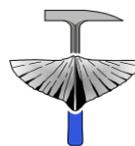




Universidad de Oviedo



Facultad de Geología

TRABAJO FIN DE MÁSTER

# **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOFÍSICA DEL ENTORNO DE UNA EXPLOTACIÓN MINERA EN EL SECTOR DE SOPUERTA (PAÍS VASCO)**

MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA GEOLÓGICA

DANIEL PEÑA GRACIA

JULIO DE 2023





# Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



---

D. Daniel Peña Gracia, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Caracterización geológica y geofísica del entorno de una explotación minera en el sector de Sopena (País Vasco)”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 14 de julio de 2023

Fdo. Daniel Peña Gracia

El Dr. Carlos López Fernández, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo y el Dr. Javier Olona Allué, Director de *TerraDat Geophysics S.L.*, confirma/n que ha/n tutelado el trabajo “Caracterización geológica y geofísica del entorno de una explotación minera en el sector de Sopena (País Vasco)” realizado por D. Daniel Peña Gracia y autorizan su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 14 de julio de 2023

Fdo. Carlos López Fernández

Fdo. Javier Olona Allué

---



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directores Carlos López Fernández y Javier Olona Allué la dedicación y el tiempo que han dedicado para que sea posible presentar este Trabajo Fin de Máster. A Carlos le agradezco lo aprendido durante esta etapa, despertando mi interés por todo aquello que enseñaba en sus clases, y sobre todo, la forma de hacerlo. A Javi, por enseñarme en detalle el mundo de la geofísica y su pegadiza pasión por ella, además de darme la oportunidad de crecer laboralmente dentro de la empresa prestándome multitud de facilidades para compatibilizar la realización del trabajo con las tareas profesionales. Me gustaría destacar de ambos su incansable esfuerzo para ayudarme hasta el último momento.

Por otro lado, también me gustaría agradecer a mis padres y a mi hermana el incondicional apoyo que me han dado y todos los ánimos recibidos desde que me fui lejos de casa para cursar el Máster. Gracias a ellos, he podido crecer tanto personal como académicamente en estos meses en Oviedo. Además, agradezco a mi colega Dani, quien ha sabido estar cerca en la lejanía, su apoyo durante esta etapa.

También quiero expresar mi agradecimiento a Alex, mi compañero de escalada y geofísica y de quien no dejo de aprender día a día, todo aquello que me ha enseñado acerca del procesado de los datos y de la preparación de figuras finales.

Agradezco a Quintana, cuidadoso y detallista y a quien admiro por su dedicación a la geología. Compartir jornadas de campo con él me brindó la oportunidad de observar y aprender una gran variedad de aspectos geológicos que no se aprenden en clase.

Por último, no me gustaría perder la oportunidad de agradecer a los compañeros de Máster que me acompañaron durante esta etapa, con quien destaco los momentos compartidos tanto de trabajo y estudio como de ocio.

---



## INDICE

### Resumen -Abstract

1.	Introducción, antecedentes y objetivos.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Antecedentes.....	3
1.3	Objetivos de investigación.....	3
2	Contexto geográfico y geológico.....	4
2.1	Contexto geográfico.....	4
2.2	Contexto geológico.....	7
3	Metodología.....	12
3.1	Caracterización geológica.....	12
3.2	Estudio mediante el método de tomografía eléctrica.....	13
	3.2.1 <i>Fundamentos del método eléctrico de resistividad</i> .....	13
	3.2.2 <i>Desarrollo de la investigación geofísica</i> .....	17
4	Resultados y discusión.....	25
4.1	Geología.....	26
4.2	Tomografía eléctrica.....	30
4.3	Discusión de resultados.....	36
5	Conclusiones.....	42
6	Bibliografía.....	43

---



## Resumen - Abstract

---

### Resumen:

La siguiente memoria corresponde al Trabajo Fin de Máster del Máster Oficial en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo y representa el estudio geológico y geofísico de una explotación minera y su entorno, ubicada cerca de la localidad de Sopuerta (País Vasco). Se ha realizado un estudio geológico de los diferentes materiales que afloran en la cantera y sus alrededores, y se ha abordado un estudio geofísico consistente en la realización de seis líneas de tomografía eléctrica en diferentes zonas de la explotación. La información geológica adquirida ha quedado reflejada en una cartografía a escala 1:2.500 que muestra la distribución de las diferentes unidades geológicas identificadas en el entorno de la explotación, mientras que los resultados del análisis geofísico se reflejan en 18 perfiles en los que se muestra la distribución espacial de la resistividad del terreno en profundidad. Esta ha sido correlacionada con las unidades geológicas, pudiendo establecer un modelo geológico de la cantera y su entorno. De este modo, el presente estudio ha permitido identificar sectores dentro de la explotación en los que es posible que existan cavidades kársticas, así como determinar zonas más alteradas o fracturadas y caracterizar las zonas de falla en profundidad. Esto ha permitido diferenciar zonas con mayor interés de explotación, ayudando a las labores de extracción. De este modo, se ha verificado la utilidad que tiene un estudio geológico y geofísico en una explotación de estas características.

### Abstract:

The following report presents the geological and geophysical study of a quarry and its surroundings, located near the town of Sopuerta in the Basque Country.

First of all, a geological study has been carried out, focusing on the analysis of the different materials that outcrop in the quarry. Then, the geophysical study has consisted on six electrical resistivity tomography lines in different areas of the quarry. The final analysis has been conducted by integrating the information obtained from both studies.

The geological information is displayed in a geological map where the distribution of the different identified geological units is shown, while the result of the geophysical analysis consists in 18 resistivity profiles.

This study has allowed the identification of sectors within the quarry where karstic cavities may be placed, as well as determining areas where the rock is weathered or fractured, and characterizing fault zones in depth. Greater exploitation interest areas have been differentiated, helping the extraction quarry work. This way, the usefulness of a geological and geophysical study in a quarry has been verified.

---



# 1. Introducción, antecedentes y objetivos

## 1.1 Introducción

Esta memoria constituye el Trabajo Fin de Máster del Máster universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo. Recoge el estudio geológico y geofísico del entorno de una explotación a cielo abierto ubicada en la localidad de Sopuerta (Vizcaya, País Vasco), donde se extraen calizas con el objetivo de aprovecharlas y utilizarlas fundamentalmente como árido en el ámbito de la construcción. El citado estudio forma parte de un proyecto de mayor entidad en el que participaron varias empresas con diferentes objetivos, siendo TerraDat Geophysics S.L. la encargada de la caracterización geológica y geofísica. El presente trabajo se ha desarrollado en el marco de mi labor profesional como geólogo dentro de esta empresa de exploración geofísica y geológica.

La geofísica es una herramienta muy importante en la exploración previa de los yacimientos minerales dado que comprende técnicas de estudio no invasivas que permiten analizar grandes extensiones de terreno sin necesidad de alterarlo total o parcialmente. Se trata de técnicas de investigación que estudian y examinan la variación de propiedades físicas para obtener información acerca del subsuelo. Entre los métodos geofísicos superficiales, algunos de los más comunes pueden ser: georradar, sísmica de refracción o los métodos eléctricos.

En este trabajo, se ha seleccionado como método de investigación la tomografía eléctrica con la finalidad de caracterizar los materiales de la cantera y su entorno. Es una técnica con la que se puede obtener información significativa acerca de algunas de las propiedades de las rocas carbonatadas objeto de explotación, de la presencia de cavidades o incluso de las propiedades hidrogeológicas del macizo.

El trabajo ha consistido en un análisis multidisciplinar que incorpora diferentes métodos o técnicas de estudio. En primer término, la investigación en superficie ha consistido en el estudio geológico, que combina el análisis detallado de las diferentes litologías presentes en la explotación con la contextualización geológica de los mismos, permitiendo plasmar esa información en una cartografía geológica donde queda reflejada la distribución espacial de las diferentes unidades de la zona. Seguidamente y con el propósito de analizar el subsuelo de la cantera, el trabajo se ha centrado en el estudio geofísico mediante el método de tomografía eléctrica. Este se fundamenta en la inyección controlada de corriente eléctrica en el suelo a través de electrodos y en la medida de la diferencia de potencial entre otros dos. Permite registrar la resistividad del terreno en diferentes puntos del subsuelo para generar un perfil bidimensional en el que se representa la distribución espacial de la resistividad en el subsuelo. Dicho ensayo puede ser utilizado para definir unidades geológicas o estructuras (como fallas). Finalmente, se ha integrado toda la información obtenida en un modelo de utilidad para la explotación.

Inicialmente, en la cantera se identificaron varios retos para optimizar el trabajo de explotación. Por un lado, la existencia de estructuras como cavidades kársticas y fallas desarrolladas en la unidad carbonatada objeto de explotación y, por otro, las zonas en las que la composición de la roca no cumplía con los estándares mineros requeridos debido al mayor porcentaje de arcillas y arenas (fundamentalmente por su alteración). En ciertos puntos de la cantera este alto contenido en arcillas complicaba notablemente el sistema de trabajo implantado. A excepción de verano, durante gran parte del año la cantidad de precipitaciones era elevada, por lo que habitualmente las condiciones de trabajo se desarrollaban en condiciones de gran humedad. La cantera se encontraba al aire libre y el volumen de material que se movilizaba día a día se mantenía mojado casi ininterrumpidamente. El tamizado mecánico del material machacado se veía entorpecido por la presencia de arcilla, ya que en presencia de agua se adhería a los clastos carbonatados (en ocasiones incluso se agrupaban varios unidos por la acción adherente de la arcilla). Como consecuencia, el material extraído no se podía clasificar correctamente desencadenando errores granulométricos. Por otro lado, como se indicó anteriormente, las cavidades kársticas también dificultaban el trabajo diario. Su naturaleza imprevisible causaba problemas a la hora de barrenar y colocar los explosivos para una nueva voladura y existían igualmente problemas de seguridad relacionados: colapsos en los bancales, aquellos asociados a la presencia de agua, inestabilidades de taludes, etc.

Ambos problemas se encontraban en relación directa, pues muchas veces las cavidades kársticas aparecían rellenas de estas arcillas de decantación. El agua subterránea fluía por aquellas zonas en las que la presión intersticial era mucho menor; es decir, los conductos kársticos, y la continua circulación de agua producía la disolución de la roca carbonatada, por lo que las partículas insolubles presentes en la caliza (mayoritariamente arcillas) quedaban como residuo en los propios conductos.

Este factor es de vital importancia, pues tanto el agua como la arcilla presentan resistividades muy bajas; algunos valores comunes para la arcilla según diferentes autores son: 1-20  $\Omega$ ·metro (Everett, 2013); de 1 a  $10^2$   $\Omega$ ·metro (Lowrie y Fichtner, 1997); aproximadamente entre 1-100  $\Omega$ ·metro (Mussett y Khan, 2000). En consecuencia, los métodos que se centran en la resistividad del terreno ofrecían mucho potencial de aplicación. Al ponerlos en práctica, se pueden delimitar o acotar las zonas con resistividades bajas, en contraposición de las zonas con mayor resistividad que corresponderían a rocas con mayor contenido en carbonato. Unido a ello, las zonas con mayor alteración de la roca también pueden demarcarse con este método, dado que se pueden relacionar a zonas más fracturadas y por tanto con mayor porosidad secundaria y mayor contenido en agua. Así pues, se consideró que el método de tomografía eléctrica de resistividad podía resultar eficiente y ofrecer los resultados esperados.

## 1.2 Antecedentes

Este trabajo se ha realizado con los datos e información obtenida por parte de la empresa *TerraDat Geophysics S.L.*, enmarcada dentro del proyecto SMARTMINING que ha sido financiado por la convocatoria europea MINE.THE.GAP. Se trata de un proyecto europeo destinado a PYMES orientadas al sector de la minería y las materias primas, con el propósito de plantear nuevos proyectos, propuestas y soluciones para la digitalización, mejora sostenible y lograr una cadena circular.

En esta convocatoria participaron tres empresas. *Cantera Lacilla S.L.* proporcionó el lugar y las instalaciones donde se desarrolló el estudio. *about GmbH* se encargó de monitorizar y analizar los patrones de la maquinaria móvil, con el objetivo de crear conductas o rutas que optimizasen el tiempo de trabajo en la instalación. Por último, *TerraDat Geophysics S.L.* aportó la información y los modelos geológicos y geofísicos obtenidos mediante la exploración minera no invasiva. Entre los objetivos principales, destacó la integración de toda la información en un modelo de trabajo eficiente, tratando de mejorar la seguridad y sostenibilidad de la explotación.

La totalidad de los datos geológicos y geofísicos presentados en este Trabajo de Fin de Máster corresponden a una parte de los datos obtenidos por la empresa *TerraDat Geophysics S.L.* en el marco del citado proyecto. El estudio geológico-geofísico se desarrolló en cantera Lacilla, cuyos responsables han concedido el permiso para hacer pública la información obtenida. El presente trabajo se centra fundamentalmente en la caracterización geológica y en la aplicación del método de tomografía eléctrica.

## 1.3 Objetivos de investigación

El objetivo fundamental de este estudio es la caracterización geológica de las calizas objeto de interés minero mediante el análisis del macizo rocoso en profundidad y a través del uso de técnicas geofísicas como herramienta principal. De este modo, analizando factores como el grado de alteración, el contenido en arcilla o incluso la presencia de cavidades kársticas, se pretende acotar las zonas en las que existan evidencias de que la calidad litológica es inferior al estándar requerido en la explotación. De acuerdo con ello, desde la cantera tendrían la posibilidad de establecer un orden de prioridad de las zonas que tienen planeado explotar en un futuro próximo: considerando la información obtenida acerca de las zonas con mayor calidad o pureza de la roca, es posible gestionar de la mejor forma posible los diferentes pedidos que pueda tener la cantera (encargos con unas especificaciones concretas de contenido en  $\text{CaCO}_3$ , otros en los que no importe incluir un pequeño porcentaje de material con algo de contenido en arcilla, etc.), optimizando por tanto el tiempo, el empleo de explosivos y el material a explotar.

Asimismo, se pretenden verificar los beneficios que puede aportar la prospección geofísica en contextos análogos, ya que en el ámbito minero tiene aplicación directa no solo durante la fase de exploración sino también durante la fase de explotación de un proyecto.

## 2 Contexto geográfico y geológico

### 2.1 Contexto geográfico

En la región que se extiende desde Bilbao hasta Cantabria se ha desarrollado una intensa actividad minera durante siglos. Existen numerosos y diversos yacimientos que han sido estudiados en detalle. Se trata de una zona con una larga historia minera, constatándose con indicios romanos (Herrera, 2009) hasta convertirse durante el siglo XIX en un importante núcleo industrial.

