



TÍTULO

**APLICACIÓN DE MÉTODOS MAGNÉTICOS,
ELECTROMAGNÉTICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA FAJA PIRÍTICA
IBÉRICA (HUELVA, ESPAÑA)**
PROSPECCIÓN PARA UN YACIMIENTO DE NÍQUEL EN EL PERMISO
DE INVESTIGACIÓN MINERA TARANTO

AUTOR

Brayner Reynaldo García Moncada

Esta edición electrónica ha sido realizada en 2021

Tutor Académico	D. Francisco Manuel Alonso Chaves
Tutor de Empresa	D. Juan Manuel Pons Pérez
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales (2019/20)</i>
©	Brayner Reynaldo García Moncada
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2020



**Atribución-NoComercial-SinDerivadas
4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)**

Para más información:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>



Trabajo Final de Máster

***APLICACIÓN DE MÉTODOS MAGNÉTICOS,
ELECTROMAGNÉTICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA FAJA
PIRÍTICA IBÉRICA (HUELVA, ESPAÑA):
PROSPECCIÓN PARA UN YACIMIENTO DE NÍQUEL EN EL
PERMISO DE INVESTIGACIÓN MINERA TARANTO.***

Brayner R. García Moncada

Universidad Internacional de Andalucía – Universidad de Huelva

Diciembre 2020

Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**APLICACIÓN DE MÉTODOS MAGNÉTICOS, ELECTROMAGNÉTICOS Y
GEOQUÍMICOS EN LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA (HUELVA, ESPAÑA):
PROSPECCIÓN PARA UN YACIMIENTO DE NÍQUEL EN EL PERMISO DE
INVESTIGACIÓN MINERA TARANTO.**

Autor:

Brayner Reynaldo García Moncada

Tutor Académico:

Francisco Manuel Alonso Chaves

Tutor de Empresa:

Juan Manuel Pons Pérez

Diciembre 2020

**APLICACIÓN DE MÉTODOS MAGNÉTICOS, ELECTROMAGNÉTICOS Y
GEOQUÍMICOS EN LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA (HUELVA, ESPAÑA):
PROSPECCIÓN PARA UN YACIMIENTO DE NÍQUEL EN EL PERMISO DE
INVESTIGACIÓN MINERA TARANTO.**

Trabajo Final de Máster presentado por Brayner R. García Moncada para obtener el Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales. Dirigido por el Dr. Francisco M. Alonso Chaves y D. Juan M. Pons Pérez.

Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad Internacional de Andalucía. Universidad de Huelva.

Fdo.: Juan Pons Pérez

Fdo.: Francisco Alonso Chaves

Fdo.: Brayner Garcia Moncada

García M., Brayner R.

**APLICACIÓN DE MÉTODOS MAGNÉTICOS, ELECTROMAGNÉTICOS Y
GEOQUÍMICOS EN LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA (HUELVA, ESPAÑA):
PROSPECCIÓN PARA UN YACIMIENTO DE NÍQUEL EN EL PERMISO DE
INVESTIGACIÓN MINERA TARANTO.**

**Tutor académico: Francisco M. Alonso Chaves. Tutor de empresa: Juan M. Pons Pérez.
Trabajo Final de Máster. UNIA. UHU. Facultad de Ciencias Experimentales. Master
Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales. Año 2020.**

RESUMEN

Palabras clave: Magnético, Electromagnético, Geoquímica, Prospección minera, Taranto, Anticlinal, Puebla de Guzmán, Níquel.

Se realizó un procesamiento e interpretación de datos magnéticos, electromagnéticos y geoquímicos, provenientes de adquisiciones realizadas en un segmento del permiso de investigación Taranto con fines de prospección minero, tomando como dato fundamental de partida el máximo de Intensidad Magnética Total del área. Además, a partir de la correlación de los datos geocientíficos se seleccionará la zona de perforación para un posible sondeo de exploración. La zona de estudio se encuentra entre los términos municipales Villanueva de los Castillejos y San Bartolomé de la Torre, entre las coordenadas UTM de 658000 a 661500 m en el eje X y de 4149500 a 4152000 m en el eje Y, en la zona 29N (sistema de referencia ED50), en la provincia de Huelva, España. Durante el procesamiento de los datos magnéticos, se realizaron análisis espectrales para la estimación de profundidades de las fuentes magnéticas y análisis estadísticos, además de la separación del componente residual mediante un filtro Gaussiano y elaboración de mapas de derivadas y cosenos direccionales. A través de los datos electromagnéticos se obtuvieron mapas de resistividades a diferentes profundidades, donde se resaltaron los valores característicos para rocas con elementos metálicos. Para los datos geoquímicos, se realizó el método de selección de umbrales para las familias de contenidos de níquel, mediante los análisis estadísticos de histogramas de frecuencias y coeficiente de correlación. Los resultados e interpretación de la integración de los datos geocientíficos invitan a pensar sobre la presencia de una fuente magnética asociada a rocas del CVS con naturaleza metálica. Por otra parte, hay indicios suficientes como para considerar un posible yacimiento constituido de partículas finas de mineral de níquel dispersadas en rocas básicas. Finalmente, sería interesante deliberar en la realización de un sondeo de exploración de testigo continuo, que permita tomar muestras en profundidad de las rocas volcánicas de esta región, entre las coordenadas UTM de 658450 a 659750 m en el eje X y de 4151050 a 4151800 m en el eje Y.

García M., Brayner R.

**APPLICATION OF MAGNETIC, ELECTROMAGNETIC AND GEOCHEMICAL
METHODS IN THE IBERIAN PYRITIC BELT (HUELVA, SPAIN): PROSPECTING
FOR A NICKEL DEPOSIT IN THE TARANTO MINING RESEARCH PERMIT.**

Academic tutor: Francisco M. Alonso Chaves. Company tutor: Juan M. Pons Pérez.

**Master's Dissertation. UNIA. UHU. Faculty of Experimental Sciences. Master in
Geology and Environmental Management of Mineral Resources. Year 2020.**

ABSTRACT

Keywords: Magnetic, Electromagnetic, Geochemical, Mining Prospecting, Taranto, Anticline, Puebla de Guzmán, Nickel.

It was made processing and interpretation of magnetic, electromagnetic, and geochemical data from acquisitions made in a segment of the Taranto research permit for mining prospecting purposes, taking as a fundamental starting data the maximum Total Magnetic Intensity of the area. Besides, based on the correlation of the geoscientific data, the drilling area will be selected for a possible exploration well. The study area is between the municipalities Villanueva de los Castillejos and San Bartolomé de la Torre, between UTM coordinates from 658000 to 661500 m on the X-axis and from 4149500 to 4152000 m on the Y-axis, at the 29N zone (system of reference ED50), in Huelva's province, Spain. During the processing of the magnetic data, spectral analyzes were made to estimate the depths of the magnetic sources and statistical analyzes, in addition to the separation of the residual component through a Gaussian filter, and the elaboration of derivative maps and directional cosines. Through the electromagnetic data, resistivity maps were obtained at different depths, where the characteristic values for rocks with metallic elements were highlighted. For the geochemical data, the threshold selection method was performed for the nickel content families, through the statistical analysis of frequency histograms and correlation coefficient. The results and interpretation from the integration of geoscientific data invite us to think about the presence of a magnetic source associated with rocks of the CVS with a metallic nature. On the other hand, there is sufficient evidence to consider a possible deposit consisting of fine particles of nickel ore dispersed in basic rocks. Finally, it would be interesting to deliberate on the elaboration of an exploratory survey of the continuous core, which allows taking deep samples of the volcanic rocks in this region, between UTM coordinates from 658450 to 659750 m on the X-axis and from 4151050 to 4151800 m on the Y-axis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Adquisición geofísica	2
1.2 Adquisición geoquímica.....	3
1.3 Planteamiento de problema y objetivos	4
2. CONTEXTO GEOGRÁFICO y GEOLÓGICO	6
2.1 Localización geográfica	6
2.2 Marco geológico.....	7
2.2.1 Geología de la Zona Surportuguesa	7
2.2.2 Geología de la Faja Pirítica Ibérica	8
2.2.3 Sistema de cabalgamientos de la Faja Pirítica Ibérica	11
3. METODOLOGÍA	15
3.1 Aspectos generales	15
3.1.1 Base de datos geofísica	16
3.1.2 Base de datos geoquímica	17
3.2 Procesamiento de los datos magnéticos	18
3.2.1 Análisis espectral.....	18
3.2.2 Separación de efectos regional-residual.....	19
3.2.3 Análisis estadístico.....	20
3.2.4 Derivadas horizontales	21
3.2.5 Derivada vertical	21
3.2.6 Filtro de coseno direccional	22
3.3 Datos electromagnéticos	22
3.4 Procesamiento de los datos geoquímicos	23
3.4.1 Análisis estadístico.....	23

3.4.2 Selección de umbrales	24
3.4.3 Obtención de mapa de anomalía geoquímica de Níquel	25
4. RESULTADOS	26
4.1 Datos magnéticos	26
4.1.1 Análisis espectral.....	28
4.1.2 Separación de efecto de la componente residual.....	29
4.1.1 Análisis estadístico	31
4.1.2 Mapas direccionales	33
4.2 Datos electromagnéticos	38
4.3 Datos geoquímicos	42
5. DISCUSIÓN.....	49
6. CONCLUSIONES	58
7. RECOMENDACIONES	59
8. AGRADECIMIENTOS	60
9. REFERENCIAS	61
10. ANEXOS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa con los resultados de intensidad magnética total (IMT) y las muestras de suelos. La zona marcada con el rectángulo rojo muestra la zona donde se centra este TFM.	4
Figura 2 Mapa de la adquisición aerotransportada en el permiso de investigación Taranto.	6
Figura 3 Área de procesamiento e interpretación de los datos de interés.	7
Figura 4 Esquema tectónico de la Zona Surportuguesa.	8
Figura 5 Mapa geológico del Anticlinorio de La Puebla de Guzmán. En él se localizan las mineralizaciones de sulfuros masivos del distrito minero de Tharsis y otras próximas.	11
Figura 6 Mapa geológico del sector de Villanueva de los Castillejos - El Almendro	12
Figura 7 Corte geológico transversal al sistema de cabalgamientos imbricados	13
Figura 8 Mapa de litologías correspondiente al permiso de investigación minera Taranto, Huelva	14
Figura 9 Esquema metodológico de trabajo	15
Figura 10 Geometría de adquisición aerotransportada.....	17
Figura 11 Espectro de potencia para datos magnéticos.....	19
Figura 12 Filtro pasabanda.....	20
Figura 13 Filtro Gaussiano.....	20
Figura 14 Filtro coseno direccional.....	22
Figura 15 Mapa de intensidad magnética total (IMT) reducido al polo (RTP).....	27
Figura 16 Mapa de intensidad magnética total (IMT) reducido al polo (RTP) de la ventana de interés.	28
Figura 17 Espectro de potencia de la ventana de IMT RTP.....	29
Figura 18 Mapa de efecto residual de IMT RTP.....	30
Figura 19 Espectro de potencia efecto residual de IMT RTP.	31
Figura 20 Histograma de frecuencia de efecto residual de IMT RTP.....	32
Figura 21 Diagrama de caja de efecto residual de IMT RTP.....	33
Figura 22 Mapa de derivada en el eje X de IMT RTP.	34

Figura 23 Mapa de derivada en el eje Y de IMT RTP.	35
Figura 24 Mapa de derivada en el eje Z de IMT RTP.....	36
Figura 25 Mapa coseno direccional a N125°E de IMT RTP	37
Figura 26 Mapa coseno direccional a N215°E de IMT RTP.	38
Figura 27 Mapas de resistividades a 25 m (izquierda) y 50 m (derecha) de profundidad.	40
Figura 28 Mapas de resistividades a 75 m (izquierda) y (derecha) 100 m de profundidad.	41
Figura 29 Mapas de resistividades a 125 m (izquierda) y 150 m (derecha) de profundidad. ..	41
Figura 30 Mapas de resistividades a 175 m (izquierda) y 200 m (derecha) de profundidad. ..	41
Figura 31 Mapas de resistividades a 225 m (izquierda) y 250 m (derecha) de profundidad. ..	42
Figura 32 Mapas de resistividades a 275 m (izquierda) y 300 m (derecha) de profundidad. ..	42
Figura 33 Localización de muestras para el análisis geoquímico en relación con la distribución de litologías	43
Figura 34 Histograma, frecuencia y porcentaje acumulado de las muestras generales.	45
Figura 35 Histograma, frecuencia y porcentaje acumulado de las muestras de PQ.....	45
Figura 36 Histograma, frecuencia, porcentaje acumulado y umbrales seleccionados de las muestras generales del CVS.	46
Figura 37 Histograma, frecuencia y porcentaje acumulado de las muestras del Grupo Culm. 46	
Figura 38 Mapa de fondos geoquímicos de Ni	48
Figura 39 Mapa de IMT RTP y geología local.	50
Figura 40 Mapa derivadas X (izquierda), Y (derecha) de IMT RTP y lineamientos de bordes.	51
Figura 41 Mapa coseno direccional de IMT RTP y lineamientos de continuidad. N125°E (izquierda) y N215°E (derecha).	52
Figura 42 Mapas de resistividades a diferentes profundidades. Zonas relevantes.....	54
Figura 43 Mapa de relieve (mapa de sombras) y localización de las anomalías geoquímica de Ni.....	55
Figura 44 Situación de la zona de interés para ubicación un sondeo de exploración	57

Figura 45 Mapa de toponimias de la zona.....	64
Figura 46 Mapa de resistividades a 25 m de profundidad (Ampliado).....	65
Figura 47 Mapa de resistividades a 50 m de profundidad (Ampliado).....	66
Figura 48 Mapa de resistividades a 75 m de profundidad (Ampliado).....	67
Figura 49 Mapa de resistividades a 100 m de profundidad (Ampliado).....	68
Figura 50 Mapa de resistividades a 125 m de profundidad (Ampliado).....	69
Figura 51 Mapa de resistividades a 150 m de profundidad (Ampliado).....	70
Figura 52 Mapa de resistividades a 175 m de profundidad (Ampliado).....	71
Figura 53 Mapa de resistividades a 200 m de profundidad (Ampliado).....	72
Figura 54 Mapa de resistividades a 225 m de profundidad (Ampliado).....	73
Figura 55 Mapa de resistividades a 250 m de profundidad (Ampliado).....	74
Figura 56 Mapa de resistividades a 275 m de profundidad (Ampliado).....	75
Figura 57 Mapa de resistividades a 300 m de profundidad (Ampliado).....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de la adquisición aerotransportada de Taranto.	16
Tabla 2 Profundidades asociadas a las fuentes de IMT RTP.	29
Tabla 3 Profundidades asociadas a las fuentes de efecto residual de IMT RTP.	31
Tabla 4 Parámetros estadísticos.	32
Tabla 5 Máximos y mínimos de resistividad aparente, a cada 25 m de profundidad.	39
Tabla 6 Parámetros estadísticos de la base de datos geoquímica, para el área investigada (datos globales) y para cada una de las unidades litoestratigráficas (PQ/CVS/Culm).	44
Tabla 7 Tabla de coeficiente de correlacion de los diferentes elementos.	47

1. INTRODUCCIÓN

Un programa de exploración minera consiste en una agrupación de trabajos y análisis de datos geológicos geoquímicos y geofísicos, que conducen al descubrimiento y delimitación de yacimientos minerales para una posible explotación con interés económico. Las técnicas geofísicas y geoquímicas permiten medir propiedades objetivas que poseen los minerales en una zona referenciada geográficamente, y en la medida de lo posible, incrementar las posibilidades de ubicar el contenido mineral. Los técnicos definen dos tipos de prospección: La que busca definir la geología regional y aquella que busca la presencia de depósitos minerales directamente. Éstos en muchos casos se superponen, debido a que uno puede dar lugar a otro. Normalmente, el primer tipo de prospección busca obtener mapas con la distribución de propiedades, geometría de cuerpos o estructuras regionales de una zona, mientras que, el segundo tipo de prospección geofísica/geoquímica trata de delimitar un depósito mineral, y de esta forma, obtener un conocimiento local de interés, y reducir el área de investigación (Castilla y Herrera, 2012).

Los métodos geofísicos se basan en el estudio de ciertos cambios físicos naturales y artificiales, entre estos destacan los métodos gravimétricos, magnéticos, eléctricos, etc. (Keary *et al.*, 2002) Los métodos magnéticos se utilizan ampliamente en la búsqueda de depósitos de minerales metálicos, una tarea que se logra rápida y económicamente mediante métodos aéreos. El objetivo del mismo es investigar la geología del subsuelo sobre la base de anomalías en el campo magnético de las rocas subyacentes mediante adquisiciones con apoyo aéreo. La técnica se emplea ampliamente y la velocidad de operación de los levantamientos aéreos hace que el método sea muy atractivo en la búsqueda de depósitos minerales con una importante respuesta magnética. Los levantamientos magnéticos son capaces de localizar depósitos de sulfuros masivos, especialmente cuando se integran con métodos electromagnéticos (EM).

Los métodos EM hacen uso de la respuesta del suelo a la propagación de campos electromagnéticos, que se componen de una intensidad corriente eléctrica alterna y una fuerza de magnetización (Telford *et al.*, 1990). El campo electromagnético primario que se genera al pasar una corriente alterna a través de una bobina, viaja por caminos tanto encima como por debajo de la superficie. Donde, en presencia de un cuerpo conductor, el componente magnético del campo electromagnético que penetra en el suelo induce corrientes alternas, o corrientes parásitas, que fluyen en el conductor donde se genera un campo electromagnético secundario que viaja al receptor, donde éste responde a la resultante de los campos. Estas diferencias entre

los campos electromagnéticos transmitidos y recibidos revelan la presencia del conductor y proporcionan información sobre su geometría y propiedades eléctricas. Cabe destacar que, no es necesario el contacto físico del transmisor o del receptor con el suelo, los levantamientos EM de superficie pueden realizarse mucho más rápido que los levantamientos eléctricos, los cuales requieren contacto con el suelo. Más importante aún, al igual que los métodos magnéticos, tanto el transmisor como el receptor pueden montarse en un avión o remolcarse detrás de ellos, esto hace del método electromagnéticos aerotransportados uno de los más utilizados en la prospección de cuerpos minerales conductores (Keary *et al.*, 2002).

El método geoquímico es una técnica de prospección indirecta que permite en la caracterización de la distribución y abundancia de algunos elementos, como los elementos indicadores y los elementos exploradores relacionados con un depósito mineral. Dicho procedimiento se utiliza para identificar la geometría de yacimientos y ayuda en la toma de decisiones en la selección de zonas de interés para ejecutar perforaciones en la etapa de descubrimiento de un depósito (Macheyeki *et al.*, 2020). Una anomalía geoquímica puede ser un depósito mineral, y por ello contiene varios elementos en concentraciones anormales. La presencia de estos elementos en el subsuelo, se manifiesta en la superficie terrestre por una distribución anormal que difiere con los contenidos "normales" de los mismos elementos en la roca. Este tipo de distribución ubicada geográficamente se denomina anomalía geoquímica (IIM, 2020).

Uno de los métodos de prospección geoquímica es la técnica iones metálicos móviles (IMM), ésta se basa en que, a través de procesos físicos y electroquímicos, un depósito mineral libera iones metálicos que migran a la superficie, quedando unidos a las partículas de suelo (Mann *et al.*, 1998). La movilidad de los metales es posteriormente restringida por diferentes procesos que resultan en la unión permanente a las partículas del suelo, en la parte superior de la zona mineralizada enterrada; sin embargo, la meteorización y la erosión dan como resultado su dispersión secundaria. Por lo tanto, utilizando la técnica de MMI para la exploración, se pueden indicar la existencia de zonas anómalas que identifican fuentes de mineralizaciones importantes a escala prospectiva (Amedjoe & Adjovu, 2013).

1.1 Adquisición geofísica

Entre los meses de diciembre de 2017 y febrero de 2018, en el permiso de investigación, llamado Taranto, entre los municipios El Almendro, Villanueva de los Castillejos, Alosno y San Bartolomé de la Torre, se realizó una adquisición geofísica de datos aeromagnéticos con un magnetómetro de vapor de cesio bombeado ópticamente Geometrics y datos electromagnéticos aerotransportado con el sistema VTEM™ max. (*Versatile Time Domain*

Electromagnetics) con procesamiento de forma de onda completa, con la empresa Geotech ltd para la empresa MATSA (Minas de Aguas Teñidas) (Figura 1). Dicho levantamiento geofísico se efectuó con el helicóptero A-star 350 B3 de la compañía Heliastur. En donde, se adquirió un total de 82 km² de área en 905 líneas de vuelo con una altura promedio de 92 m para dicho bloque. El estudio se realizó con el objetivo de descubrir potenciales yacimientos de interés minero en el permiso de investigación “Taranto” para MATSA.

1.2 Adquisición geoquímica

MATSA realizó una campaña geoquímica en el permiso de investigación Taranto, con el objetivo de obtener la concentración de metales en la zona y encontrar depósitos minerales de interés económico centrados principalmente en mineralizaciones ricas en níquel, plomo, cobre zinc, oro y plata, relacionadas con rocas básicas, para ello se llevó a cabo una adquisición de muestras de suelo, en donde se aplicó la metodología de Ion Metales Móviles (IMM) (Figura 1). Dicha campaña comprende un área de 72 km², en donde se recogieron un total de 6837 muestras, que representan una densidad de muestreo de 95 muestras/km² para el bloque de investigación. En este análisis se obtuvieron resultados con concentración elevadas de varios elementos metálicos en algunas zonas, donde uno de estos elementos fue el níquel (Ni).

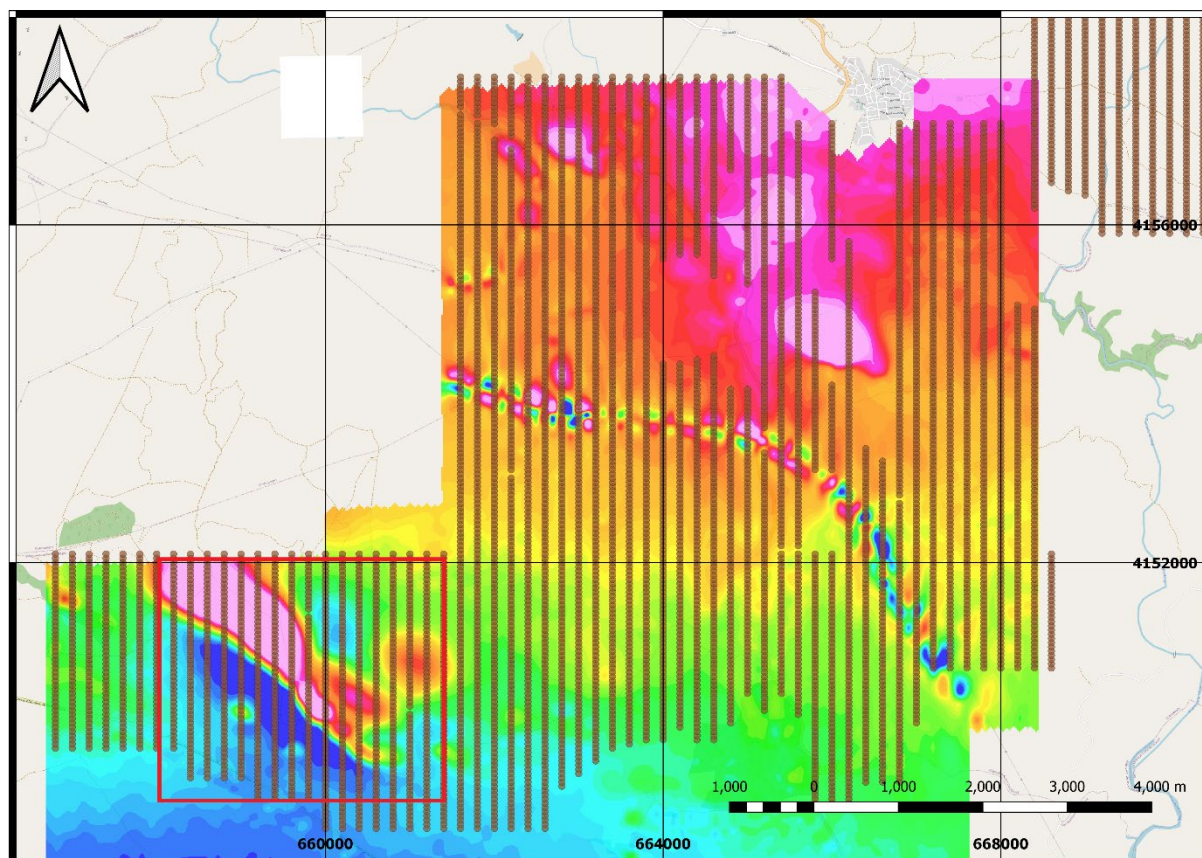


Figura 1 Mapa con los resultados de intensidad magnética total (IMT) y las muestras de suelos. La zona marcada con el rectángulo rojo muestra la zona donde se centra este TFM.

1.3 Planteamiento de problema y objetivos

Queda claro que las campañas geofísica y geoquímica realizadas para la empresa MATSA (Figura 1), tienen una orientación en la búsqueda de nuevos depósitos minerales, para la explotación de metales a nivel económico, tales como cobre (Cu), zinc (Zn) y níquel (Ni), entre otros. La provincia de Huelva es conocida por sus numerosos yacimientos metalogénicos, por encontrarse ubicada geológicamente en la Faja Pirítica Ibérica, posiblemente una de las provincias metalogénicas más importantes del mundo. Los resultados obtenidos para la campaña geofísica mostraron un máximo alto de intensidad magnética total (con valores superiores a 43500 nT) en la zona entre los municipios Villanueva de los Castillejos y San Bartolomé de la Torre, mientras que las resistividades, en esa zona presentan valores menores a $100 \Omega \cdot m$, lo que se asocia con una fuente de naturaleza metálica. Por otro lado, la campaña geoquímica y su posterior análisis por IMM, muestra valores altos de concentración de níquel. Debido a ello, se presume la presencia de un depósito de rocas asociada al Complejo Vulcano-Sedimentario, que contienen dicho elemento para un posible yacimiento de interés económico en el subsuelo.

Sin embargo, sigue habiendo una falta de información detallada acerca de las estructuras geológicas presentes, asociadas a las mineralizaciones buscadas. Por ello, es importante realizar una buena prospección minera a partir de la correlación de los estudios de los diferentes métodos geofísicos y geoquímicos, para poder definir la veracidad de esta interpretación y caracterizar elementos importantes como la geometría y profundidad de la fuente magnética. El objetivo de la presente investigación es realizar un procesamiento e interpretación de los datos geofísicos y geoquímicos obtenidos en la zona suroccidental del permiso de investigación Taranto, para la prospección minera de un posible yacimiento de níquel. Los datos fundamentales de partida son los valores máximos de IMT del área seleccionada. Finalmente, a partir de la correlación de los datos geocientíficos se seleccionará la zona de perforación para un posible sondeo de exploración que permita corroborar el posible depósito de níquel.

2. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

2.1 Localización geográfica

El permiso de investigación “Taranto”, se encuentra situado en la comarca del Andévalo de la provincia de Huelva, en concreto, se extiende a lo largo de los términos municipales de: Villanueva de los Castillejos, Alosno y San Bartolomé de la Torre (Figura 2).

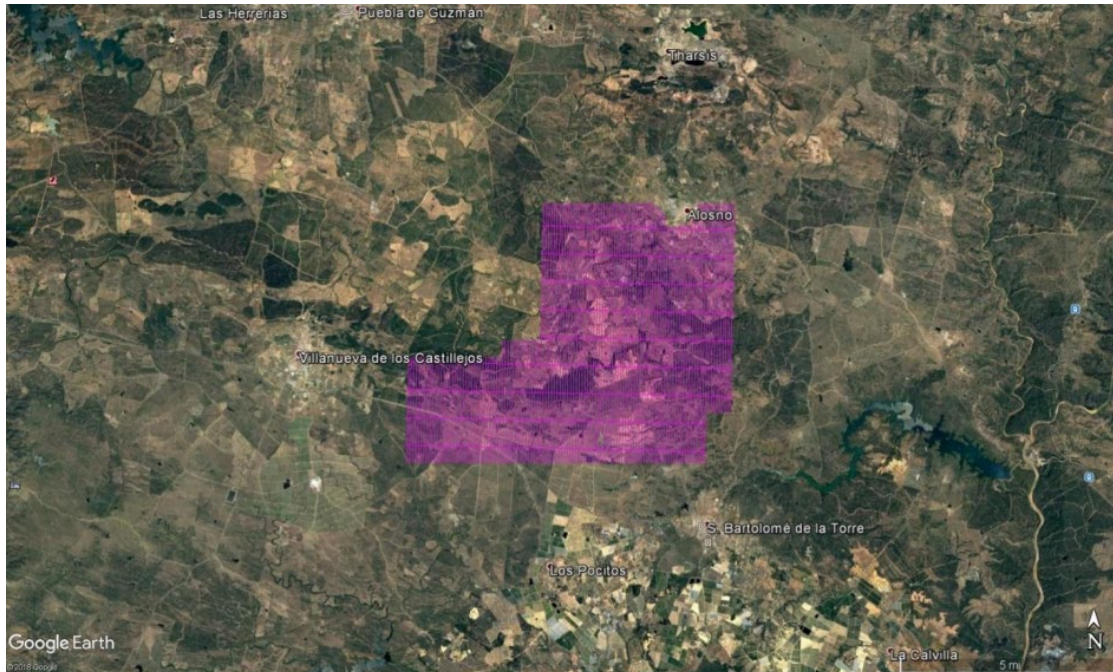


Figura 2 Mapa de la adquisición aerotransportada en el permiso de investigación Taranto.

Cabe citar, entre otros topónimos de interés, el Arroyo de la Hijuela y la Sierra de Urraca Alonso (Figura 3), dado que en esas zonas se ha planteado la correlación de datos geofísicos y geoquímicos de interés minero (ver Figura 45 en Anexos, para más detalles de la toponimia de la zona de estudios).

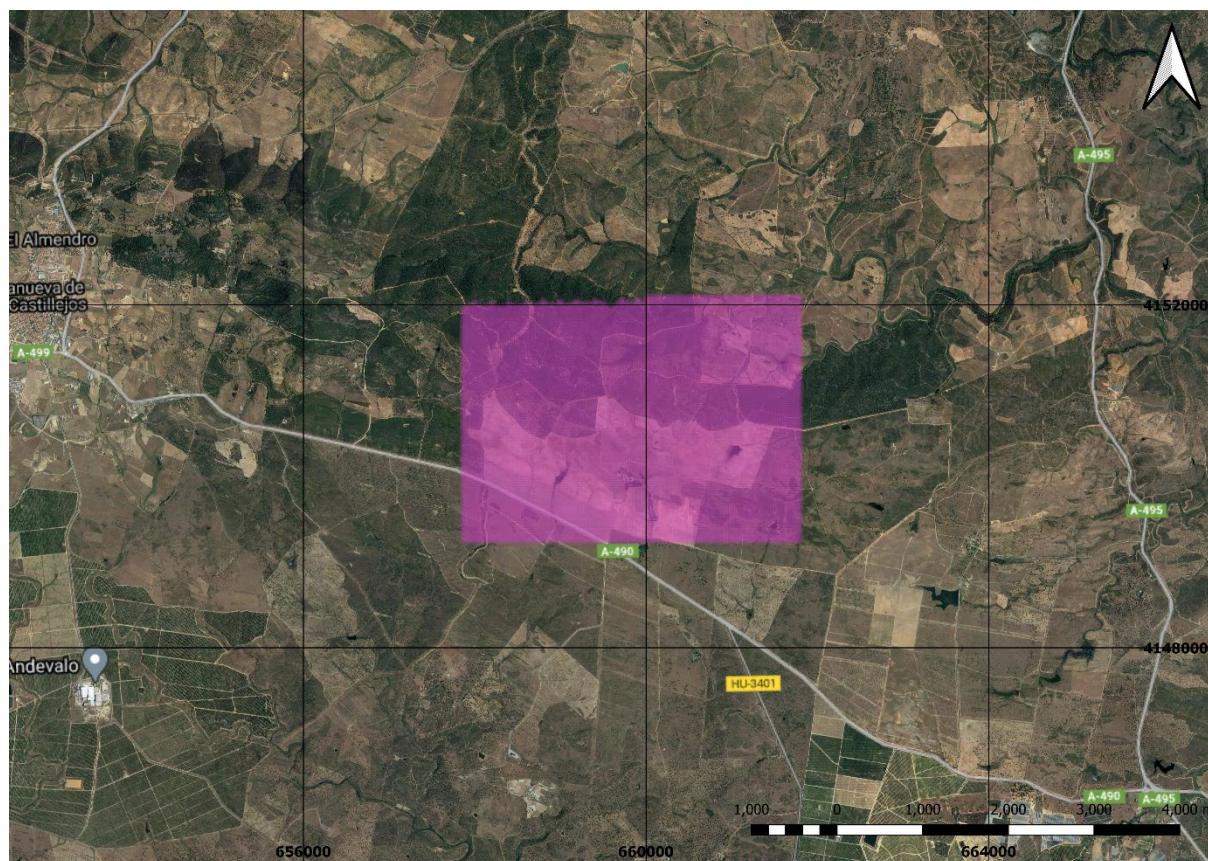


Figura 3 Área de procesamiento e interpretación de los datos de interés.

