ver 4.2.1. del capítulo de resultados.

Según OpenAI, (2024) desde una perspectiva teórica, indica que el rango de anomalías de resistividad se clasifica de la siguiente manera: las de resistividad baja varían entre 10 - 100 Ohm*m, las de resistividad moderada oscilan entre 100 - 1000 Ohm*m y las de alta resistividad se encuentran entre 1000 - 10000 Ohm*m. Es por ello que las formaciones geológicas del presente estudio se clasifican desde bajas hasta alta resistividades.

En el proyecto Virgen del Carmen de Arequipa se logró identificar zonas mineralizadas con alta cargabilidad. Los resultados más destacados se observan en las secciones correspondientes a las Líneas 100, 200 y 300, donde se detectaron anomalías de cargabilidad superiores a 20 mV/V y resistividades mayores a los 376 Ohm*m, asociadas a la presencia de sulfuros. Estos resultados

confirman que la interpretación de los modelos de polarización inducida en 2D, permite delimitar estructuras relacionadas con las zonas mineralizadas. Ver figuras 44 la 46.

Para Castilla (2024), las anomalías de interés, presentan valores de cargabilidad que oscilan de 20 a 29 mV/V, y $> 29\text{mV/V}$, y resistividades que fluctúan entre los 520 a 4800 Ohm*m. Se deduce que estos valores corresponderían a zonas de mineralización. Las que se habrían generado por procesos metasomáticos, por el emplazamiento de intrusivos porfídicos sobre rocas calcáreas. Es por ello que en la presente investigación las anomalías de interés desde un punto de vista de rangos de valores de cargabilidad y resistividad coinciden con las de Castilla (2024) y OpenAI, (2024).

Segundo objetivo específico

Para la proposición de targets de perforación sobre posibles zonas de interés, se consideró 7 targets, tomando en consideración la geología local de la zona, las secciones y mapas de cargabilidad y resistividad; agrupadas en dos categorías:

La de Primera prioridad corresponde a las líneas 100 (hole 1), 200 (hole 2) y 300 (hole 3), debido a sus altos valores de cargabilidad. En estas secciones se observan anomalías significativas al extremo Oeste, a aproximadamente 200 metros de profundidad. Estos targets fueron considerados para conocer la profundidad exacta de la zona mineralizada, su tamaño y los tipos de minerales de sulfuro presente.

La de Segunda prioridad corresponde a las líneas 600 (hole 5 y 6) y 700 (hole 7 y 8), consideradas por sus valores de resistividad moderada a alta, que varían entre 400 a 2000 Ohm*m, como se observa en las figuras del 47 y 48.

Estos targets fueron seleccionados para profundizar el conocimiento sobre el cuerpo intrusivo (monzonita) asociado a la roca caja de la zona de interés, así como otros intrusivos, como la tonalita y la granodiorita.

Para Castilla (2024), las principales anomalías de interés, se presentan en las líneas L1600, L1500, L1400, L1300, L1200. Tomando en consideración la geología local de la zona, modelos 3D de IP/RES en específico, se han propuesto un total de 16 targets de perforación. Dentro de ellas 07 DDH, son de primera prioridad y 09 DDH son de segunda prioridad. Siendo el target de menor profundidad de 251.74 m, y 621.60 m el de mayor profundidad. Por esta razón, la identificación de los targets de perforación en la presente investigación, considerando la geología, las secciones y los mapas IP/Resistividad concuerda con los planeamientos de Castilla (2024).

CONCLUSIONES

- Se ha delimitado el contacto entre el Grupo Nazca (Conglomerado) y Grupo Maure (Tobas) que generalmente están asociados de bajas a moderadas resistividades con valor promedio de 70 a 1000 Ohm*m. Asimismo los intrusivos de la Unidad Tiabaya (Tonalita y Granodiorita) y Unidad Linga (Monzonita) están asociadas a valores de moderadas a altas resistividades con valor promedio de 500 a 4000 Ohm*m. Asimismo, la mineralización está emplazada en la monzonita, que presentan cargabilidades superiores a 20 mV/V y resistividades mayores a los 376 Ohm*m. Se interpreta que la mineralización corresponde a sulfuros, los cuales se observan en las líneas 100, 200 y 300 los cuales se encuentran al extremo oeste a 200 metros de profundidad aproximadamente.
- Tomando en consideración la geología local de la zona, modelos 2D de IP/RES en específico, se han propuesto un total de 7 targets de perforación. Dentro de ellas 03 targets, son de primera prioridad y 4 targets son de segunda prioridad. Siendo el target de menor profundidad de 300 m y 350 m el de mayor profundidad.