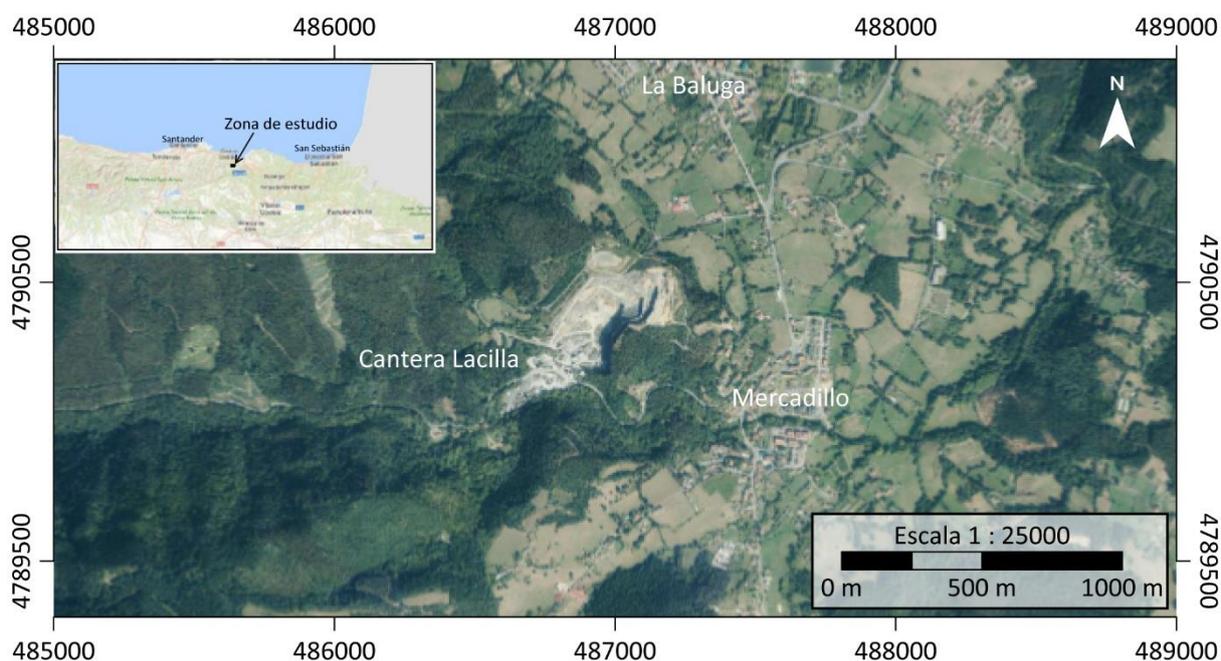
La mayoría de las mineralizaciones de hierro se ubican en las calizas urgonianas que afloran en la cantera objeto de estudio. Su génesis se relaciona con fluidos hidrotermales que favorecieron la precipitación mineral en fallas (Robles, 2014) durante el Aptiense, cuando se produjo la migración de fluidos calientes cargados en Fe y Mg que, al reaccionar con los niveles carbonatados, también reemplazaron el carbonato cálcico por siderita (Gil Crespo *et al.*, 2014). Otras mineralizaciones que también han sido explotadas (Zn-Pb-Fe) aparecen con multitud de morfologías: reemplazamientos masivos, diseminaciones, venas epigenéticas o encajadas en carbonatos estratiformes interestratificados con sedimentos detríticos y que se asocian a un origen sedimentario exhalativo (Fernández-Martínez y Velasco, 1996). A pesar de que muchos de estos yacimientos se han encontrado estratigráficamente en las mismas rocas que se explotan en la cantera, en esta no se observan mineralizaciones.

La explotación donde se ha realizado el estudio geofísico que se presenta en esta memoria se ubica en el entorno de Sopuerta, una localidad que pertenece a la comarca de las Encartaciones, situada en la parte oeste de la provincia de Vizcaya (País Vasco) (Fig. 1). Durante el siglo XX esta zona fue uno de los núcleos mineros más relevantes de Vizcaya, siendo posible hoy en día encontrar antiguas instalaciones mineras: líneas de ferrocarril, oficinas, viviendas de mineros, ferrerías, etc. En las inmediaciones de esta localidad, aún quedan dos grandes hornos de calcinación de la pretérita mina Santa Catalina. Además, con el objetivo de no perder todo el legado que ha dejado la minería, se fomentó la creación del museo de la minería del País Vasco en Gallarta, cercano a Sopuerta, en el que se puede descubrir la historia minera local y regional.

Actualmente no quedan explotaciones que se dediquen a la extracción de hierro, al haber cesado su actividad mayoritariamente en los años 1960 y 1970. La principal actividad minera que se concentra en esta comarca se focaliza en la extracción de las calizas del urgoniano, ya sea con el objetivo de comercializarla como roca ornamental o bien destinada a machaqueo para comercializarla como árido. Prueba de ello son las diferentes explotaciones que existen cerca de la cantera estudiada:

- Cantera Galdames, en la que se explota caliza y se oferta para la producción de hormigón estructural, obras de escollera o fabricación de cemento.

- Cantera Caliza Elejalde, donde se extrae una caliza margosa. Se ofertan soluciones constructivas y decorativas en fachadas, interiores o pavimentos con todo tipo de acabados.
- Cantera del Santullán, en la que se explota un paquete de unos 300 metros de calizas urgonianas. Los materiales que ofertan son calizas micríticas y bioclásticas con contenido medio de  $\text{CaCO}_3$  mayor al 98%. Ofertan áridos de diferentes granulometrías ya sea para construcción o para aplicaciones industriales.
- La cantera Ventalaperra, donde se explotan dos niveles de calizas, uno con una alta pureza en carbonato cálcico (98%) y otro con un componente silíceo (15% de sílice). Producen áridos a nivel industrial para la elaboración de hormigón y obra civil.



**Figura 1.** Situación de la Cantera Lacilla (Sopuerta, País Vasco). Ortofoto fechada en 2022 tomada del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, Instituto Geográfico Nacional de España.

La cantera se sitúa en una zona con relieve montañoso con cotas que oscilan entre los 100 y 350 metros. Predominan los ríos de trazado norte-sur, siendo el cauce del Bilochi el más importante de la zona. El clima es húmedo, estando influenciado por la cercanía a la costa. Los inviernos son suaves y los veranos frescos, y durante el transcurso del año la temperatura suele variar entre 4° y 23° C, aunque es muy infrecuente bajar de los 0° C o sobrepasar los 28° C. Se dan abundantes lluvias durante gran parte del año e incluso nieve en invierno en cotas elevadas. Según los datos obtenidos en la estación meteorológica cercana a Sopuerta, a una altitud de 177 msnm, la temperatura media anual es de unos 12° C y el promedio mensual de precipitaciones es de 54 mm. Estas condiciones dan pie a que exista una abundante y tupida cubierta vegetal compuesta mayoritariamente por bosques mixtos de coníferas y caducifolias (robles y hayas) que dificultan ligeramente la geología; sin embargo, la cantera es un sitio extraordinario como afloramiento.

La explotación, denominada “Lacilla” y en cuyas instalaciones se ha desarrollado este trabajo (Fig. 2), pertenece a la empresa Cantera Lacilla S.L. Su principal actividad económica es la extracción, trituración y clasificación de árido de machaqueo, produciendo áridos de litología caliza cuyos principales usos se dan en sectores industriales, obra civil o edificación.



**Figura 2.** Ortofoto de detalle de la Cantera Lacilla, adquirida por la propiedad de esta.

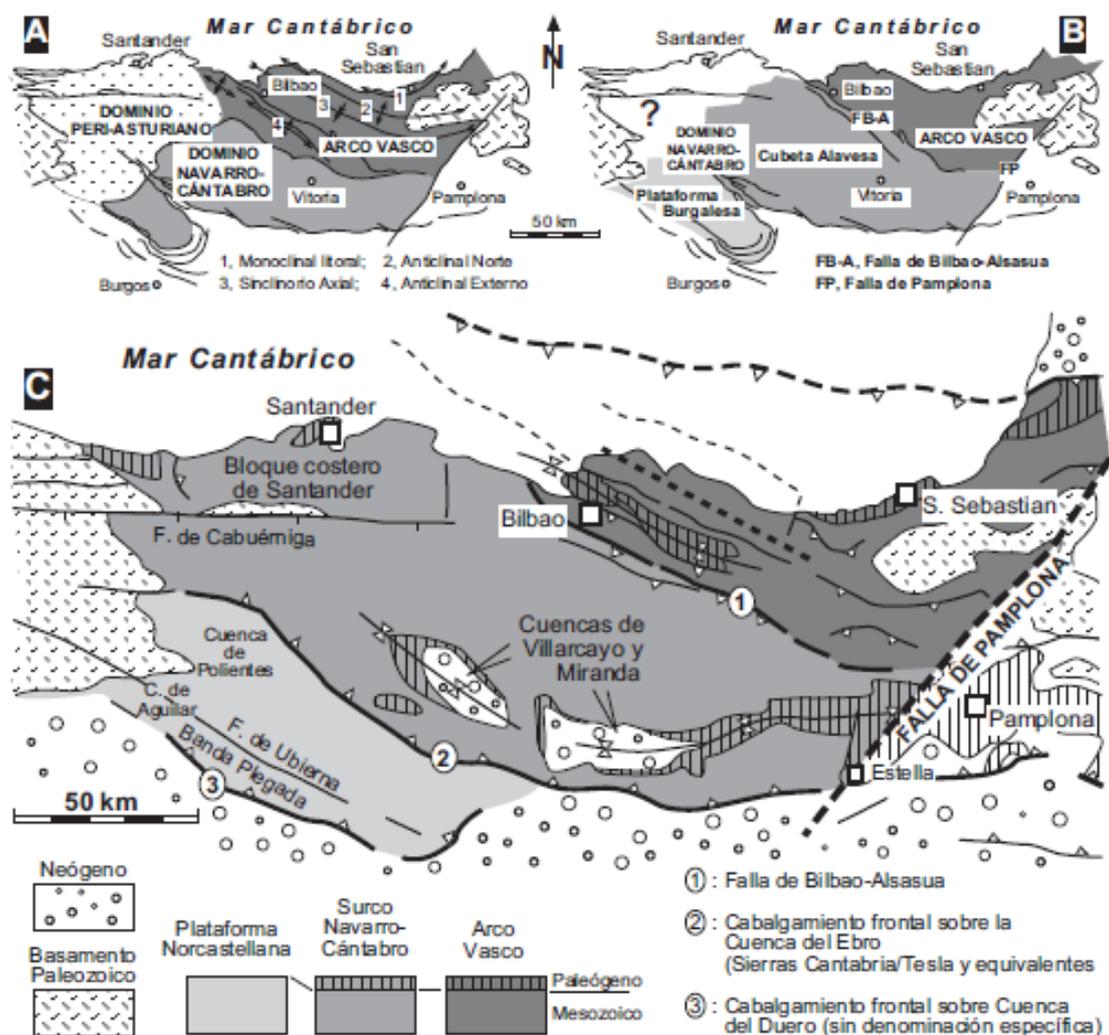
## 2.2 Contexto geológico

La zona donde se ha realizado el presente estudio se ubica en la denominada Cuenca Vasco-Cantábrica, cuenca de gran extensión geográfica y cuya superficie comprende aproximadamente la zona norte de las provincias de Burgos y Palencia, País Vasco, Cantabria, y la zona oeste de Navarra. Su límite geográfico en la parte Este se considera la falla de Pamplona, mientras que en la zona Oeste se sitúa en el contacto con los materiales del Macizo Asturiano. Respecto a las divisorias Norte y Sur, corresponden a los frentes de cabalgamiento sobre el macizo de las landas y sobre las cuencas del Duero y del Ebro, respectivamente (Robles, 2014).

La Cuenca Vasco-Cantábrica pertenece al conjunto pirenaico, con una historia de más de 200 millones de años (Rat, 1988). Tradicionalmente, según el trabajo de (Feuillée y Rat, 1971) se ha dividido en tres dominios atendiendo a criterios estratigráficos y estructurales. Posteriores trabajos de diferentes autores como Serrano y Martínez del Olmo (1990) o Barnolas y Pujalte (2004), han modificado ligeramente la nomenclatura y los límites de las diferentes subdivisiones teniendo en cuenta diferentes criterios. La figura 3 ilustra las principales divisorias de la cuenca y la subdivisión de esta según el criterio de los autores citados.

En esta memoria se adoptará la división propuesta por Barnolas y Pujalte (2004). La plataforma Norcastellana representa la zona de la cuenca con menor potencia de sedimentos, formada por materiales fundamentalmente continentales y que se encuentran apreciablemente deformados. En el dominio conocido como Arco Vasco se dieron condiciones de fuerte subsidencia generando mucho espacio de acomodación y permitiendo el depósito de una gran serie mesozoica. Destacan las series del Cretácico superior y del Terciario por su gran espesor, relacionadas con surcos sedimentarios profundos (Rat, 1988). Estructuralmente, es un arco asimétrico, pues su rama oriental tiene unas dimensiones notablemente inferiores a la occidental (Cuevas, 1999). Además, existen numerosas estructuras que se pueden relacionar con antiguas fallas sinsedimentarias; algunas se han reactivado como cabalgamientos y otras han funcionado como fallas de desgarre en función de su orientación con respecto al esfuerzo compresivo principal (Cuevas, 1998). Por último, el Surco Navarro Cántabro se caracteriza por alcanzar una fuerte subsidencia que se compensó con el abundante aporte de sedimentos, evitando que se llegasen a dar condiciones marinas profundas. Aun así, se aprecia una notable evolución de facies desde carácter marino abierto en la parte limítrofe con el Arco Vasco hasta facies litorales en su límite con la plataforma Norcastellana.

Por otro lado, estratigráficamente, la Cuenca Vasco-Cantábrica se caracteriza por una potente serie de materiales mesozoicos que se apoyan sobre el basamento paleozoico plegado y deformado; aunque en esta cuenca, realmente, aparecen materiales que engloban un registro temporal muy amplio, desde el Pérmico superior hasta el Mioceno (Robles, 2014). Su configuración sedimentaria e historia geológica se encuentra ligada a grandes eventos tectónicos como son la apertura del golfo de Vizcaya o el choque de las placas ibérica y europea y la formación de los Pirineos (Rat, 1988).



**Figura 3.** Esquema de división de la Cuenca Vasco-Cantábrica: (A) Según Feuillee y Rat (1971); (B) según Serrano y Martínez del Olmo (1990); (C) Barnolas y Pujalte (2004b). Tomado de Barnolas y Pujalte (2004).

Respecto al espesor de sedimentos acumulado, varía según los estudios de diferentes autores. Según Robles (2014a), el fuerte proceso extensional que sufrió la Cuenca Vasco Cantábrica pudo ser suficiente para que se acumulasen hasta 18 km de sedimento. En toda esta potente serie estratigráfica destaca el complejo urgoniano correspondiente al periodo Cretácico, con potencias máximas del orden de 10.000 m debido en gran parte a un tectonismo sinsedimentario importante (Fernández Mendiola, 1987), lo que permitió que se alcanzasen condiciones marinas profundas en la mayor parte de la Cuenca Vasco Cantábrica (Quintana, 2012). Es importante destacar también la diferencia de espesor entre diferentes partes de la cuenca a la que hacen referencia autores como Espina (1994), quien afirma que los procesos extensionales han supuesto diferencias de espesor de hasta 7.000 m.

Las fallas y pliegues, así como el apretamiento de estos, aumentan de oeste a este, pudiendo diferenciar tres sectores atendiendo a los cambios laterales de deformación: central-suroccidental, oriental y occidental. Tanto en la zona central como en la suroccidental predominan estructuras con orientación NO-SE y apenas aparecen estructuras transversales. Por otro lado, en la zona oriental existe mucha más variabilidad en cuanto a orientaciones: SO-NE en la zona septentrional y O-E en su parte meridional. El último sector coincide con el bloque costero de Santander (Quintana, 2012). Los sectores estructurales se ilustran en la figura 4, en la que se ha marcado con un punto negro la cantera estudiada, ubicada en el sector con predominio de orientaciones NO-SE.



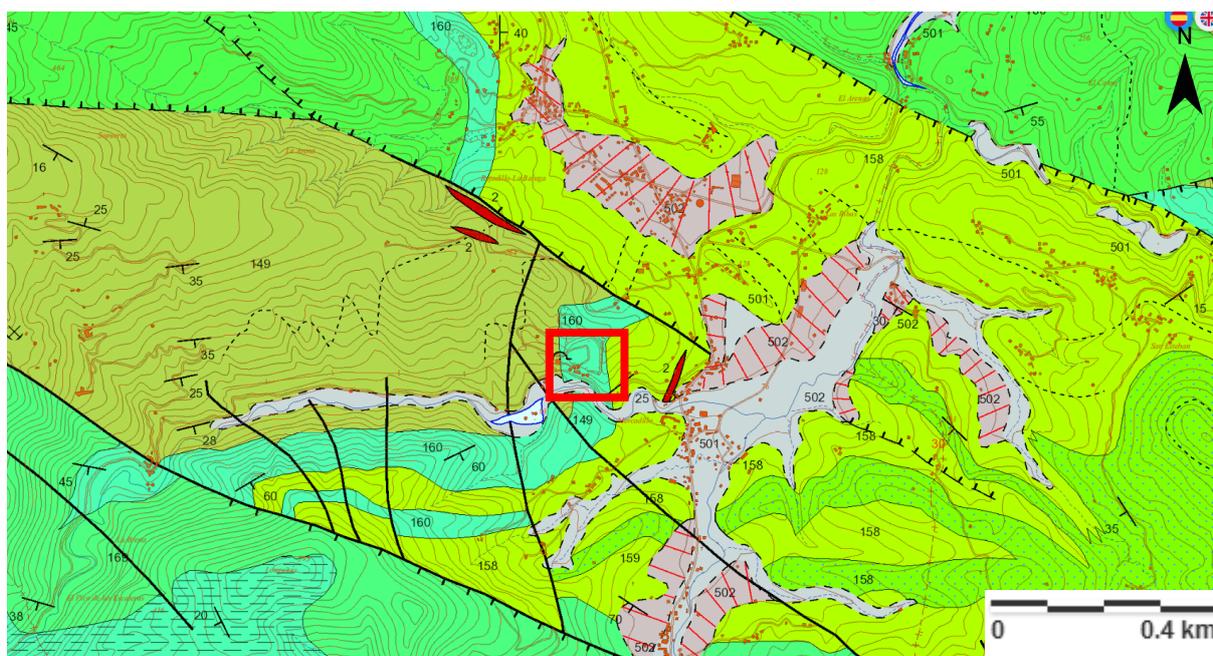
**Figura 4.** Divisiones y subdivisiones menores de la zona Vasco-Cantábrica (Barnolas y Pujalte, 2004). Límites de los sectores con diferentes orientaciones estructurales (líneas rojas discontinuas) Tomado de Quintana (2012). Se ha marcado con una estrella negra la ubicación aproximada de la zona de estudio del presente trabajo.