2.2 Marco geológico

En la provincia de Huelva aflora la parte más meridional del zócalo varisco ibérico (Macizo Ibérico) y sobre éste hay una cobertera sedimentaria neógena que pertenece a la Cuenca del Guadalquivir. A su vez, el denominado Macizo Ibérico se puede subdividir en los siguientes conjuntos tectónicos: Zona de Ossa-Morena (al norte) y Zona Surportuguesa (al Sur). En esta última región afloran rocas de edad devono-carboníferas y en ella se localiza la provincia metalogénica conocida como Faja Pirítica Ibérica (Schemerhorn, 1971).

2.2.1 Geología de la Zona Surportuguesa

La Zona Surportuguesa forma parte de un cinturón orogénico varisco de piel final, de vergencia regional generalizada hacia el sur y formado durante el Carbonífero (Figura 4), se extiende desde la costa vicentina en Portugal hasta la Sierra Norte de Sevilla. Dicha zona limita al norte con la Zona de Ossa-Morena. Hacia al Sur limita con las cuencas del Algarve y del Guadalquivir, que evolucionaron durante el Mesozoico y Cenozoico, respectivamente. En la Zona Surportuguesa (ZSP) afloran rocas devono-carboníferas y pérmicas (Paleozoico superior). Las rocas más antiguas ocupan el núcleo de grandes estructuras anticlinales, como son el

anticlinal de Valverde del Camino y Puebla de Guzmán. Las rocas pérmicas aparecen en el extremo más oriental, en el entorno del río Viar. La ZSP ha sido subdividida por Mantero *et al.* (2007), en diferentes dominios:

- Dominio Septentrional, en él se incluye la unidad de Pulo do Lobo y las rocas plutónicas de la Sierra Norte de Sevilla, así como, la Cuenca Pérmica del Viar.
- Dominio Central o Faja Pirítica Ibérica.
- Dominio Meridional o del Suroeste Portugués.

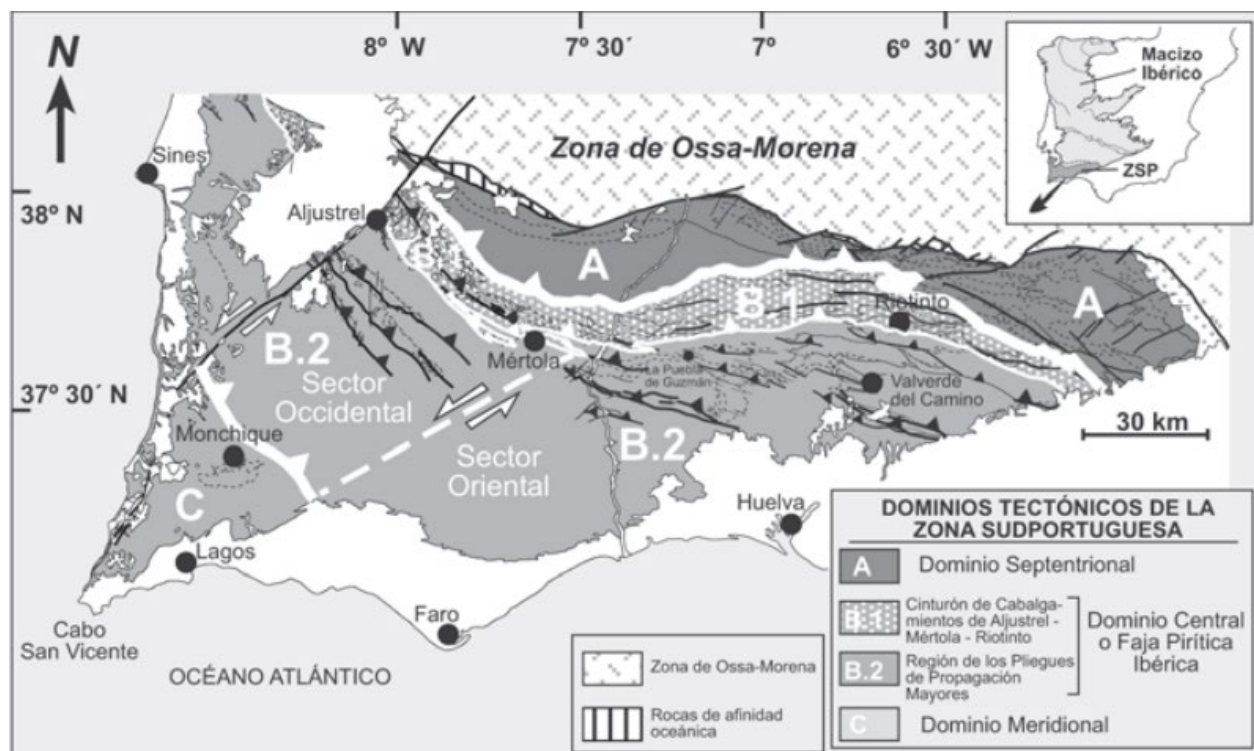


Figura 4 Esquema tectónico de la Zona Surportuguesa (Mantero *et al.*, 2007).

2.2.2 Geología de la Faja Pirítica Ibérica

La Faja Pirítica Ibérica es una de las subdivisiones de la Zona Surportuguesa en función de sus características litológicas, estructurales y paleogeográficas. Las rocas del Devónico afloran, entre otros sectores, en el núcleo de los pliegues de propagación que se observan en el Dominio Central de la Zona Surportuguesa, así como en el cinturón de cabalgamientos de Aljustrel – Mértola – Riotinto. En el área de investigación de este trabajo afloran rocas devónicas (cuarcitas y pizarras formadas en una plataforma siliciclasticas, llamado PQ) y que corresponden al flanco sur del anticlinal de Puebla de Guzmán. Las rocas de Complejo Vulcano-Sedimentario (CVS) representan los procesos de sedimentación y vulcanismo que tuvieron lugar al final del Devónico, Tournaisiense y parte del Viseense. Dichos materiales se caracterizan por

importantes cambios laterales de facies y se trata de rocas volcánicas (o subvolcánicas) de composición ácidas y básicas. En el CVS se encuentran los principales yacimientos minerales de la región, que dan lugar a la provincia metalogénica conocida a nivel mundial como la Faja Pirítica Ibérica. La sucesión estratigráfica del Dominio Central de la Zona Surportuguesa, termina con los depósitos siliciclásticos (alternancia de pizarras y grauwacas) del Viseense Superior, los cuales son interpretados como sedimentos de tipo *flysch* (Grupo Culm). Para más datos de interés sobre la geología regional de la Zona Surportuguesa se recomienda consultar el trabajo de Schemerhorn (1971).

Efectivamente, en el Dominio central de la Zona Surportuguesa probablemente tiene lugar la mayor concentración de sulfuros masivos del planeta, con reservas que superan los 2000 millones de toneladas. En dicha región se han explotado más de 80 yacimientos minerales polimetálicos, entre los que se encuentran: Aguas Teñidas, Riotinto, Tharsis, Magdalena, Neves Corvo, Aljustrel, Aznalcóllar, La Zarza, Sotiel, etc. Además, se han explotado yacimientos de manganeso y mineralizaciones hidrotermales (vease también el trabajo de Leistel et al., 1998). A modo de ejemplo en la Figura 5 se muestran la localización de algunos de los yacimientos minerales más interesantes del anticlinal de Puebla de Guzmán.

Seguidamente se detallan otros aspectos interesantes de las unidades litoestratigráficas citadas de acuerdo con Mantero *et al.* (2007), entre otros:

- Grupo de Pizarras y Cuarcitas (Grupo PQ) de edad Frasnense y Fameniense (Devónico Superior):

El grupo PQ es la base de la serie estratigráfica regional, dicha unidad está formada por pizarras negras con intercalaciones de cuarcitas. Estos niveles se agrupan (algunas veces) en tramos lutítico-arenosos de potencia métrica (Sáez & Moreno, 1997). La potencia estimada para estos materiales es del orden de unos 2000 m, donde los niveles de cuarcita de esta unidad aumentan de grosor y de tamaño de grano hacia el techo, donde las pizarras casi desaparecen. Las características litológicas y estructurales presentes en esta secuencia, sugieren que estos materiales se depositaron en una plataforma marina somera.

- Complejo Vulcano-Sedimentario (CVS) de edad Fameniense-Viseense Medio-Superior (Devono-Carbonífero)

El Complejo Vulcano-Sedimentario es una unidad tectonoestratigráfica con una gran variedad de litologías, y la geometría de los cuerpos rocosos en dicha unidad es muy compleja. Cabe imaginar una cuenca sedimentaria devono-carbonífera muy compartimentada, con diferentes

niveles de subsidencia y con aportes detríticos que están condicionados a la estabilidad de sus taludes y el carácter restringido de las subcuencas (Moreno *et al.*, 1996). Routhier *et al.* (1978) menciona que la estratificación del CVS varía entre un almacén de rocas sedimentarias (pizarras), sin presencia de rocas volcánicas, y un almacén de rocas magmáticas con intercalaciones de rocas sedimentarias.

El Complejo Vulcano-Sedimentario está compuesto por rocas magmáticas y sedimentarias de edad Fameniense tardío a Viseense medio-superior. Estas rocas magmáticas son de origen volcánico y subvolcánico de composición ácida (riolitas y dacitas) y básica (basaltos), las rocas sedimentarias son detríticas de grano fino (areniscas) y *cherts*. Además, indican que los depósitos de sulfuros masivos suelen estar ubicados en el techo de secuencias magmáticas ácidas. La zona superior de dichas rocas posee una geometría tabular y congruente con la estratificación. La zona inferior se caracteriza por una mineralización diseminada o *stockwork*. Esta unidad tiene una gran importancia desde el punto de vista minero debido a que están caracterizados mayormente por pirita, esfalerita, galena, calcopirita, y tetraedrita; algunos de sus componentes menores son la pirrotita, arsenopirita, casiterita, sulfosales de Cu-Pb y de Bi-Pb, estannita, barita, magnetita, electrum, cobaltita y otros minerales.

- Grupo Culm

La unidad tectono-litoestratigráfica más moderna son los sedimentos flyschoides del Viseense-Namuriense, dicha unidad debuta con una secuencia esencialmente pizarrosa (de aproximadamente de 45-50 m de espesor), a la cual, le sucede una alternancia de grauwas y pizarras. En conjunto, esta unidad tiene varios miles de metros de espesor y se trata de una formación turbidítica de facies Culm. Estos materiales afloran ocupando una amplia extensión en el Dominio Meridional de la Zona Surportuguesa y pueden reconocerse en una transversal desde Ayamonte hasta Riotinto.

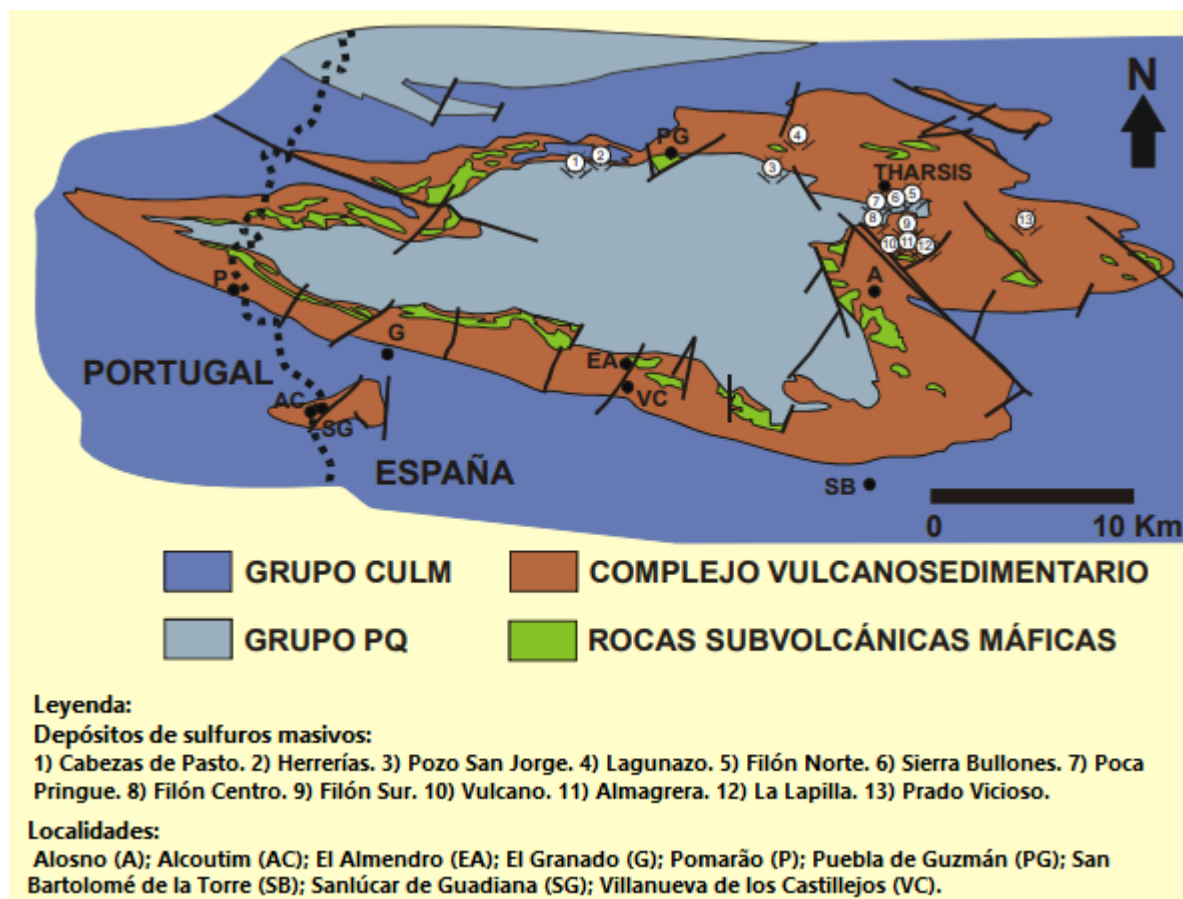


Figura 5 Mapa geológico del Anticlinorio de La Puebla de Guzmán. En él se localizan las mineralizaciones de sulfuros masivos del distrito minero de Tharsis y otras próximas a éste (Tomado de Capitán, 2014).

2.2.3 Sistema de cabalgamientos de la Faja Pirítica Ibérica

La Zona Surportuguesa es un cinturón de pliegues y cabalgamientos que se enraízan a una profundidad de aproximadamente de 12 km hacia el norte (Mantero *et al.*, 2011), donde a partir de éstos, estructuras de plegamientos importantes se forman, tales como, el Anticlinal de Puebla de Guzmán (Figura 6) y el Anticlinal de Valverde del Camino. Cabalgamientos regionales con directrices estructurales que varían, en dirección O-E y NO-SE, superponen rocas del PQ, sobre rocas del CVS (Figura 7). Regionalmente las rocas del Dominio Septentrional se superponen a las rocas de la Faja Pirítica Ibérica, y éstas a su vez cabalgan al Domino Meridional (Mantero *et al.*, 2007).

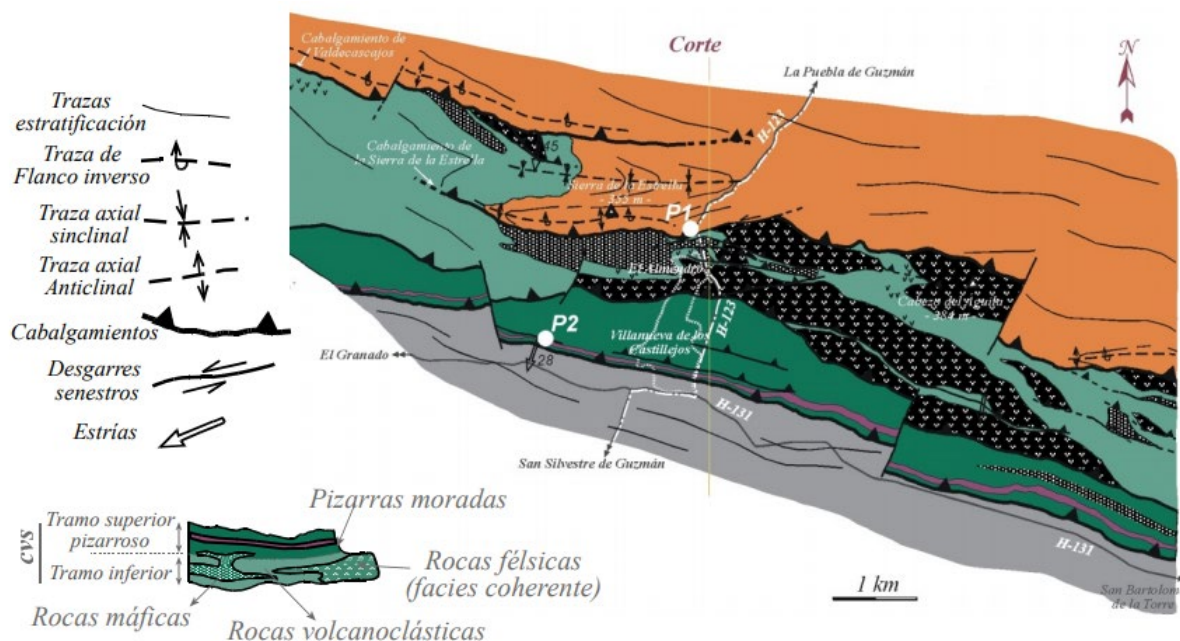


Figura 6 Mapa geológico del sector de Villanueva de los Castillejos - El Almendro. Los colores naranjas representan rocas del Devónico (Grupo PQ) que cabalgan sobre rocas carboníferas (CVS) -en colores verdes y negros-. Obsérvese que las rocas del Culm (color gris) constituyen el bloque de muro del sistema de cabalgamiento descrito en el flanco sur del antiforme de Pueblo de Guzmán (véase para más detalles Mantero *et al.*, 2006).

Mantero *et al.* (2006), realizan en la transversal de Villanueva de los Castillejos - El Almendro, una descripción de la geometría y cinemática del sistema de cabalgamientos variscos que configuran el borde meridional del Anticlinal de la Puebla Guzmán. Dichos autores describen que el borde meridional del anticlinal de la Puebla de Guzmán está establecido por un sistema de cabalgamientos que sigue la dirección N110°E y un movimiento del bloque de techo hacia el S-SO. Dicho sistema está compuesto de superficies menores de cabalgamientos, que muestran geometrías anastomosadas y que disminuyen progresivamente su buzamiento desde el sector más septentrional a 40°N hacia las zonas externas y meridionales a 20°N.

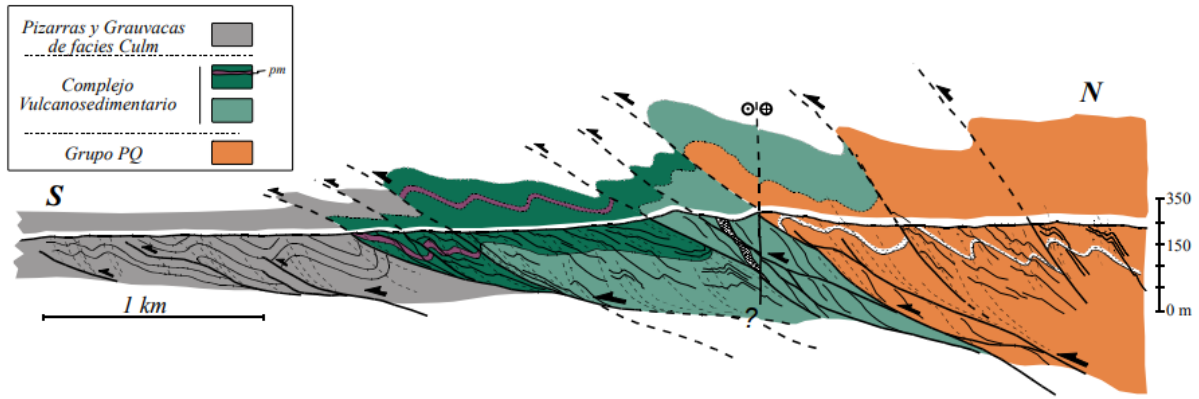


Figura 7 Corte geológico transversal al sistema de cabalgamientos imbricados (Tomado de Mantero *et al.*, 2006).

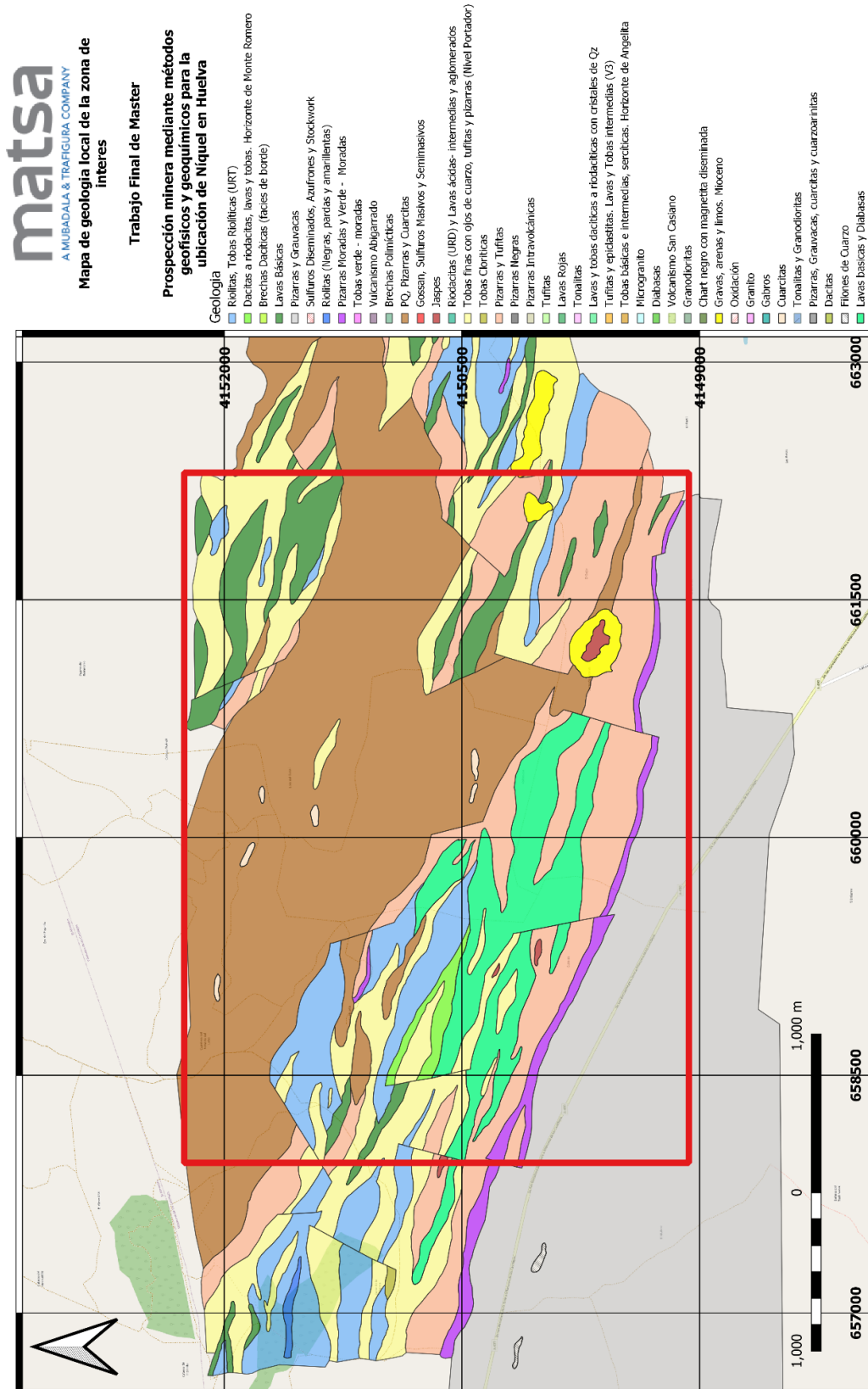


Figura 8 Mapa de litologías correspondiente al permiso de investigación minera Taranto, Huelva (cortesía de MATSA).

3. METODOLOGÍA

Un esquema de la metodología realizada a lo largo del TFM para conseguir los objetivos propuestos en el mismo, son de manera esquemática presentada en la Figura 9. Seguidamente, se irán detallando los distintos aspectos metodológicos contemplados en el tratamiento de la base de datos de MATSA, para el desarrollo de este TFM.

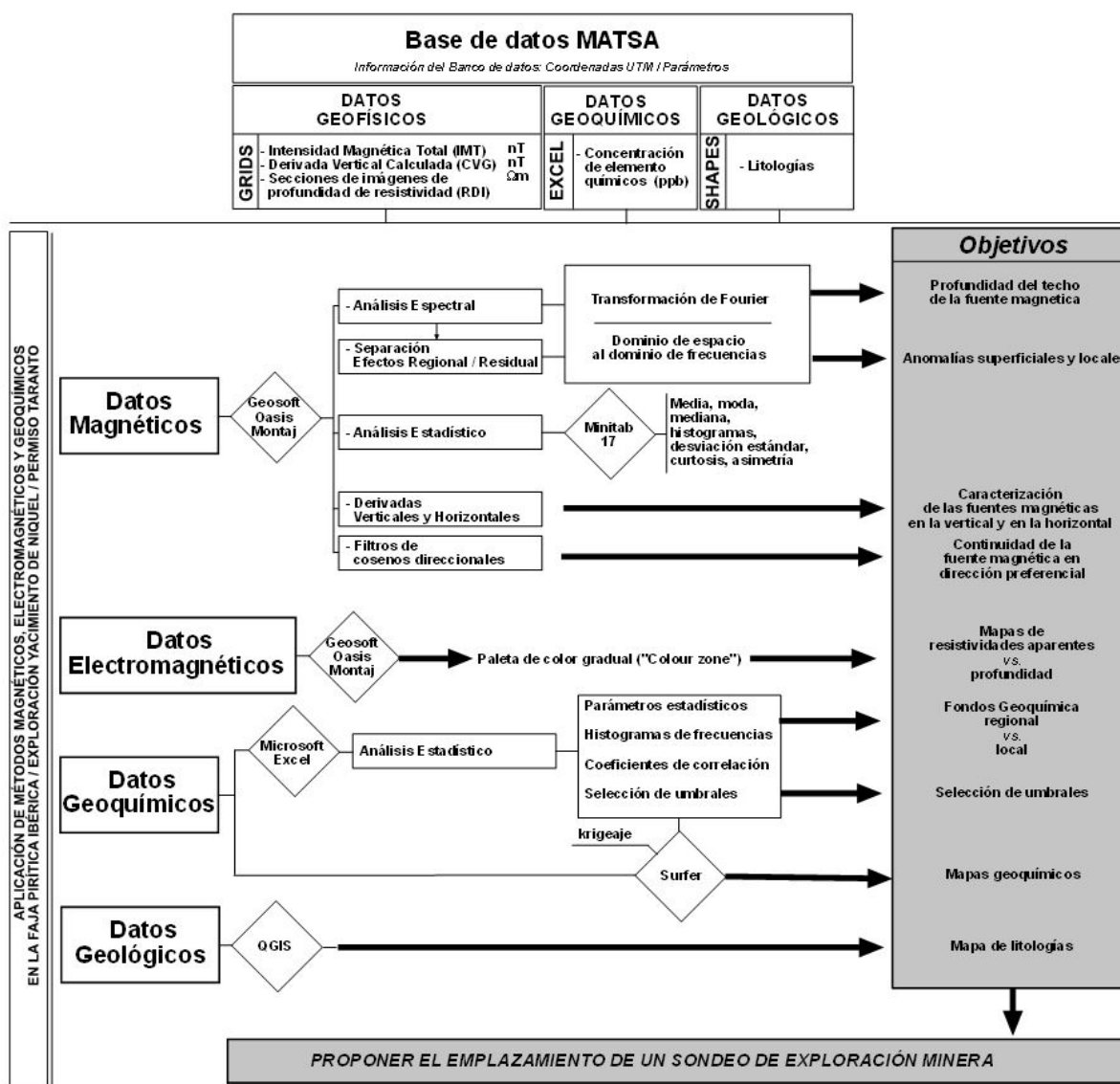


Figura 9 Esquema metodológico de trabajo

3.1 Aspectos generales

Las medidas de campo magnéticos realizadas en el observatorio San Fernando (Cádiz), durante los días del vuelo aeromagnético (17-01-2018), pueden servir de ejemplo para plantear los valores de fuerza magnética total, que cabría esperar en un área de 200 km alrededor del citado

observatorio y, por consiguiente, en nuestra área de investigación. Así pues, seguidamente se expone los siguientes datos:

F (fuerza magnética total) = 43063.51 nT, y sus correspondientes componentes: X=27621.53 nT, Y=-598.79 nT y Z=33032.41 nT (componente vertical), además de la componente horizontal H=27628.02 nT. Así como una declinación magnética -1.24° y una inclinación magnética de 50.09° . Estos fueron calculados a través de la página web INTERMAGNET, el día 28-11-2020. Dichos datos deben de servir de referencia para el mejor análisis comparativo con los datos obtenidos en la campaña aeromagnéticas.

3.1.1 Base de datos geofísica

Las características de adquisición del bloque de Taranto fueron las siguientes (Tabla 1):

Tabla 1 Características de la adquisición aerotransportada de Taranto.

A6 - Taranto	Espaciamiento (m)	Area (Km ²)	Lineas adquiridas	Direccion de Vuelo	Numero de Linea
Lineas de vuelo	100	82	905	N0°E/N180°E	L26000 – L27170
Lineas de amarre	1000			N90°E/N270°E	T28000 – L28080

Durante la adquisición, el helicóptero se mantuvo a una altitud media de 92 metros sobre el suelo con una velocidad de promedio de 80 Km por hora.

El sistema electromagnético utilizado era un sistema de registro de datos de transmisión de forma de onda de receptor completo Geotech Time Domain EM (VTEMTM max), ubicado 50 metros debajo del helicóptero. Este utiliza el registro de medio ciclo transmitido de las formas de onda del transmisor y el receptor para obtener una calibración de respuesta completa del sistema durante todo el vuelo de inspección. Las bobinas del transmisor y del receptor VTEMTM estaban en configuración concéntrica-coplanar y orientada en dirección Z. El bucle transmisor-receptor se remolcó a una distancia media de 45 metros por debajo de la aeronave, como se muestra en la Figura 10.