RECOMENDACIONES

- Dada la profundidad de las anomalías de cargabilidad, se considera recomendable la ejecución de una campaña de sondeos diamantinos de mediano alcance orientada hacia los sectores con mayor respuesta de cargabilidad, con el propósito de confirmar las potencias y leyes de dichas zonas anómalas.
- Considerando los datos obtenidos a partir de las líneas de Polarización Inducida y Resistividad correspondientes al estudio de 10 kilómetros de longitud a una profundidad de 300 metros, con un espaciamiento de 50 metros entre dipolos, se sugiere ampliar el estudio geofísico a 15 kilómetros, incrementando la separación entre dipolos a 100 metros, con el objetivo de identificar posibles anomalías geofísicas asociadas a ocurrencias minerales dentro del proyecto Virgen de Carmen.
- Se recomienda extender los estudios de Polarización Inducida 3D con el propósito de facilitar una visualización y un análisis más precisos y realistas de la geometría, el volumen y la profundidad de las anomalías geofísicas de interés.
- Se considera recomendable realizar estudios geoquímicos en trincheras con el objetivo de identificar los elementos predominantes en el área de estudio, permitiendo correlacionar estos resultados con los datos geofísicos y así mejorar la precisión en la delimitación de las zonas mineralizadas. Del mismo modo, se recomienda ejecutar trincheras sobre vetas aflorantes con el fin de confirmar la posible presencia de mineralización económica, previamente sugerida como positiva en los estudios geofísicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrian, J., Tezkan, B., & Candansayar, E. (2022). Exploración de un yacimiento de mineral de cobre en Elbistan/Turquía mediante inversión 2D de los datos de polarización inducida en el dominio del tiempo mediante una malla no estructurada. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 2255–2272. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02857-1>
- Aedo Rojas, M. A. (2022). *Caracterización de estructuras mineralizadas en el yacimiento vetiforme María Elena mediante magnetometría terrestre, ERT e IP, región de Atacama, Chile* [Tesis de posgrado, Universidad de Chile].
- Aguilef, S. (2012). *Análisis geológico de estudios geofísicos de Polarización Inducida (IP) en sistemas IOCG y pórfido cuprífero del Norte de Chile* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio digital.
- Ahmed, M. E., Pham, L. T., El-Qassas, R. A. Y., Kieu, T. D., Mohamed, H., & Le, C. V. A. (2023). Datos geofísicos para la exploración minera. En A. B. Pour, M. Parsa, & A. M. Eldosouky (Eds.), *Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration* (pp. xx–xx). Elsevier.
- Caldas Vidal, J. (1978). *Geología de los cuadrángulos de San Juan, Acarí y Yauca (31-m, 31-n, 32-n)* (Boletín Serie A: Carta Geológica Nacional N° 30). Instituto Geológico y Minero del Perú (INGEMMET).
- Carrasco, P. (2023). *Avance en técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial* [Tesis doctoral, Universidad de Salamanca].
- Castilla Cayllahua, R. (2024). *Interpretación litológica y caracterización de posibles zonas mineralizadas utilizando polarización inducida y magnetometría en el*

- Proyecto Borrego I, Comas, Concepción - Junín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Cervantes, J., & Vargas, E. (2013). *Estudio de polarización inducida y resistividad en el Proyecto La Buena, Malla La Julia, Distrito Minero Melchor Ocampo, Zacatecas* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Contreras Velásquez, 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 pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Corriveau, L., & Goodfellow, W. D. (2007). Iron oxide copper-gold deposits: A Canadian perspective. *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5*, 307–327.
- Dávila Burga, J. (2006). *Diccionario Geológico – Bilingüe Español-Inglés*.
- Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geofísica para la exploración mineral geocientífica*. Cambridge University Press.
- Fuentes Valdivia, J. A. (2017). *Reconocimiento de mineralización profunda de carácter polimetálico mediante métodos de exploración gamma ray y polarización inducida en el proyecto Ichuña – Moquegua* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Gandhi, S. S. (2004). Magmatic-hydrothermal Fe oxide \pm Cu \pm Au deposits: Classification for a digital database and an overview of selected districts. *IAVCEI General Assembly*.
- Hitzman, M., Oreskes, N., & Einaudi, M. (1992). Características geológicas y entorno tectónico de depósitos proterozoicos de óxido de hierro (Cu-U-Au-REE). *Investigación Precámbrica*, 58, 241–287.