La historia geológica de la Cuenca Vasco-Cantábrica se puede describir de forma muy sintética en una cuenca extensional cuyas fallas normales se reactivaron como inversas durante la Orogenia Alpina, además de la consecuente generación de pliegues. Se reconocen dos eventos extensionales mayores de edades Triásico-Jurásico medio y Jurásico superior-Paleógeno inferior, aunque el que realmente configura la cuenca es el evento extensional intramesozoico (Hernaiz *et al.*, 1994). En este momento durante el Aptiense-Albiense se dieron las condiciones necesarias para que un complejo sistema de fallas controlase la sedimentación (García Mondéjar, 1996). La compresión terciaria posibilitó la reactivación de las fallas normales como inversas causando la inversión tectónica (Hernaiz *et al.*, 1994).

La serie estratigráfica en la zona de estudio comprende materiales cretácicos, representados por la facies Weald, las calizas urgonianas, y el complejo supraurgoniano compuesto por areniscas, lutitas y finalmente margas y margocalizas. El complejo Purbeck-Weald se diferencia de los materiales por debajo y por encima de la serie estratigráfica, cuyas características son de medios marinos. Compuesto por materiales detríticos y en su mayor parte continentales, se

encuentran grandes diferencias de espesor debidas a la presencia de subcuencas con comportamiento independientes (Rat, 1988). Seguidamente, se produjo la transgresión urgoniana (Rat, 1988), y es durante el Aptiense-Albiense cuando se alcanza la mayor subsidencia, dando como resultado las calizas de plataforma en facies urgoniana y las margas de cuenca (Quintana, 2012). La acción de fallas extensionales muy activas causó una marcada subsidencia diferencial generando diversos ambientes y facies, entre los que destacan las plataformas carbonatadas bien desarrolladas (Rosales, 2001). Constan principalmente de calizas masivas con rudistas, margas y margocalizas, brechas calizas, conglomerados silíceos, areniscas y lutitas (García Mondéjar y Robador, 1986-1987). Finalmente, el complejo supraurgoniano comprende la fase post rift. Supone el cese de la extensión y su depósito representa el relleno de la cuenca (Quintana, 2012). Compuesto por unidades terrígenas propias de ambientes marinos someros (Mediato *et al.*, 2009).

En la figura 5 se muestra la cartografía geológica a escala 1:50.000 de la zona de estudio elaborada por el Instituto Geológico y Minero de España, en la que se ha indicado la ubicación de la cantera.



**Figura 5.** Mapa geológico regional de la zona donde se encuentra la cantera. La cantera se localiza donde se ha marcado el rectángulo rojo. Tomado del Mapa Geológico Continuo del Instituto Geológico y Minero de España.

La configuración estructural del sector donde se ubica la zona de estudio destaca por la presencia de estructuras con orientación NO-SE, como pueden ser el pliegue anticlinal sobre el que se localiza la cantera o las diferentes fallas cartografiadas en el mapa geológico (Fig. 5). La citada orientación coincide con el sector estructural definido en la figura 4 para la ubicación geográfica de la cantera.

Las calizas que se explotan en la cantera pertenecen al complejo urgoniano y son de edad Aptiense (Perconig y Ortiz Ramos, 1975). El término urgoniano, que es como se llama a estas calizas, lo definió ya en 1850 D'Orbigny cuando se refirió a la facies particular de caliza depositada durante el Barremiense-Aptiense en el margen septentrional del mar Tethys, con sección tipo en Provenza, dándole nombre (Bodego y López Horgue, 2014). Tanto en la parte basal como hacia techo, pasan gradualmente a las formaciones inferior y superior, aumentando el contenido detrítico. A pesar de la gran variedad de litologías que aparecen en el complejo urgoniano, Perconig y Ortiz Ramos (1975) distinguen tres tramos basándose en criterios microscópicos: un tramo inferior con calizas arenosas y calizas microbrechoides con cristales de cuarzo subangular y abundantes restos fósiles; un tramo intermedio compuesto por calizas criptocristalinas recristalizadas con abundante fauna fósil; y por último el tramo superior de calizas arenosas con cristales de cuarzo, calizas brechoides y calizas criptocristalinas recristalizadas, además de restos fósiles.

Las calizas se presentan en una serie bien estratificada en la que se alternan ocasionalmente delgadas capas de margas y areniscas. Hacia la parte basal de la formación aumenta el contenido detrítico, pues el paso a la hacia la unidad infrayacente se produce de forma gradual. Hacia la parte superior tampoco puede observarse una transición neta, pasado gradualmente a la formación margoarenosa superior (Perconig y Ortiz Ramos, 1975).

Entre la abundante fauna fósil que se puede encontrar en estas calizas, destaca un grupo de moluscos extinto por su facilidad de reconocerlos en campo: los rudistas; entre los que abundan los requienidos y los policonitidos. A pesar de que realmente no formaban verdaderos arrecifes, construyeron sistemas biosedimentarios caracterizados por potentes bancos carbonatados sobre fondos detríticos en zonas someras con corrientes de no demasiada energía (Bodego y López Horgue, 2014). Tradicionalmente se han llamado calizas de "Toucasia" por la abundancia de esta especie de Rudistas en las calizas.

Respecto a la génesis de las calizas urgonianas, pueden ubicarse en ambientes de clima tropical en el que predominan aguas de temperaturas altas y abundantes precipitaciones, relacionándose con antiguos edificios arrecifales (Damas Mollá *et al.*, 2014), dando como resultado depósitos carbonatados formados por calizas micríticas con biohermes y biostromas de rudistas y corales, junto con miliólidos, orbitolínidos, chondrodontas, gasterópodos y algas calcáreas (Robles *et al.*, 2014)

Durante la historia geológica de estas calizas, fueron evidentes los procesos diagenéticos que sufrieron debido a la presión litostática de la columna de sedimentos suprayacente, alcanzando condiciones de presión y temperatura considerable que confirieron a los sedimentos carbonatados unas características apreciables de resistencia (Damas Mollá *et al.*, 2014). Las facies de las calizas urgonianas se han utilizado desde hace mucho tiempo como roca ornamental, siendo quizás las más conocidas las denominadas Calizas de Ereño (Rojo Ereño o Rojo Bilbao) y las Calizas de Markina o Negro Markina (Robles *et al.*, 2014).

### 3 Metodología

#### 3.1 Caracterización geológica

En primera instancia se realizó una revisión bibliográfica. Comprendió aspectos tales como la recopilación de trabajos acerca de la geología local y regional o la consulta de los mapas geológicos disponibles de la zona que se debía cartografiar. Tras contextualizar geológicamente la zona, se llevó a cabo el estudio geológico de campo.

Entre las labores desarrolladas en el campo se incluye el análisis de las diferentes unidades estratigráficas. Se examinaron y describieron las características de las diferentes litologías presentes en la zona centrándose en aspectos como la composición, el color o la presencia de fósiles, entre otros. La recopilación de datos en campo prosiguió con la toma de datos estructurales de las diferentes unidades geológicas diferenciadas (estratificación, fallas, estrías de falla, etc.) y la realización de pequeños esquemas o cortes para ayudar en la interpretación. En su caso, se analizaron la dirección de movimiento de las fallas de acuerdo con los escalones de recristalización y se estudiaron las cavidades kársticas accesibles (Fig. 6). Se prestó especial atención a aquellas zonas en las que la roca se encontraban más alterada o fracturada y a aquellas zonas en las que la roca se presentaba más sana, determinando el grado de alteración ISMR (1981).



**Figura 6.** De izquierda a derecha: escalones de recristalización en un plano de falla, detalle de un conducto kárstico y superficies de estratificación en un talud de la cantera.

Finalmente, el objetivo de la caracterización geológica ha sido plasmar toda la información obtenida en la cartografía geológica de la cantera y sus alrededores a escala 1:2.500 para representar y entender la distribución espacial de las rocas presentes en la cantera. Se presenta más adelante en el apartado de resultados.

### **3.2 Estudio mediante el método de tomografía eléctrica**

#### **3.2.1 Fundamentos del método eléctrico de resistividad**

La geofísica se basa en aplicar conocimientos y conceptos de la física a la investigación de la Tierra. El objetivo principal en cuestiones de ingeniería o medio ambiente es el análisis de los primeros metros a decenas de metros de profundidad del terreno; para ello, basta con enfocar y adaptar los métodos tradicionalmente usados en exploraciones regionales (Sharma, 1997).

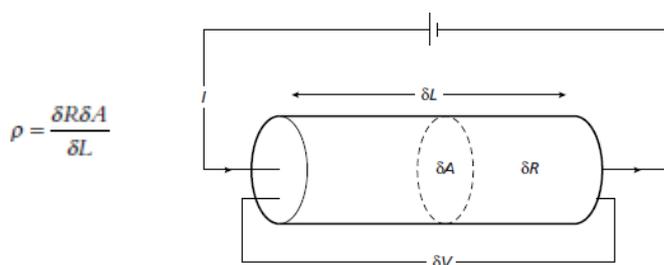
Dentro del campo de la prospección geofísica existe una gran variedad de métodos de investigación que se pueden englobar en dos grandes grupos. Por un lado, aquellos que se denominan pasivos se basan en el análisis de una propiedad física existente (como la gravedad o el campo magnético), para detectar y tratar de dar explicación a las perturbaciones y divergencias que se registran entre las observaciones y los resultados teóricos esperados. Por otro lado, se encuentran los métodos activos, que implican la generación de una señal artificial (ya sea sísmica, eléctrica, electromagnética, etc.) sobre el terreno para registrar su llegada mediante sensores en diferentes puntos, y de este modo estudiar cómo se propaga la energía generada a través del subsuelo. En ambos casos el objetivo es establecer la estructura y/o características del subsuelo.

Los métodos eléctricos cuyo objetivo ha sido prospectar el subsuelo han estado en uso desde el siglo XIX, desde los descubrimientos y los trabajos de Faraday y Maxwell (Butler, 2005). Se podría decir que los comienzos se remontan a la década de 1830, cuando Robert W. Fox comenzó a experimentar con corrientes naturales asociadas a sulfuros en Cornwall, Inglaterra (Burger, 1992), aunque su generalización se dio principalmente gracias a los trabajos de Schlumberger a partir de 1912 (Udías y Mezcua, 1997). Para algunos autores como Kearey *et al.* (2002), los trabajos que utilizan técnicas eléctricas se encuentran entre los métodos geofísicos más difíciles de interpretar debido a la compleja base teórica en la que se basan.

Existen métodos eléctricos pasivos que aprovechan la carga natural del terreno (como el potencial espontáneo), mientras que otros, de tipo activo, contemplan la inyección de corriente para analizar el subsuelo. Con alguna excepción menor, los métodos activos de prospección eléctrica se pueden dividir en aquellos que inyectan directamente corriente al terreno mediante electrodos y aquellos que, sin contacto directo, inducen corrientes en el terreno (Butler, 2005)

En este trabajo se ha escogido la tomografía eléctrica como método de investigación, que se basa en la medición de la resistividad del subsuelo. El método consiste en generar una corriente artificial que se inyecta en el terreno a través de electrodos (denominados de corriente) que se disponen según una geometría determinada. Al inyectar la corriente, se miden las diferencias de potencial resultantes entre otros dos electrodos en superficie (denominados de potencial). La intensidad de la corriente inyectada, el voltaje medido, y la geometría de los electrodos de medición, aportan información acerca de las propiedades eléctricas del subsuelo. Mediante procesos de inversión matemática es posible construir un modelo en el que se muestre la distribución de la resistividad en el subsuelo.

La resistividad se define como la resistencia que opone un material al paso de corriente eléctrica a través de sí mismo, que se mide en el SI en ohmio-metro ( $\Omega \cdot m$ ), siendo la conductividad (Siemens/metro) su inversa; o lo que es lo mismo, la resistividad es una medida de la facilidad con la que las rocas conducen la corriente eléctrica (Butler, 2005). La resistividad (“ $\rho$ ”) se puede expresar matemáticamente para un cilindro de resistencia “ $\delta R$ ”, longitud “ $\delta L$ ” y área de la sección “ $\delta A$ ” como (Fig. 7):



**Figura 7.** Relación matemática para calcular la resistividad y esquema que ilustra de donde se obtienen los diferentes parámetros que se consideran en la ecuación. Tomado de Kearey et al., 2002.

Esta fórmula teórica se puede aplicar a un material cuya resistencia sea uniforme en todo su volumen. Sin embargo, en la práctica, debido a la propia naturaleza heterogénea y anisótropa de los materiales geológicos, por norma general no se encuentra un terreno que mantenga los mismos valores de resistividad en toda su extensión y profundidad.

En ensayos desarrollados en un contexto de trabajo con un suelo de propiedades eléctricas heterogéneas, la resistividad medida por el equipo no equivaldrá a la resistividad real de cada uno de los materiales atravesados, sino que resultará en una resistividad media, dependiente de todos los materiales que sean afectados por la corriente eléctrica durante el ensayo. A esta resistividad medida se la denomina resistividad aparente, y se toma como base para la interpretación del estado del terreno (Orellana, 1972).

Para la medición de la resistividad eléctrica en campo, o resistividad aparente, se utiliza un dispositivo de cuatro electrodos. Dos de ellos, denominados de corriente, inyectan corriente continua de intensidad conocida en el terreno, mientras que en otros dos electrodos (de potencial) se mide la diferencia de potencial creada por dicha inyección (Udías y Mezcuá, 1997). Tradicionalmente, las técnicas más empleadas han sido el sondeo eléctrico vertical o las calicatas eléctricas; sin embargo, en los últimos años se ha generalizado el uso de la tomografía eléctrica debido a su mayor capacidad de adquisición de datos, al desarrollo tecnológico de los equipos, y a la mayor cantidad de datos que aporta sobre el terreno.

En un sondeo eléctrico se toma como referencia un punto central y se van separando los electrodos de manera equidistante según la distancia convenida. Conforme más alejados se encuentren, la corriente alcanzará mayor profundidad. La distancia de separación de electrodos varía sin mover el punto medio del dispositivo, por lo que se obtiene la distribución de la resistividad aparente en profundidad en una línea vertical (cuya posición es el punto medio establecido). En el caso de la calicata, se mantienen los espaciados y todo el dispositivo se desplaza lateralmente, obteniendo la distribución de resistividades a una profundidad constante

y estudiando las variaciones laterales en vez de en profundidad. Con ambos métodos se obtiene fundamentalmente un modelo 1D. Actualmente la tendencia es obtener información del terreno en 2D y 3D gracias al desarrollo de la adquisición multielectrodo, y a su tratamiento mediante algoritmos de inversión (Everett, 2013).