El magnetómetro de vapor de cesio Geometrics estuvo localizado 10 m debajo del helicóptero, como se muestra en la Figura 10. La sensibilidad del sensor magnético es 0.02 nanoTesla (nT) en un intervalo de muestreo de 0.1 segundos.

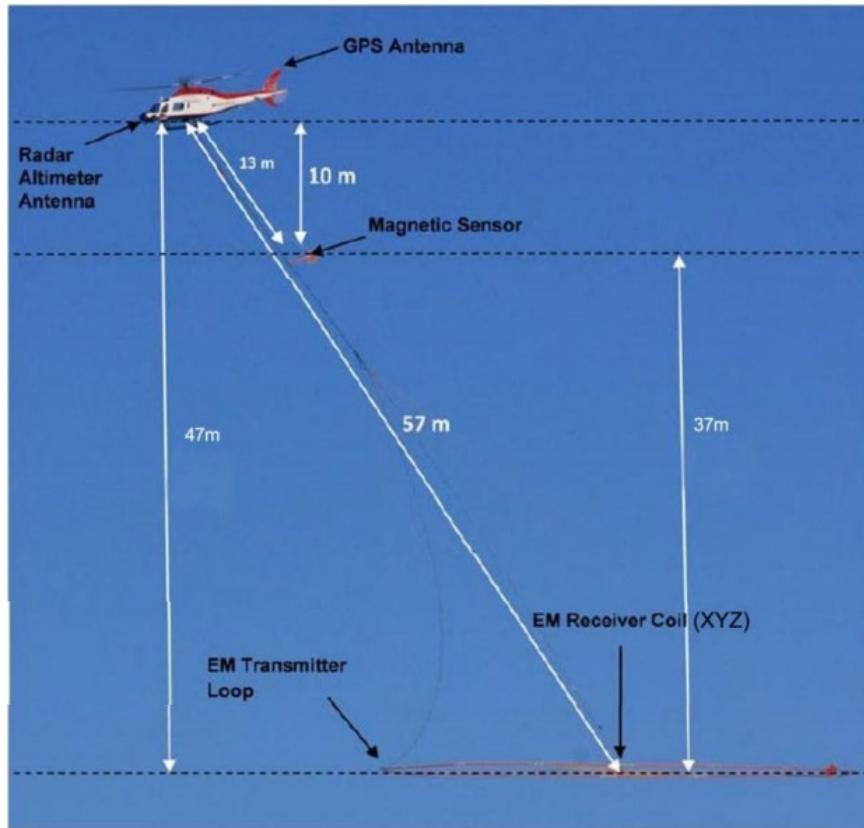


Figura 10 Geometría de adquisición aerotransportada.

Los resultados del procesamiento hechos por Geotech ltd. de los datos geofísicos utilizados en este trabajo, se presentaron en los siguientes *Grids* para su manipulación:

- Intensidad Magnética Total (IMT) reducido al polo (RTP)
- Derivada Vertical Calculada (CVG) reducido al polo
- Secciones de imágenes de profundidad de resistividad (RDI).

3.1.2 Base de datos geoquímica

Para la zona de interés de 11 km², se obtuvo un total de 1134 muestras, que representan una densidad de muestreo de 95 muestras/km². La toma de muestras geoquímica se hizo en líneas paralelas en dirección N-S, donde entre cada muestra hay una distancia de 50 m, mientras que la distancia entre líneas de muestreo fue de 200 m, por lo cual, se obtuvo un total de 20 líneas de adquisición con un muestreo entre 47 y 54 elementos. Los datos de partida para el estudio geoquímico es la concentración de diversos elementos químicos: oro (Au), calcio (Ca), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), potasio (K), magnesio (Mg), níquel (Ni), zinc (Zn), entre otros, expresada en ppb (partes por billón).

3.2 Procesamiento de los datos magnéticos

A partir de los *Grids* de datos magnéticos de Geotech Ltd, se procedió a importar dichos datos con el programa Geosoft Oasis Montaj. El procesado de los datos permitió obtener mapas que facilitaban la visualización de los diferentes *Grids* para todo el permiso minero "Taranto". Dada la amplia extensión del citado permiso se optó por seleccionar el área de mayor interés, que coincide con el máximo de IMT en la zona suroeste de la región investigada.

3.2.1 Análisis espectral

Se realizó el análisis espectral de la base de datos magnética, este es un método en el cual se transforman los datos del dominio espacial al dominio de frecuencias. Esta transformación se realiza mediante una transformada bidimensional de Fourier de la cual se obtiene posteriormente un espectro radial. Este espectro es por utilidad representado gráficamente en logaritmo neperiano y de donde se seleccionan bandas de frecuencias que conserven una relación lineal para todos sus datos. Spector y Grant (1970) indican que las pendientes de estas relaciones lineales son proporcionales a la profundidad del techo de la estructura asociada a este rango de frecuencias (Figura 11).

La fórmula para estimar la profundidad es (Spector y Grant, 1970):

$$Z = \frac{m}{4\pi}$$

Donde:

Z: profundidad del techo de la fuente

m: pendiente de la relación lineal

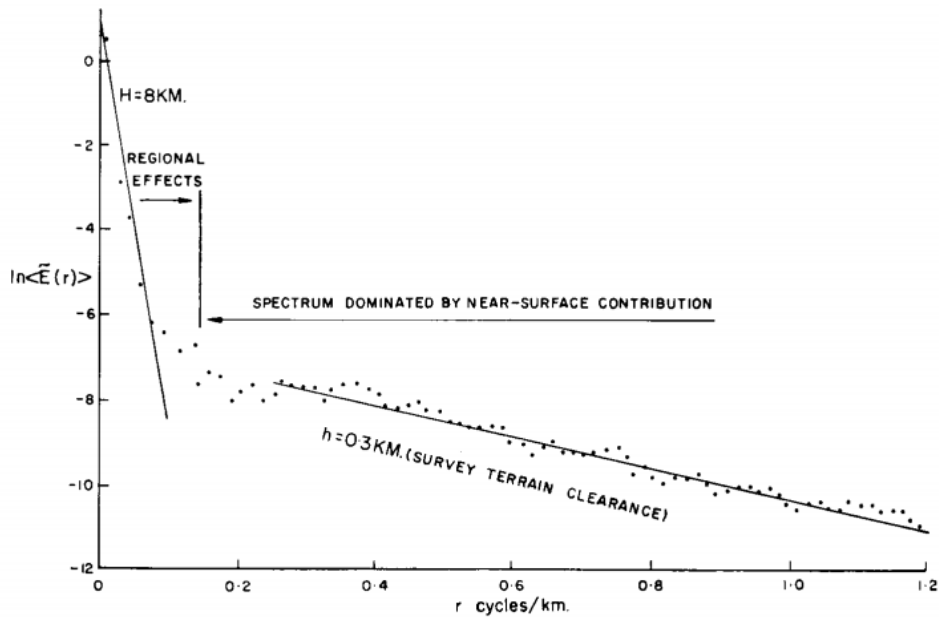


Figura 11 Espectro de potencia para datos magnéticos. (Tomado de Spector y Grant, 1970).

La pendiente de la curva en la zona de bajas frecuencias, representa la componente regional del campo magnético y está asociada a las estructuras regionales relativamente profundas, mientras que la pendiente correspondiente a altas frecuencias, está relacionada con la componente residual, asociada a cuerpos superficiales.

3.2.2 Separación de efectos regional-residual

La exploración magnética se enfoca en las anomalías que resultan del cambio de las propiedades magnéticas de los cuerpos en el subsuelo a diferentes profundidades. Dependiendo de la profundidad del objetivo se utilizan anomalías de distintos rangos, por ejemplo, los objetivos para la industria minera son mucho más superficiales que los objetivos petroleros por lo cual se utilizan anomalías residuales (superficiales y longitud de onda corta) en el primer caso y regionales (profundas y longitud de onda larga) para el segundo (Telford *et al.*, 1990).

La separación de los efectos residuales y regionales es importante en la interpretación magnética, porque permite una mejor interpretación y definición de las estructuras objetivos en la investigación (Dobrin y Savit, 1988). Por ello, a partir de los números de ondas obtenidos asociada a las diferentes tendencias del espectro radial, se aplicó un filtro pasabanda para atenuar el ruido presente en la base de datos de la IMT, este filtro se utiliza para pasar o rechazar un rango de numero de onda de los datos (Figura 12) (Geosoft Inc, 2007). La banda utilizada fue entre los valores de número de onda 0 y 6.5 rad/km.

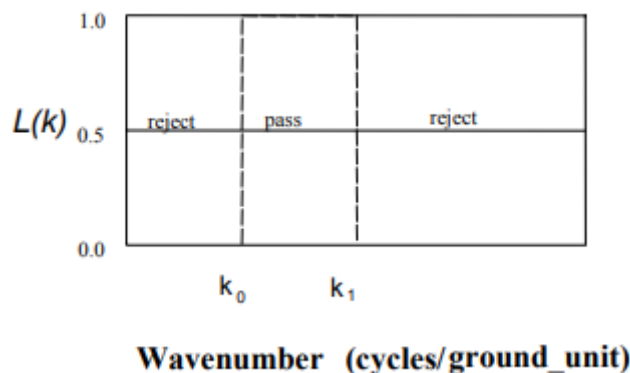


Figura 12 Filtro pasabanda (Tomado de Geosoft Inc, 2007).

Donde k_0 es el valor de número de onda menor para la selección del corte de filtro, y k_1 es el número de onda mayor de selección. La selección binaria de 0/1, el 1 para aceptar la banda deseada y el 0 para rechazar dicho intervalo.

Para separar los efectos residuales de interés de los regionales se utilizó un filtro Gaussiano, con un valor de número de onda o desviación estándar de 2.6 unidades. Dicha herramienta, es un filtro suave que se utiliza frecuentemente para aplicaciones pasa bajo o pasa alto. La función y la representación gráfica del filtro es la siguiente (Figura 13) (Geosoft Inc, 2007):

$$L(k) = 1 - e^{\frac{-k^2}{2k_0^2}}$$

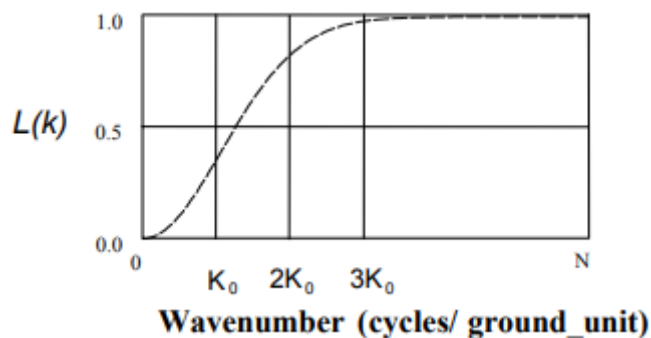


Figura 13 Filtro Gaussiano (Tomado de Geosoft Inc, 2007).

Donde, k_0 es la desviación estándar de la función de Gauss, similar a un punto de corte, la selección binaria de 0/1, el 1 para efectos regionales y el 0 para efectos residuales.

3.2.3 Análisis estadístico

Se efectuó un análisis estadístico de la base de datos magnética de la componente residual, que permitiera identificar las características, tendencias y agrupaciones de los datos, tales como la

media, mediana, moda, desviación estándar, curtosis y asimetría para poder obtener una estimación del comportamiento magnético de la zona.

Este estudio se realizó con el programa *Minitab 17* debido a la cantidad de estaciones (28057) obtenida de la base de datos exportadas del *Grid* de intensidad magnética total (IMT) reducida al polo (RTP). Se generó un histograma de frecuencias, un diagrama de caja y bigotes además de los parámetros estadísticos calculados.

3.2.4 Derivadas horizontales

Para resaltar la geometría de los cuerpos magnéticos y estudiar su continuidad, se utilizó el filtro para calcular la *n*-ésima derivada horizontal en las direcciones X, Y. Este proceso implica una transformación de fase, así como una mejora de las altas frecuencias, donde generalmente produce picos de anomalía aproximadamente ubicados sobre los bordes de cuerpos anchos y la mejora de las altas frecuencias agudiza estos picos para aumentar la definición de los bordes del cuerpo. Algunos intérpretes utilizan esta cualidad de las derivadas horizontales para mapear los contornos del cuerpo (Milligan y Gunn, 1997).

Para calcular derivadas en direcciones X y Y, el programa Oasis Montaj utiliza las siguientes ecuaciones (Geosoft Inc, 2007):

$$L(\mu) = (\mu i)^n$$

Donde “n” es el orden de la derivada, “ μ ” es la componente X del número de onda e “i” es igual a $\sqrt{-1}$.

$$L(v) = (v i)^n$$

Donde “n” es el orden de la derivada, “v” es la componente Y del número de onda e “i” es igual a $\sqrt{-1}$.

3.2.5 Derivada vertical

Para resaltar las anomalías asociadas a fuentes geológicas más someras de las estructuras se aplicó la derivada vertical a los datos magnéticos. Dicho método calcula variación del campo magnético en la vertical sobre el mismo punto, por lo tanto, permite ubicar y limitar los cuerpos que generan las anomalías magnéticas (Henderson y Zietz, 1949). Para calcular las derivada vertical se utilizó la siguiente ecuación (Geosoft Inc, 2007):

$$L(r) = r^n$$

Donde “n” es el valor del orden de derivada y “r” es el número de onda utilizado.

3.2.6 Filtro de coseno direccional

Dicho filtro es muy bueno para atenuar las características direccionales de los datos magnéticos. La función coseno aplica un filtro que permite el paso (rechazo) de las señales en la dirección de preferencia y rechaza (pasa) los efectos que generan las otras direcciones, y de esta forma se obtienen los efectos de la dirección deseada de manera aislada (Figura 14) (Geosoft Inc, 2007).

$$L(\theta) = \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right|, \text{ rechaza la dirección } \alpha$$

$$L(\theta) = 1 - \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right|, \text{ pasa la dirección } \alpha$$

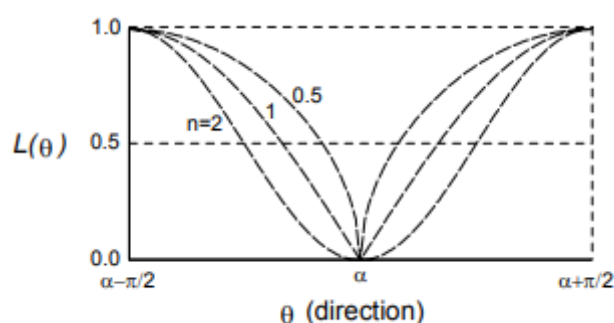


Figura 14 Filtro coseno direccional (Tomado de Geosoft Inc, 2007).

“ α ” es la dirección del filtro en grados (0-360 con respecto al norte), “ n ” es el grado de la función coseno, que por defecto se usa un grado 2 para una función de coseno cuadrado.

3.3 Datos electromagnéticos

Al igual que los datos aeromagnéticos, luego de la obtención de los *Grids* de datos electromagnéticos de Geotech ltd de varias profundidades, se procedió a importar dichos datos con el programa Geosoft Oasis Montaj, donde luego de la visualización de los distintos *Grids* de profundidades, se realizó el recorte de la zona de interés.

Estos, contienen los datos de resistividades a diferentes profundidades, específicamente en intervalos de 25 m en profundidad, por lo cual, debido a las estimaciones de profundidad obtenidos del estudio del espectro de potencia en el análisis magnético, se decidió estudiar hasta 300 m para observar el comportamiento eléctrico de forma volumétrica en la zona de estudio. Por ello, se obtuvieron un total de 12 *Grids* para las profundidades (25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 m). Es importante señalar que se procedió a utilizar una paleta de colores gradual señalando las resistividades menores a $100 \Omega \cdot m$, con un archivo tipo “*Colour*

Zone” (.ZON) que permite visualizar mejor dichas resistividades a medida a que se profundiza. Se tomaron resistividades menores a $100 \Omega \cdot m$ debido a que éstas reflejan la naturaleza metálica de las rocas (Alonso y Strauss, 1978).

3.4 Procesamiento de los datos geoquímicos

Cabe justificar para este apartado de la memoria, que el desarrollo metodológico seguido es el aprendido durante este Máster, en el módulo específico de Geoquímica, impartido por el profesor Fernando Palero. En este sentido, en los párrafos siguientes se justifica el procedimiento para tratar datos geoquímicos basados en la experiencia del citado profesor.

De la misma forma que en la metodología geofísica, se procedió a reducir la base de datos, solo para la zona de interés en el suroeste del permiso de investigación Taranto, cabe mencionar que también es interesante para el desarrollo de este TFM, el tratamiento estadístico para los datos anómalos de las concentraciones de diversos elementos. De manera especial, se analiza el Ni, así como un conjunto de elementos habitualmente asociados al Ni en los yacimientos en rocas magmáticas básicas. Dichas rocas, como ha sido justificado en el apartado geológico, afloran asociadas al CVS junto con una amplia variedad de litologías. A partir de los datos facilitados por MATSA, en los que se incluye miles de referencias cruzadas a localización de cada una de las muestras, así como concentraciones en ppb de diversos elementos químicos, así como: Ag, Al, Au, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Pd, Sr, Zn, etc. Se ha seleccionado un grupo de ellos por su especial correlación para los objetivos de este TFM, centrándonos en un análisis estadístico y la selección de umbrales geoquímicos para finalmente proponer un mapa de anomalías geoquímicas de Ni, a modo de una propuesta inicial.

3.4.1 Análisis estadístico

Se procedió a realizar un análisis estadístico de la variable Ni de la base de datos geoquímica aportada por MATSA, para conocer el comportamiento y distribución de los datos. Para cada muestra se ha considerado su situación espacial en relación a los afloramientos de las 3 unidades tectono-estratigráfica consideradas en la zona: PQ, Complejo Volcano-Sedimentario (CVS) y Culm (Figura 33). Dadas las diferencias litológicas en unas y otras unidades es de esperar que los valores de fondo puedan ser diferentes, lo cual afectaría a la hora de considerar en ellas los umbrales de anomalía de una forma adecuada. Establecer el fondo geoquímico en cada unidad tectono-estratigráfica será uno de los criterios comparativos para definir de forma correcta las anomalías de la variable Ni.

El procesamiento de datos se ha realizado con las herramientas que aporta el programa Microsoft Excel, en donde, se obtuvieron los parámetros estadísticos de las concentraciones de níquel en la campaña completa y por fondos litológicos (tabla 6). Además, se ha realizado empíricamente histogramas de frecuencia con sus respectivas distribuciones acumuladas en porcentaje a partir de intervalos y números de clases. El estudio y análisis detallado de los histogramas, junto con los parámetros estadísticos, aportan una idea sobre la distribución geoquímica, fondos regionales y locales de la zona de estudio.

Por otro lado, se realizó un análisis del coeficiente de correlación de cada uno de los elementos con respecto al níquel. Esta técnica permite el estudio del comportamiento estadístico por pares de elementos, estableciendo una relación lineal entre las poblaciones de dos elementos. El análisis de correlación posibilita conocer la dependencia de un elemento respecto de otro, dentro de una campaña geoquímica, de esta manera, la correspondencia del níquel con otros elementos metálicos.

3.4.2 Selección de umbrales

Para el establecimiento de umbrales que delimiten diferentes familias de contenidos se ha analizado en detalle el histograma de frecuencia, comprobando si hay una distribución multimodal de la población del níquel que pueda interpretarse como una superposición de valores por dispersión sobre un fondo geoquímico normal para la zona. Estos umbrales serán representados en un mapa que, por la escala de trabajo, indicará las zonas más cercanas al foco de la dispersión.

Unos adecuados porcentajes de datos en cada familia de contenidos para una buena definición de las zonas anómalas son los siguientes:

- Del 55 al 70% para el fondo regional.
- Del 30 al 15% para el fondo local.
- Del 10 al 5% para anomalía clara.
- El 5% o menos para la anomalía muy alta (picos de anomalía).

Desgraciadamente no siempre es posible mantener estos porcentajes debido a la distribución estadística de la variable, para lo cual deben considerarse otras formas, a veces tan simples como considerar los valores extremos de la población atendiendo a los valores de media y desviación estándar.

3.4.3 Obtención de mapa de anomalía geoquímica de Níquel

Después de haber establecido los umbrales que definen las anomalías de concentración de níquel, se procedió a la obtención de los mapas de anomalías geoquímicas de dicho elemento, con el programa Surfer, para el posterior análisis georreferenciado. La interpolación utilizada para la generación de los mapas fue el método kriging, para ello se estudió el comportamiento variográfico de variable, para establecer unos parámetros correctos de búsqueda en el proceso de interpolación, ya que, para el manejo efectivo de este método, implica conocer el comportamiento espacial de la varianza antes de acometer el método de estimación para generar una superficie de salida adecuada (Oliver y Webster, 1990).

4. RESULTADOS

A continuación, se presenta la interpretación magnética, electromagnética y geoquímica por medio de análisis estadísticos, mapas, cálculos y la estimación de profundidades de las fuentes de interés.

4.1 Datos magnéticos

En la Figura 15 se presenta el mapa de intensidad magnética total (IMT) reducido al polo (RTP) de la zona del permiso de investigación Taranto, obtenido a partir del método magnético aerotransportado. Este exhibe dos áreas con máximos locales, el primero en el extremo noreste, entre las coordenadas UTM 4154000 a 4158000 m en el eje Y, con valores alrededor de 43500 nT (máximo “El Barrito”, tomando como referencia la toponimia local), y el segundo en el extremo Suroeste alrededor las coordenadas UTM 659000 m en el eje X y 4151500 m en el eje Y, con valores próximos a 43600 nT (máximo “La Hijuela”). Cercano a este último (al Sur del mismo) se muestra dos zonas de mínimos locales, el primero, en contacto con el máximo local de “La Hijuela”, valores próximos a 43330 nT, mientras que el segundo, coincidiendo con el límite suroccidental del área investigada se localizan los valores de IMT RTP de 43340 nT, aproximadamente. En la zona central de Taranto se encuentran valores medios cercanos a 43365 nT (tonos verdes), al norte de estos destaca la alternancia de pequeñas áreas entre máximos y mínimos que se atribuye a intensidades inducidas por un cable de alta tensión y por tanto no debe considerarse como intensidades de origen natural, producida por las rocas. En general los contornos presentan una orientación N110E en la mitad meridional del área investigada, mientras que en la zona nororiental se aprecia que los contornos magnéticos se orientan E-O. No obstante, en la zona Suroeste, los contornos de los máximos y mínimos locales que están en contacto, tienen una dirección N125E. Los mayores gradientes coinciden con el máximo de La Hijuela, con valores de aproximadamente 30 nT por cada 100 m.

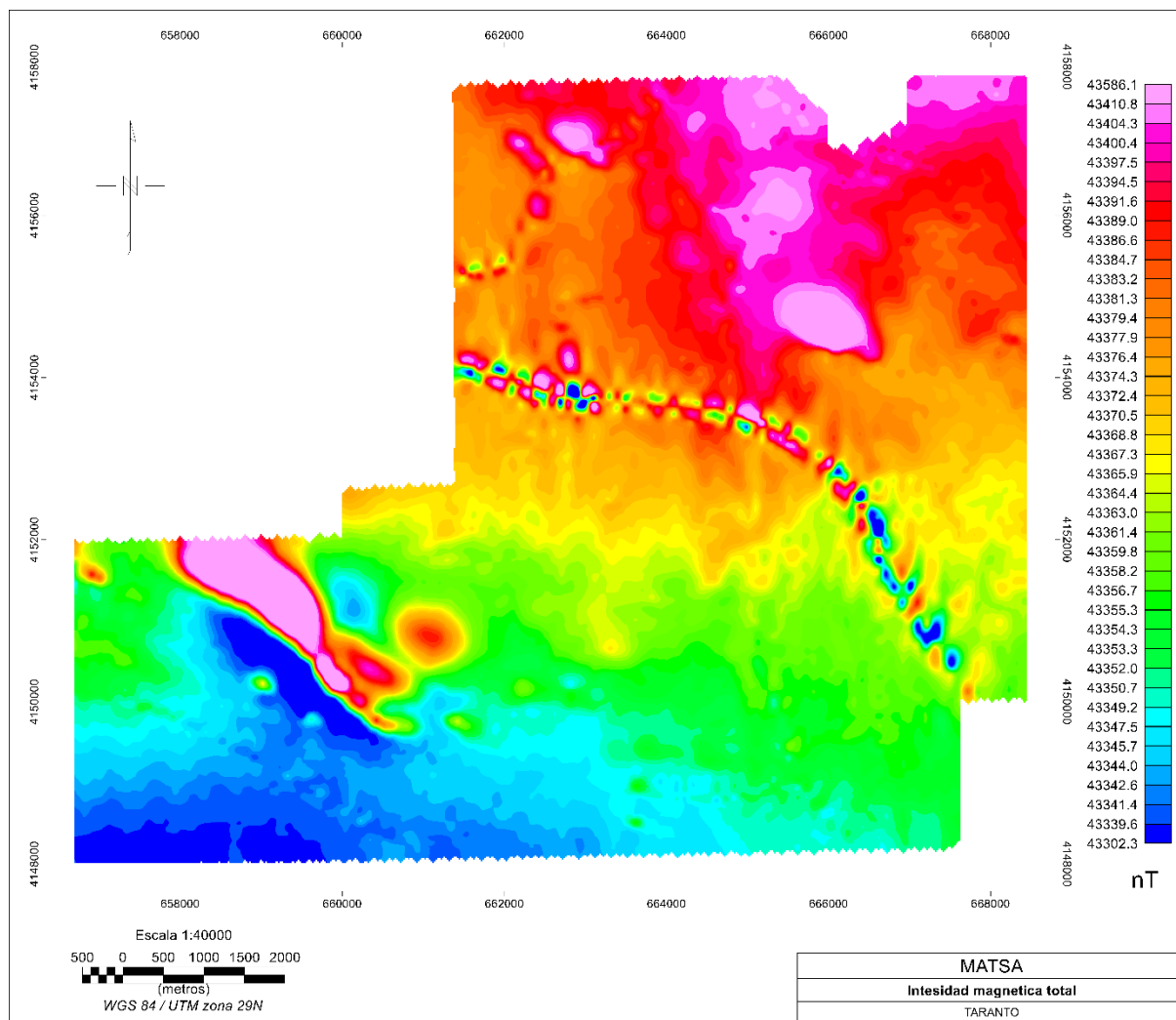


Figura 15 Mapa de intensidad magnética total (IMT) reducido al polo (RTP).

Luego de la obtención del mapa de IMT RTP de la extensión total de adquisición de Taranto, se recortó dicha base de datos, centrando el interés en el máximo de IMT RTP de La Hijuela (Figura 16). En este nuevo mapa, se puede observar con mayor detalle los valores y contornos de IMT RTP. La nueva ventana tiene una extensión de 4000 m en dirección N-S y 2900 m en dirección E-O entre las coordenadas 658000 m a 661500 m en el eje X, y 4149500 m a 4152000 m en el eje Y. El valor máximo “absoluto” es de 43580 nT en la zona central de interés, en donde los contornos tienen una tendencia de N125E como se mencionó en el apartado anterior. El límite sur de este máximo, queda bien definido al estar en contacto con el contorno del mínimo “absoluto” de 43350 nT, a través de una banda de anchura de aproximadamente 500 m, a lo largo de dicha banda se concentran los principales gradientes de 32 nT por cada 100 m. Al este de la nueva ventana se encuentra un máximo local (máximo de “Sierra de Urraca Alonso”) de contorno de forma circular de 43387 nT, con un gradiente mucho más suave de 6 nT cada 100 m.

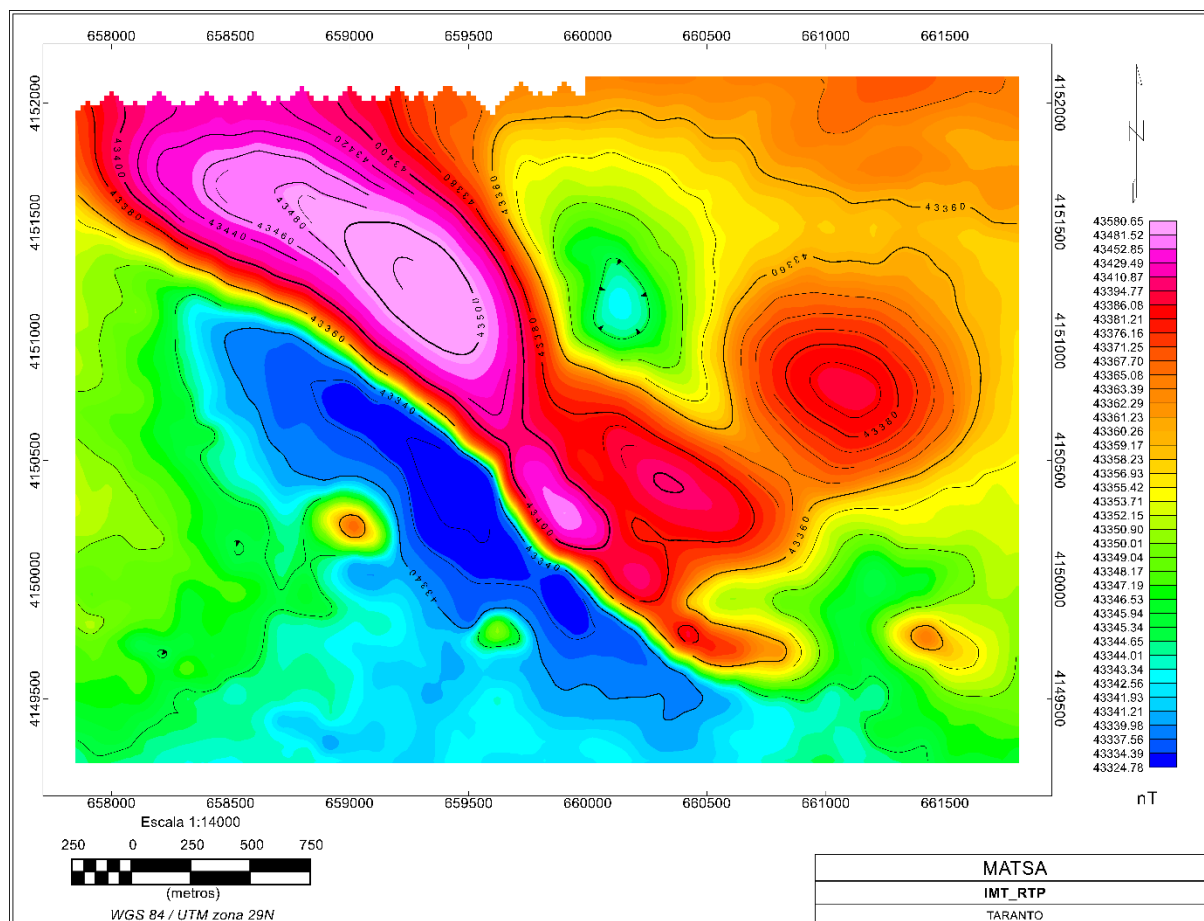


Figura 16 Mapa de intensidad magnética total (IMT) reducido al polo (RTP) de la ventana de interés.

4.1.1 Análisis espectral

La transformada de Fourier y el espectro de potencia fueron obtenidos con el programa Oasis Montaj, mientras que los gráficos del espectro de potencia radial se construyeron y analizaron con el programa Excel mediante un gráfico de dispersión, para tener una primera aproximación a las profundidades de las fuentes (Figura 17). Cabe destacar que los datos del espectro de potencia mostraron una división de las tendencias de efectos profundos a someros a valor de número de onda de 2.68 rad/km, mientras que el ruido obtenido por el espectro estuvo a partir de 6.85 rad/km. En la Tabla 2 se muestran los valores correspondientes a las profundidades estimadas para las fuentes magnéticas. Las profundidades van de aproximadamente 250 m para el techo de la fuente magnética más profunda en la ventana de interés, 125 m para el techo de la fuente más somera.