- Lyatsky Geoscience Research & Consulting Ltd. (2004). El significado de anomalía. *Recorder*, 2. Sociedad de Exploración Geofísica de Canadá.
- Montalvo Román, J. L. (2021). *Modelamiento 3D de datos geofísicos de polarización inducida y resistividad para la caracterización de un yacimiento tipo pórfido en el proyecto Tarata, Tarma Junín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Ohta, Y., Goto, T., Koike, K., et al. (2024). Correlación entre la polarización inducida y el contenido de sulfuro de muestras de rocas obtenidas de montículos hidrotermales del fondo marino en la depresión de Okinawa, Japón. *Earth, Planets and Space*, 76, 54. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01910-1>
- OpenAI. (2024). *ChatGPT (versión del 15 de julio)*. Inteligencia Artificial GPT-3.5.
- Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua* (2ª ed.). Thomson Paraninfo.
- Parasnis, D. S. (1997). *Principios de geofísica aplicada* (5ª ed.). Chapman & Hall.
- Bérubé, P. (1997, septiembre). Resistividad/polarización provocada en la exploración minera. *VAL D'OR SAGAX INC.*
- Bérubé, P. (1997, septiembre). *Magnetometría en exploración minera*. VAL D'OR SAGAX INC.
- Portaelectricos. (2019). *RETIE Definiciones*. <https://portaelectricos.com>
- Prado Alemán, J. R. (2018). *Prospección geológica y geofísica en los sectores de Patara y Coricancha – Unidad Minera Huachocolpa Uno, Subunidad Bienaventurada* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Reynolds, J. M. (1997). *Una introducción a la geofísica aplicada y ambiental*. John Wiley and Sons.

- Rojas Puelles, C. A. (2018). *Magnetometría terrestre de alta resolución y polarización en la búsqueda de sistemas de vetas mineralizadas en la Laguna Verde, Región de Aysén, Chile* [Tesis de posgrado, Universidad de Chile].
- Salazar Miranda, E. D. (2021). *Evaluación geofísica de polarización inducida IP, resistividad y refracción sísmica del proyecto Las Águilas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno].
- Saparun, M., Akbar, R., Marbun, M., Dixit, A., & Saxena, A. (2022). Aplicación de la polarización inducida y la resistividad a la determinación de la ubicación de minerales en zonas de roca extrusiva, montañas del sur de Java, Indonesia. *Revista Internacional de Hidrología y Medio Ambiente para la Sostenibilidad*, 1(3), 108–119.
- Summer, J., & Zongue, K. (1980). *Curso corto de polarización inducida para geofísica de exploración*. Asociación Geofísica de Sudáfrica, Universidad de Witwatersrand, Johannesburg.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sherriff, R. E. (1990). *Geofísica aplicada* (2ª ed.). Cambridge University Press.
- Tucto Huerta, H. E. (2022). *Reporte técnico del proyecto Virgen del Carmen. Geología y Exploraciones*. Cuántica Mining SAC.
- Vara Horna, A. A. (2012). *Desde la idea hasta la sustentación: Siete pasos para una tesis exitosa*. Instituto de Investigación, Facultad de Ciencias Administrativas y Recursos Humanos, Universidad de San Martín de Porres.
- Villarreal Jaramillo, E., Gómez Cahuaya, E., Acosta Ale, J., Torres Bazán, V., Yupa Paredes, R., Valencia Miraval, C., & Guainazzo Santi, J. (2016). *Prospección geológica minera del ANAP Antabamba Bloque 3*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

Zhdanov, M. S. (2021). Editorial para el número especial “Geofísica para la exploración minera”. *Minerals*, 11(7), 692. <https://doi.org/10.3390/min11070692>

Zongue, K. (2005). Estado del arte en IP y resistividad compleja. En *Métodos eléctricos y electromagnéticos*. Organización de Ingeniería e Investigación Inc.