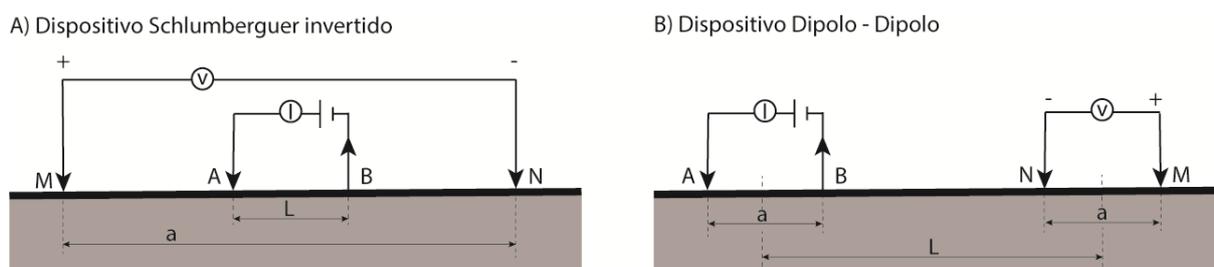
Los equipos que permiten realizar tomografías eléctricas constan de los cables de adquisición, los electrodos y el resistivímetro. Tras la instalación de los electrodos en la superficie del terreno, estos se conectan a los cables de registro. En última instancia, estos se conectan al resistivímetro. Una vez todo está preparado, el propio equipo controla en que electrodos se inyecta corriente y en cuales se registra la diferencia de potencial, por lo que se realizan automáticamente multitud de mediciones con diferentes combinaciones geométricas. Así se obtiene una mayor cantidad de datos que con otros métodos como el sondeo eléctrico vertical o la calicata, permitiendo obtener una sección bidimensional con la distribución de la resistividad en profundidad. Como en los métodos de resistividad comunes, la resolución y máxima profundidad de investigación alcanzada en la tomografía eléctrica depende de la separación y geometría de los electrodos (Lowrie y Fichtner, 1997).

Aunque el equipo disponga de un elevado número de electrodos, en cada medida de resistividad se utilizan cuatro electrodos de medida: dos de inyección de corriente y dos que miden la diferencia de potencial generada entre dos puntos. Los cuatro han de estar posicionados según una geometría determinada para cada medida, ya que las distancias entre ellos determinan el punto exacto del subsuelo en el que se está registrando la resistividad. Gracias al uso de equipos con múltiples electrodos, es posible realizar cientos de combinaciones geométricas de electrodos, por lo que durante el tiempo de adquisición se pueden obtener medidas de la resistividad del terreno en multitud de puntos del subsuelo. Así se consigue una pseudosección de resistividad aparente con valores XYZ, donde la distancia horizontal y la altitud representan las coordenadas espaciales, mientras que la resistividad eléctrica se representa como el valor correspondiente en cada punto de la pseudosección. Posteriormente a la creación de la pseudosección de resistividad aparente, esta se somete a un proceso de inversión mediante un algoritmo integrado en una aplicación informática. Gracias al proceso de inversión es posible calcular una sección de resistividad del terreno, donde se puede interpretar las características geológicas del mismo.

Previamente a la toma de datos en campo, se debe considerar el espaciado entre electrodos. Según las distancias que se tomen para la separación de estos, existen numerosas configuraciones de medida: como Wenner, Schlumberger o Dipolo-Dipolo. La distribución espacial que se da a los electrodos en el campo condiciona el resultado, pues cada configuración presenta diferentes ventajas, ya sea alcanzando mayor profundidad u obteniendo mayor resolución lateral.

El presente estudio se ha llevado a cabo utilizando dos configuraciones de medida: Dipolo-Dipolo y Schlumberger invertido. Se ha escogido el dispositivo Dipolo-Dipolo por las ventajas que ofrece en cuanto a profundidad alcanzada y a su resolución lateral. Sin embargo, en ciertas

ocasiones y debido a la menor intensidad de señal generada, esta medición puede verse afectada negativamente por heterogeneidades subsuperficiales, lo cual puede generar ciertas incertidumbres e los resultados finales. Por este motivo se optó por el dispositivo Schlumberger invertido como configuración adicional. En este caso, la resolución lateral de la medición es menor, pero la intensidad de la señal eléctrica generada es mayor, reduciendo en mayor grado la calidad del ensayo en zonas complejas. En la figura 8 se presenta el esquema de medida de las dos configuraciones de medida elegidas.



**Figura 8.** Configuraciones de medida, siendo A y B los electrodos de corriente y C y D los de medida de voltaje: (A) Configuración Schlumberger invertido y (B) Configuración Dipolo-Dipolo.

La puesta en práctica de la tomografía eléctrica es amplia, lo que la convierte en una técnica de estudio con gran interés para abordar una amplia variedad de problemáticas. Entre sus usos prácticos, cabe destacar las aplicaciones relacionadas con la evaluación del nivel freático y la presencia de agua subterránea (Butler, 2002), dado que la conductividad eléctrica de las rocas se ve fuertemente afectada por la cantidad de agua con sales en disolución (Udías y Mezcua, 1997). La matriz sólida de una roca no suele ser conductiva (con notables excepciones de materiales metálicos o ciertos materiales arcillosos, que son conductores); sin embargo, la porosidad de las rocas condiciona la conductividad eléctrica de los materiales geológicos debido a la presencia de iones disueltos en los fluidos presentes en los poros (Everett, 2013). Por este motivo, muchas rocas conducen la electricidad electrolíticamente en vez de por procesos electrónicos; siendo la porosidad el factor que mayor control tiene de la resistividad de las rocas (Kearey *et al.*, 2002). La temperatura también juega un papel importante, ya que la conductividad aumenta progresivamente a medida que la temperatura se eleva. Además, existen otros factores que pueden influir en la resistividad de las rocas, como pueden ser la permeabilidad o la geoquímica de los fluidos, entre otros.

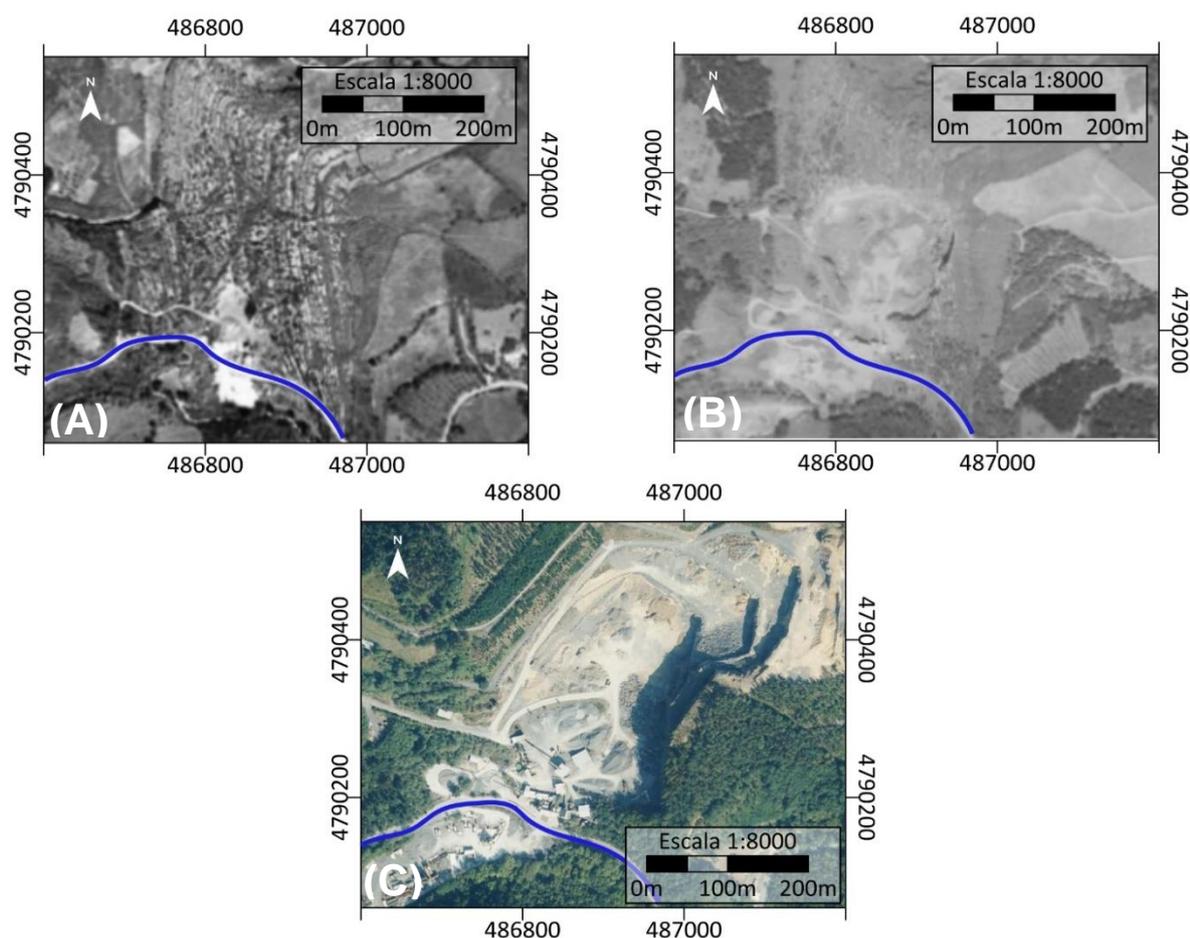
Así, las principales aplicaciones se centran en cartografiar rocas con diferentes porosidades en relación con su función hidrogeológica (Mussett y Khan, 2000). También es útil para identificar discontinuidades horizontales y verticales en las propiedades eléctricas del terreno, así como en la detección de cuerpos tridimensionales que presenten anomalías de conductividad eléctrica (Kearey *et al.*, 2002), aunque también se ha utilizado para cartografía geológica poco profunda, para caracterizar fallas, túneles o cavidades kársticas (Butler, 2002).

### 3.2.2 Desarrollo de la investigación geofísica

#### i) Planificación de la campaña

Para un primer planteamiento del trabajo se realizó una visita preliminar a la explotación, que ayudó a estructurar y organizar las ideas iniciales, a analizar el potencial de actuación y a reflexionar acerca de cómo optimizar el desarrollo de los ensayos de tomografía eléctrica. En esta primera toma de contacto también se identificaron en campo las diferentes características y diversos factores que se consideraron relevantes para abordar el estudio geológico-geofísico. De este modo, fue de utilidad observar in situ algunas propiedades del macizo rocoso y de la propia roca que se consideraron fundamentales a la hora de plantear la geofísica, como las discontinuidades presentes en el macizo o la evidente presencia de cavidades kársticas.

Centrando la atención en la cantera y sus alrededores, se revisaron bases de datos de fotografías aéreas históricas para tratar de evaluar la evolución temporal en sus diferentes etapas de producción. En la figura 9 se pueden apreciar tres fotos de diferentes épocas, en las que se puede ver el estado de la cantera en cada momento.



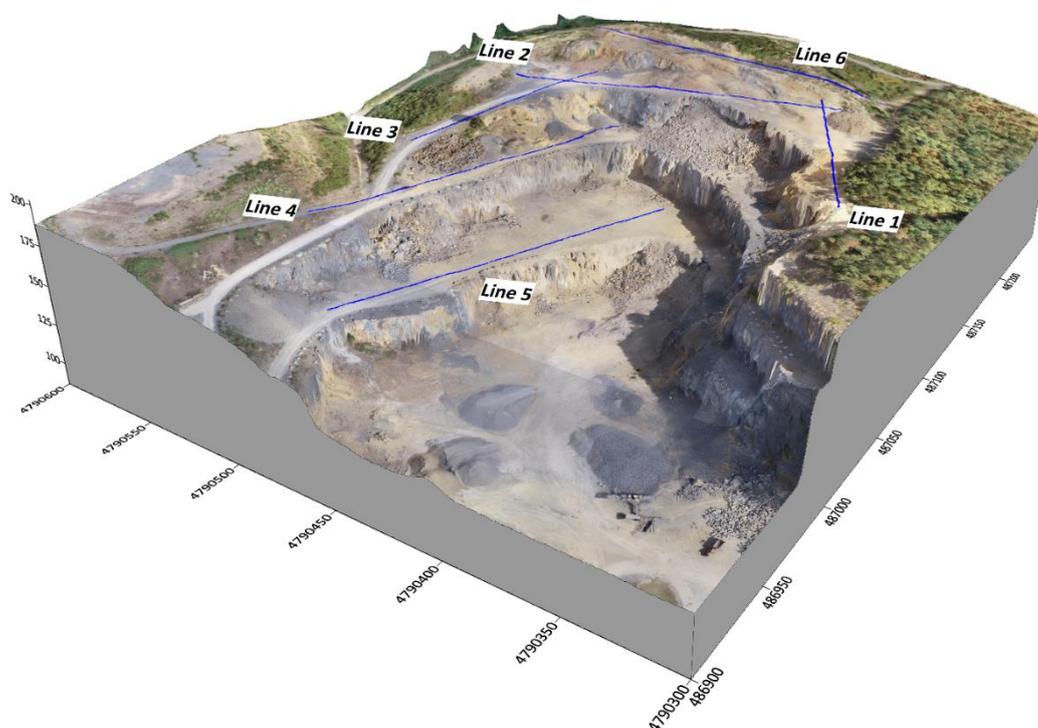
**Figura 9.** Imágenes de Satélite en diferentes épocas de explotación de la cantera: (A) Vuelo americano (1956-1957). (B) Vuelo nacional (1981-1986). (C) Ortofoto PNOA 2022. En las 3 ortofotos se ha marcado con una línea azul carretera principal. Tomado del Centro Nacional de descargas del Instituto Geográfico Nacional.

Además de la parte geológica, geofísica e histórica, también fue de interés conocer el funcionamiento logístico de la cantera. Se examinaron aspectos como el método de extracción de la roca o su primer procesado y se observaron los diferentes procesos que seguían en la cantera desde que la roca que aflora en el talud se moviliza hasta que es preparada para el transporte en camiones.

Con una visión más concreta, se debatieron los parámetros y la geometría de adquisición con mayor potencial de aplicación para enfocarlos hacia las zonas más problemáticas o hacia aquellas en las que existía menos información y menor control litológico de la propia roca. Con ello, se propuso focalizar el estudio hacia las zonas más desconocidas, contribuyendo a la caracterización del macizo rocoso para facilitar la extracción y optimizar la explotación. Toda la información adquirida y todos los datos recopilados hasta este momento contribuyeron a una mejor y más completa planificación general del mismo. De este modo, se pudo organizar y planificar el procedimiento que se iba a seguir durante el estudio.

Para el diseño de la campaña de tomografía eléctrica se propusieron 6 posibles líneas para los perfiles de eléctrica. Sobre la topografía de referencia se plasmaron diferentes emplazamientos variando la geometría, la longitud total y el espaciado entre electrodos. Cuanto más larga se proyecte una línea más información se obtiene en profundidad, por lo que se intentó optimizar el espacio disponible para obtener la máxima cantidad de información posible.

Durante la campaña de adquisición se realizaron 6 líneas de tomografía eléctrica, cuya ubicación final se presenta en la figura 10.