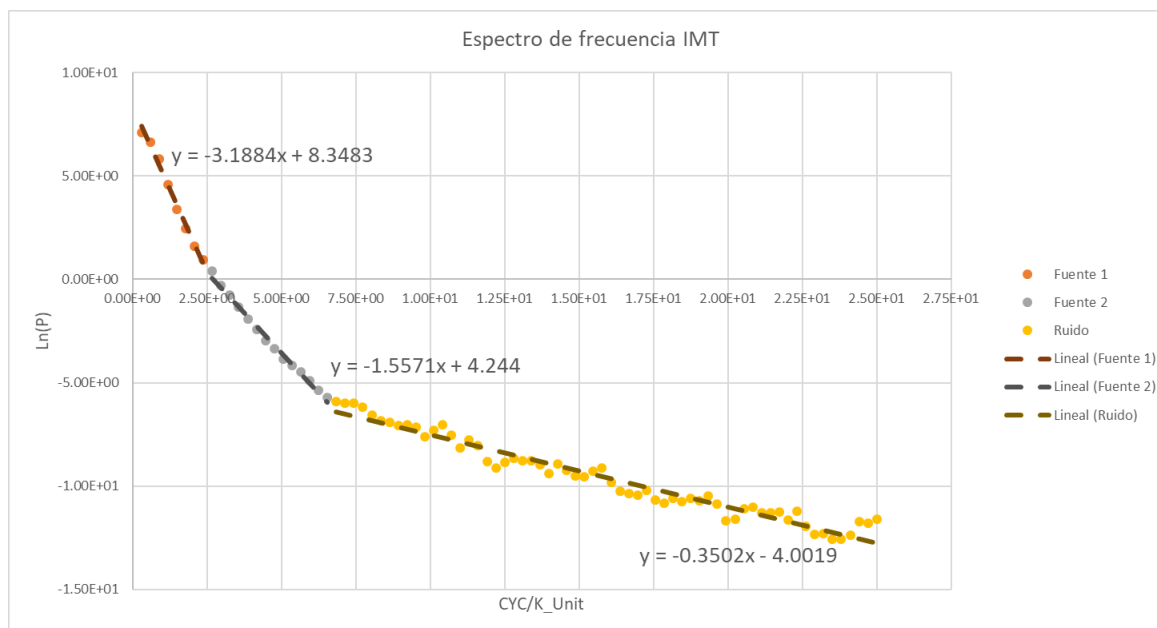


Figura 17 Espectro de potencia de la ventana de IMT RTP.

Tabla 2 Profundidades asociadas a las fuentes de IMT RTP.

	Fuente 1	Fuente 2	Ruido
Metros (m)	253.72	123.91	27.87

4.1.2 Separación de efecto de la componente residual

En el paso anterior se obtuvo inicialmente el espectro de potencia de la IMT RTP, por lo que a partir de este análisis se aplicó un filtro pasabanda para valores menores de números de onda de 6.5 rad/Km, y de esta forma, atenuar los efectos del ruido de la IMT RTP. Seguidamente se utilizó un segundo filtro, específicamente un filtro Gaussiano con un valor de 2.6 de desviación estándar, con el objetivo de lograr una mejor respuesta de las fuentes someras separando los efectos residuales de los regionales de la zona.

En la Figura 18 se aprecia las fuentes de componente residual de IMT RTP del estudio, luego de la separación de los efectos regionales. En este se puede observar que los contornos de la zona de mayor magnetización (máximo de “La Hijuela”) tienen una orientación similar a los datos de fuentes totales (N125E), con un máximo de 100 nT, mientras que los mínimos locales se encuentran en contacto con este, con una disminución drástica de valores de -35 nT al Sur y -26 hacia al Norte, con un gradiente de 34 nT y 30 nT por cada 100 m. Al Este se puede observar como el máximo de la Sierra de Urraca Alonso, mencionado anteriormente, con forma redondeada, muestra luego de la separación de efectos, una forma mucho más elongada

(N125E) en dirección similar a los contornos principales de la zona, éste presenta un máximo local de 12 nT, con un gradiente de 3 nT por cada 100 m.

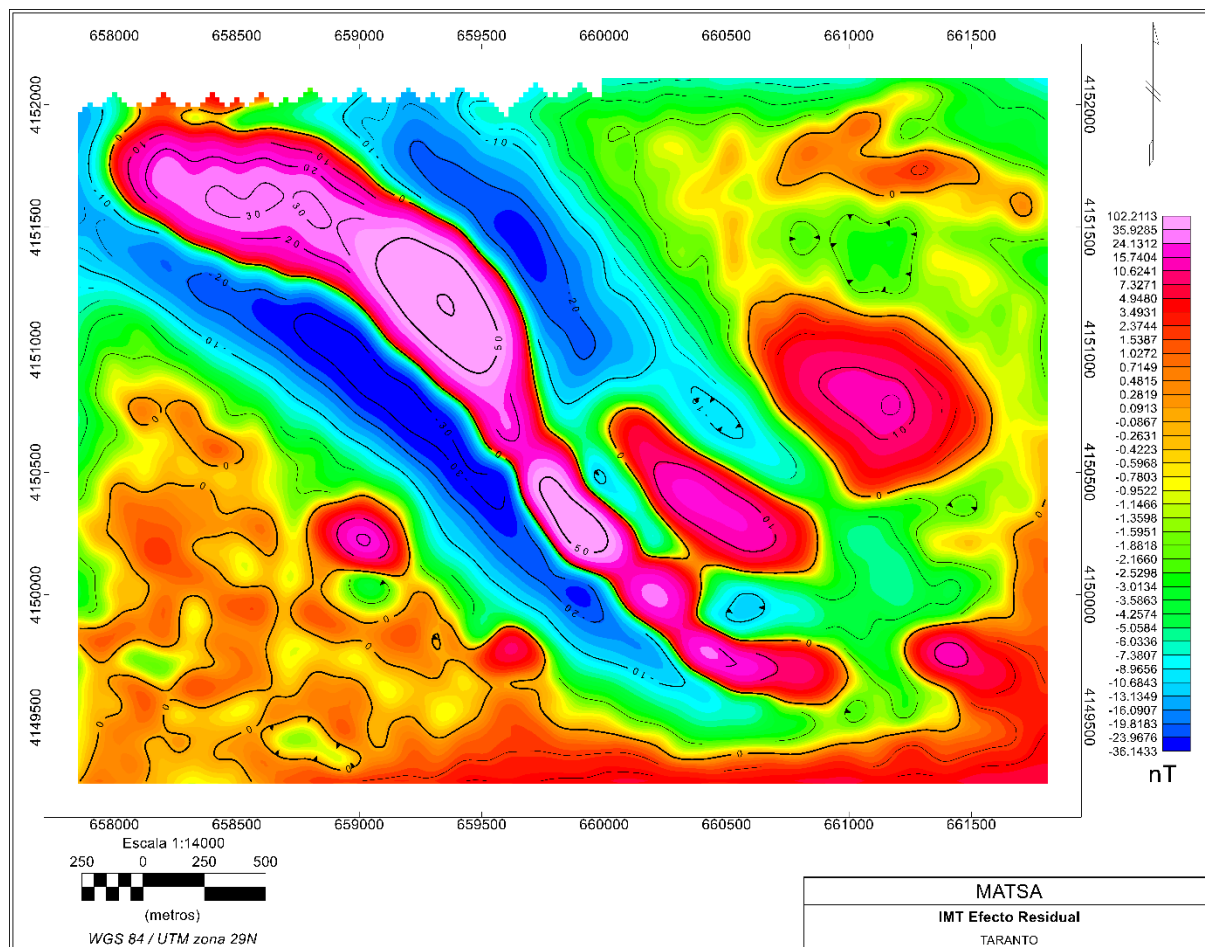


Figura 18 Mapa de efecto residual de IMT RTP.

De la misma forma que se construyó el espectro de potencia de los datos de IMT RTP, se obtuvo uno de los datos de IMT RTP de la componente residual (Figura 19), para tener una primera aproximación a las profundidades de las fuentes residuales. Los datos del espectro de potencia de IMT RTP residuales mostraron al igual que el espectro anterior, tres tendencias para los distintos tipos de fuentes. Donde ha sido posible determinar, en función de la pendiente de la curva, que la fuente más profunda tiene el techo aproximadamente a 160 m mientras que la fuente más somera estaría a 100 m de profundidad, de acuerdo con IMT RTP residual (Tabla 3).

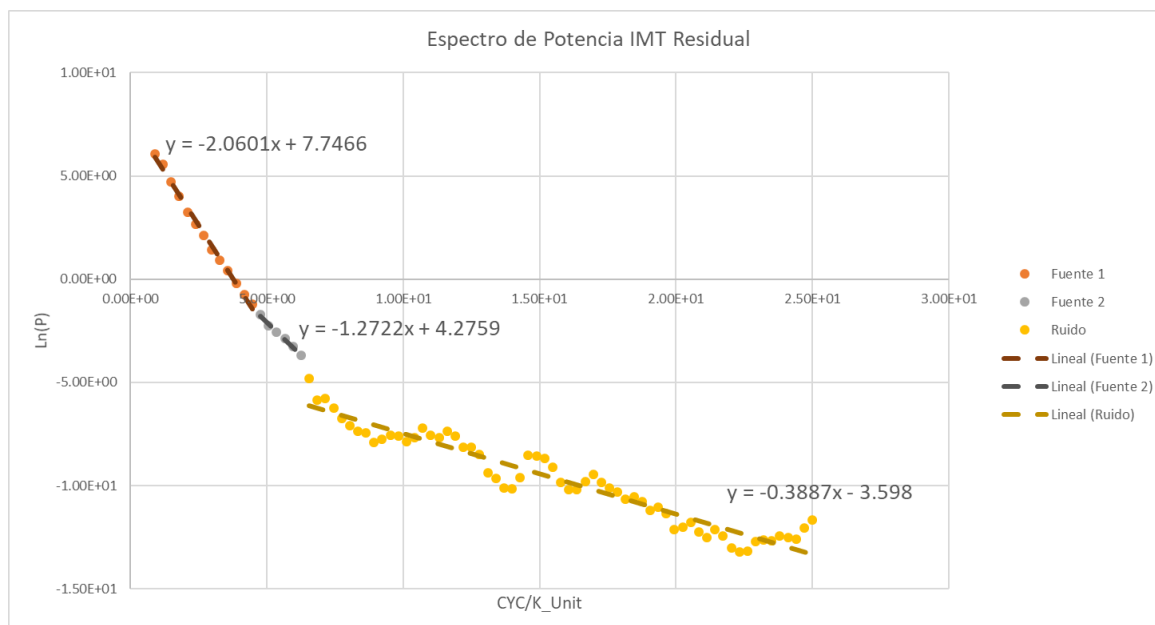


Figura 19 Espectro de potencia efecto residual de IMT RTP.

Tabla 3 Profundidades asociadas a las fuentes de efecto residual de IMT RTP.

	Fuente 1	Fuente 2	Ruido
Metros (m)	163.94	101.24	30.93

4.1.1 Análisis estadístico

En la Tabla 4 se encuentran los parámetros estadísticos calculados para un total de 28057 de estaciones magnéticas de la base de datos de efecto residual. La cuales van desde un rango entre -36 y 102 nT con una media de -0.012 nT con asimetría a la derecha con un valor de 2.59, donde se presenta una curtosis de 12.72 es decir, una forma leptocúrtica. Los valores del histograma (Figura 20) muestran una distribución normal, entre los valores -1 y 1 nT. En el diagrama de caja (Figura 21) de distribución de los datos muestra valores extremos dentro del rango normal entre -12.8 y 9.48 nT, los valores fuera de estos extremos se consideran anómalos para los datos residuales, de los cuales están los mínimos y máximos de -36 y 102.

Tabla 4 Parámetros estadísticos.

	nT
Media	-0.01223627
1º Cuartil	-4.4425745
Mediana	-0.86366969
3º Cuartil	1.131354809
Moda	-10.6144819
Desviación estandar	14.52448095
Maximo	102.2112732
Minimo	-36.1433029
Numero casos	28057
Curtosis	12.72153523
Asimetria	2.587457895

Histograma de anomalías residuales

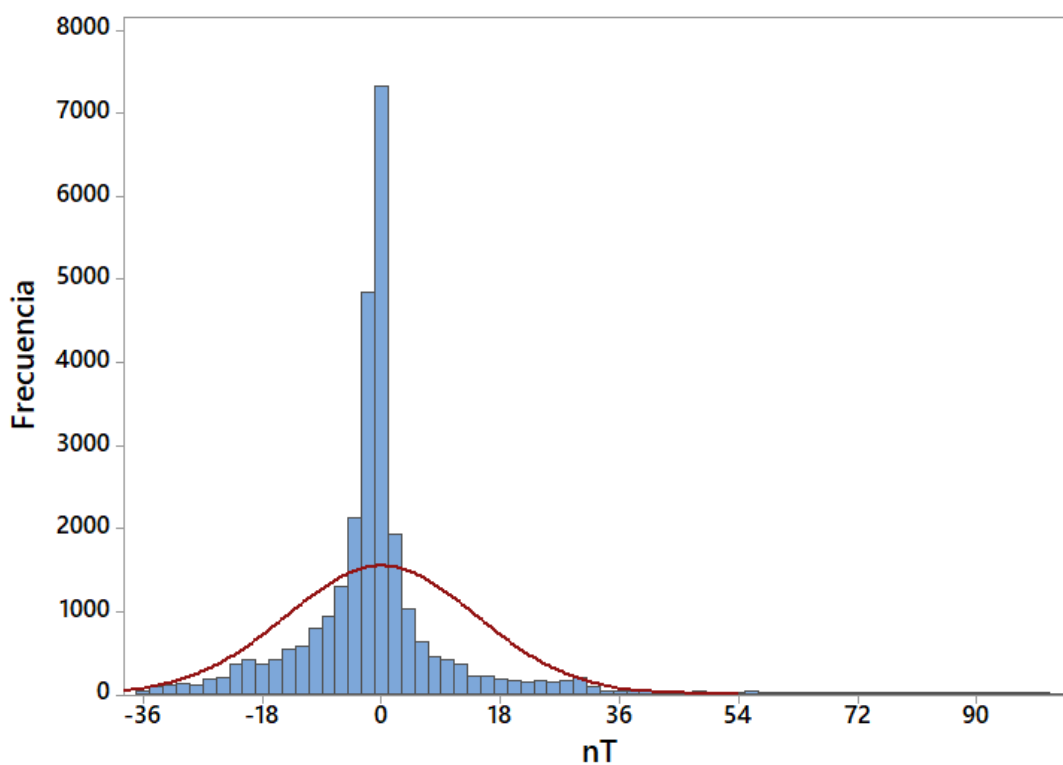


Figura 20 Histograma de frecuencia de efecto residual de IMT RTP.

Diagrama de caja de anomalias residuales

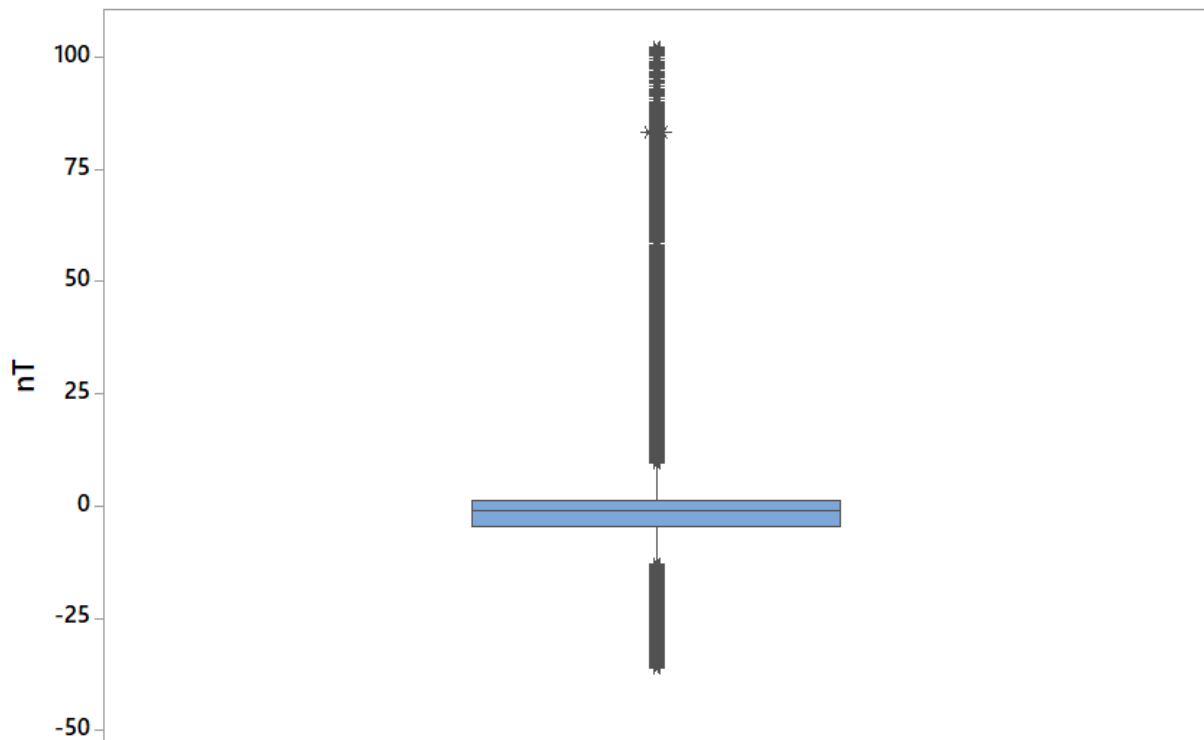


Figura 21 Diagrama de caja de efecto residual de IMT RTP.

4.1.2 Mapas direccionales

El mapa de derivada en dirección X de la IMT RTP (Figura 22) destaca las estructuras y cuerpos orientados en la dirección N-S, donde se puede observar que, en la ventana seleccionada, este no presenta grandes variaciones en los contornos en dirección N-S, exceptuando en la zona centro-norte y la zona Este en el máximo IMT RTP de la Sierra de Urraca Alonso, donde presenta una continuidad en dicha dirección, y en general en el mapa se resaltan los contornos de máximos y mínimos entre las direcciones N125E a N130E como en los análisis anteriormente mencionados. Mientras que el mapa derivada en dirección Y (Figura 23) enfatiza las estructuras orientadas en dirección E-O, en donde se visualiza que los contornos de máximos y mínimos destacan generalmente en la dirección N125E a N130E de nuevo, y en los extremos noreste y suroeste los contornos se orientan en dirección E-O.

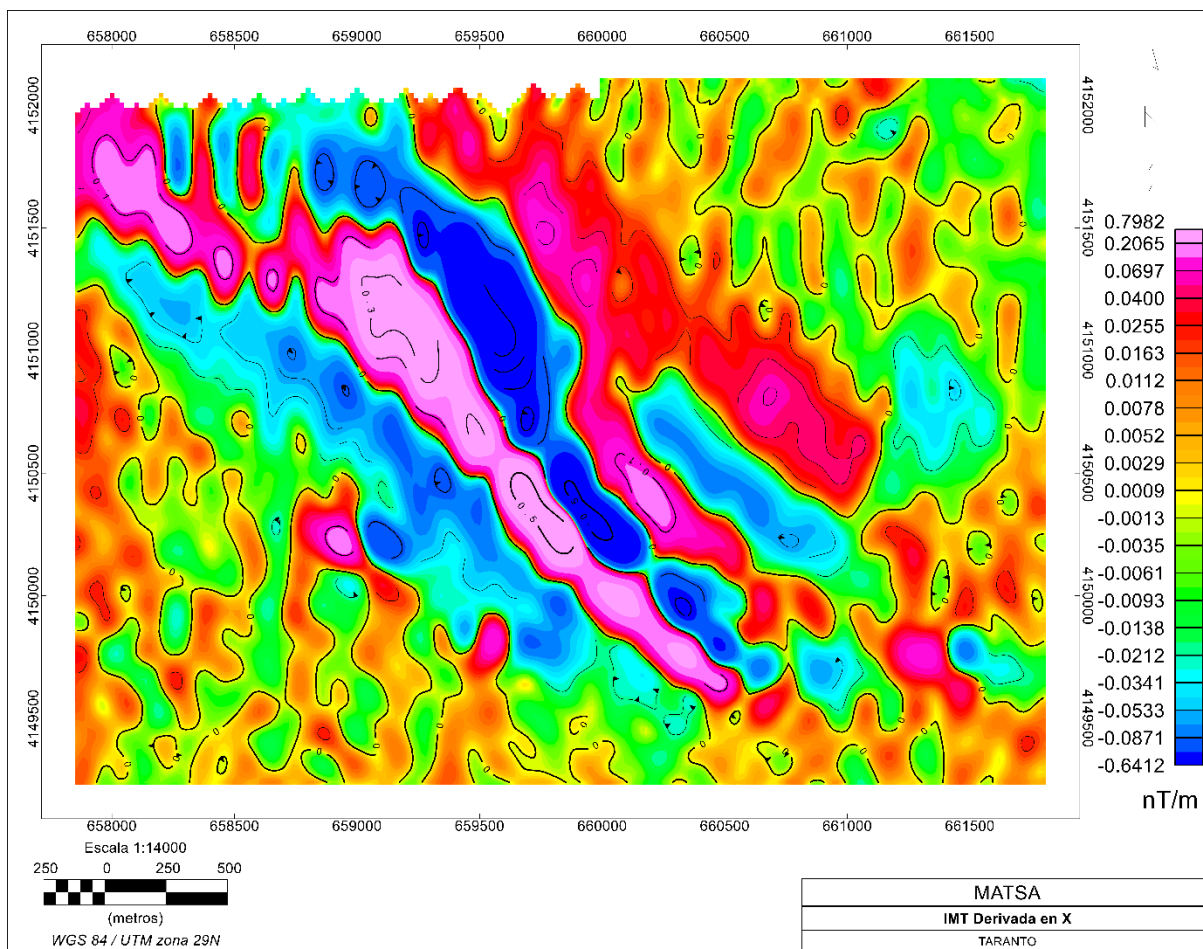


Figura 22 Mapa de derivada en el eje X de IMT RTP.

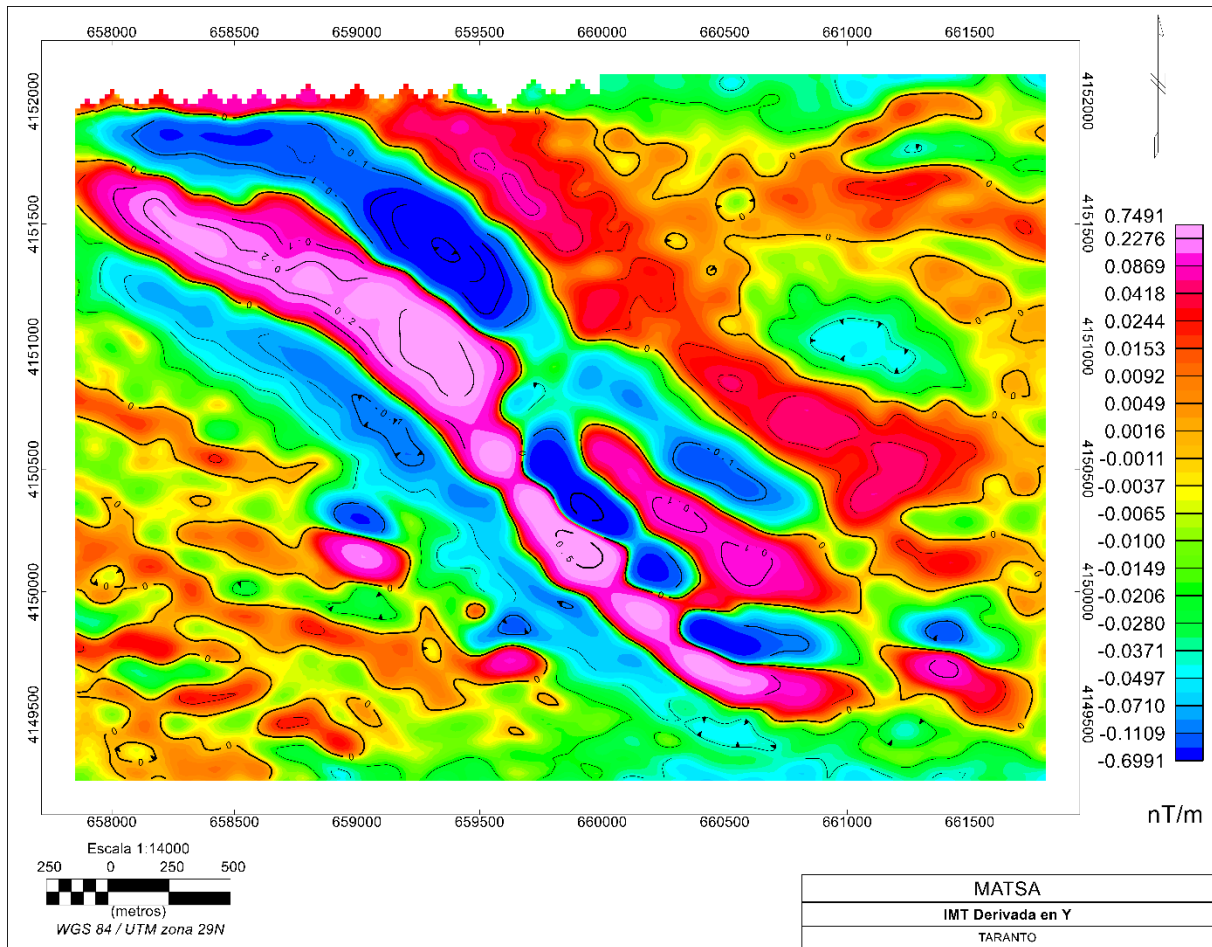


Figura 23 Mapa de derivada en el eje Y de IMT RTP.

El mapa de derivada en el eje Z de IMT RTP (Figura 24) ayuda a realzar los efectos por las fuentes más someras y atenuar los efectos de fuentes profundas. De esta forma se observa como los contornos del máximo principal se delinean mucho mejor en comparación con los datos originales, y esto permite observar las estructuras magnéticas y cambios del área. Además, hay un incremento en las intensidades negativas alrededor del máximo principal de La Hijuela en la misma dirección estructural (N130E). Los contornos del máximo de la Sierra de Urraca Alonso ahora tiene una forma más detalla y un poco más elongada en dirección de las estructuras. En las zonas extremas de esta carta, se generan intensidades de menor tamaño que pertenecen a fuentes más someras.

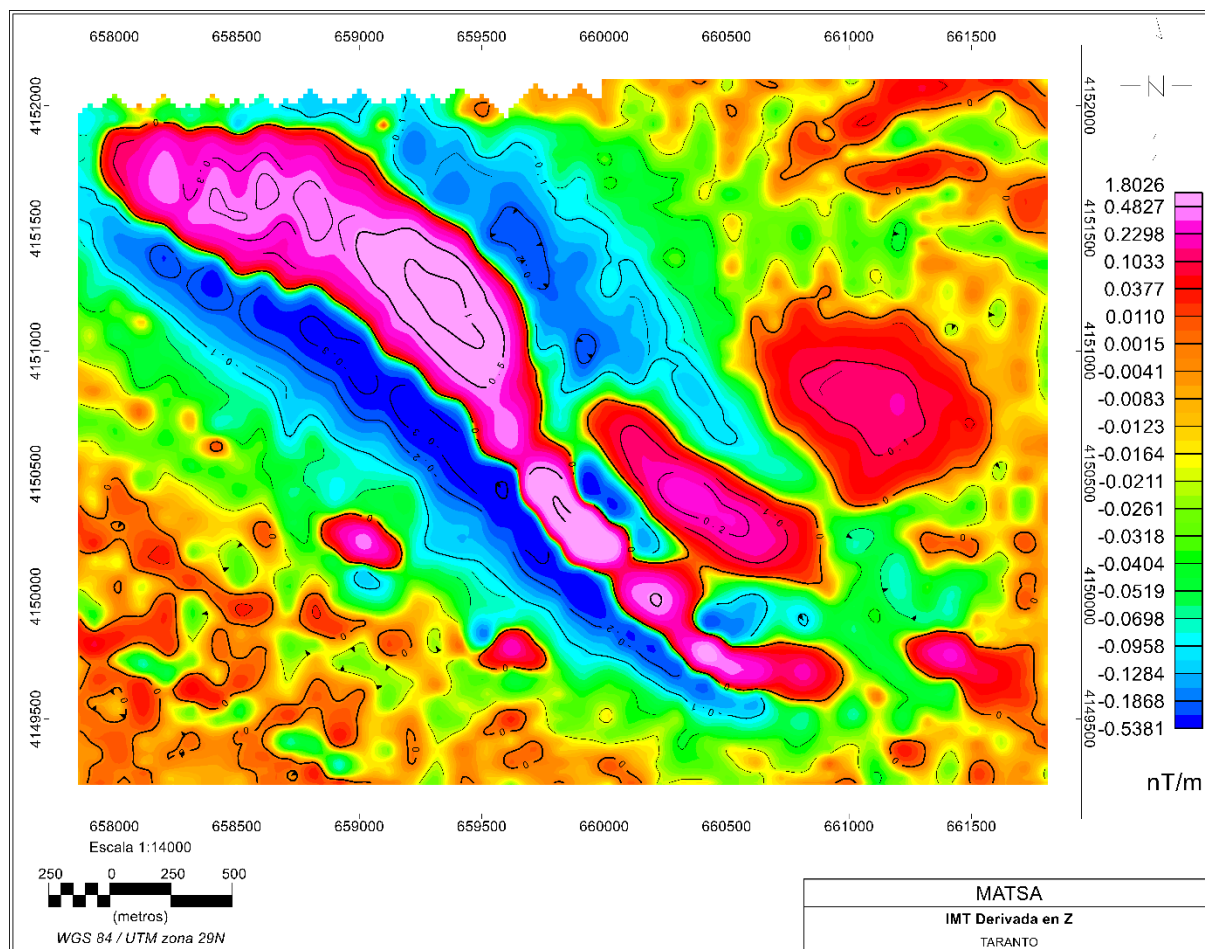


Figura 24 Mapa de derivada en el eje Z de IMT RTP.

El filtro coseno direccional se obtuvo con la finalidad de destacar las características principales de la base de datos, donde se aplicó una dirección preferencia de N125°E debido a la orientación de las estructuras entre el mapa geológico y la IMT RTP. En este (Figura 25) se presenta como la IMT RTP mantienen una continuación en dicho sentido a lo largo de la base de datos sin mayor contraste de valores magnéticos. Por otro lado, se aplicó de nuevo un filtrado de coseno direccional, pero en sentido perpendicular a las estructuras (N215°E) para ver el comportamiento de la IMT RTP en dicha dirección, y de esta forma asegurar la continuación de la fuente magnética, donde se observa que los máximos y mínimos de dicha fuente no contempla una constancia muy significativa en esta dirección. No obstante, el máximo local del Este en la Sierra de Urraca Alonso, mantiene una continuación estructural en dicha dirección.