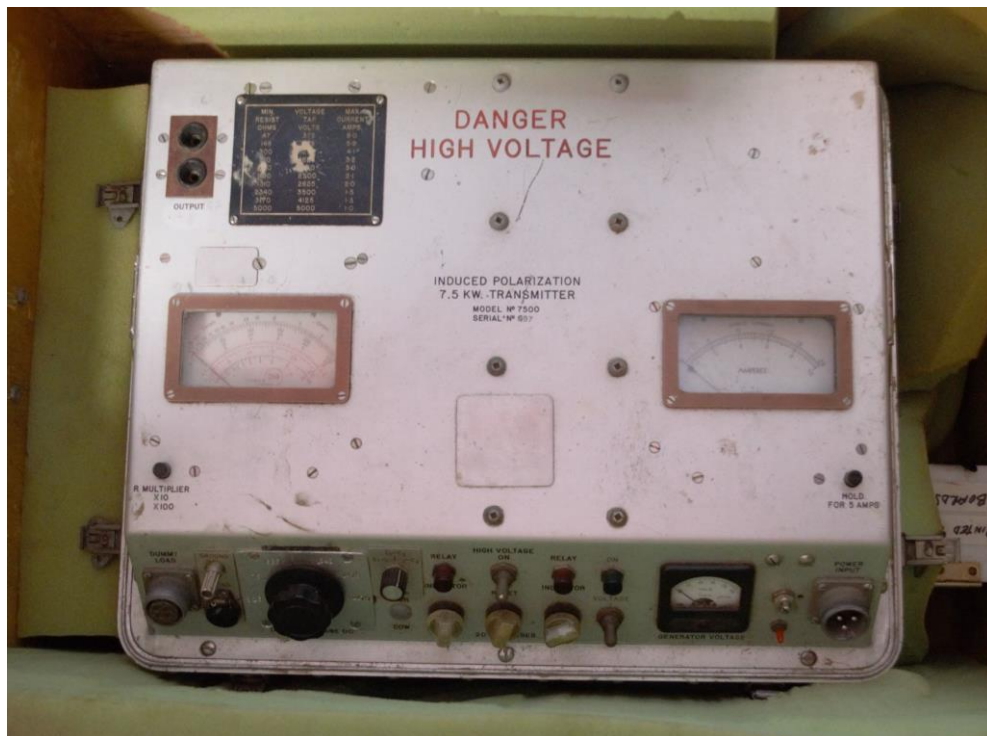
ANEXOS

ANEXO 1: EQUIPOS / INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Receptor Iris Elrec Pro 10 canales (Equipo Receptor)



Huntec 5000 (Equipo Transmisor)



Motor Generador Kholer



Estación total Topcon



GPS Garmin

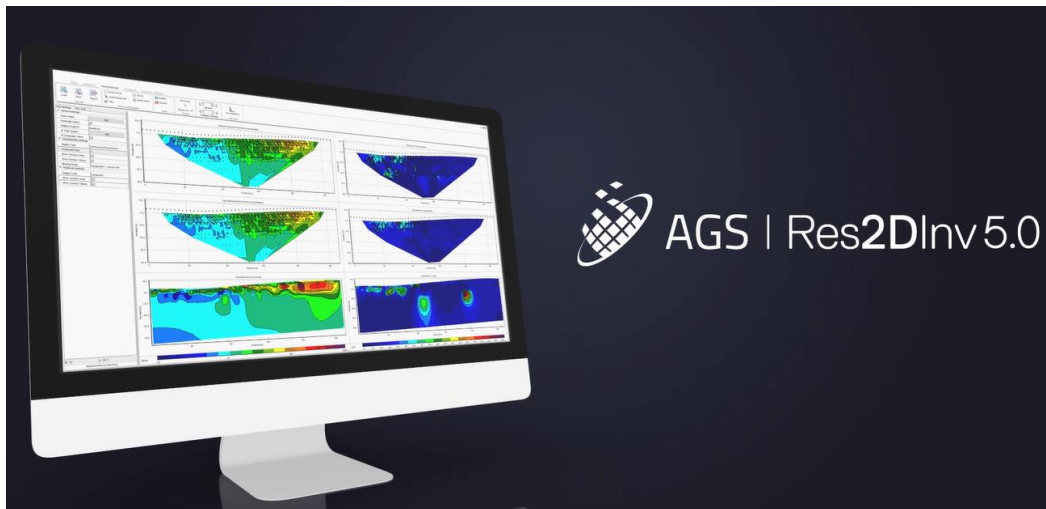


Prosys II

IRIS INSTRUMENTS

Prosys II Software

Res2DInv 5.0



Oasis Montaj ver. 8.4



ANEXO 2: PANEL FOTOGRAFICO

Proyecto Virgen de Carmen, Arequipa



Equipo humano de trabajo



Punto de registro