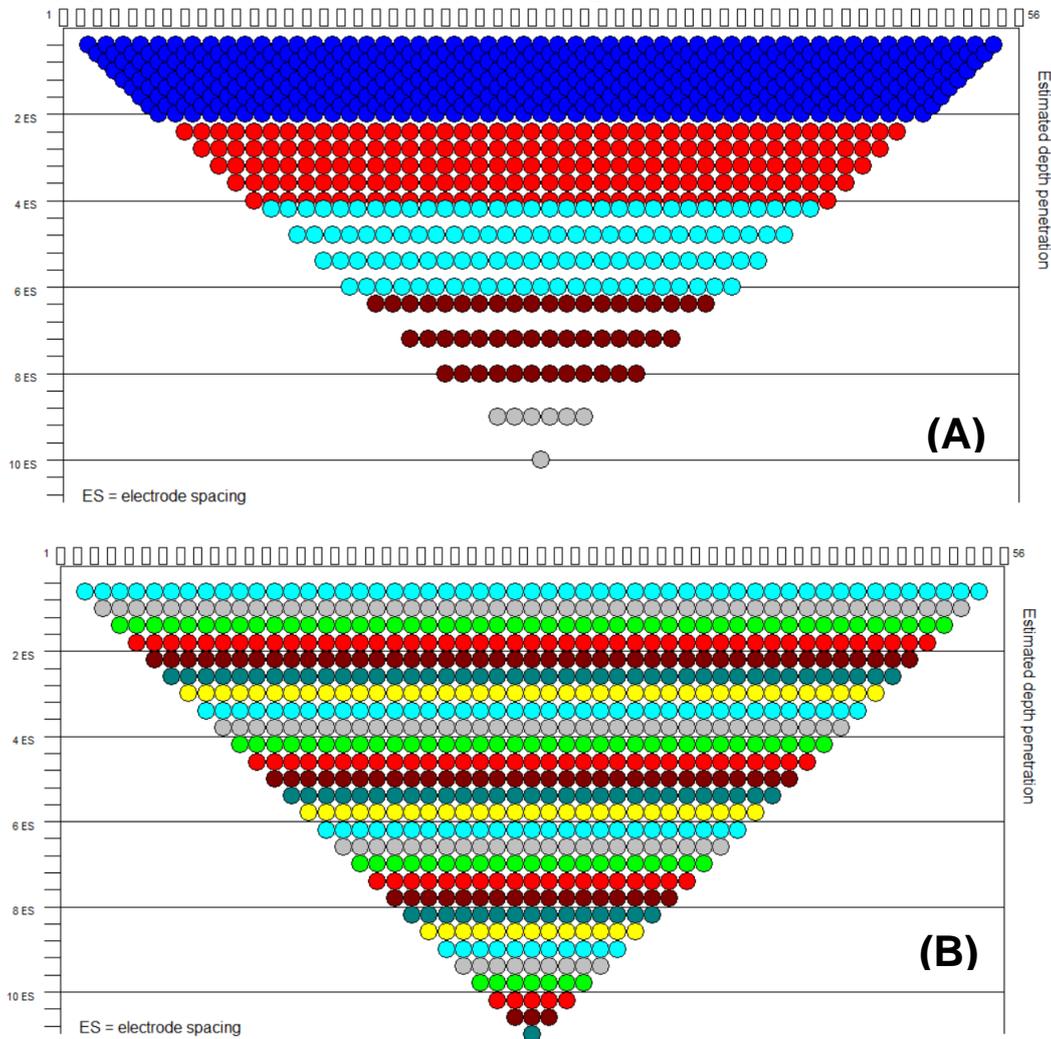


**Figura 10.** Modelo 3D de la cantera. En azul, líneas geofísicas de tomografía eléctrica realizadas.

En lo referente a la preparación del trabajo topográfico, se importaron las coordenadas propuestas durante la fase de planificación al software de la tableta de control del GPS para disponer de referencias sobre dónde ubicar las líneas de investigación durante la campaña de campo.

Por último, en el programa de procesado de tomografía eléctrica se definieron y configuraron los dos comandos Dipolo-Dipolo y Schlumberger Invertido que se ejecutaron en campo durante la adquisición. Se prepararon con el software *AGISSADMIN* del fabricante *AGI (Advanced Geosciences Inc.)*, donde se configuró el procedimiento de inyecciones de corriente y medidas de potencial a seguir durante la adquisición de datos, y el número de electrodos a utilizar (56).

El esquema de medida de cada comando utilizado en campo se muestra en la figura 11, donde se representan con rectángulos blancos la posición de los 56 electrodos y con círculos de colores el punto exacto del subsuelo donde se registra el dato de resistividad aparente. Aunque la profundidad no deja de ser aproximada, está condicionada por la distancia entre electrodos y por tanto el eje vertical viene dado en función del espaciado.



**Figura 11.** Esquema de los comandos: (A) Dipolo-Dipolo y (B) Schlumberger invertido.

## ii) Adquisición de datos

Respecto a la localización exacta de las líneas geofísicas y al lugar de emplazamiento de los sensores, cabe destacar el trabajo relacionado con la topografía. Previamente a la campaña de campo se implementaron en el software de la tableta de control del GPS la localización de las líneas propuestas durante la etapa de planificación. En campo se utilizó un sistema GNSS RTK E200 del fabricante E-survey que cuenta con una fiabilidad del posicionamiento centimétrica. Con este equipo se marcaron in situ el punto inicial y final de las líneas predefinidas, con ligeras variaciones respecto a los puntos definidos en gabinete debidas en parte a elementos del campo no previstos con la foto aérea como maquinaria pesada o acopios recién depositados. Estas marcas de comienzo y final de cada línea sirvieron para marcar con pintura la posición en la que se debía de instalar cada una de las piquetas según el espaciado propuesto. Tomándolas como referencia, se extendió una cinta métrica a lo largo de toda la longitud de cada línea y, teniendo en cuenta el espaciado (2 o 3 m), se definió la posición exacta en la que se debía colocar cada uno de los electrodos marcándolo en el suelo con pintura. Indicados tanto los puntos de inicio y final de la línea como la posición de cada uno de los electrodos, se llevó a cabo el montaje del equipo.

Posteriormente, en el momento en el que la línea ya se encontraba completamente instalada con todos los electrodos en su posición correcta, se procedió a registrar de manera precisa y exacta los valores definitivos de la posición XYZ de cada electrodo, para tener los datos reales de la disposición final de cada uno de ellos (Fig. 12).

Cabe destacar que todos los mapas y datos aportados en este informe en materia de posicionamiento se han referenciado al sistema UTM ERTS1989 30N.



**Figura 12.** Izda.: Piqueta clavada en el lugar marcado previamente con pintura. Dcha.: Toma de datos de la ubicación de cada electrodo con el sistema GNSS RTK E200.

En lo referente a las líneas geofísicas, la campaña de campo se realizó durante la semana del 10 de octubre de 2022 y consistió en seis líneas de tomografía eléctrica. El equipo utilizado fue un SuperSting modelo R8/IP/SP, de la marca comercial AGI (*Advanced Geosystems Inc*), capaz de medir simultáneamente hasta en ocho canales; es decir, tomando ocho datos de resistividad en cada inyección de corriente al terreno. Este equipo consta del resistivímetro, las estacas o piquetas de acero inoxidable para clavar en el terreno y los cables con los electrodos de transmisión por los que circula la corriente eléctrica y que sirven para conectar todo el dispositivo (Fig. 13).



**Figura 13.** Foto del equipo, de izquierda a derecha: resistivímetro, piqueta y electrodo en el cable.

Los perfiles eléctricos de resistividad se obtuvieron con el equipo descrito y cuyo montaje se especifica a continuación. Cabe reseñar, como se ha mencionado anteriormente, que una parte del trabajo topográfico consistió en posicionar sobre el terreno los puntos donde se instaló cada electrodo para facilitar el montaje del equipo.

En primer lugar, se hincaron las estacas metálicas en los puntos previamente marcados con pintura. Como la roca afloraba casi en superficie, no fue posible hacerlo en todos los puntos señalados, siendo necesario colocarlos horizontalmente en el terreno cubriéndolas con un poco de tierra, y se añadió un poco de agua para facilitar la transmisión de la corriente eléctrica inyectada hacia el suelo (Fig. 14). Finalmente, se desplegaron los 4 cables y se conectaron los electrodos presentes en el mismo con las piquetas que estaban asentadas en el suelo. Por último, con todo el dispositivo preparado, se conectaron los cables entre sí y al equipo de medida, además de conectar la batería para alimentar el circuito.

Completadas las labores anteriores, se configuró el resistivímetro estableciendo parámetros tales como el nombre del archivo, el espaciado de los electrodos o la configuración de medida que se usó durante la toma de datos: en este caso Dipolo-Dipolo y Schlumberger invertido. Antes de comenzar la adquisición, también se registró con el GPS la ubicación exacta de cada uno de los puntos donde se colocaron los electrodos, como se ha citado anteriormente al describir el trabajo topográfico.

La toma de datos siguió el mismo proceso para cada línea. El resistivímetro realizó automáticamente la toma de datos según los parámetros establecidos por lo que con la línea instalada se inició la obtención de datos. El tiempo de adquisición varió en función de diferentes factores: la longitud de la línea, la configuración de medida, el espaciado, etc. La duración media de las líneas osciló entre 25-30 minutos, siendo el tiempo total ligeramente menor para la configuración Dipolo-Dipolo. Cuando la medición llegó a su fin, se conectó un ordenador portátil para exportar el archivo generado (extensión .stg) que contenía toda la información adquirida. Se visualizaron de manera preliminar los datos obtenidos y se comprobó que la adquisición concluyó satisfactoriamente. Este archivo corresponde al perfil con los datos en bruto de la línea, siendo valores de resistividad aparente.



**Figura 14.** Piqueta colocada horizontalmente por la imposibilidad de clavarla de manera vertical

La adquisición de datos en el campo fue automática. Cuando todo el dispositivo se encontraba correctamente instalado, desde el resistivímetro se ejecutó el comando que ya tenía establecido el procedimiento de medida que se iba a seguir, controlando aquellos electrodos de inyección de corriente y aquellos en los que se registraba la diferencia de potencial (y por tanto la resistividad). se cargaron y configuraron previamente los comandos Dipolo-Dipolo y Schlumberger invertido

En la tabla 1 se resumen la longitud teórica y total, el espaciado entre los electrodos y los metros lineales totales las principales características de las líneas de eléctrica ejecutadas.

**Tabla 1.** Datos de las seis líneas de tomografía eléctrica realizadas.

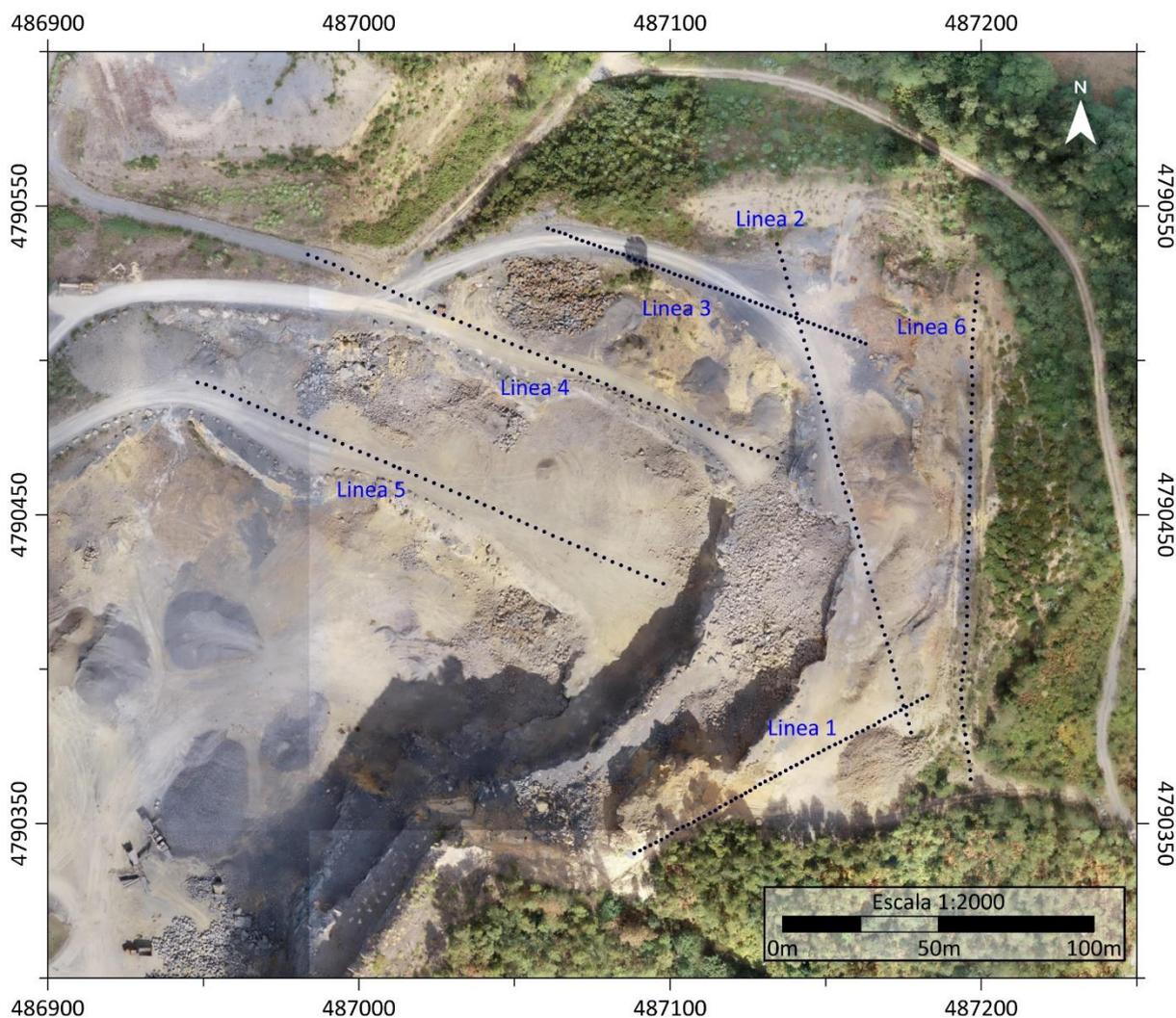
Línea	Longitud teórica (m)	Longitud real (m)	Espaciado de electrodos (m)
Lacilla_1	110	107,10	2
Lacilla_2	165	163,90	3
Lacilla_3	110	108,79	2
Lacilla_4	165	164,56	3
Lacilla_5	165	163,25	3
Lacilla_6	165	163,40	3

Longitud total (m)	871,00
--------------------	--------

### iii) Procesado e inversión de datos

Posteriormente a la toma de datos en la explotación minera, se exportaron y descargaron en un ordenador y se realizó una copia de seguridad de los datos en bruto, tanto de las coordenadas como de los archivos generados por el resistivímetro. También se pudo efectuar un primer control de calidad para comprobar que durante la adquisición no habían existido errores mayores y que los datos adquiridos presentaban suficiente calidad.

Los datos topográficos finales contenían la información acerca de las coordenadas exactas de cada línea realizada. Su ubicación junto con la localización de cada uno de los electrodos instalados en campo muestra en la figura 15.



**Figura 15.** Localización definitiva de todos los electrodos colocados y líneas realizadas.

En cada línea se registraron los perfiles de la resistividad del terreno con dos configuraciones diferentes: Dipolo-Dipolo y Schlumberger invertido. Realmente, aunque se trate de seis líneas, se dispone de 18 perfiles o secciones de resistividad, teniendo en cuenta las seis de cada configuración y las resultantes de la fusión entre los datos de ambas

El archivo generado por el resistivímetro durante la adquisición contiene la información de la pseudosección de resistividad aparente del terreno. Junto con el perfil topográfico de la línea de electrodos se procesa en el software *EarthImager 2D de AGI, versión 2.40*. Ambos archivos son el punto de partida para dar comienzo al proceso iterativo de inversión. Antes de ejecutar el algoritmo, se han de definir los parámetros específicos de inversión; algunos de los más importantes son el tipo de algoritmo o el modelo inicial del que parte la inversión. En este caso, se utilizó el algoritmo “smooth” y se estableció un perfil inicial con el valor medio de la resistividad aparente en toda su sección.

La inversión de datos se basa en un proceso iterativo, en el cual el objetivo es obtener un modelo de resistividad del terreno donde realizar interpretaciones sobre su estado. Para ello, el algoritmo de inversión calcula en varias etapas o iteraciones, un modelo de resistividad cuya pseudosección de resistividad aparente asociada o calculada se asemeje lo máximo posible a la pseudosección de resistividad aparente medida en campo. Las diferencias entre datos observados y calculados se cuantifica mediante el error cuadrático medio (RMS), siendo deseable obtener un valor mínimo (por norma general similar o inferior al 10%).

Cada uno de los perfiles de resistividad real que se obtuvieron mediante el software de inversión se utilizaron para interpretar las características del terreno. Los perfiles se consideraron finalizados en el momento en que se obtuvo un error RMS aceptable, evitando en la medida de lo posible la aparición de artefactos o zonas claramente anómalas. Por último, se exportaron como archivos XYZ, siendo X la distancia horizontal, Y la altitud, y Z el valor de resistividad real.

El archivo exportado con la información procesada se importó al programa *Surfer versión 17*, donde se generó la malla bidimensional que se presenta como el perfil definitivo. El resultado final es una sección del terreno en la que se muestra la distribución de la resistividad a lo largo de la línea y en profundidad, permitiendo interpretar los datos geofísicos.