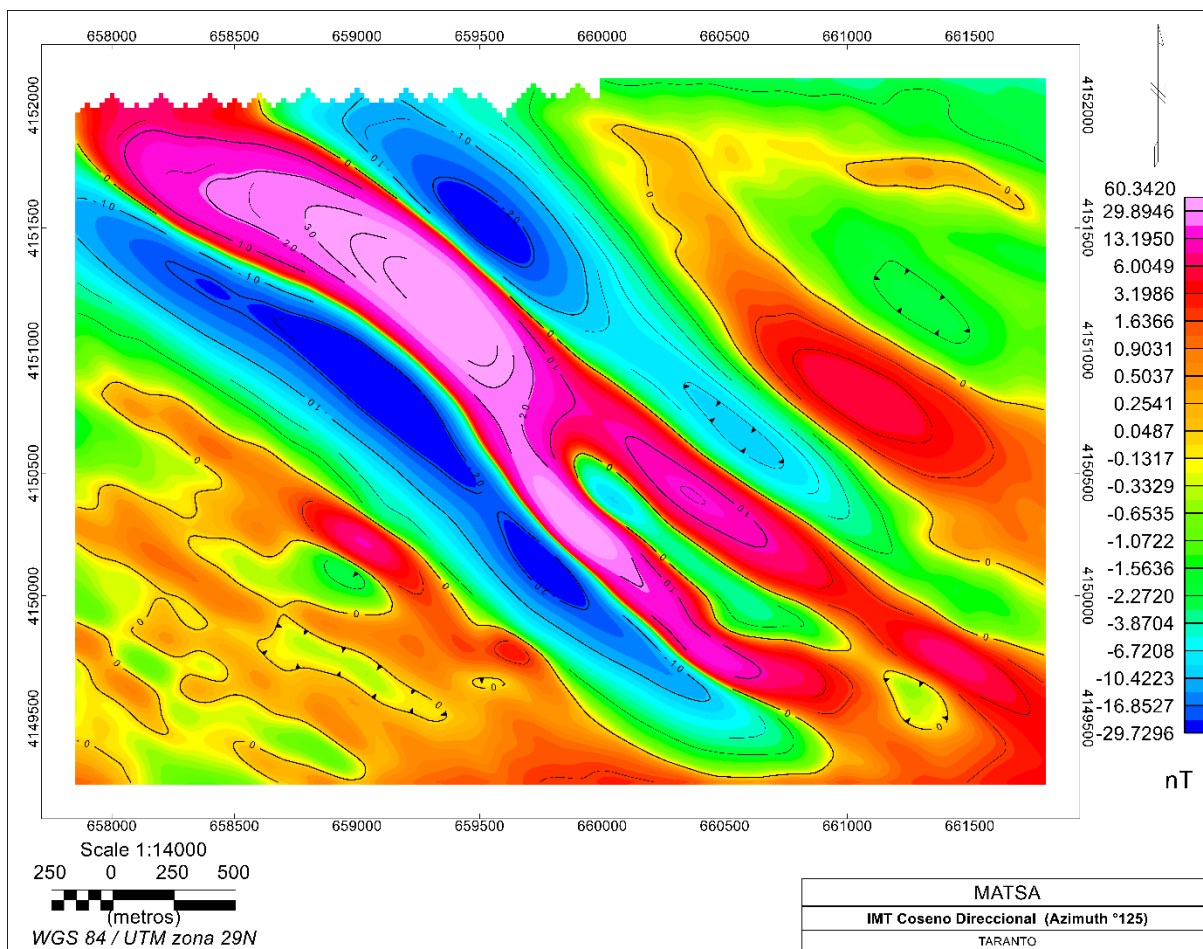


Figura 25 Mapa coseno direccional a N125°E de IMT RTP

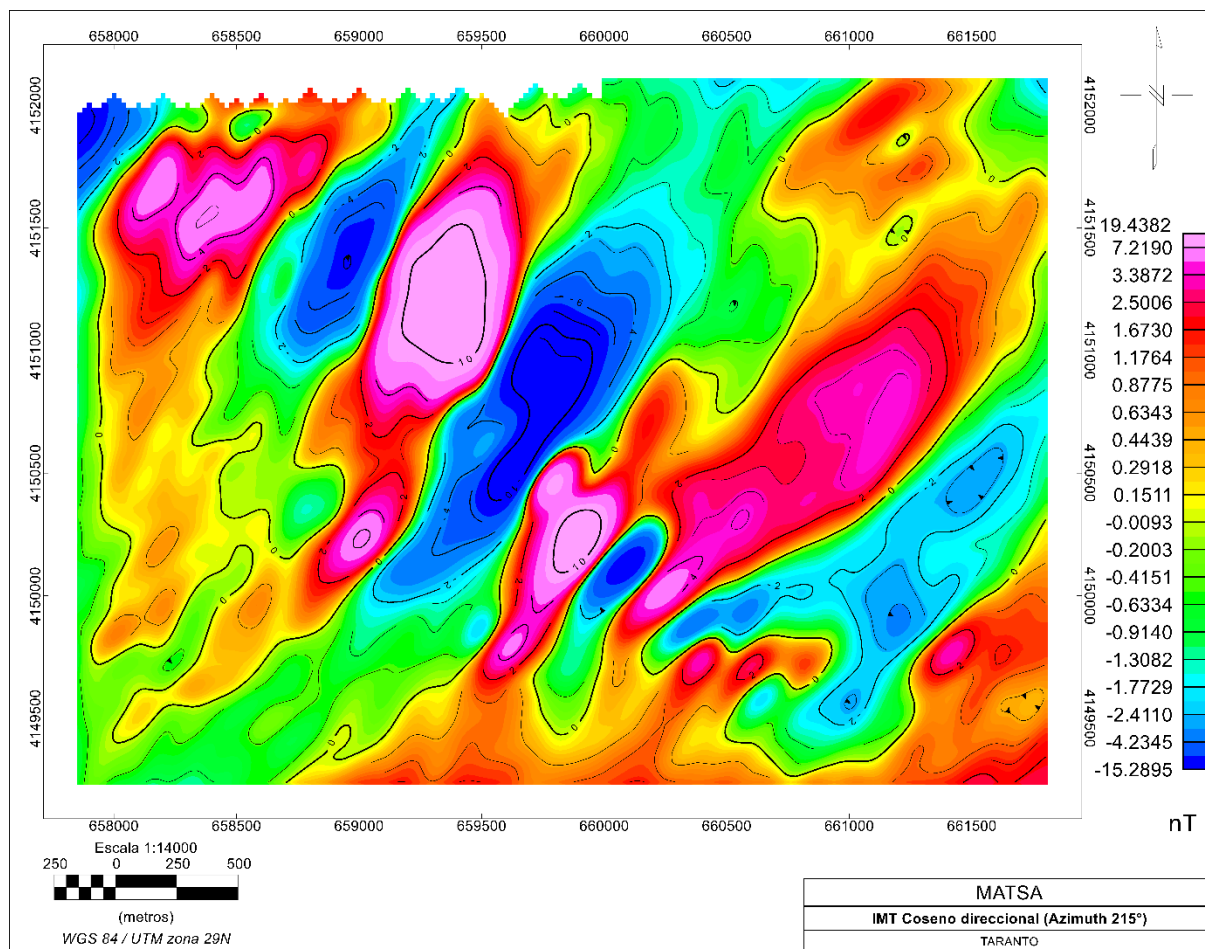


Figura 26 Mapa coseno direccional a N215°E de IMT RTP.

4.2 Datos electromagnéticos

En las siguientes figuras se presentan 12 mapas de resistividades aparentes a diferentes profundidades, con un intervalo de 25 m entre cada una, hasta los 300 m. Dichos mapas están recortados de la base de datos original al igual que lo datos magnéticos, donde en general, en la ventana seleccionada, las resistividades aparentes medidas oscilan entre 2 a 1530 $\Omega \cdot m$. Los diferentes intervalos de resistividades se muestran en la Tabla 5; además, dichos mapas están graficados por zonas de colores con valores específicos, resaltando las resistividades menores a 100 $\Omega \cdot m$. para poder observar el comportamiento eléctrico de las rocas a medida a que se profundiza en la zona.

Tabla 5 Máximos y mínimos de resistividad aparente, a cada 25 m de profundidad.

Profundidad (m)	Min. Resis. Ap (Ω *m)	Max. Resis. Ap (Ω *m)
25	69.41	1527.37
50	33.28	432.59
75	4.5	297.84
100	2	255.83
125	2.05	247.28
150	2.94	267.44
175	4.32	286.19
200	9.54	319.93
225	9.54	344.32
250	9.78	384.73
275	9.3	412.91
300	10.79	470.3

En concreto, y con el ánimo de ayudar a la interpretación, se usa una gama de color que va del tono verde claro a amarillos para valores de resistividades aparentes entre 100-70 Ω *m, tonos amarillos-anaranjados indicativos de resistividades aparentes de 70-40 Ω *m y rojos-magenta para los valores inferiores a 40-35 Ω *m. Los tonos celestes o cian indican resistividades superiores a 100 Ω *m.

A los 25 m de profundidad (Figura 27 izquierda), casi no se distinguen valores importantes de resistividad aparente, debido a que las mismas tienen principalmente valores mayores a 200 Ω *m, exceptuando a una pequeña zona al noreste, alrededor de las coordenadas 661550 m en el eje X y 4151550 m en eje Y, donde se encuentra un mínimo “absoluto” de 70 Ω *m. Las isoclinas no definen una orientación determinada, si bien, tiende a reconocerse una dirección N-S en la zona central y una vaga definición de la tendencia N120°E, en la esquina suroccidental del área investigada. A los 50 m de profundidad (Figura 27 derecha) las resistividades descienden, pero dichos valores siguen estando alejados de los 100 Ω *m, solo se muestra un descenso importante en la zona noreste anteriormente descrita, y esta vez, al sur de la misma en la coordenada 4150550 m del eje Y, donde ambos mínimos empiezan alcanzar valores menores a 50 Ω *m. Los contornos eléctricos a esta profundidad empiezan a orientarse en dirección N120E.

A los 75 m y 100 m (Figura 28) las resistividades descienden a valores entre 2 y 270 Ω *m, y los contornos ya se encuentran orientados en dirección N120°E. La zona entre los mínimos anteriormente descritos, empiezan a formar una sola capa de valores cercanos de resistividad entre 40 y 80 Ω *m. Cabe destacar que en la zona noroeste (658500 m en el eje X y 4151500 m

en el eje Y) y suroeste (658500 m en el eje X y 4149500 m en el eje Y) se resaltan mínimos locales, respectivamente, con contornos en dirección N120°E, mientras que entre ambas anomalías aparece un mínimo importante de 20 Ω^*m .

A los 125 y 150 m (Figura 29) los valores de resistividades bajos empiezan a generalizar y las isoclinas muestran una tendencia clara NO-SE, tomando valores entre 2 y 270 Ω^*m . El extremo oriental del área investigada, destaca las resistividades aparentes del orden 40 a 60 Ω^*m como valores característicos. Mientras que, los valores del mínimo local ubicado al suroeste, empieza a ascender nuevamente tomando valores mayores a 100 Ω^*m .

En general entre 175 m y 200 m de profundidad (Figura 30), las resistividades menores a 100 Ω^*m empiezan a cubrir toda la zona, el mínimo local que estaba ubicado al suroeste casi desaparece, y los contornos de la zona noroeste quedan desplazados progresivamente hacia el noreste. A partir de los 200 m (Figura 31 y Figura 32) no hay muchos cambios significativos en el área de estudios, excepto que los valores máximos de resistividades aumentan tomando valores alrededor de 470 Ω^*m . Efectivamente, en la esquina suroeste del área investigada se observan los valores mayores de resistividad, y en la zona media del área de estudio, adquiere una continuidad de menor resistividad que conecta con la parte NE del área prospectada, y lo hace, aproximadamente transversal a la dirección del gradiente eléctrico.

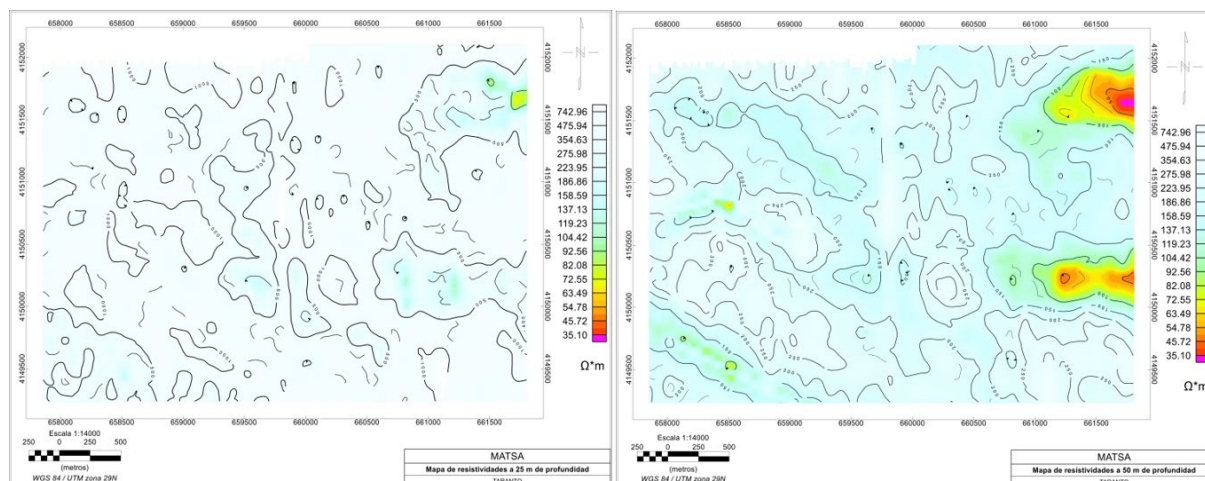


Figura 27 Mapas de resistividades a 25 m (izquierda) y 50 m (derecha) de profundidad.

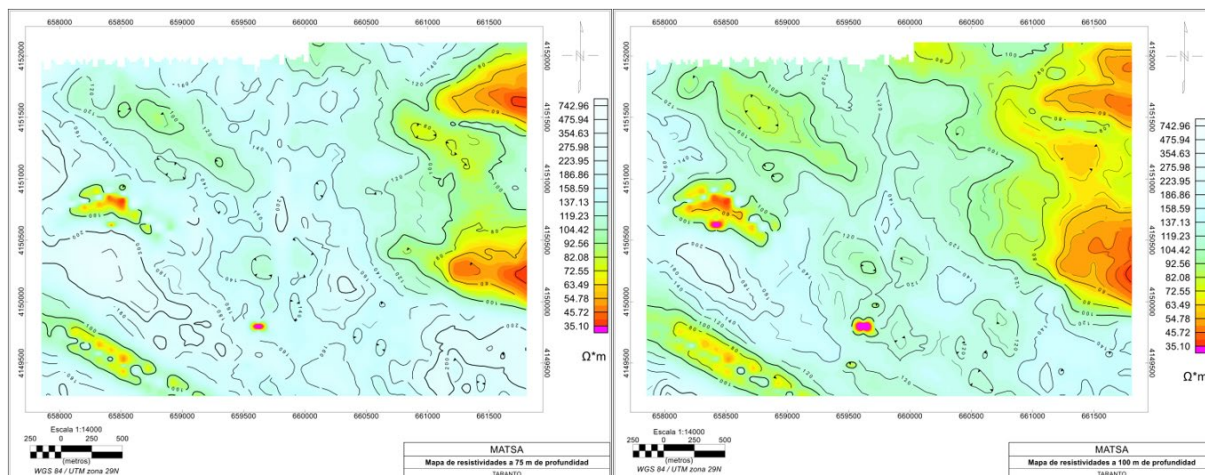


Figura 28 Mapas de resistividades a 75 m (izquierda) y (derecha) 100 m de profundidad.

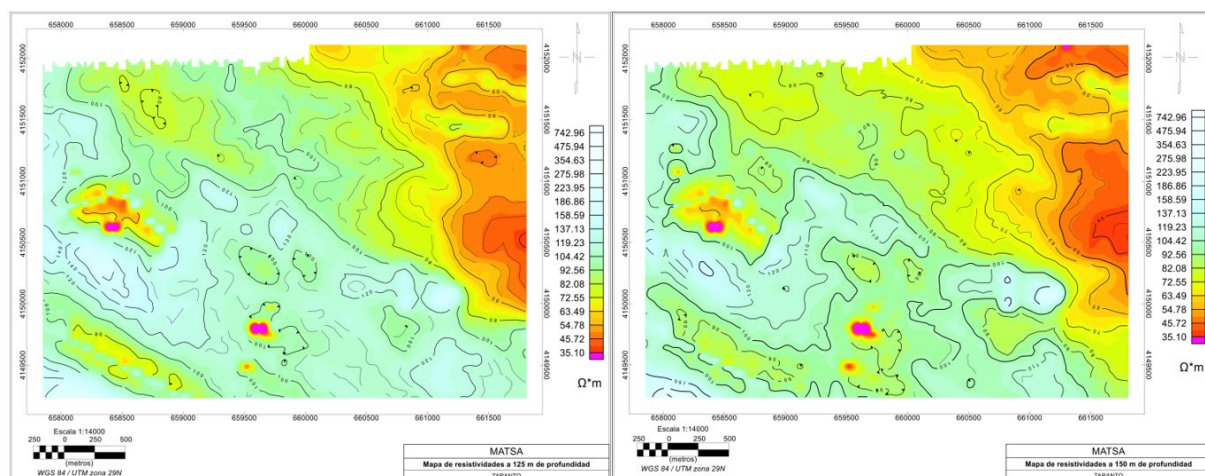


Figura 29 Mapas de resistividades a 125 m (izquierda) y 150 m (derecha) de profundidad.

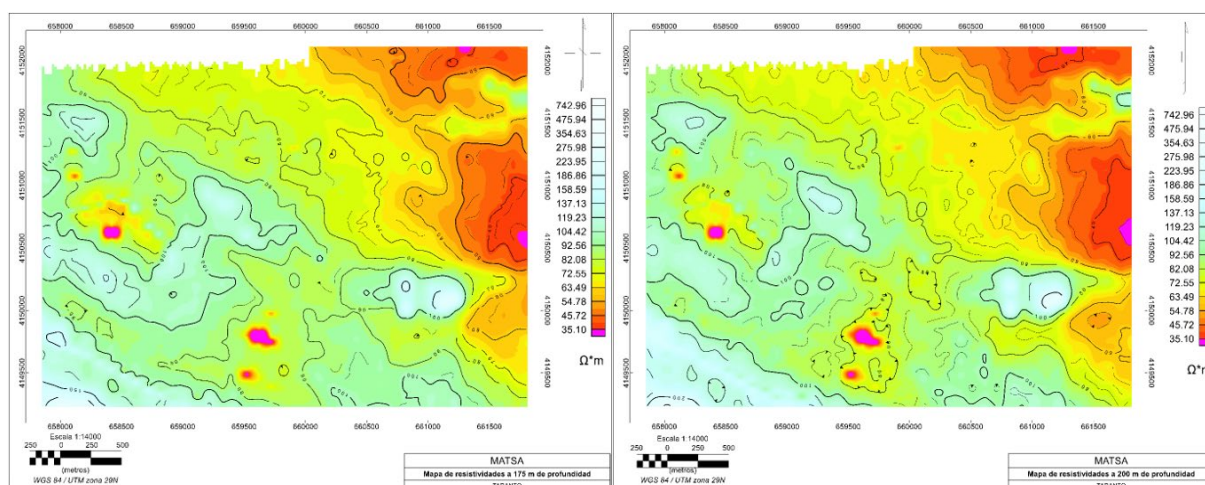


Figura 30 Mapas de resistividades a 175 m (izquierda) y 200 m (derecha) de profundidad.

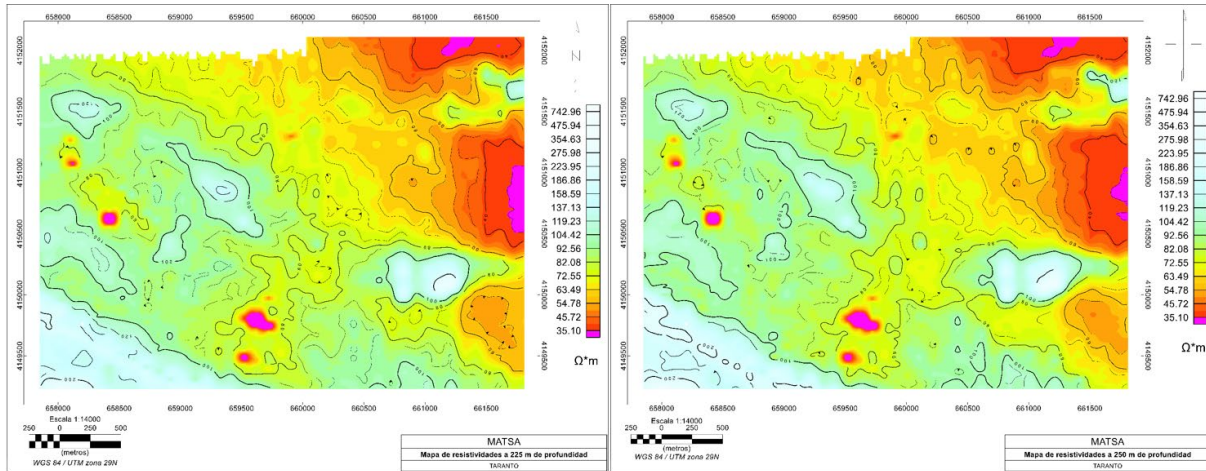


Figura 31 Mapas de resistividades a 225 m (izquierda) y 250 m (derecha) de profundidad.

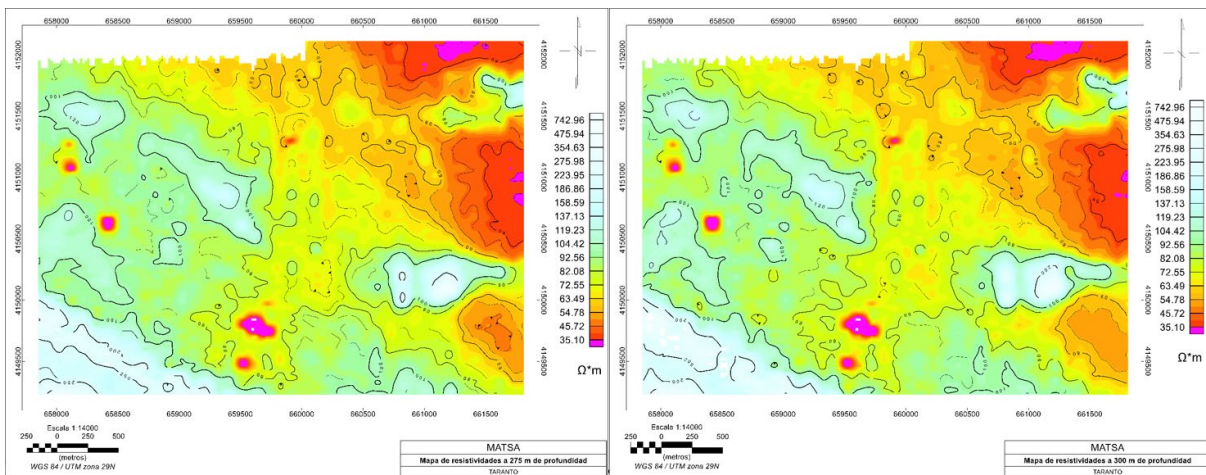


Figura 32 Mapas de resistividades a 275 m (izquierda) y 300 m (derecha) de profundidad.

4.3 Datos geoquímicos

En la Tabla 6 se encuentran los parámetros estadísticos obtenidos de las muestras analizadas durante la campaña geoquímica. En dicha tabla se presentan los datos referidos a la población global y para cada uno de las unidades litoestratigráficas de la Zona Surportuguesa (PQ/CVS/Culm) (Figura 33).

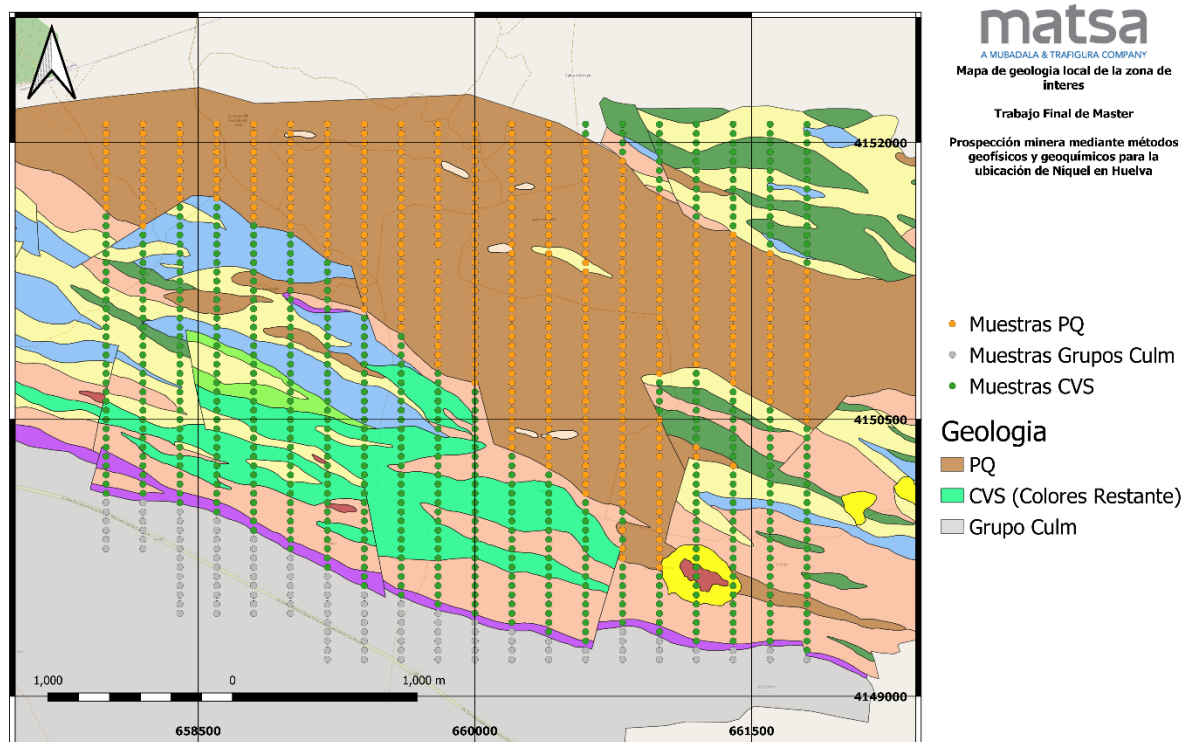


Figura 33 Localización de muestras para el análisis geoquímico en relación con la distribución de litologías (cortesía de MATSA).

Como se puede apreciar en la Tabla 6, se trata de distribuciones normales, con valores de desviación estándar bajos y coeficientes de asimetría muy bajos y ligeramente positivos, indicadores de pocos datos de valores altos desplazados de la tendencia general. En el caso de la unidad PQ, los valores de media y mediana son casi iguales dando idea de una distribución de forma gaussiana con el máximo modal algo superior. Contrastando los parámetros de la unidad CVS con los de la población global se aprecia que esta unidad es la que aporta principalmente los valores más altos y separados de la tendencia general, siendo la responsable del aumento de la desviación estándar. Dicho de otra forma, es en ella donde se hallan los valores realmente anómalos.

Tabla 6 Parámetros estadísticos de la base de datos geoquímica, para el área investigada (datos globales) y para cada una de las unidades litoestratigráficas (PQ/CVS/Culm).

	Ventana (ppb)	PQ (ppb)	CVS (ppb)	Culm (ppb)
Media	1100.075838	783.929062	1421.1891	642.463636
Mediana	755	718	892	484
Moda	1360	1140	1000	501
Desviación Estandar	1224.958989	372.195035	1587.7896	567.505368
Maximo	11900	3940	11900	4190
Minimo	84	106	84	150
Numero de Casos	1134	437	587	110
Curtosis	18.76836198	11.9190556	9.37620132	14.8632426
Asimetría	3.840549835	2.08708871	2.80643492	3.26313854

Se han obtenidos los histogramas de frecuencia y sus respectivas tablas de frecuencias acumuladas: Los datos de la población global se ilustra en la Figura 34, los datos correspondientes a la Unidad PQ se muestran en la Figura 35, así como los datos correspondientes al CVS y Culm se muestran en las Figura 36 y Figura 37, respectivamente. Se definieron 20 clases con un intervalo de 250 ppb. Considerando la distribución para el fondo litológico del CVS (Figura 36), como se ha comentado, es posible establecer tres umbrales que jerarquizan las anomalías, tal y como se expresan en la Figura 36, es decir:

- 2250 ppb y 15.33% de representatividad (Fondo local)
- 3000 ppb y 10.9% de representatividad (Anomalía clara)
- 4250 ppb y 6.64% de representatividad (Pico de anomalía)

No se ha podido reconocer un umbral para un fondo regional debido a la tendencia normal general de la población, siendo solo a partir del umbral de 2250 ppb cuando se aprecia un cambio de tendencia que se podría considerar como efecto de una superposición. Seguramente la escala localizada de la campaña y la profundidad del posible foco de dispersión queden en gran medida enmascarados por el fondo geoquímico normal para las rocas de la zona.

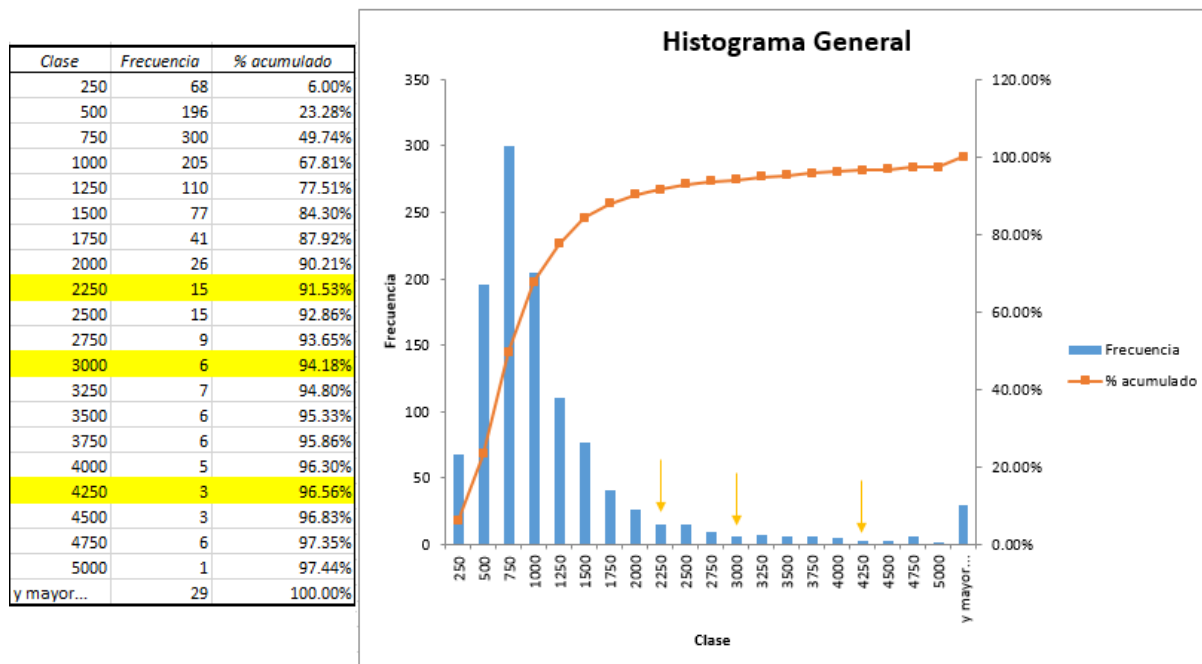


Figura 34 Histograma, frecuencia y porcentaje acumulado de las muestras generales.