## 4 Resultados y discusión

En este apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos. En primer lugar, se presenta la cartografía geológica realizada en la zona objeto de estudio y, a continuación, las líneas geofísicas realizadas. Para cada línea se muestran tres perfiles de resistividad del terreno correspondientes a la (i) configuración Dipolo-Dipolo (DD), (ii) configuración Schlumberger invertido (SI) y a la (iii) fusión de ambos (Merged). Con el objetivo de evitar repeticiones, durante la presentación y posterior discusión de los resultados se hará referencia a los perfiles de acuerdo con la citada configuración de medida, empleando los términos: “DD”, “SI” y “Merged”.

El valor de cada uno de los puntos donde se registra la resistividad en el terreno depende de la distribución de electrodos, tanto de los de corriente como de los de medida de diferencia de potencial. Así, en la parte central de cada perfil es donde se alcanza la mayor profundidad de penetración del método, reduciéndose progresivamente hacia los extremos. En este caso, se ha logrado una profundidad de investigación máxima de unos 25-30 m para las líneas de menor longitud (Lacilla-1 y Lacilla-3) y de unos 30-35 m para las líneas más largas (Lacilla-2, Lacilla-4, Lacilla-5 y Lacilla-6).

La escala de colores elegida para representar los perfiles geofísicos es la misma en todos los casos para facilitar la comparación entre los diferentes modelos de tomografía eléctrica. Los valores de resistividad presentan un amplio rango de valores (desde 1 a 100.000  $\Omega \cdot \text{metro}$ ), por lo que se ha elegido una escala logarítmica en base 10 para optimizar la visualización de la información. De este modo, se acentúan tanto las anomalías de baja como las de alta resistividad, lo que facilita la interpretación. Con el mismo objetivo, las isolíneas de resistividad que corresponden a las divisiones principales (1, 10, 100, etc.) se resaltan frente a las divisiones secundarias.

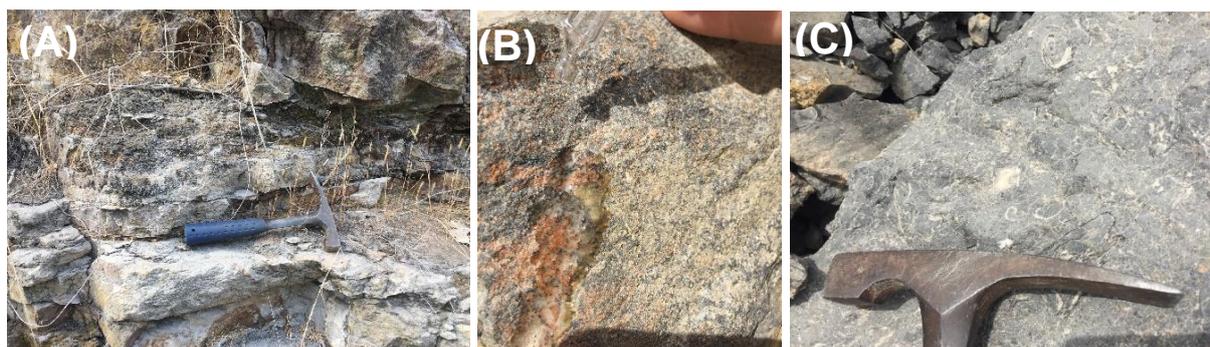
Sobre cada perfil, acompañado del nombre de la línea y de la configuración utilizada para su adquisición, aparece entre paréntesis el error cuadrático medio (RMS) expresado en porcentaje. Como se ha comentado anteriormente, se trata de un parámetro que indica el grado de similitud entre los datos medidos en campo y los calculados por el software mediante un proceso de inversión iterativo, y que se ha utilizado para validar la fiabilidad de los resultados. Los ejes de las secciones muestran la distancia horizontal y la elevación (metros sobre el nivel del mar), expresadas en metros. Se ha añadido además la orientación de cada perfil, mostrando su localización en las figuras 10, 15 y 19. Además, en los perfiles también se ha integrado la topografía adquirida en campo, simbolizando mediante triángulos negros invertidos la posición de cada uno de los electrodos en campo.

## 4.1 Geología

La cartografía geológica elaborada a escala 1:2.500 de las diferentes unidades que afloran en el entorno de la cantera ha sido el objetivo del estudio geológico. En el establecimiento de las unidades geológicas cartografiables se ha prestado especial atención a aspectos geológicos que pudiesen influir en los resultados del estudio de resistividad del terreno. Así, se han diferenciado varias unidades dentro del complejo urgoniano en el que se agrupan las calizas objeto de explotación en la cantera, tal y como se refleja en la leyenda. Además, se han podido diferenciar las dos unidades, supra e infrayacentes a las calizas urgonianas, que presentan mayor contenido detrítico: la unidad inferior, que corresponde a las areniscas del Weald (representada en tono morado en la cartografía), y la superior, que corresponde a una unidad detrítica que se sitúa estratigráficamente por encima de las calizas (en tono amarillo).

En síntesis, la serie estratigráfica de la zona de estudio comprende tres unidades. En la parte basal aparecen las areniscas del Weald, seguidas por la caliza urgoniana y la unidad de areniscas de la parte superior. Finalmente, en la parte superior aparecen las formaciones superficiales y los rellenos antrópicos.

El Weald está representado por la facies típica de esta unidad, compuesta por areniscas cuarcíticas de grano medio. En la figura 16-A se muestra el aspecto que tiene esta unidad en campo. Dentro de la caliza urgoniana se han diferenciado seis unidades. La unidad más basal de calcarenitas es la única que presenta diferencias notables en cuanto a litología, dado que presenta mayor contenido detrítico. Reacciona al añadir ácido clorhídrico, como se muestra en la figura 16-B, y presenta colores anaranjados que difieren del color gris que presentan el resto de las unidades de calizas. Por otro lado, la división de las otras cinco unidades se ha realizado a partir de los pequeños niveles arcillosos que se intercalan entre los estratos masivos de caliza (Unidad 1, 2, 3, 4 y 5). En la figura 16-C se muestra la U-1 perteneciente a las calizas urgonianas, que difiere ligeramente de las demás unidades de caliza por presentar un color gris más claro y algo de arcilla en su composición.



**Figura 16.** Aspecto en afloramiento de (A) Areniscas del Weald, (B) Calcarenitas de la parte basal de las calizas y (C) Unidad 1 de las calizas

Las unidades 2 a 5 son similares en cuanto a composición se refiere. Se trata de una caliza micrítica que presenta un color gris oscuro en corte fresco y que destaca por la abundante presencia de rudistas. La división de las diferentes unidades se basa en la presencia de pequeñas capas arcillosas de unos centímetros de espesor. En la figura 17-A se muestra el color gris más oscuro que da en corte fresco la caliza de las unidades 2 a 5. Apenas tiene contenido detrítico y es evidente a simple vista la abundante presencia de rudistas. Entre dichas unidades aparecen los pequeños niveles con mayor concentración arcillosa, que han sido utilizados como criterio para la división de las unidades 2 a 5 de caliza (Figura 17-B). Por último, en la Figura 17-C se muestra la parte superior de la serie, compuesta por las areniscas de techo.



**Figura 17.** Aspecto en campo de (A) Unidades 2-5 de las calizas, (B) fotografía de detalle de los niveles arcillosos que se han utilizado como criterio de división de las unidades (C) Areniscas de la parte superior dispuestas en estratos tabulares y planoparalelos, y al fondo la caliza urgoniana.

La caliza urgoniana que se explota en la cantera se ubica en el flanco norte de un pliegue anticlinal con dirección NO-SE. Este acaba mediante un cambio neto al norte de la cantera al entrar en contacto con una falla de alto buzamiento (Fig. 5). En la zona de estudio, las unidades descritas en la cartografía se disponen en una serie homoclinal con una orientación de las capas NE-SO y un buzamiento relativamente constante de unos  $25^\circ$  hacia el SE. Destaca la presencia de pliegues muy abiertos con la misma dirección que el anticlinal principal, que causan una pequeña variabilidad de unos 20 grados en la dirección de las capas.

En la zona afloran diferentes planos de fallas normales (Fig. 18) que, al igual que la falla regional principal, presentan dirección NO-SE. La mayor parte de ellas se inclinan hacia en NE a excepción de dos que se inclinan hacia el SO, en general todas con un alto buzamiento. Además, en los planos de falla se pueden apreciar dos familias de estrías de falla y escalones de recristalización.



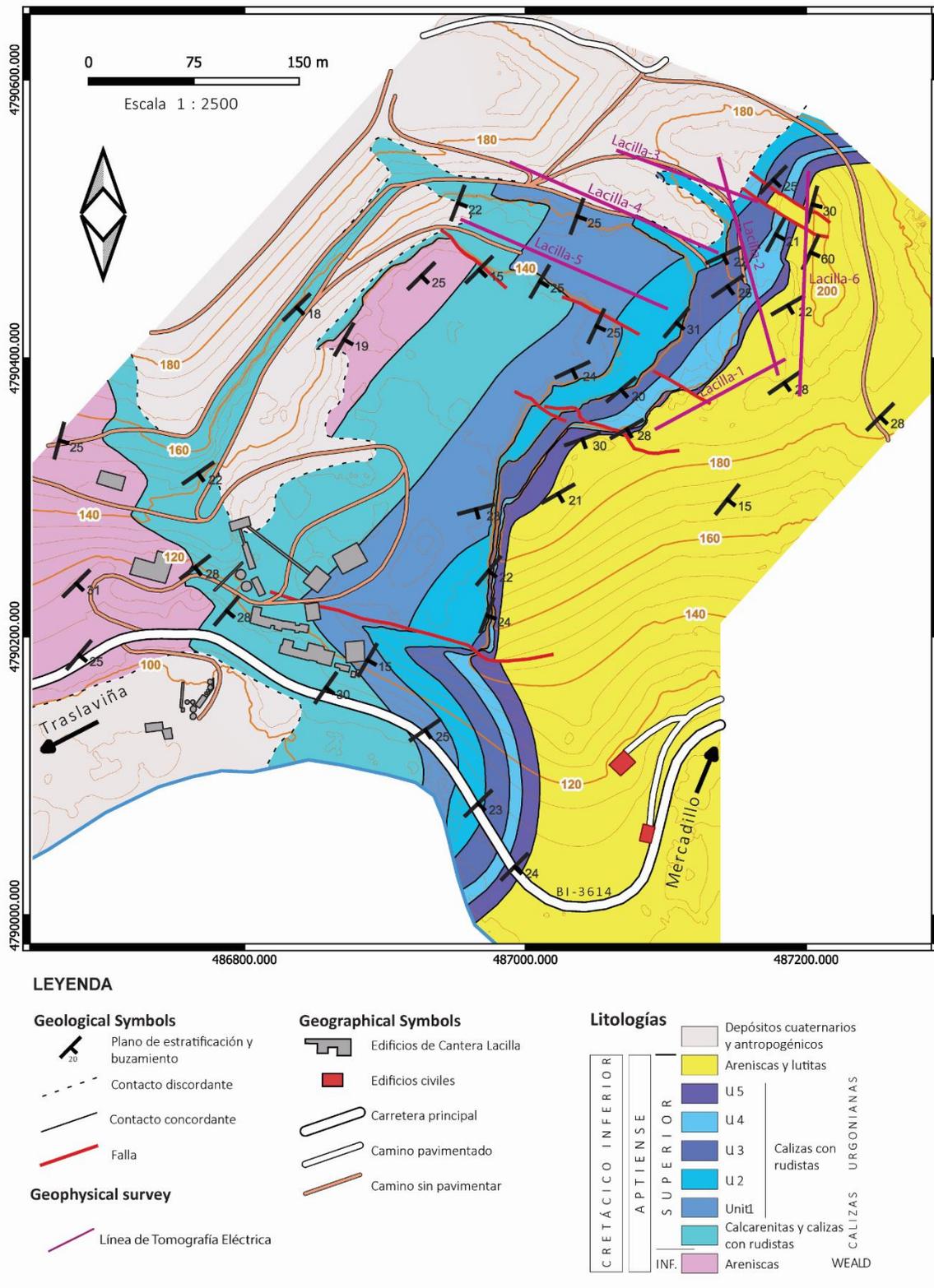
**Figura 18.** Aspecto de una de las fallas principales que afecta a los bancos de la explotación.

Sobre los planos de falla se han diferenciado dos familias de estrías: la primera de ellas la componen estrías normales débilmente oblicuas, mientras que la segunda familia es oblicua de mayor ángulo y senestra con componente inversa. Según las relaciones de corte, la segunda familia es posterior.

Los planos de falla que afloran en la explotación suponen un riesgo para las labores mineras que se desarrollan en la cantera. La inestabilidad de los taludes en las zonas próximas es evidente, quedando demostrado con desprendimientos y caídas de bloques puntuales. Además, los posibles problemas de subsidencia originados por la presencia de las cavidades kársticas que se observan en la totalidad de la instalación suponen otro riesgo añadido.

Ambas cuestiones suponen también una contaminación del material extraído, ya que la presencia de material fracturado y alterado en las zonas de falla y las arcillas presentes en las cavidades no son el objetivo de explotación en la cantera y alteran el producto final.

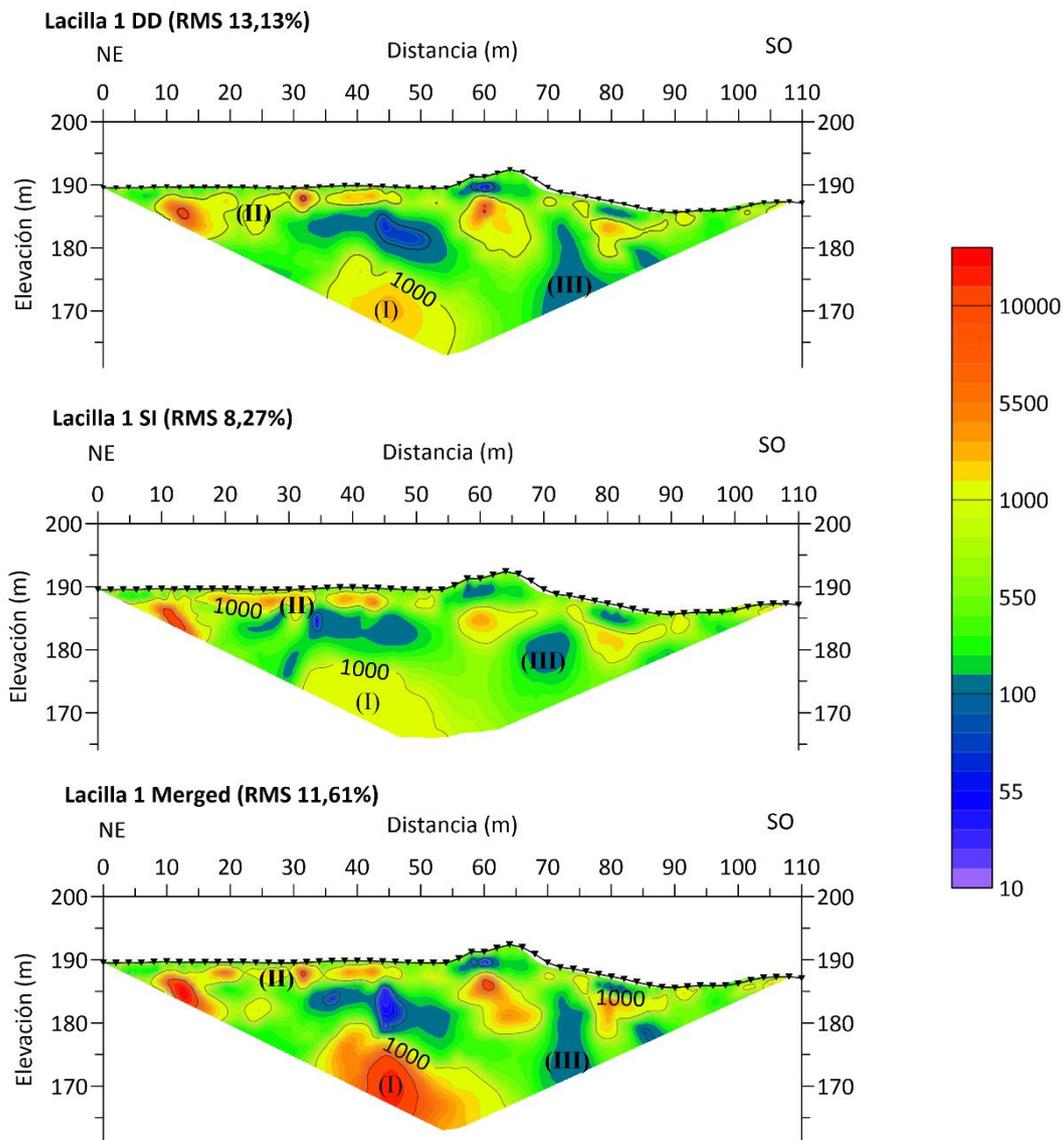
En la figura 19 se presenta la cartografía geológica a escala 1:2.500 que ha sido elaborada gracias a la información obtenida mediante el estudio geológico.