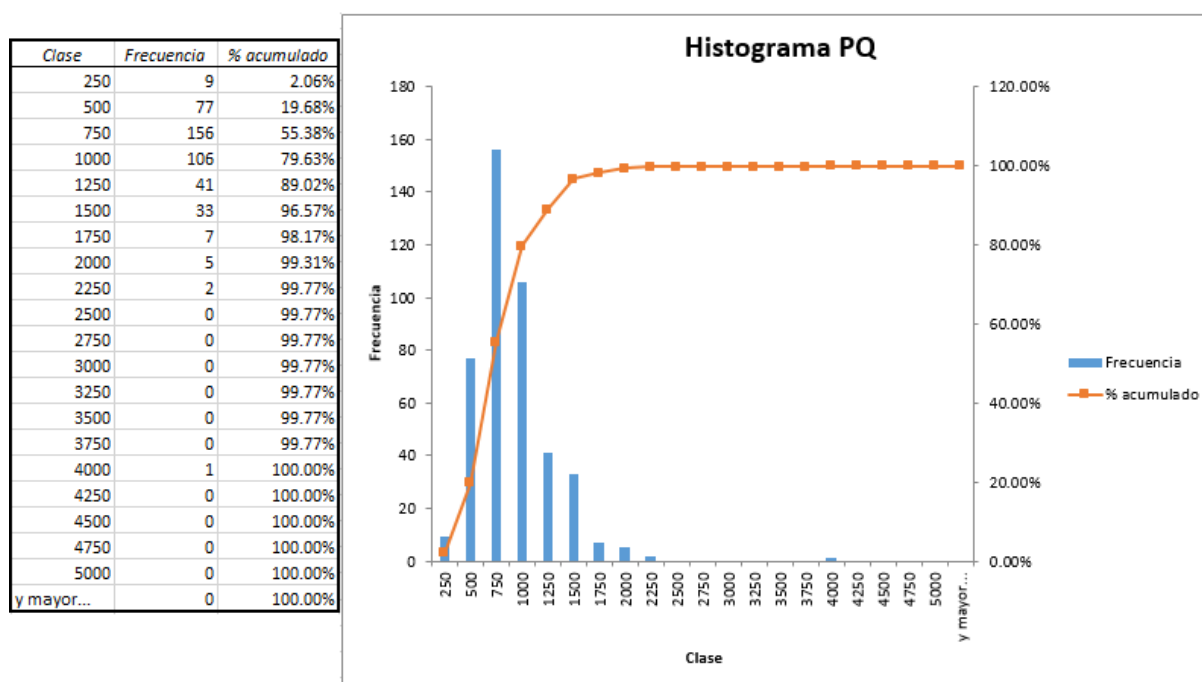


Figura 35 Histograma, frecuencia y porcentaje acumulado de las muestras de PQ.

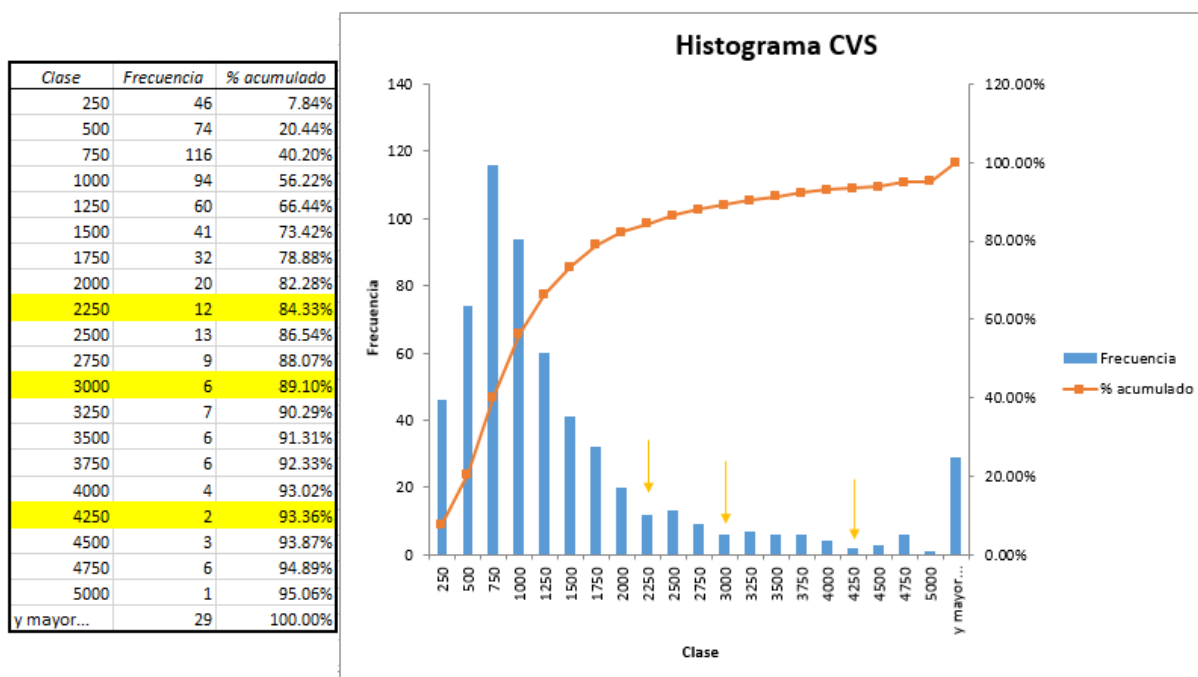


Figura 36 Histograma, frecuencia, porcentaje acumulado y umbrales seleccionados de las muestras generales del CVS.

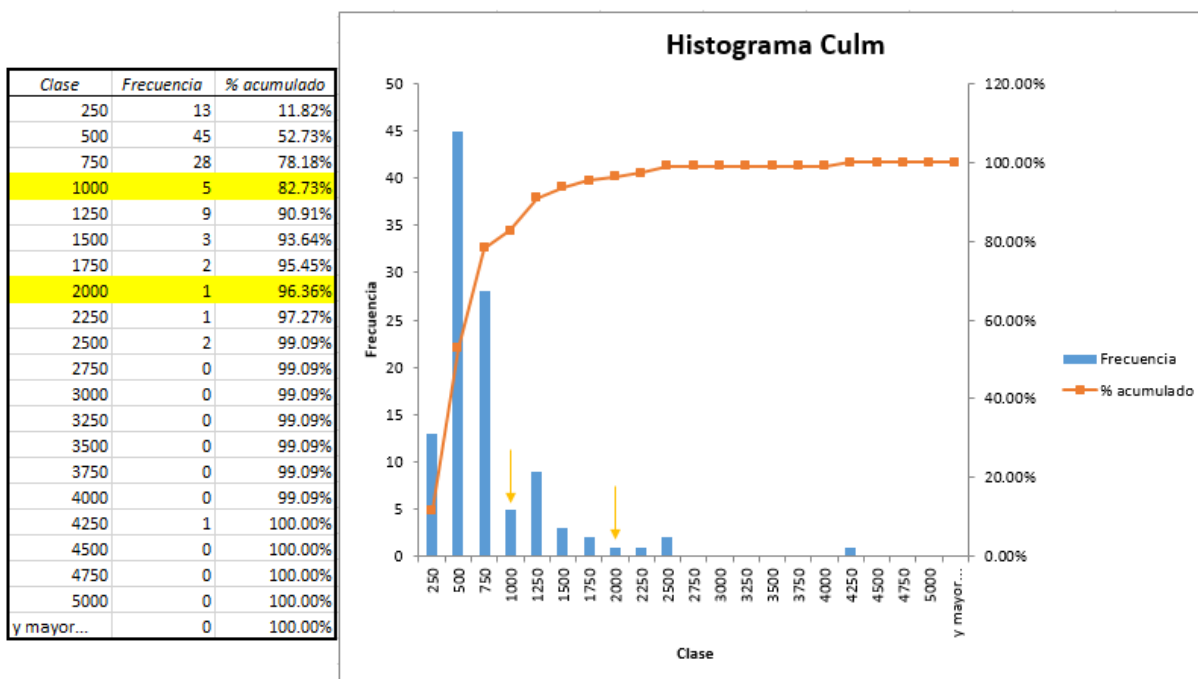


Figura 37 Histograma, frecuencia y porcentaje acumulado de las muestras del Grupo Culm.

La Tabla 7 muestra el coeficiente de correlación de algunos elementos (Au, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Pd, Sr y Zn) con los que el Ni aparece normalmente asociado en los yacimientos de éste elemento en rocas magmáticas básicas, intentando buscar indicadores que pudieran dar pistas sobre un posible yacimiento de este tipo en la zona.

Tabla 7 Tabla de coeficiente de correlacion de los diferentes elementos.

	Au (ppb)	Ca (ppb)	Cd (ppb)	Co (ppb)	Cr (ppb)	Cu (ppb)	K (ppb)	Mg (ppb)	Ni (ppb)	Pd (ppb)	Sr (ppb)	Zn (ppb)
Au (ppb)	1											
Ca (ppb)	-0.03321287	1										
Cd (ppb)	0.03844039	0.184709	1									
Co (ppb)	0.0952595	0.2625837	0.0949721	1								
Cr (ppb)	-0.0603996	-0.29752589	-0.1311222	-0.08282971	1							
Cu (ppb)	0.39678912	0.19493576	-0.01403847	0.11936069	-0.0906857	1						
K (ppb)	0.13962587	-0.07486219	-0.03840399	-0.00690033	0.2106906	0.21415169	1					
Mg (ppb)	-0.03965504	0.82187622	0.27262618	0.32087044	-0.18074805	0.17823937	-0.1631639	1				
Ni (ppb)	0.01108253	0.44283174	0.04929701	0.47278803	0.08291648	0.25877148	0.10881613	0.52695166	1			
Pd (ppb)	0.31300771	-0.03078331	-0.0107517	0.06014187	-0.0284977	0.12706978	0.00772427	-0.02810385	0.05220263	1		
Sr (ppb)	-0.02254286	0.92501318	0.19943912	0.27771116	-0.25744163	0.17190471	-0.17213962	0.88969062	0.46142111	-0.02349517	1	
Zn (ppb)	0.02552539	0.10977195	0.31191059	-0.01545615	0.08640859	0.12353989	0.33073745	0.06173973	0.10916653	-0.01048998	0.071552	1

El mapa de fondo geoquímico para el Ni (Figura 38) solo muestra anomalías de cierta relevancia en 4 zonas, de la ventana de interés. Al Noroeste (658000 a 658500 m en el eje X y 4151000 a 4151500 m en el eje Y), en la zona de La Hijuela se aprecia un área anómala de 0.114 km², donde solo se detalla el fondo local y anomalía clara. En la zona media, entre La Hijuela y la Sierra Urraca Alonso se encuentran un área anómala más relevante de 1.66 km², donde aparece las tres familias de contenidos presentes, el fondo local, anomalía y el pico de anomalía. Al sureste un área anómala de 0.1 km² hay otra anomalía puntual. Finalmente, al Noreste de la ventana de estudio un área anómala de 0.03 km², donde solo se aprecia el fondo local y la anomalía geoquímica.

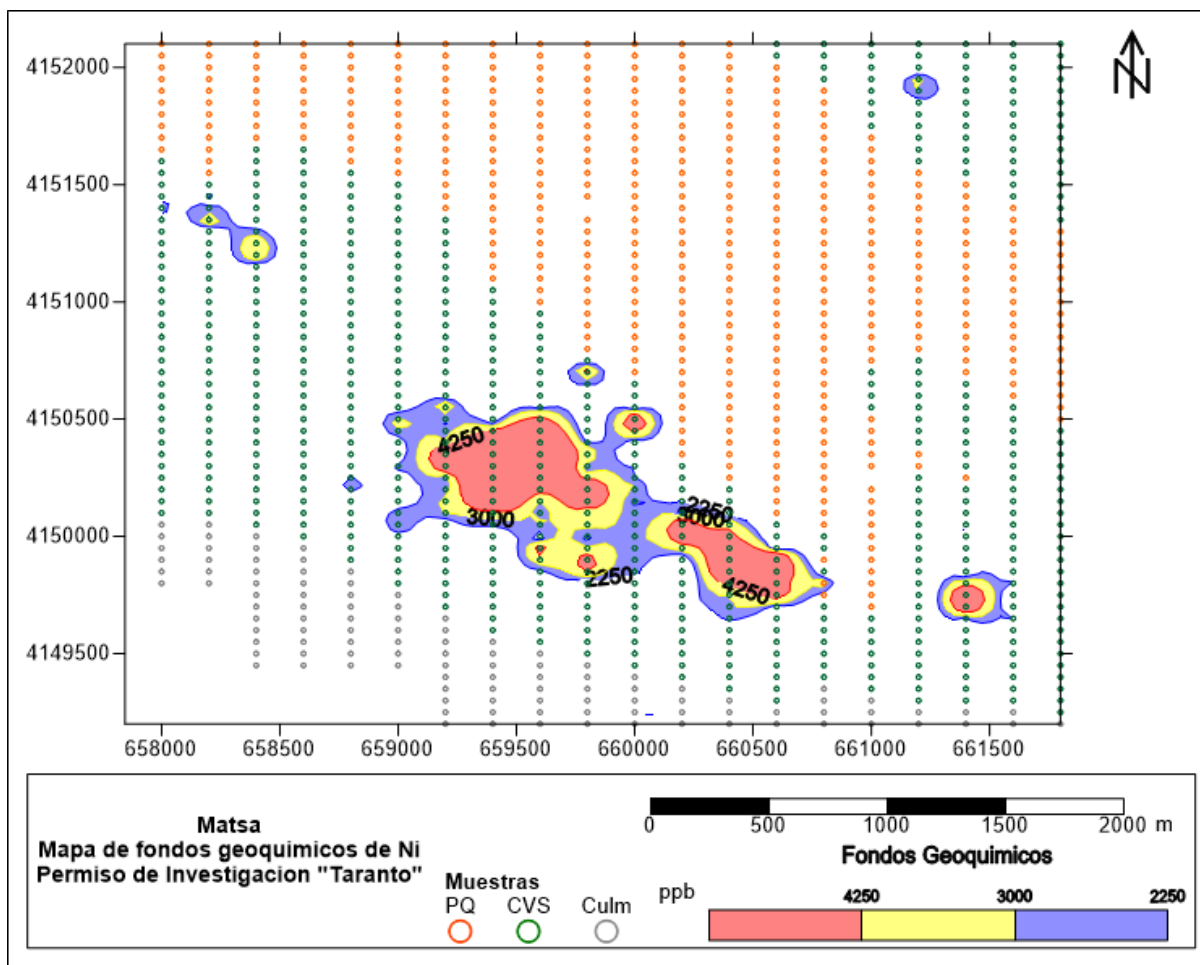


Figura 38 Mapa de fondos geoquímicos de Ni

5. DISCUSIÓN

A continuación, se presenta la interpretación magnética, electromagnética y geoquímica integrada, por medio de análisis de estadísticas, mapas, cálculos y estimación de profundidades de las fuentes de anomalías.

Realizando una integración de los resultados geofísicos y geoquímicos expuestos anteriormente, podemos resaltar ciertas características y rasgos de particular importancia. En líneas generales, la discusión de este trabajo se centra en un área de 11 km² donde ha sido identificada la zona con mayor magnetización (véase los datos de IMT reducidos al polo).

En dicha zona se observa que las isolíneas de contornos correspondientes a IMT RTP coinciden con la orientación de los cabalgamientos que explican la superposición del PQ sobre el CVS. Un cabalgamiento de dirección N125°E con buzamiento al norte atraviesa la región y dicha estructura condiciona la orientación de las anomalías geofísicas investigadas. La existencia en el bloque de muro de dicho cabalgamiento de rocas volcánicas ácidas (riolitas y dacitas) y básicas (diabasas, principalmente), especialmente estas últimas es el origen de la anomalía.

La posición y orientación de los contornos que delimitan el máximo “absoluto” en la Hijuela, coincide el contacto con pizarras y cuarcitas, además con los contactos de riolitas y rocas volcánicas básicas (Figura 39) en superficie. Por lo tanto, podría considerarse que las rocas básicas (con una concentración relativa elevada de minerales accesorios como magnetita o ilmenita) podrían ser responsables de la susceptibilidad magnética superior que observa respecto al resto de rocas que afloran en la región, y por consiguiente del máximo de IMT detectado. Asimismo, el mínimo adyacente a esta zona, podría ser una respuesta a cambios drásticos en la composición mineralógica de las rocas. El elevado gradiente permite diferenciar las unidades constituidas por lavas basálticas y diabasas, las cuales, según la respuesta magnética, poseen una susceptibilidad magnética mayor.

Por otro lado, es importante precisar que los diversos materiales litológicos presentes en la zona de estudio favorecen la distribución heterogénea de las propiedades físicas del subsuelo, además, por tratarse de materiales ferromagnéticos, es probable que haya la presencia de remanencia magnética en las rocas presentes, esto puede afectar los máximos y mínimos obtenidos a partir de la reducción al polo.

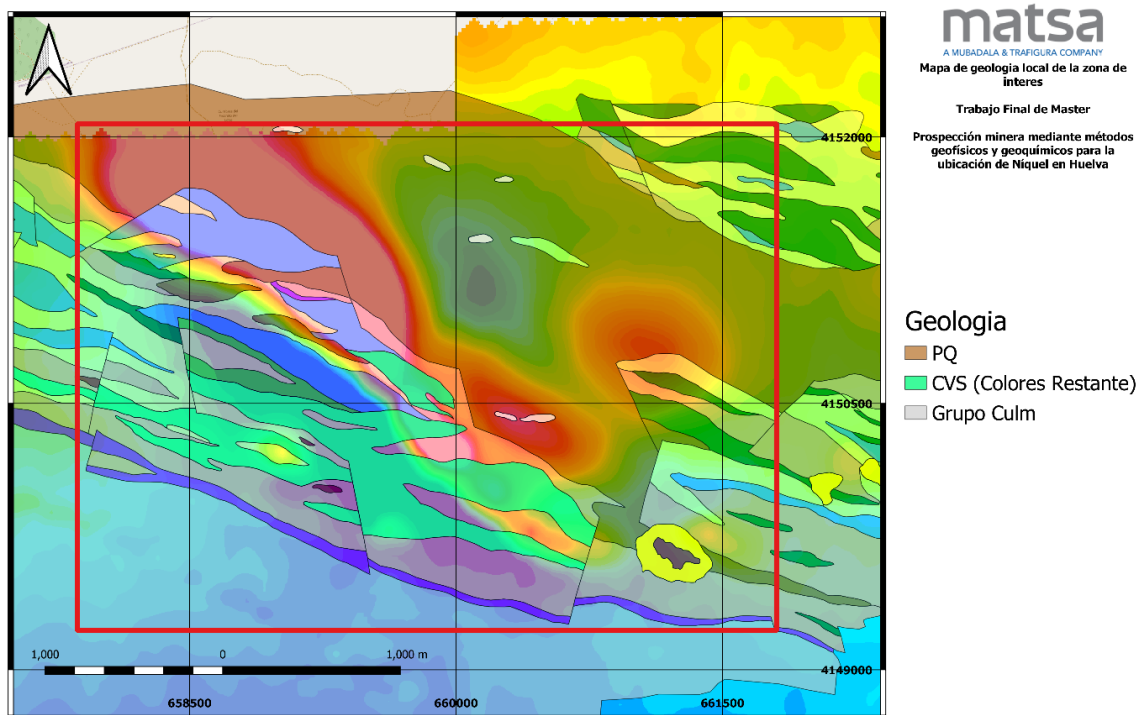


Figura 39 Mapa de IMT RTP y geología local.

El mapa de componente residual de IMT RTP mantiene grandes similitudes con el mapa de IMT RTP. La orientación de los contornos y la ubicación de los máximos y mínimos mantienen coherencia a lo observado previamente. En este caso es importante precisar que los contornos que delimitan los máximos reducen su ancho y son rodeados de mínimos locales. La reducción de la zona de máximos permite interpretar que en los niveles más someros las zonas de respuesta magnética más relevante se limitan a 0.5 km de ancho y 3.6 km de largo con orientación NO-SE. Del mismo modo, se observa un máximo local concéntrico al Este de la zona de estudio en la Sierra de Urraca Alonso, éste podría ser una posible extensión del material/rocas que producen la anomalía principal. La distribución irregular de los contornos ubicados al extremo SO responden a las heterogeneidades que se ubican en los estratos más someros.

Los resultados estadísticos muestran que estos se acoplan en una distribución normal-unimodal, donde describe la presencia de una sola fuente importante dentro de la zona, entre los valores -12.8 y 9.48 nT. Fuera de este rango se deduce como anomalía de interés para los datos de IMT RTP residuales según el análisis del diagrama de caja. En el mapa de IMT RTP de datos residuales se observa como los valores superiores a 9.48 nT se definen con mucho más detalle, tanto el máximo principal, como el máximo local ubicado al este de la zona. Los valores por debajo de -12.8 nT se encuentra en contacto con el máximo principal de la zona, donde podría

definirse como el contraste de susceptibilidad magnética entre la fuente y las rocas “encajantes” que la contiene.

El análisis espectral de IMT RTP indica la presencia de posibles fuentes magnéticas a 253,72 m y 123 m de profundidad, sin embargo, el espectro obtenido a partir de mapa residual sugiere fuentes a 163,94 m y 101,24 m. No obstante, si se considera el margen de error propio de las estimaciones matemáticas que se realizan para este método, se podrían establecer rangos de profundidad en los cuales se localicen las zonas cuya respuesta magnética es superior al material que la rodea. En primer lugar, se tiene un rango entre 101 m y 123 m, mientras que para la fuente más profundas el rango aumenta, donde se puede dividir en dos interfaces, siendo una en aproximadamente 163,94 m y la siguiente a 253,72 m. El ruido no es considerado para estas estimaciones, ya que éste no posee información de calidad y está sujeto a errores de interpretación.

El mapa de la derivada en la dirección X y Y resalta las anomalías con una orientación N-S y E-O respectivamente. En el caso de la Figura 40 se observa que se mantiene la tendencia de los contornos principales, lo que evidencia la disposición de la fuente magnética en la orientación estructural de la geología local, aproximadamente N125°E. Los valores máximos de las derivadas permiten identificar los límites o bordes de la zona que presenta la mayor respuesta magnética y que a su vez podría estar asociada con algún depósito mineral.

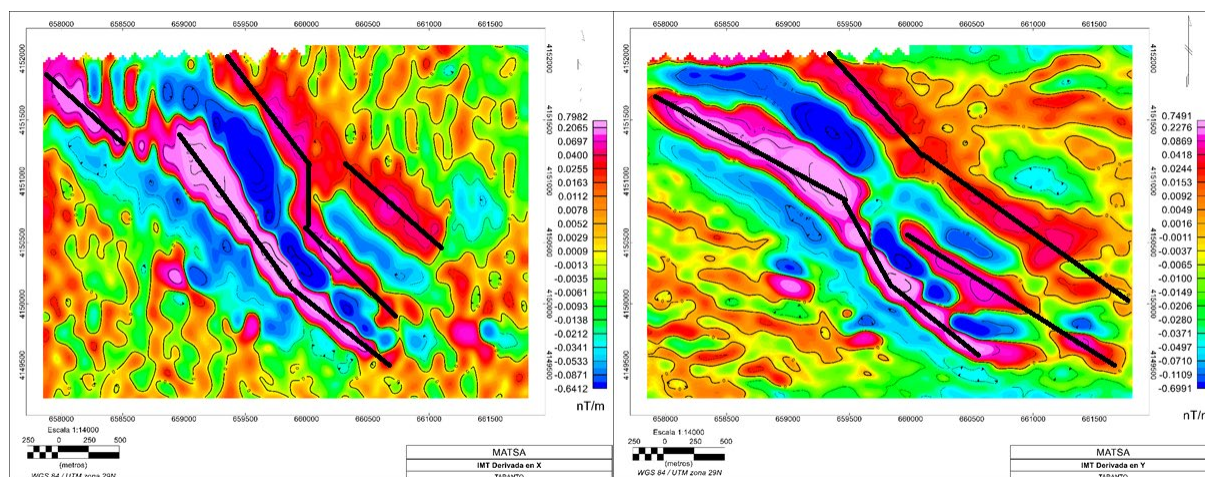


Figura 40 Mapa derivadas X (izquierda), Y (derecha) de IMT RTP y lineamientos de bordes.

El filtro de coseno direccional se aplica con la finalidad de remover o resaltar en este caso las características direccionales de un mallado de datos y de esta forma aislar la continuidad de la fuente. Para el caso de N125°E (Figura 41 izquierda), se observa claramente la tendencia presentada en mapas anteriores, además, permite verificar/comprobar la disposición de los

posibles depósitos. El segundo caso presenta el resultado obtenido con un ángulo de N215°E (Figura 41 derecha), sin embargo, éste no presenta una continuidad de los contornos para la orientación señalada, lo que implica que en dicha dirección no se presenta la zona de interés. De esta manera se puede hacer una delimitación transversal más precisa para la zona que se podría prospectar con sondeos de exploración.

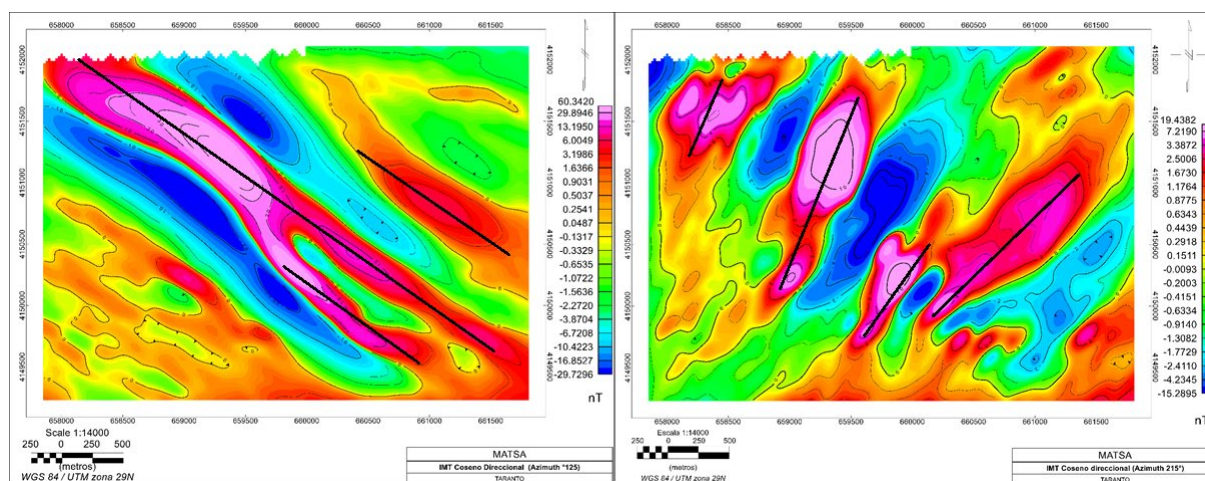


Figura 41 Mapa coseno direccional de IMT RTP y lineamientos de continuidad. N125°E (izquierda) y N215°E (derecha).

Los cortes en profundidad de los datos de resistividad aparente a partir del método electromagnético (Figura 42), muestran el comportamiento eléctrico en las zonas de las fuentes magnéticas. Seguidamente se analiza cada una de las anomalías identificadas y su evolución en profundidad. Cada una de ellas se denominan desde la A a la G.

El máximo magnético principal se corresponde con la anomalía A que se observa a 75 metros de profundidad al analizar la resistividad de las rocas. En ese sector los valores de resistividad aparente están por debajo de $100 \Omega \cdot m$. La anomalía en cuestión es aún más evidente y queda mejor definida a 100 m de profundidad. Obsérvese el paralelismo entre las anomalías de IMT y de resistividad aparente.

La anomalía E, situada en la parte oriental del área investigada, se corresponde con resistividades aparente bajas. Obsérvese que el límite meridional de dicha anomalía tiende a orientarse de forma paralela a la dirección N110-120E, a la vez que queda alineada esa zona con la anomalía A. Resulta especialmente evidente esta correlación a 100 m de profundidad, donde se estima a partir del análisis del espectro de potencia de componente residual, que la profundidad de la fuente más somera esta entre 101 y 123 m. A 150 y 175 m las masas de roca con baja resistividad siguen estando presentes a la vez que la extensión generalizada de la zona

menos resistiva tiende a orientarse a lo largo de una franja NO-SE, en un sentido muy amplio. Asimismo, la anomalía B en la parte más nororiental, destaca características similares a esta última, donde las resistividades descienden consecuentemente a la vez, no obstante, a medida que profundiza, la anomalía tiende a orientarse en dirección E-O. Por otro lado, a partir de 175 m, desplazada al sur de la anomalía E, probablemente por la interacción de los contactos de PQ y CVS del flanco derecho del área de estudio, sobresale una anomalía eléctrica G, donde los valores superan los $50 \Omega \cdot m$, alineándose ligeramente con la anomalía A.

La anomalía C está localizada en la zona centro-occidental del área investigada, a partir de los 75 m de profundidad, los contornos de resistividades se mantienen bajo los $80 \Omega \cdot m$. Merece la pena destacar que a partir de los 150 m de profundidad se identifica una anomalía con una extensión muy limitada y valores por debajo de 35 ohmios metro. Igualmente, en la zona central (F), se destaca una anomalía eléctrica similar, donde las resistividades se mantienen por debajo de $35 \Omega \cdot m$, en una extensión limitada, a medida que se profundiza. Por otro lado, los mapas de IMT RTP presentan máximos locales en estas zonas, esto puede deberse a algún cuerpo rocoso con propiedades conductivas para ocasionar esta respuesta, además, sus dimensiones no son suficientes para generar un pico respuesta magnética considerable.

La anomalía D se identifica por valores de resistividad aparente de 70 ohmios metro, está situada en la esquina suroccidental del área investigada, y desde los 75 metros de profundidad muestra una orientación paralela a las estructuras tectónicas regionales. Si bien, en profundidad tiende a desaparecer al ascender la resistividad en vertical y en cualquier caso se aprecia un cierto desplazamiento de la anomalía hacia el norte, lo que podría correlacionarse con el buzamiento generalizado de la estructura en tal sentido. Con esto presente, se puede estimar alguna fuente entre 75 m y 150 m con propiedades conductivas, pero con poca susceptibilidad magnética, ya que en el mapa de IMT reducido al polo y los diferentes mapas procesados de este, no muestra ninguna característica importante en dicha zona.

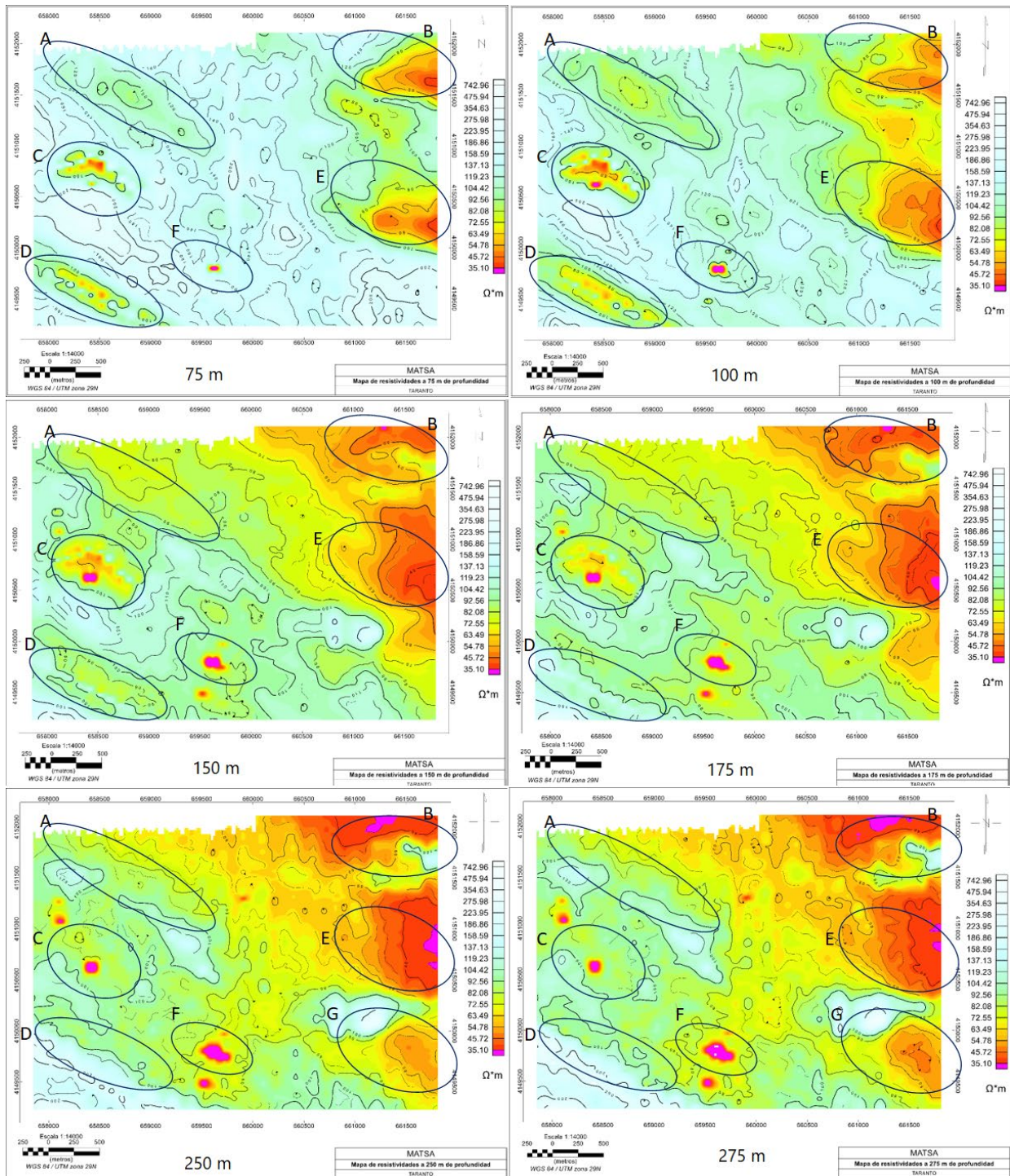


Figura 42 Mapas de resistividades a diferentes profundidades. Zonas relevantes

En base a los resultados geoquímicos, se presenta el siguiente análisis, donde cabe resaltar, que los valores obtenidos en las unidades de las concentraciones geoquímicas por parte del método IMM, son bajas y por ello el método no es totalmente resolutivo en profundidad debido a su alcance, no obstante, no puede descartarse la presencia de un depósito de níquel a altas profundidades del subsuelo.

La distribución de Ni en los suelos muestreados indica la presencia de cuatro zonas anómalas, en donde superan los valores de 2250 ppb, que caracterizan el umbral de anomalía geoquímica para la campaña realizada. Dichas zonas están situadas sobre los materiales del CVS, el fondo geoquímico más amplio se encuentra ubicada en la zona media de la ventana de estudio, cercana a los contornos Sureste de la anomalía magnética principal de esta investigación, y al igual que ésta, los contornos geoquímicos están orientados en la dirección característica de las estructuras tectónicas descritas en la región (N125°E). Las posiciones de estas anomalías no coinciden totalmente con el máximo de intensidad magnética al noroeste, esto puede deberse a acumulaciones mecánicas de la erosión de los cuerpos mineralizados que quedarían concentradas en zonas topográficamente deprimidas (Figura 43), sin embargo no parece que esta sea la relación fundamental, dado que el IMT y la anomalía geoquímica hay una zona deprimida y un relieve que de una u otra manera sería una barrera para los arrastre gravitacionales de zonas topográficamente más altas. Por ello, tratando de justificar la localización de la anomalía geoquímica en la zona detectada, parece razonable pensar que ésta se debería a la surgencias de aguas contaminadas por las mineralizaciones no aflorantes a lo largo de planos de fractura.

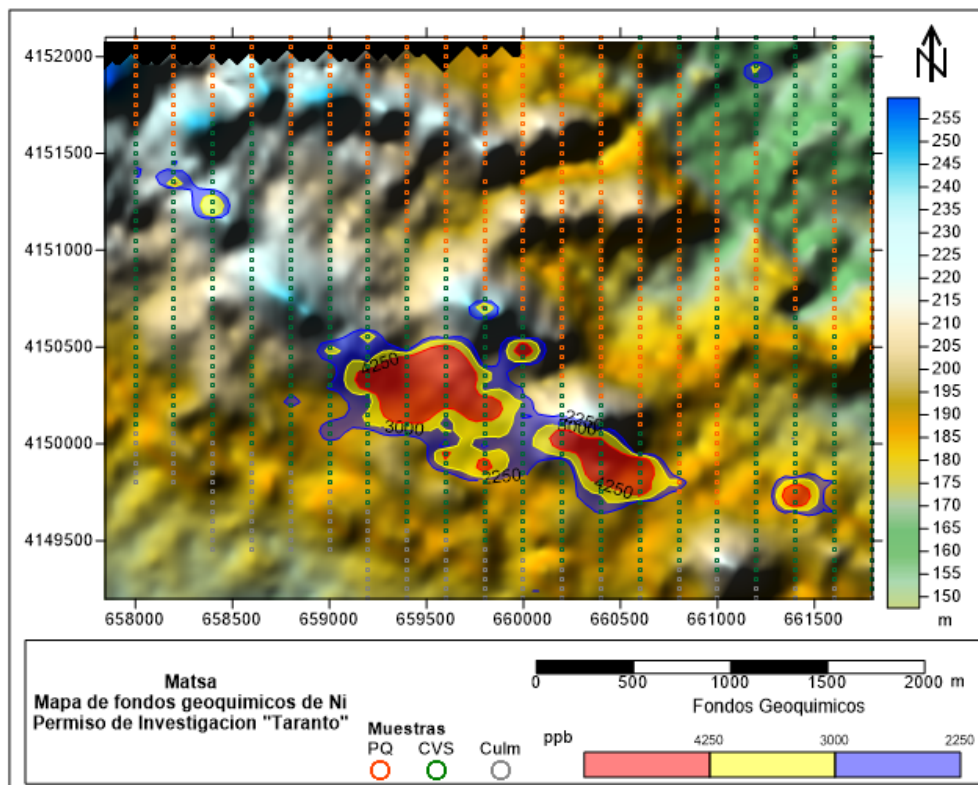


Figura 43 Mapa de relieve (mapa de sombras) y localización de las anomalías geoquímicas de Ni

El coeficiente de correlación de elementos metálicos y no metálicos, muestra como la concentración de níquel tiene una ligera relación para elementos como el calcio, cobalto, magnesio y estroncio, esto parece indicar una relación directa con la composición de las rocas básicas (Mg, Ca, Sr). Este tipo de rocas pueden asociarse a depósitos de níquel (Gunn y Dentith, 1997).

Finalmente, el análisis correlativo de los métodos magnéticos, electromagnéticos y geoquímicos aplicados en esta investigación, invita a especular que la presencia de una fuente magnética asociada a rocas del CVS con naturaleza metálica. Por otra parte, se estima que hay indicios suficientes como para considerar un posible yacimiento constituido de partículas finas de mineral de níquel dispersadas en rocas básicas.

Después de lo expuesto, sería interesante deliberar en la realización de un sondeo de exploración de testigo continuo, que permita tomar muestras en profundidad las rocas volcánicas de esta región. Dicho sondeo debería tener como objetivo corroborar la continuidad de las rocas básicas en el bloque de muro del cabalgamiento. Un estudio geológico-estructural de la zona debería aportar datos relevantes de las estructuras tectónicas en ese sector. Sin duda, una cartografía geológica detallada, realizada a una escala apropiada en un área que podría ser ligeramente superior a 2-3 km² (Figura 44) se hace necesario. Tal área debe incluir la superficie comprendida entre las coordenadas 658450 a 659750 m en el eje X y 4151050 a 4151800 m en el eje Y. El mapeo geológico de superficie debería aportar datos para establecer cálculos sobre la profundidad de objetivos a lo largo del sondeo, así como la orientación del mismo. Es evidente que uno de los lugares más interesantes para el emplazamiento del sondeo sería en el bloque de techo del cabalgamiento (en las rocas devónicas), con la intención de atravesar la Unidad PQ y constatar la variedad de rocas volcánicas (ácidas y básicas) que debe haber en el bloque de muro del mismo. La orientación del sondeo debería ser aproximadamente N030°E y estaría dirigido desde su emplazamiento en superficie al suroeste. A falta de datos estructurales no se puede estimar en este TFM la inclinación del sondeo.

Sin duda, el permiso de investigación minera "Taranto" adquiere especial valor a partir de la aplicación de métodos de prospección geofísicos y geoquímicos. Resulta evidente, a partir de los argumentos expuestos en este documento, que se puede acotar el área de interés en un permiso minero, reduciendo la misma a una zona que en algunos casos, tal y como se defiende en este documento, tiene un área inferior a 1 km².

Este TFM no deja de ser un trabajo académico que permite poner en valor la aplicación combinada de diversos métodos de investigación en la Faja Pirítica Ibérica para la localización de nuevos yacimientos.

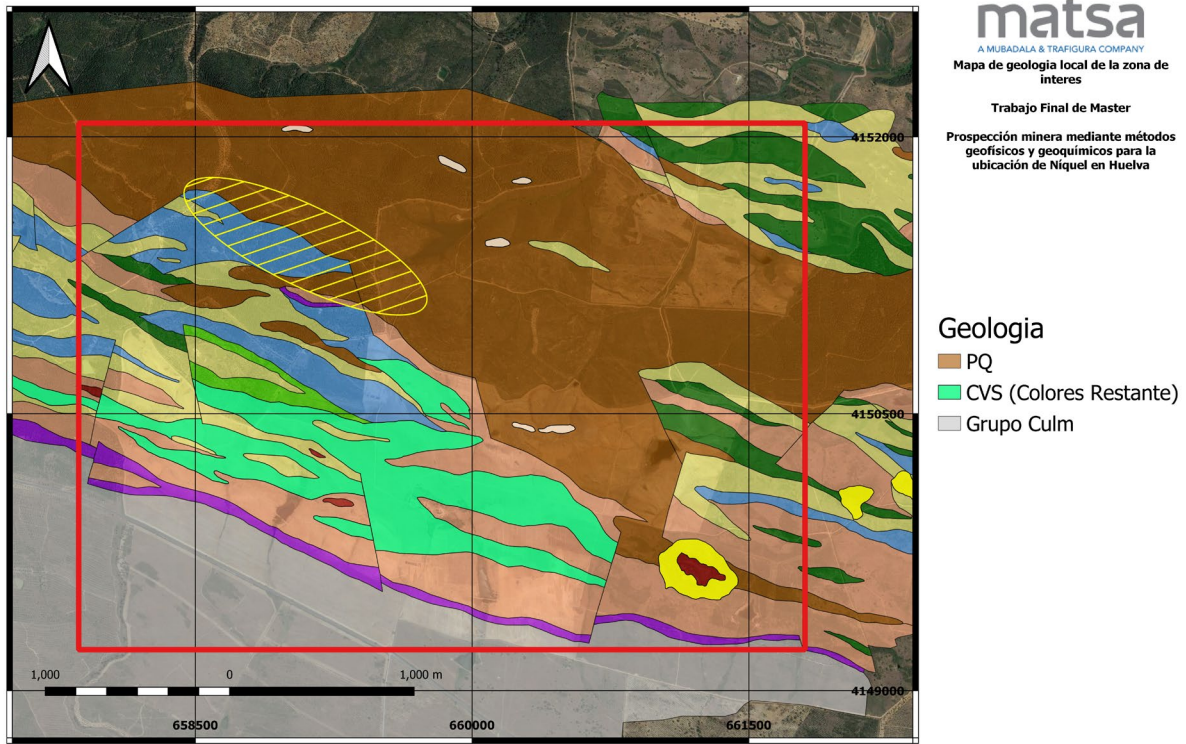


Figura 44 Situación de la zona de interés para ubicación un sondeo de exploración (datos geológicos cortesía de MATSA)

6. CONCLUSIONES

A partir de la prospección geofísica realizada basada en métodos magnéticos y electromagnéticos se evidencia la posible existencia de una masa mineral de carácter metálico en el permiso para investigación minera "Taranto". La zona de mayor interés se encuentra localizada a 2 km al noreste del pk 11.0 de la carretera A-490 (Villanueva de los Castillejos - San Bartolomé de la Torre). Diferentes caminos vecinales permiten un cómodo acceso a la zona. Sería posible elegir, en función de criterios logísticos, la localización exacta de uno o varios sondeos de exploración, los cuales deberían estar orientados N030°E, es decir, perpendicular a las directrices estructurales de la zona.

Las estimaciones de profundidad de la fuente que genera el máximo de intensidades magnéticas totales y bajas resistividades aparentes en el sector de La Hijuela, invita a pensar que podría relacionarse con una mineralización de níquel cuyo techo se encontraría entre 100 y 175 m de profundidad. Dicha mineralización podría tener interés económico.

La fuente que genera el máximo de intensidad magnética presenta una distribución que coincide con las directrices estructurales de la región (N120°E). Efectivamente, la existencia de rocas básicas del CVS en el bloque de muro de un cabalgamiento a escala regional en el flanco sur del anticlinorio de Puebla de Guzmán, podrían relacionarse con la anomalía investigada.

Los umbrales geoquímicos indican que las zonas anómalas se establecen dentro de la secuencia del Complejo Vulcano-Sedimentario, con valores de concentraciones mayores a 2250 ppb, estos no se ubican espacialmente en los contornos del máximo de intensidad magnética, debido probablemente, a puntos de surgencias de aguas subterráneas contaminadas procedentes del cuerpo mineralizado en profundidad.

El coeficiente de correlación de los diferentes elementos con respecto al níquel, muestra que éste tiene una buena dependencia con elementos característicos de rocas básicas del Complejo Vulcano-Sedimentario, como el calcio, magnesio y estroncio. De manera tentativa, tales rocas se podrían relacionar con potenciales yacimientos de níquel.

El área estimada para el emplazamiento de un sondeo de exploración, que permita corroborar la existencia de una mineralización en zona inalterada, estaría localizada entre las coordenadas 658450 a 659750 m en el eje X y 4151050 a 4151800 m en el eje Y, en la zona de La Hijuela, abarcando un área de aproximadamente de 0.975 km².

7. RECOMENDACIONES

Se propone la realización de una cartografía geológica detallada, realizada a una escala apropiada en un área que podría ser ligeramente superior a 2-3 km². Tal área debe incluir la superficie comprendida entre las coordenadas UTM 658450 a 659750 m en el eje X y 4151050 a 4151800 m en el eje Y. El mapeo geológico de superficie debería aportar datos estructurales para establecer cálculos sobre la profundidad de objetivos a lo largo del sondeo, así como la orientación del mismo.

A partir de los datos iniciales de magnetometría, realizar un estudio más detallado de la zona, tomando en cuenta la posibilidad de magnetización remanente por parte de los elementos ferromagnéticos.

Valorar la posibilidad de un sondeo de exploración en las zonas “C” y “F” señaladas en los mapas de resistividad aparente, debido a que estos presentan propiedades donde se correlacionan los máximos de IMT locales y mínimos de resistividad.

Sugerir nuevas campañas geofísicas aportando datos de gravimetría y polarización inducida, de tal manera, que permita la realización de un modelo 2D de la zona de interés. Teniendo en cuenta las densidades de las rocas del medio y la configuración estructural. Con todos los datos adquiridos en las distintas campañas geofísicas se debería conseguir una buena caracterización de los depósitos metálicos en el subsuelo, a partir de sus propiedades físicas.

8. AGRADECIMIENTOS

Las siguientes personas son aquellos estuvieron presentes en la realización de este Máster,
GRACIAS POR TODO:

Mi madre, por todo el apoyo que me diste para lograr todas mis metas.

Mi padre, por siempre estar incondicionalmente.

Mi hermano, por la confianza y siempre creer en mí.

Mi hermana, por el amor y la ayuda infinita que me has dado.

Nelsimar, por el cariño y siempre aconsejarme.

Grillo, Dylan y Onayker, por su amistad incondicional sin importar la distancia.

Pedro y Jota, por su hermandad a pesar del tiempo.

Akira, Carlos, Manuel, Noel y Jefferson, por su lealtad y cada grano de arena aportado.

Zaraichi, Adrián, Maybeth, Florisay, Ericka, Manuel, Susan, Yusmery y Jessica, más que amigos, la familia que me dio la vida, Colinas.

Mi profesora Inírida, nunca le dejare de agradecer por toda la ayuda y conocimiento que usted me ha dado.

Profesor Fernando Palero, por su conocimiento contribuido para este trabajo.

Profesor Francisco Alonso, por su tutoría impecable para culminar este proyecto.

Profesor Juan Pons y Carolina Sánchez, por la oportunidad, amabilidad y apoyo en MATSA.

Finalmente, Kendy, por su amor, comprensión y tolerancia. Eres increíble, Te amo.

9. REFERENCIAS

- Abad, M., Alonso, F., Barba, C., Borrego, J., Cáseres, L., Camacho, M. y otros mas. (2008). *Geología de Huelva, Lugares de interés geológico*. Huelva: Universidad de Huelva.
- Alonso, F., & Strauss, G. (1978). *Investigación geofísica de sulfuros masivos en el flanco norte del Anticlinal de Puebla Guzmán (Huelva) para el Instituto Geológico Minero de España*. Tharsis Consult S. A., Huelva.
- Amedjoe, C., & Adjovu, I. (2013). Application of the mobile metal ion geochemical technique in the location of buried gold mineralization in Essase Concession, Eastern Region, Ghana. *Academic Journals*, 5(6), 147-160.
- Capitán, M. (2014). *Mineralogía y geoquímica de la alteración superficial de depósitos de sulfuros masivos en la Faja Pirítica Ibérica*. Universidad de Huelva, Departamento de Geología, Huelva.
- Castilla, J., & Herrera, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Laboratorio de Tecnologías Mineras.
- Dobrin, M., & Savit, C. (1988). *Introduction to geophysical prospecting* (4ta ed.). Colorado: McGraw-Hill Book Company.
- Geosoft Inc. (2007). *Tutorial MAGMAP filtering: 2D frequency domain processing of potencial field data, extension for Oasis Montaj 6.4*. Toronto.
- Gunn, P., & Dentith, M. (1997). Magnetic responses associated with mineral deposits. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 2(17), 145-158.
- Hawkes, H., & Webb, J. (1962). *Geochemistry in Mineral Exploration*. New York: Harper & Row Publications.
- Henderson, R., & Zietz, I. (1949). The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields. *Geophysics*, 14, 508-516.
- Instituto de Investigaciones Mineras. (2020). *Cátedra: Exploración Geoquímica*. Universidad Nacional de San Juan, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1984). *Análisis básico para la optimización en la utilización de los sistemas de exploración minera*. Ministerio de industria y energía. Secretaria de la energía y recursos minerales.

- INTERMAGNET. (28 de 11 de 2020). Recuperado el 28 de 11 de 2020, de www.intermagnet.org
- Keary, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (3 ed.). Blackwell Science Ltd.
- Leistel, J., Marcoux, E., Thiéblemont, D., Quesada, C., Sánchez, A., Almodóvar, G., Pascual, E. & Sáez, R. (1998). The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt. *Mineralium Deposita*, 33: 2-30.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics* (2 ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Macheyeki, A., Li, X., Kafumu, D., & Yuan, F. (2020). *Applied Geochemistry: Advances in Mineral Exploration Techniques*. Elsevier.
- Mann, A., Birrell, R., Mann, A., Humphreys, D., & Perdrix, J. (1998). Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 61, 87-102.
- Mantero, E., Alonso-Chaves, F., García-Navarro, E., & Azor, A. (2011). Tectonic style and structural analysis of the Puebla de Guzmán Antiform (Iberian Pyrite Belt, South Portuguese Zone, SW Spain). *Geological Society*, 203-222.
- Mantero, E., Alonso-Chavez, F., & Azor, A. (2006). Geometría y Cinemática de un Sistema Imbricado de Cabalgamientos en la Faja Pirítica Ibérica (Zona Sudportuguesa). *Geogaceta*, 47-50.
- Mantero, E., García, E., Alonso-Chaves, F., Martín, L., Matas, J., & Azor, A. (2007). La Zona Sudportuguesa: propuesta para la división de un bloque continental en dominios. *Geogaceta*, 43, 27-30.
- Milligan, P., & Gunn, P. (1997). Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 63-75.
- Minorbis - Grupo Mexico. (2014). *Concurso público para la adjudicación de las actividades extractivas de explotación de los recursos existentes en la reserva minera de Aznalcóllar (Sevilla)*.

- Moreno, C., Sierra, S., & Sáez, R. (1996). Evidence for catastrophism at the Famennian-Dinantian boundary in the Iberian Pyrite Belt. *Recent advances in Lower Carboniferous geology*, 153-162.
- Oliver, M., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(3), 313-332.
- Routhier, P., Aye, F., Boyer, C., Lécolle, M., Moliere, P., Picot, P., & Roger, G. (1978). Mem. Bur: Rech. Geol. Min. 94: 1-265.
- Sáez, R., & Moreno, C. (1997). Geology of the Puebla de Guzmán anticlinorium. *Geology and VMS Deposits of the Iberian Pyrite Belt*.
- Schemerhorn, J. (1971). An outline stratigraphy of the Pyrite Belt. *Boletín Geológico y Minero de España*(82), 239-268.
- Secretaria general de la energia y recursos minerales. Direccion general de minas y de la construccion. (1990). *La Reserva "Zona de Huelva"*. Madrid: Ministerio de Industria y Energia.
- Sociedad Geológica de España. (2004). *Geología de España*. (J. A. Vera, Ed.) Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Spector, A., & Grant, F. (1970). statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2), 293-302.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge.
- Ughi, A. (2014). Estudio de la estructura cortical en la zona centro norte de Venezuela mediante el análisis de flexión de placas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 93-103.

10. ANEXOS

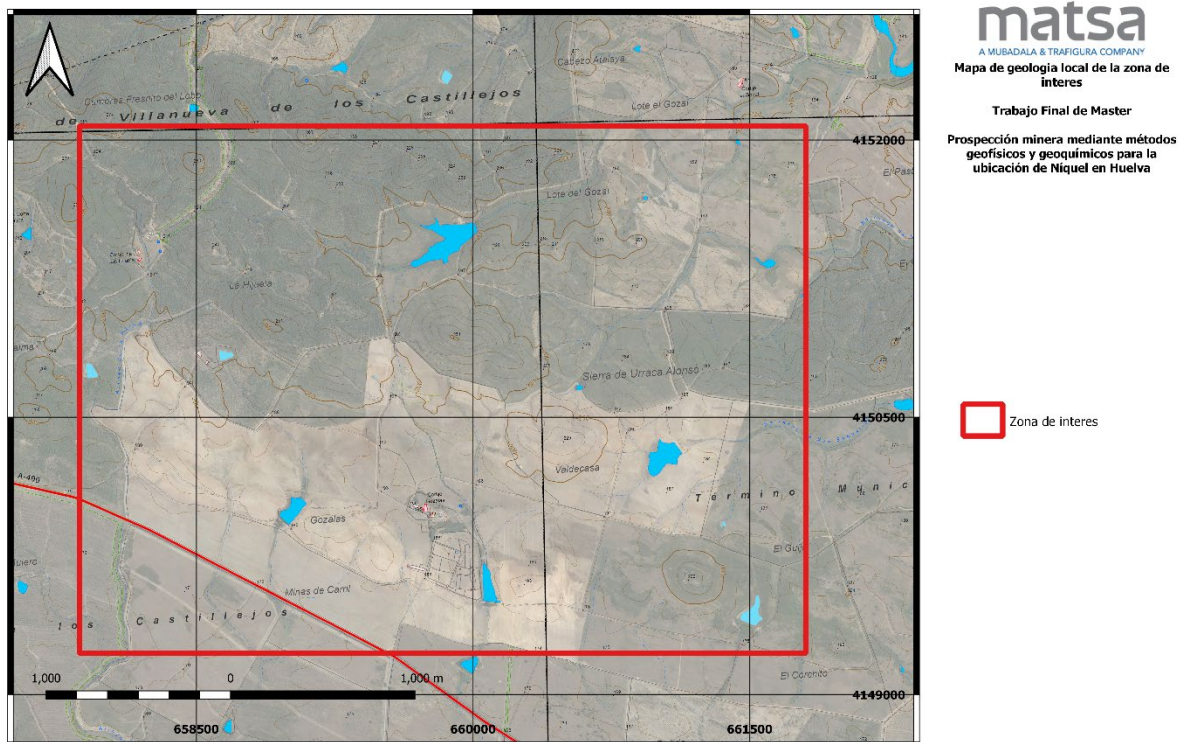
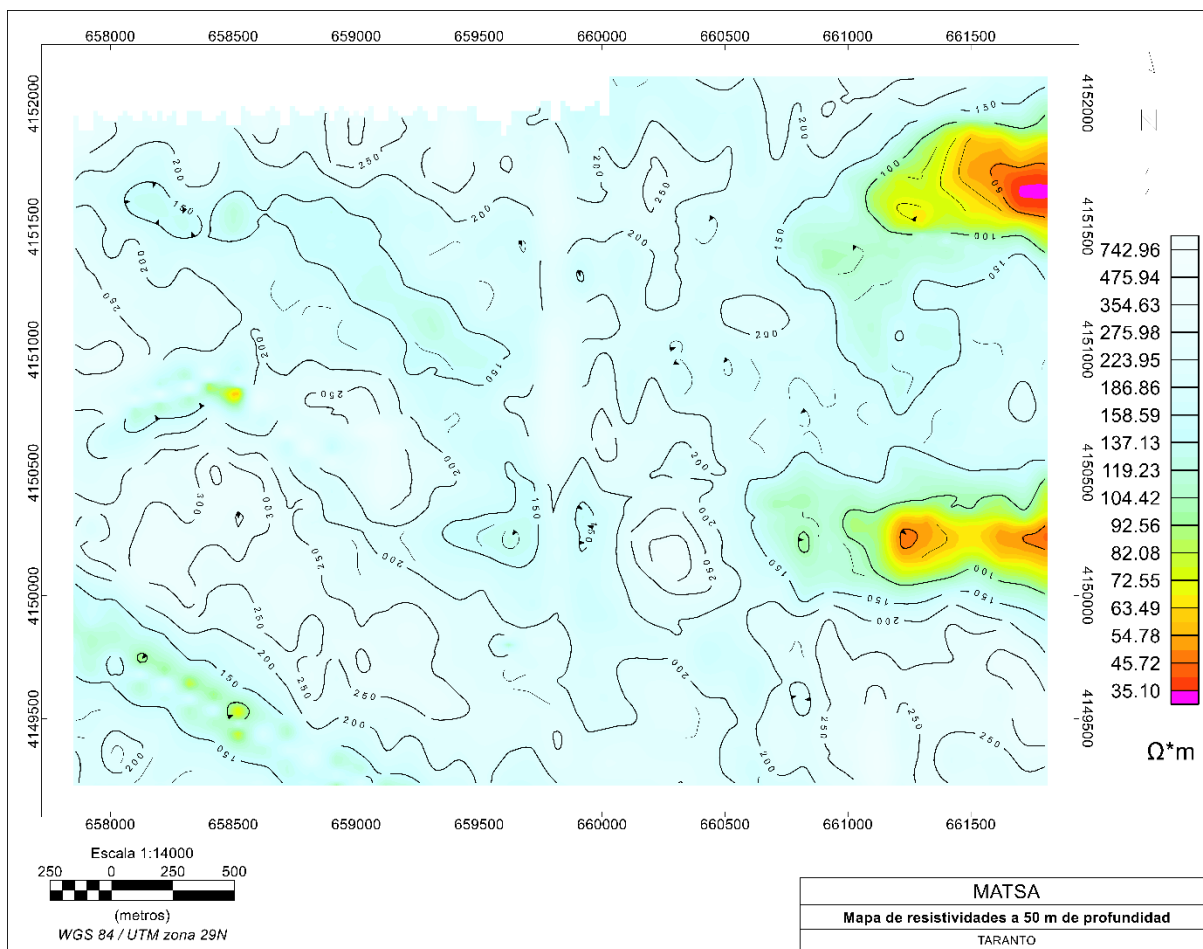


Figura 45 Mapa de toponimias de la zona (cortesía de MATSA)



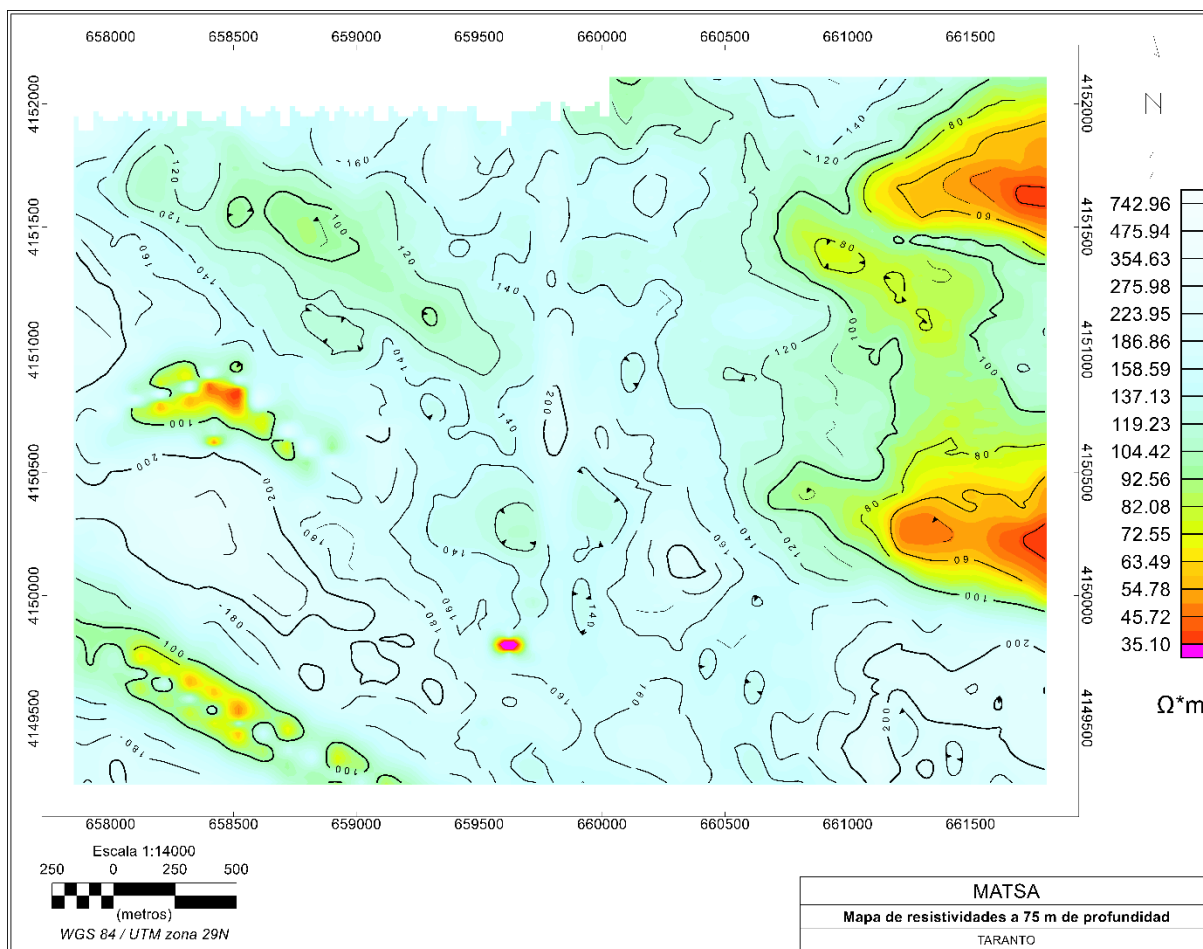


Figura 48 Mapa de resistividades a 75 m de profundidad (Ampliado).