**Figura 19.** Cartografía geológica a escala 1:2.500 del entorno de la explotación. *Tomado de Quintana 2023.*

## 4.2 Tomografía eléctrica

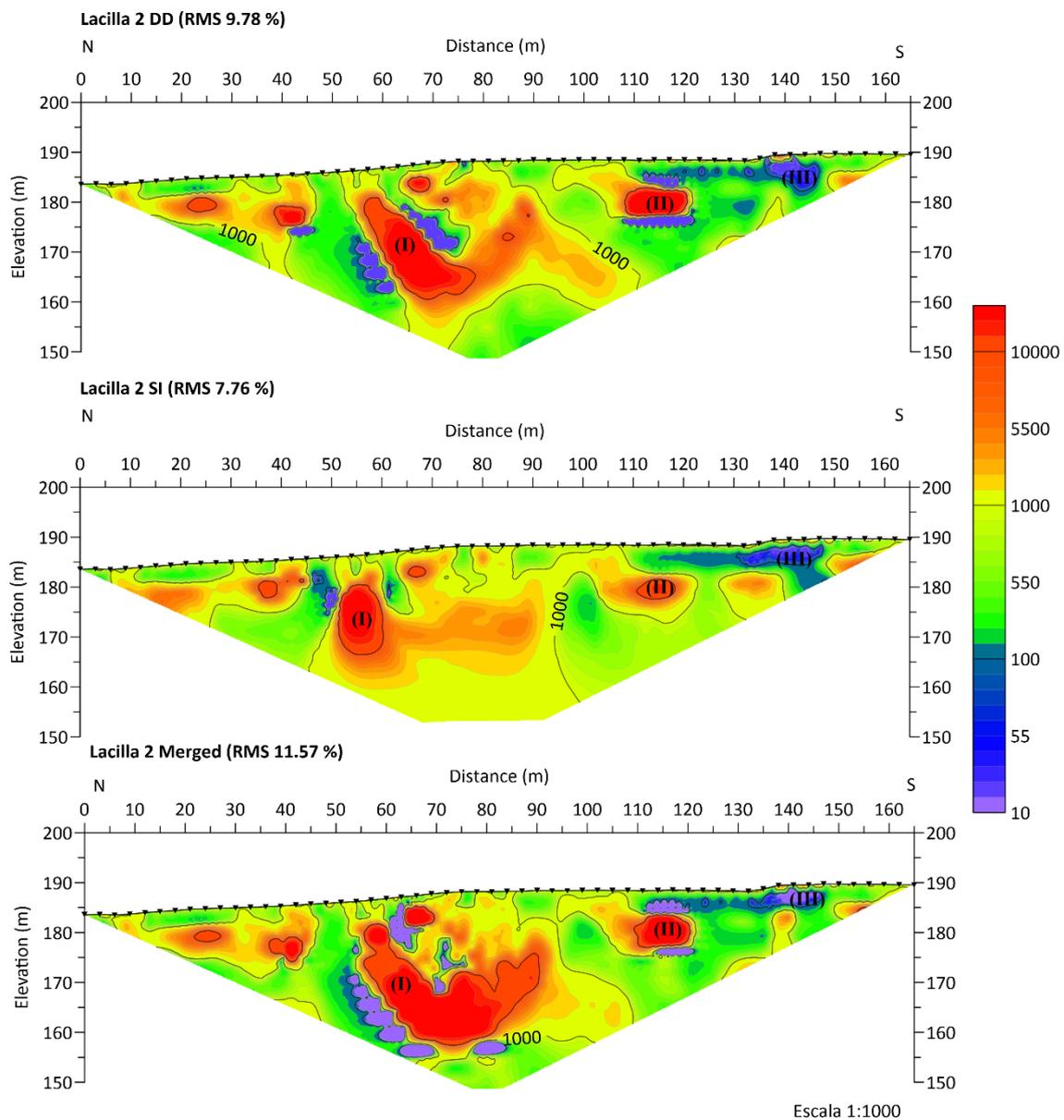
Los resultados obtenidos con las configuraciones elegidas para el perfil “Lacilla-1” (Fig. 20) presentan resultados muy similares y errores RMS que no superan el 15%. Los tres coinciden en un marcado aumento de la resistividad en profundidad en la parte central (I), superando los 1.000  $\Omega$ .m. Además, se intuye una anomalía bastante superficial de resistividad media-alta (entre 1.000 y 12.000  $\Omega$ .m en el DD y entre 1.000 y 14.000  $\Omega$ .m en el SI) que se extiende longitudinalmente por todo el perfil, entre los metros 185 y 190 de altitud (II). Esta anomalía presenta continuidad en profundidad tanto en la zona NE como alrededor del metro 65. Sin embargo, en la parte central y SO del perfil se encuentran emplazadas ciertas anomalías de baja resistividad (III). Es importante señalar que la elevación topográfica que aparece en la parte central sobre los metros 55-70, en la que se registra una baja respuesta resistiva, corresponde a una zona donde se ha depositado terreno removido. Por último, es necesario mencionar que una de las fallas cartografiadas corta de manera oblicua el sector terminal de este perfil.



Escala 1:1000

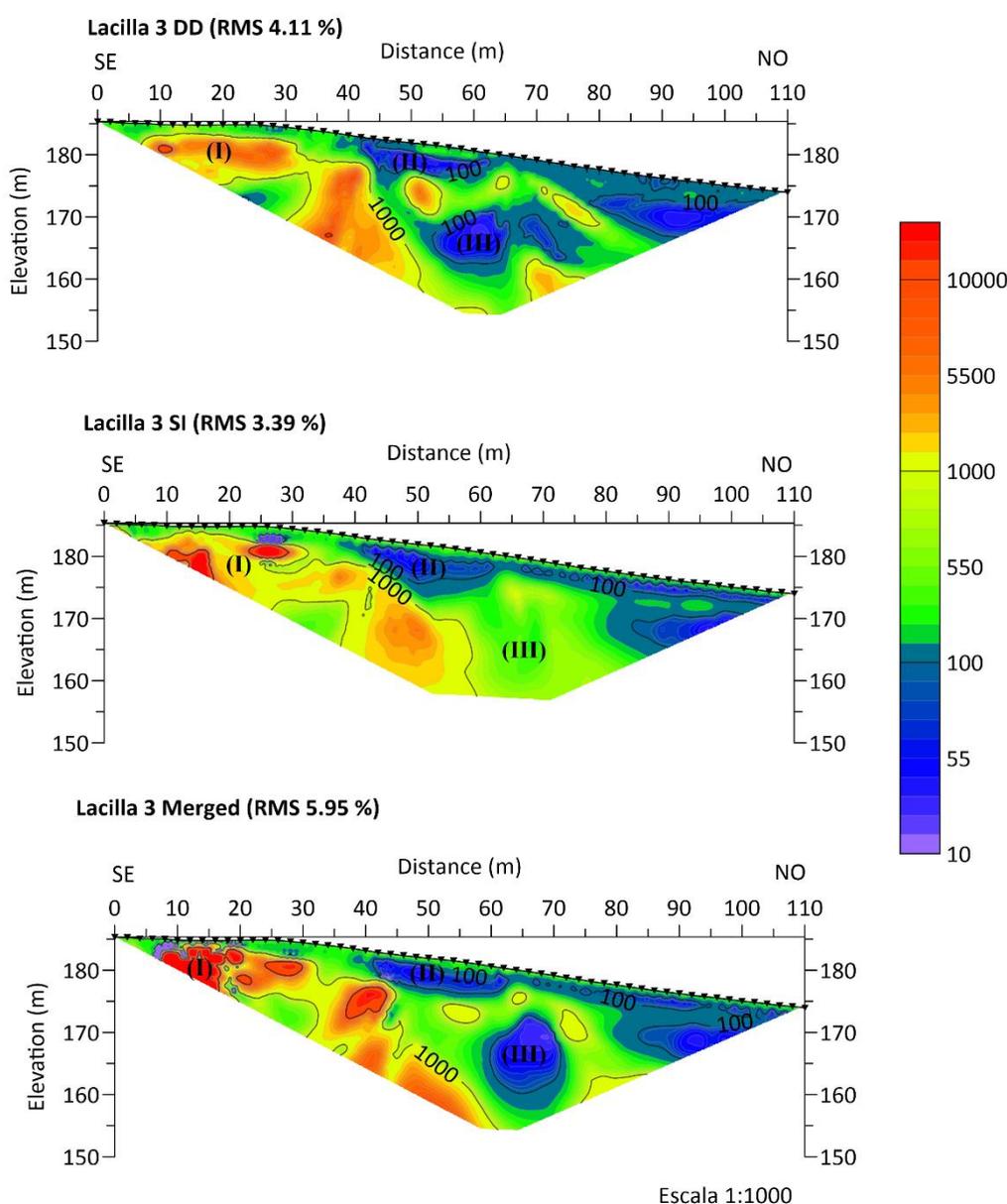
**Figura 20.** Perfiles DD (arriba), SI (centro) y Merged (abajo) correspondientes a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-1.

En este segundo perfil “Lacilla-2” (Fig. 21) se encuentran diferencias más acusadas entre las diferentes configuraciones de medida empleadas. En general, en las tres secciones se registran resistividades altas. Destaca una anomalía (I) de muy alta resistividad (valores por encima de 100.000  $\Omega \cdot m$ ) que se registra en el modelo DD entre los metros 50 y 70. Aparece otra anomalía (II) con geometría muy similar entorno a los metros 110-120 y que alcanza valores similares. En ambas ocasiones, alrededor de las citadas anomalías aparecen resistividades muy bajas; su origen podría relacionarse con un error de medición en la propia configuración de medida, marcado especialmente en el modelo DD. Por el contrario, en el modelo SI presentan menor desarrollo. A pesar de sendas diferencias entre ambos perfiles, en general se puede afirmar que la resistividad se mantiene alta en la mayor parte del perfil, destacando alguna anomalía puntual que sobresale por presentar valores más elevados, en los metros 25 (16.000  $\Omega \cdot m$ ) 40 (40.000  $\Omega \cdot m$ ), 65 (30.000  $\Omega \cdot m$ ). Además, también se debe reseñar la anomalía superficial de baja resistividad que se extiende desde el metro 110 hasta el final de la línea (III).



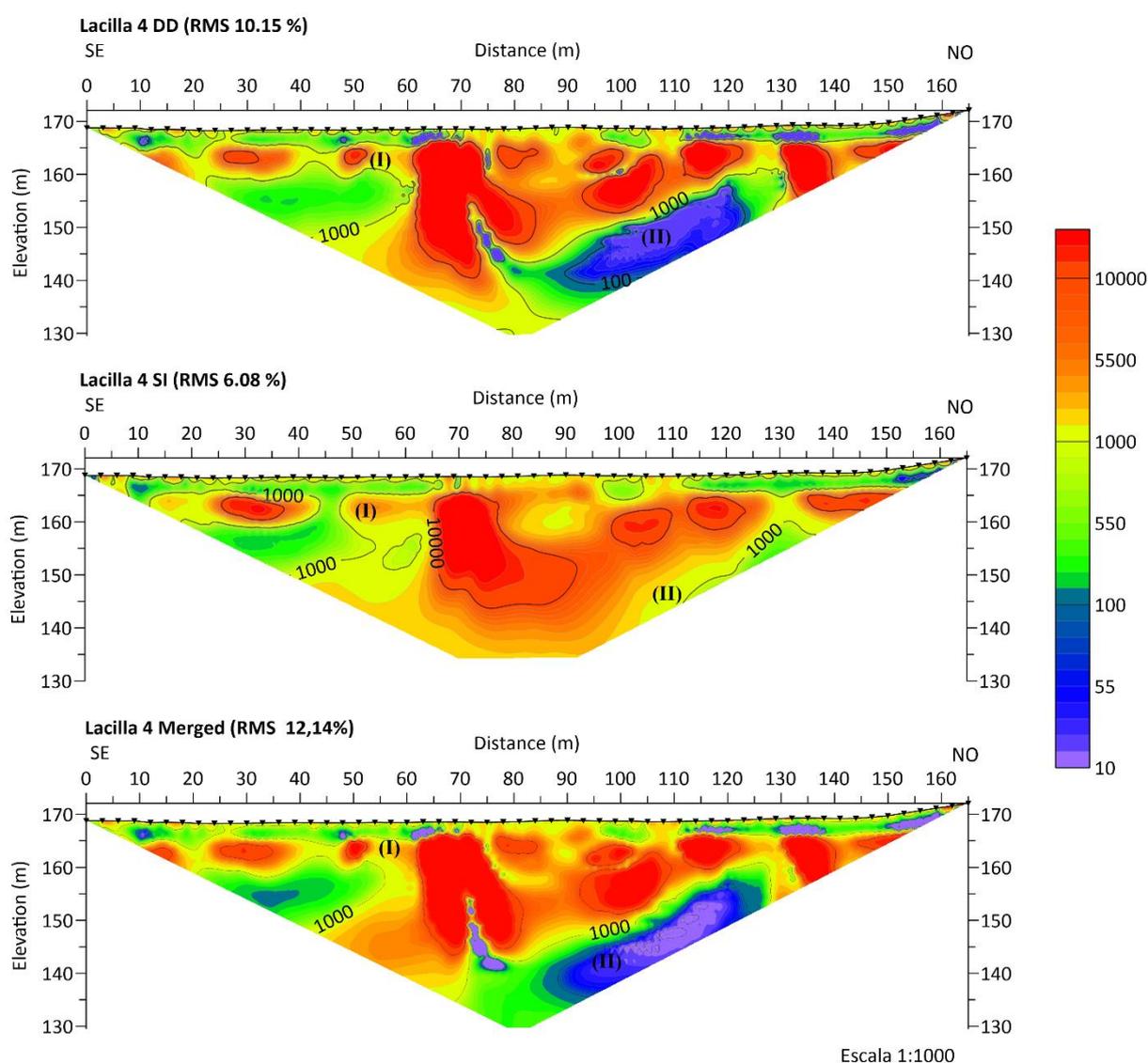
**Figura 21.** Perfiles DD (arriba), SI (centro) y Merged (abajo) correspondientes a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-2.

Esta tercera línea, denominada “Lacilla-3” (Fig. 22) destaca por el error RMS tan reducido que se ha conseguido durante el procesado, menor del 6%. Se vuelven a hacer patentes las diferencias existentes entre los perfiles obtenidos con las dos configuraciones de medida. Tanto el modelo DD como el SI arrojan resultados casi idénticos en el sector SE del perfil, donde resalta una amplia zona con valores altos de resistividad que alcanzan los 50.000  $\Omega\cdot\text{m}$  (I). Del mismo modo, la disposición espacial de una anomalía horizontal de baja resistividad que aparece desde el metro 40 en adelante coincide en ambos modelos, y se extiende horizontalmente hasta el final de la línea (II). En cambio, lo más destacable de este perfil se localiza en la parte central-NO, entre los metros 50 y 80: en el modelo SI aparece una anomalía de baja resistividad convenientemente extensa, que no llega a registrar el modelo DD (III). Finalmente, el modelo creado a partir de la fusión de ambos engloba todos los datos recopilados, por lo que muestra una combinación de las anomalías presentes en sendos perfiles anteriores.