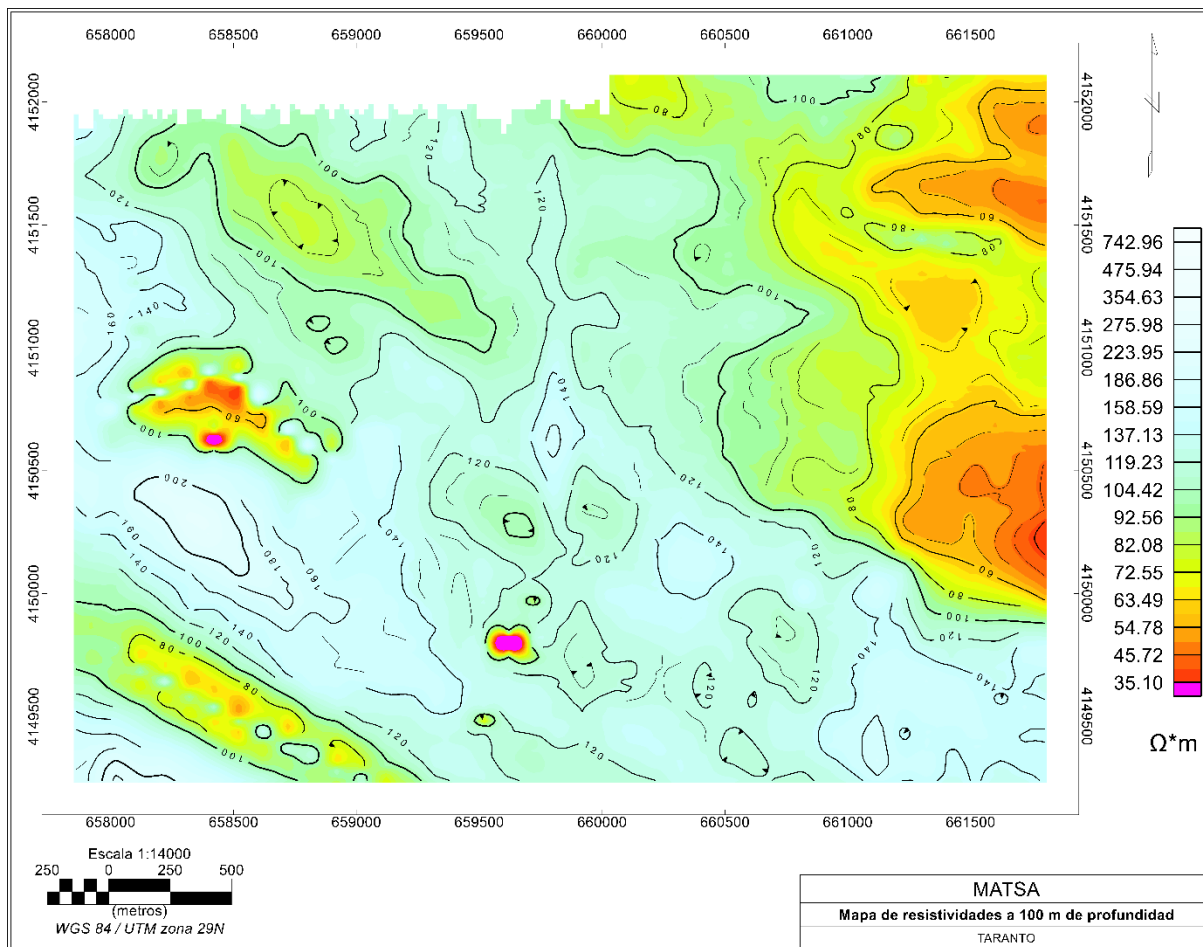


Figura 49 Mapa de resistividades a 100 m de profundidad (Ampliado).

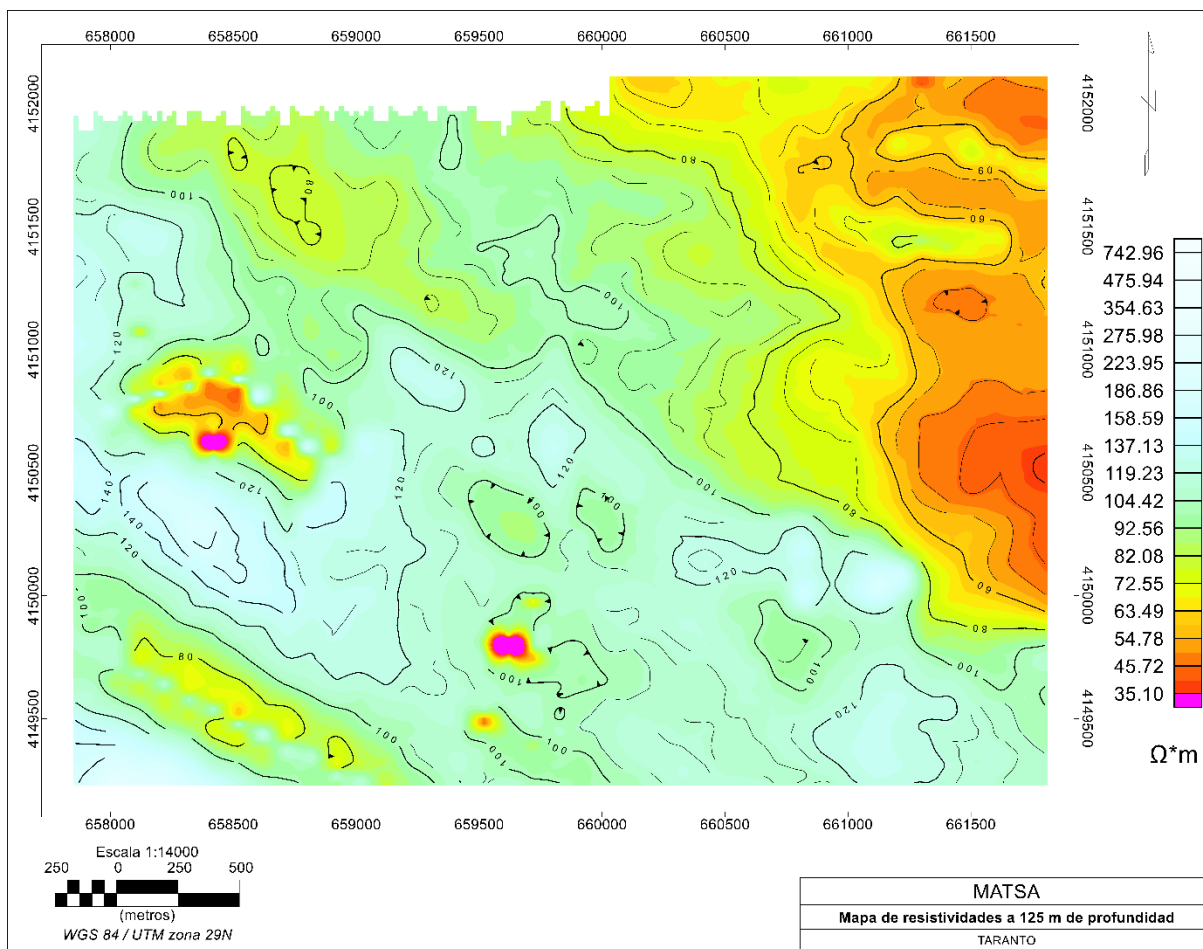
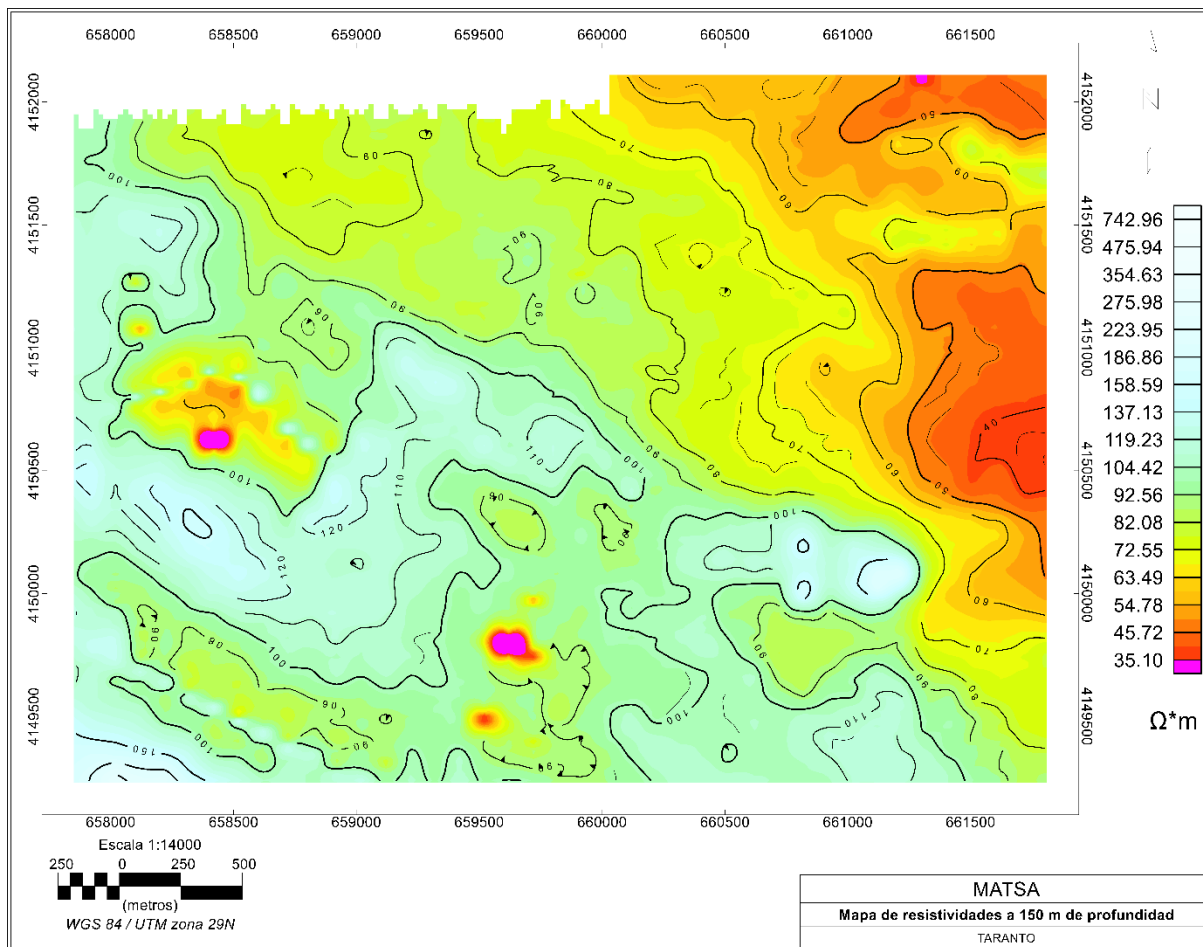


Figura 50 Mapa de resistividades a 125 m de profundidad (Ampliado).



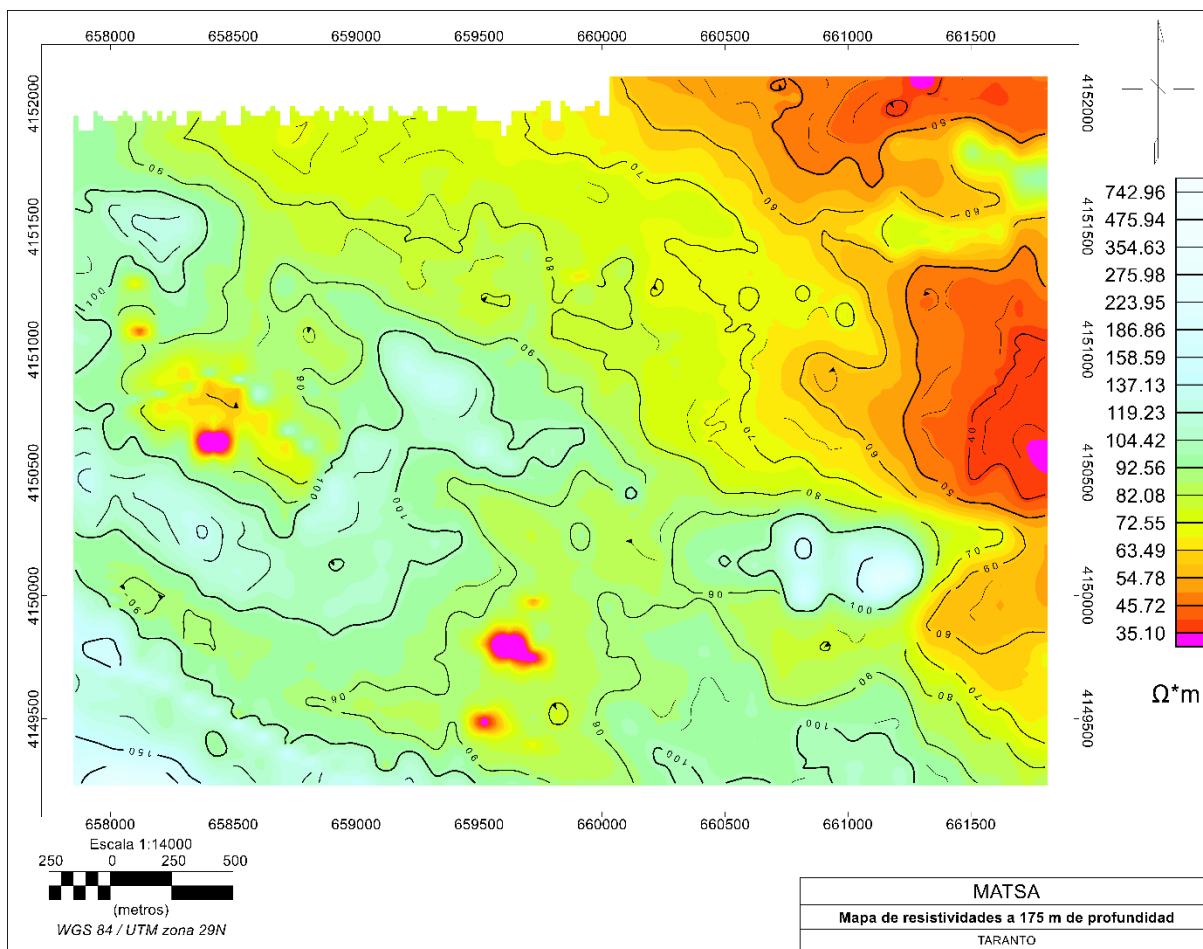


Figura 52 Mapa de resistividades a 175 m de profundidad (Ampliado).

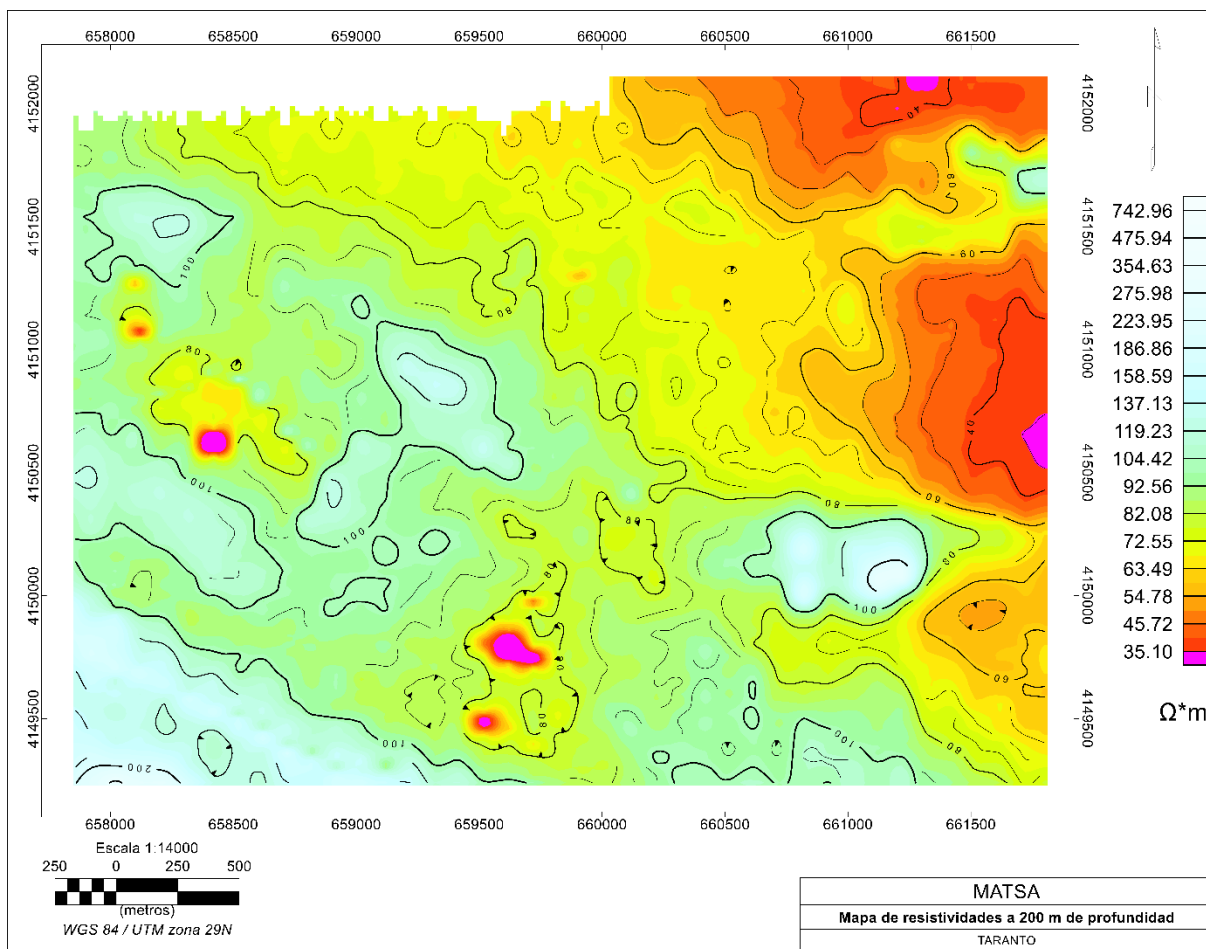


Figura 53 Mapa de resistividades a 200 m de profundidad (Ampliado).

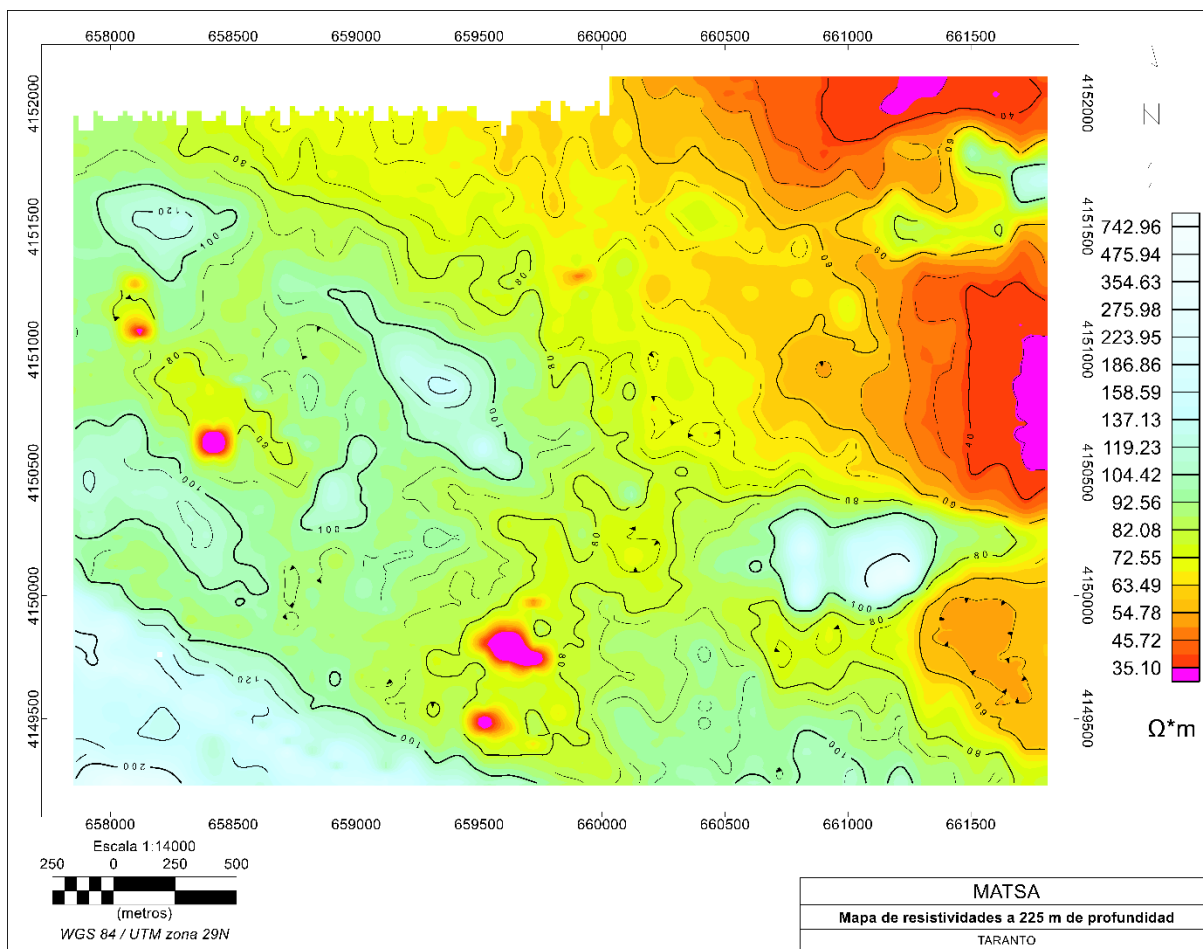


Figura 54 Mapa de resistividades a 225 m de profundidad (Ampliado).

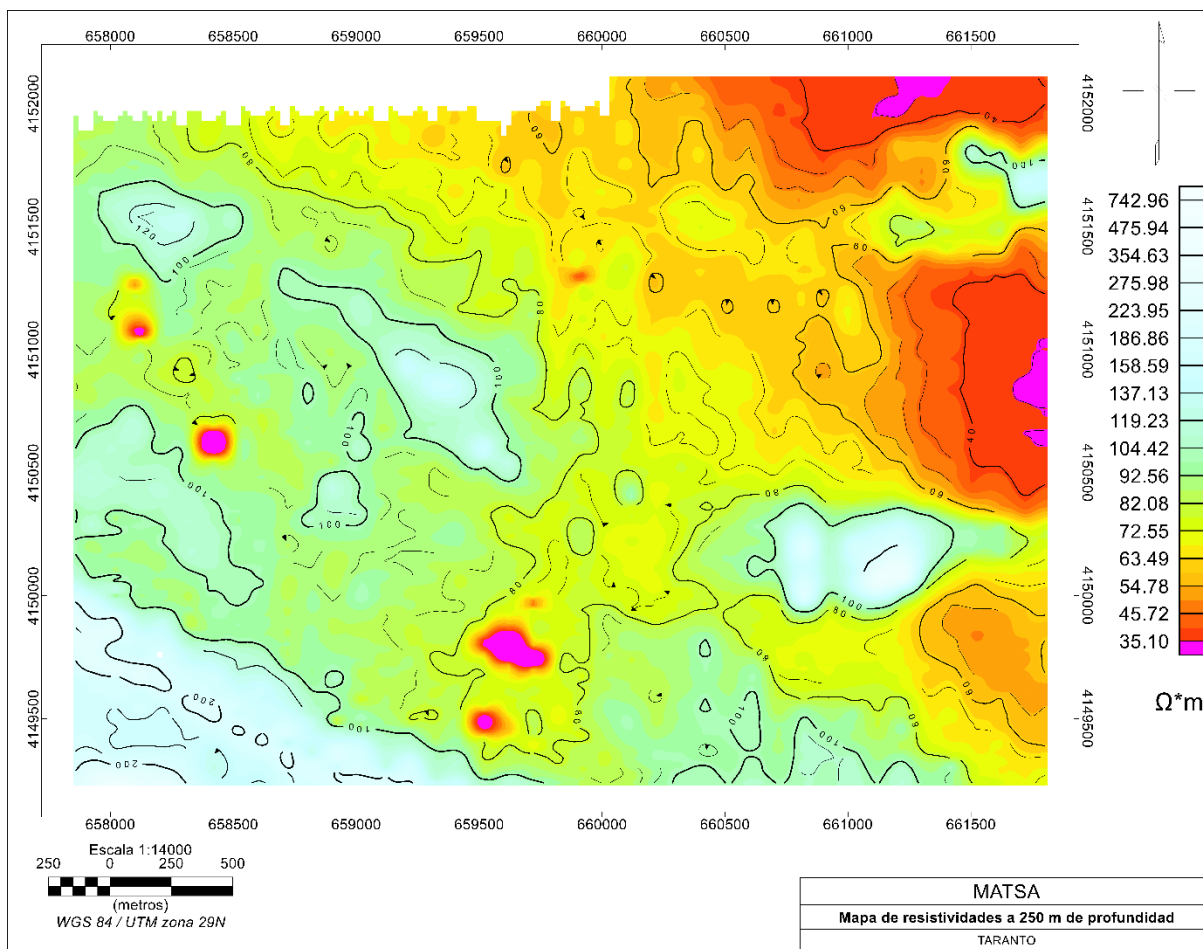


Figura 55 Mapa de resistividades a 250 m de profundidad (Ampliado).

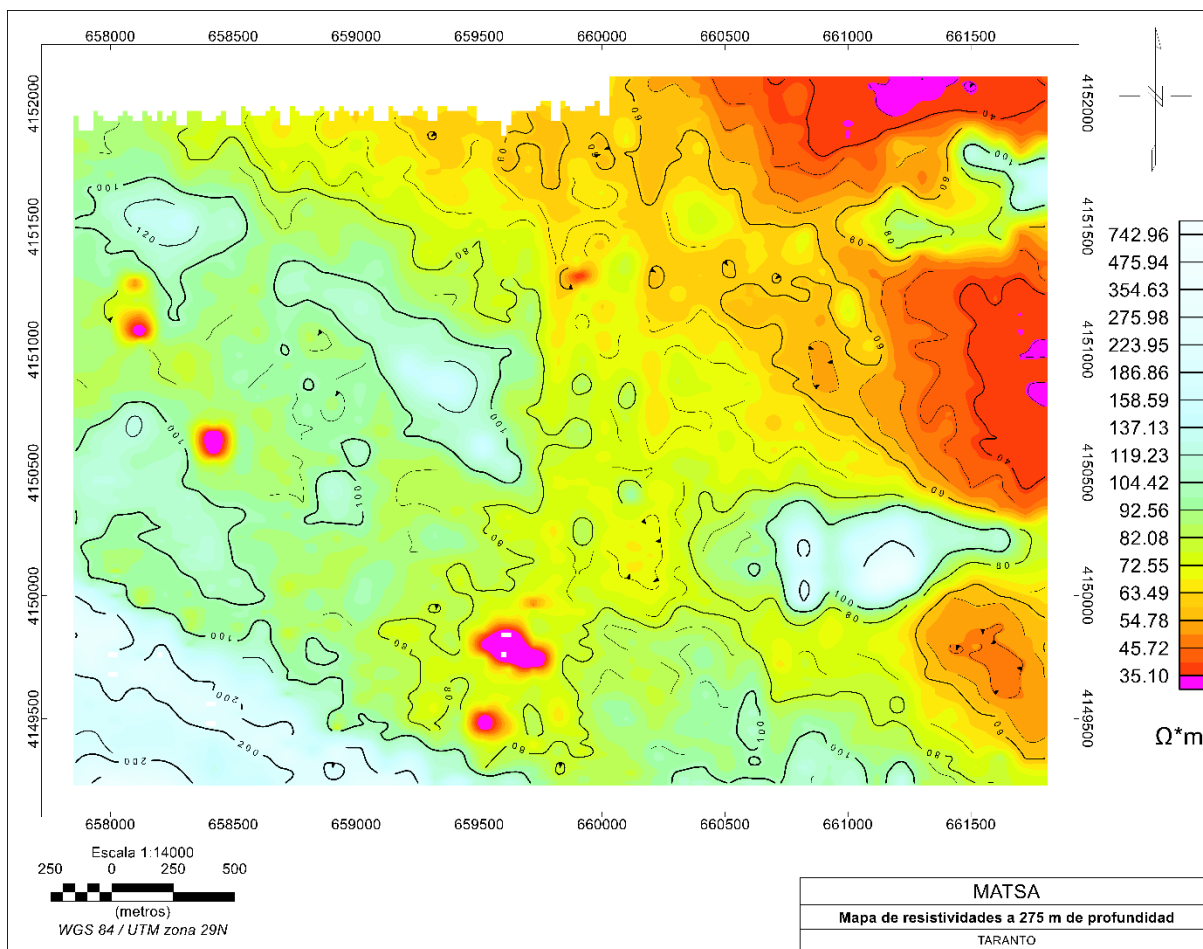


Figura 56 Mapa de resistividades a 275 m de profundidad (Ampliado).

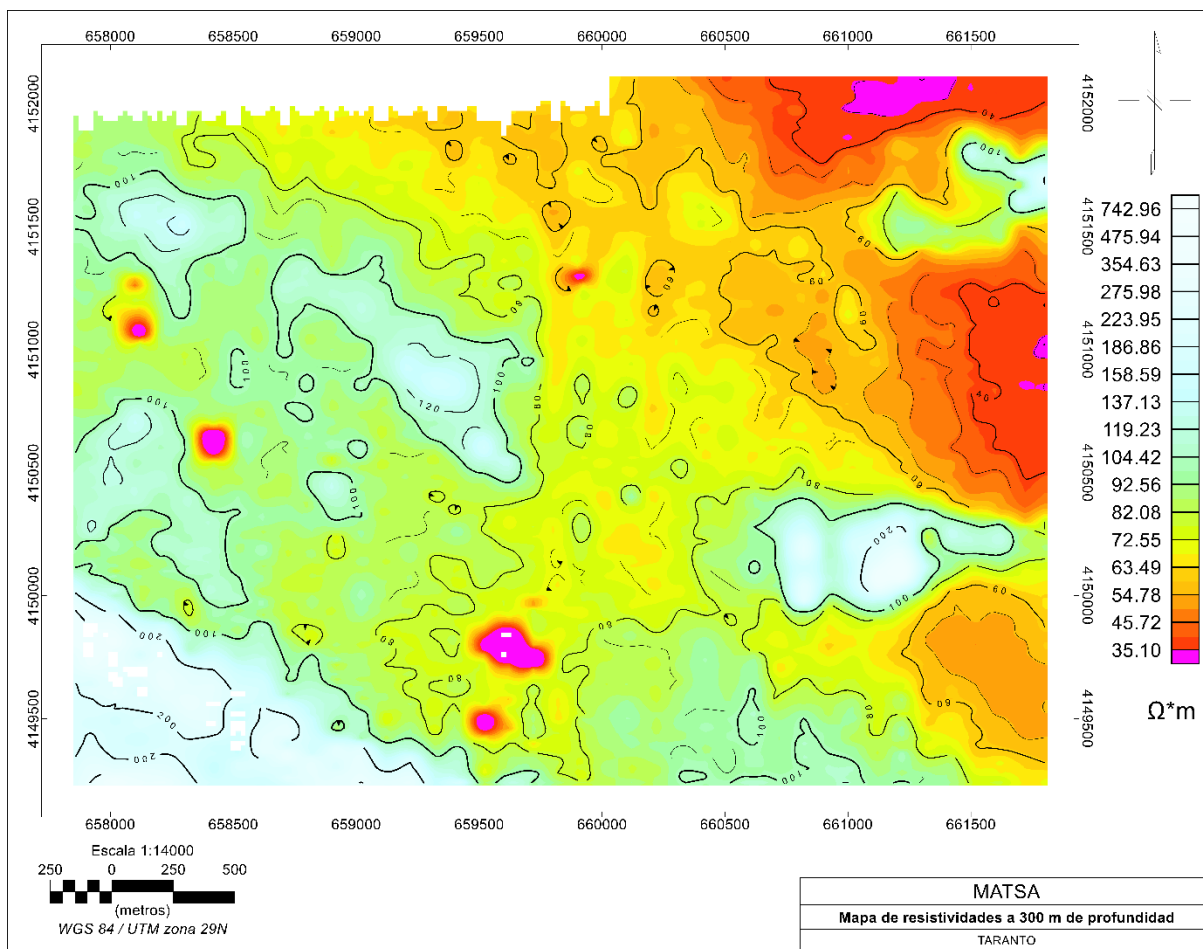


Figura 57 Mapa de resistividades a 300 m de profundidad (Ampliado).