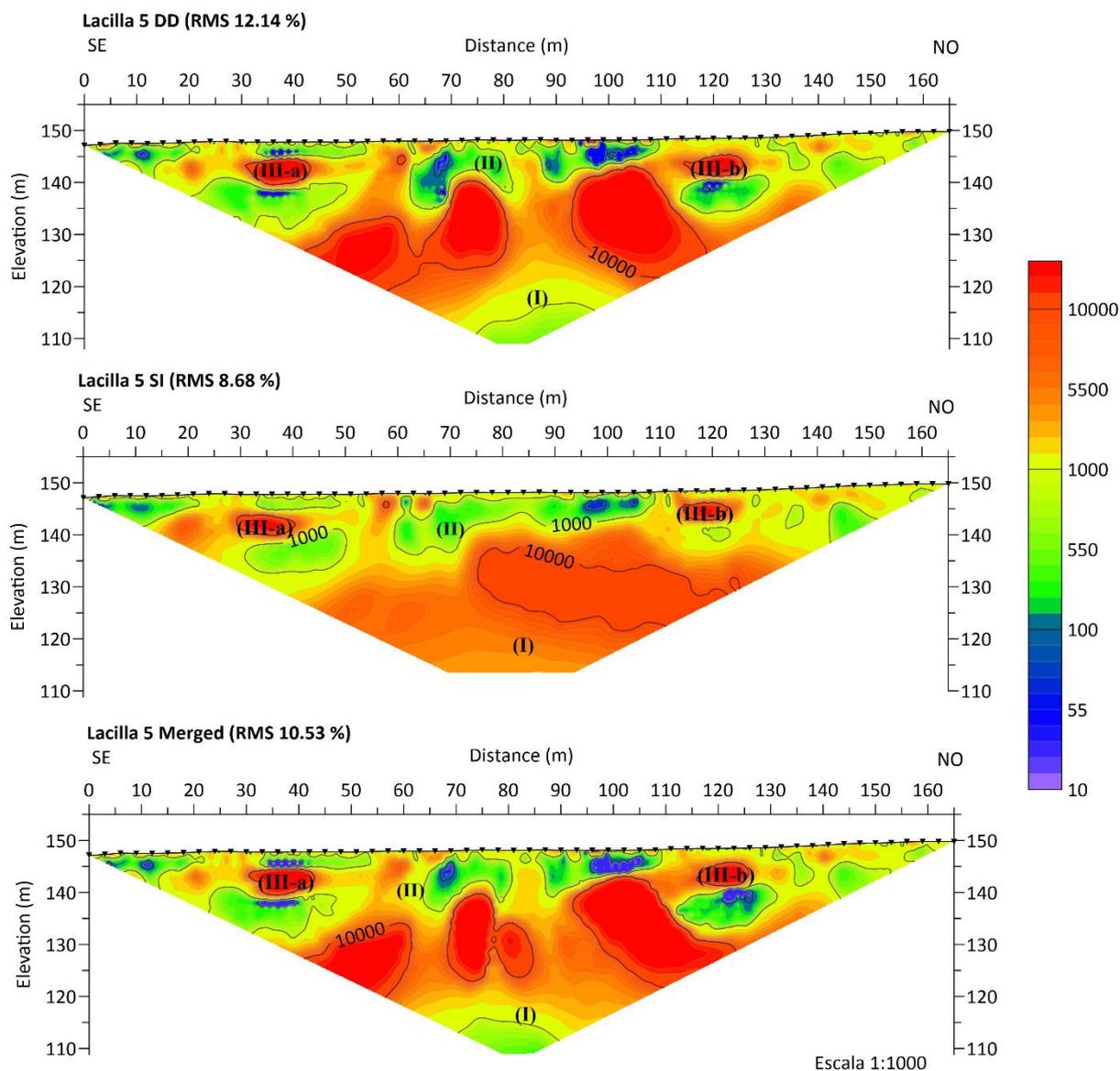
**Figura 22.** Perfiles DD (arriba), SI (centro) y Merged (abajo) correspondientes a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-3.

En el cuarto perfil llamado “Lacilla-4” (Fig. 23) también se han registrado resistividades altas en casi la totalidad de la sección, destacando áreas puntuales con resistividades muy altas. En el caso de la anomalía de alta resistividad más superficial (I) destacan valores puntuales muy altos en la zona NO (por encima de 100.000  $\Omega$ .m en los tres modelos). Del mismo modo, también se pueden observar las diferencias que se constatan entre los dos modelos, que difieren fundamentalmente en la anomalía de baja resistividad que aparece en el modelo DD entre los metros 90 y 120 que no registra el SI (II). Al igual que ocurre en perfiles comentados anteriormente, la geometría obtenida puede llevar a pensar que esté causado por la configuración de medida utilizada. A pesar de ello, en ambos perfiles se produce una disminución de la resistividad en este sector.



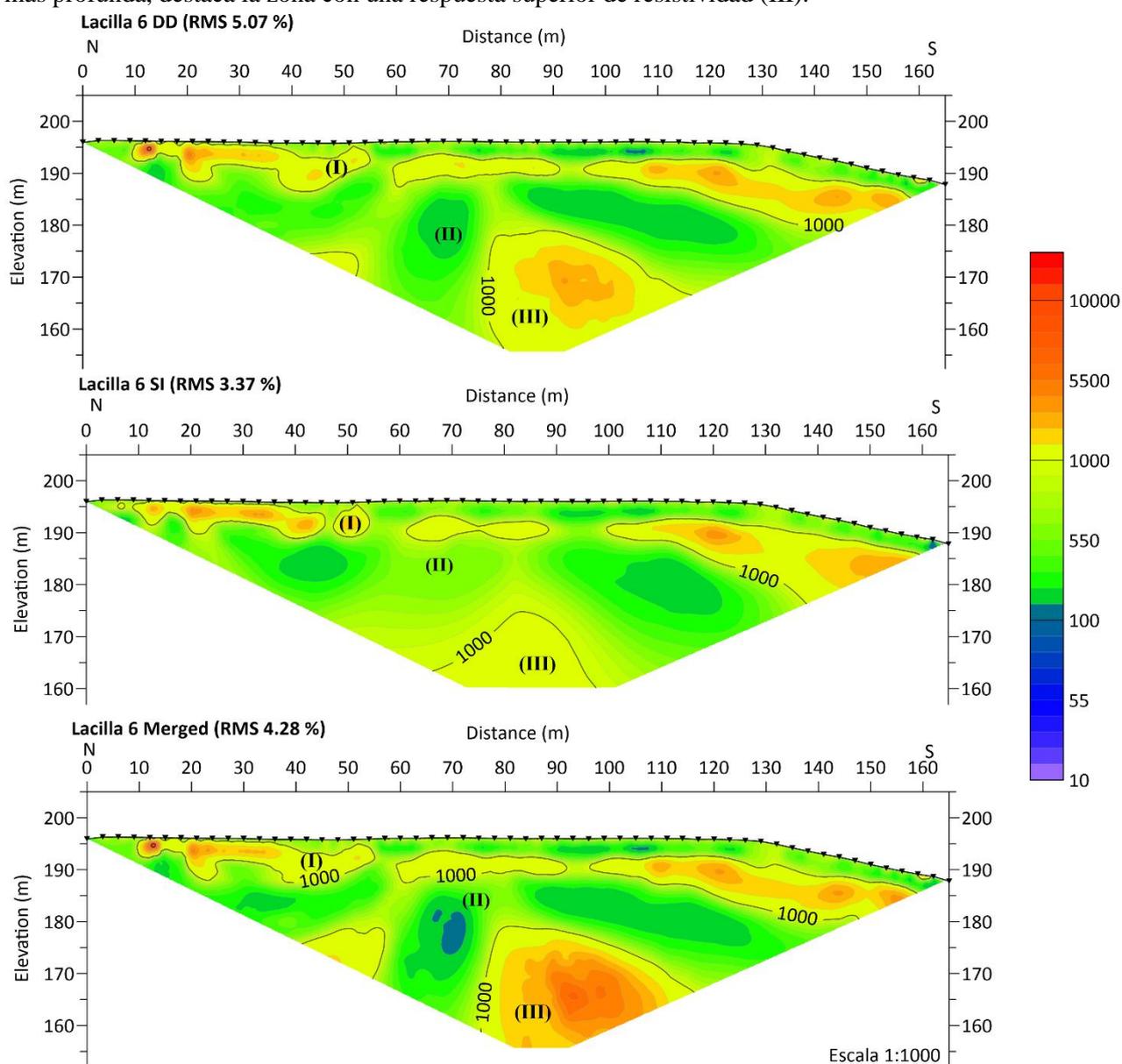
**Figura 23.** Perfiles DD (arriba), SI (centro) y Merged (abajo) correspondientes a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-4.

La estructura del quinto perfil, denominado “Lacilla-5” (Fig. 24), se puede resumir en una alta resistividad generalizada en profundidad y en una zona de menor resistividad en superficie. En la zona de mayor resistividad, aparece la anomalía (I), que se registra en la zona más profunda y de mayor incertidumbre. A excepción de esa anomalía, los valores de resistividad en este sector son altos, comprendidos entre 7.000 y 20.000  $\Omega.m$  en el caso del SI. Por otro lado, en la parte más superficial la resistividad es menor con valores por debajo de 1.000  $\Omega.m$  en la anomalía (II), excepto dos anomalías puntuales de muy alta resistividad: III-a (100.000  $\Omega.m$  en el DD y 40.000  $\Omega.m$  en el SI) y III-b (80.000 en el DD y 30.000 en el SI). Las diferencias entre los modelos DD y SI son notables.



**Figura 24.** Perfiles DD (arriba), SI (centro) y Merged (abajo) correspondientes a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-5.

Por último, el perfil “Lacilla-6” (Fig. 25) se caracteriza por presentar valores medios de resistividad, comprendidos entre 160 y 13.500  $\Omega$ .m. El empleo de una misma escala de colores para todos los perfiles permite afirmar que en esta línea no existen anomalías de alta o baja resistividad que destaquen si se comparan con las demás. Tanto en el modelo DD como en el SI se puede visualizar una anomalía superficial y horizontal (valores por encima de 1.000  $\Omega$ .m) que abarca toda la longitud del perfil, pero que no se extiende en profundidad (I). Seguidamente, aumentando ligeramente la profundidad, se aprecia una zona paralela a esta primera capa de alta respuesta resistiva que presenta menor resistividad, en la que destaca la anomalía verticalizada (II), que muestra un cambio neto con respecto a la alta resistividad que se sitúa inmediatamente al sur. Este cambio no queda bien reflejado en el SI pero si en el DD y en el Merged. La menor resistividad registrada en esta línea se alcanza en esa zona de la anomalía (II) en el modelo fusionado, representándose con color azul. Por último, en la parte central y más profunda, destaca la zona con una respuesta superior de resistividad (III).



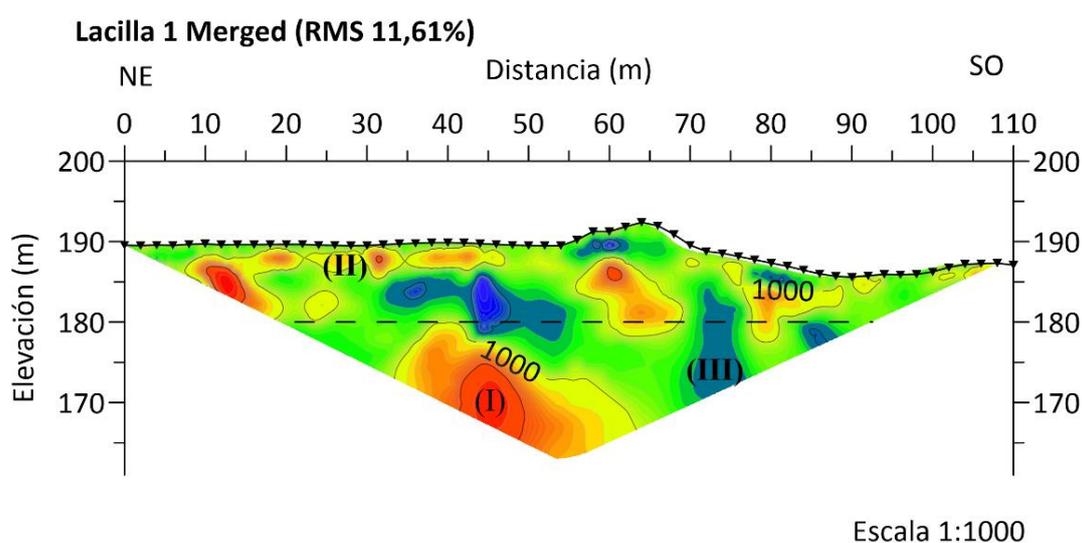
**Figura 25.** Perfiles DD (arriba), SI (centro) y Merged (abajo) correspondientes a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-6.

### 4.3 Discusión de resultados

A continuación, se discuten los resultados del método geofísico aplicado. Con el objeto de facilitar su comprensión, se ha seleccionado el perfil más representativo de las tres configuraciones de medida realizadas en cada línea y se añadido en el texto a continuación.

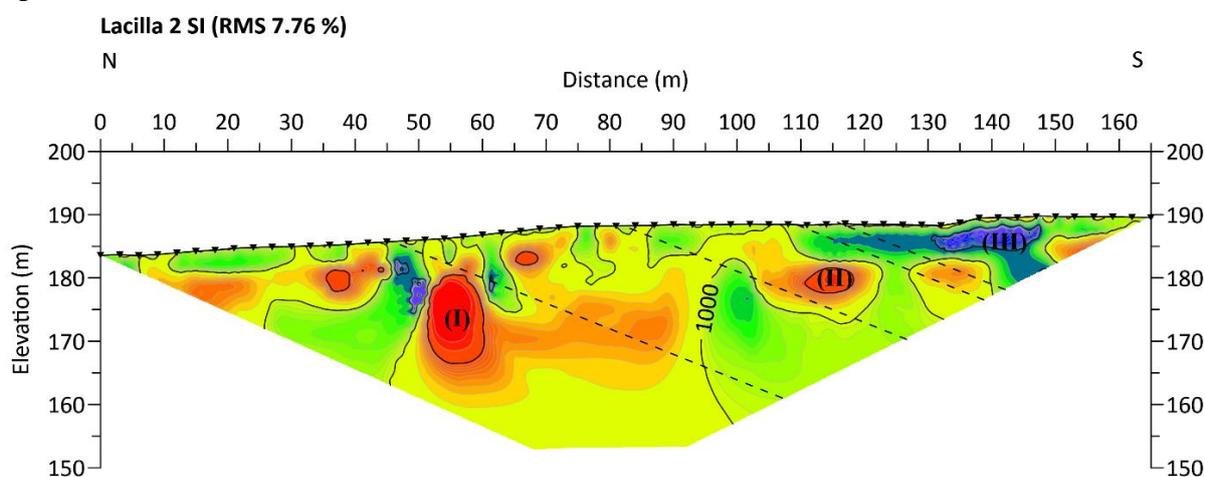
La integración de la cartografía geológica con los resultados de la tomografía eléctrica ha permitido analizar el estado de las rocas presentes en la cantera en profundidad, prestando especial atención a aspectos tales como la delimitación de las zonas más fracturadas o alteradas o la localización de posibles cavidades kársticas.

El perfil “Lacilla-1” (Fig. 26) es el que se localiza más hacia el sur, en la parte alta de la cantera y sobre areniscas. En la zona de la anomalía (II) se alcanzan los mayores valores de resistividad registrados en este perfil, presentando en general resistividades medias-altas y siendo su máximo valor mayor de 10.000  $\Omega$ .m. La línea discurre paralela a la estratificación, por lo que las diferentes unidades geológicas deberían aparecer horizontales o subhorizontales. Por esta razón, y debido a la morfología de la anomalía (II), puede relacionarse con las areniscas más superficiales de ese sector de la cantera. En profundidad aparece la segunda anomalía de media resistividad (I). De acuerdo con la cartografía geológica, en la parte central del perfil debería aparecer la caliza a una profundidad de unos 10 metros (profundidad marcada con una línea discontinua negra), por lo que las calizas se pueden relacionar con dicha anomalía (I). Sin embargo, en la parte suroeste del perfil se registran bajas resistividades en la zona donde la caliza debería tener continuidad. Esta anomalía (III) se localiza alrededor del metro 70 del perfil, coincidiendo aproximadamente con la traza de la falla cartográfica del mapa geológico, que se localizaría en el metro 65. Por tanto, esa zona de baja resistividad puede interpretarse litológicamente como la caliza, y que, debido a la fracturación propia de la zona de falla, tiene una resistividad menor.



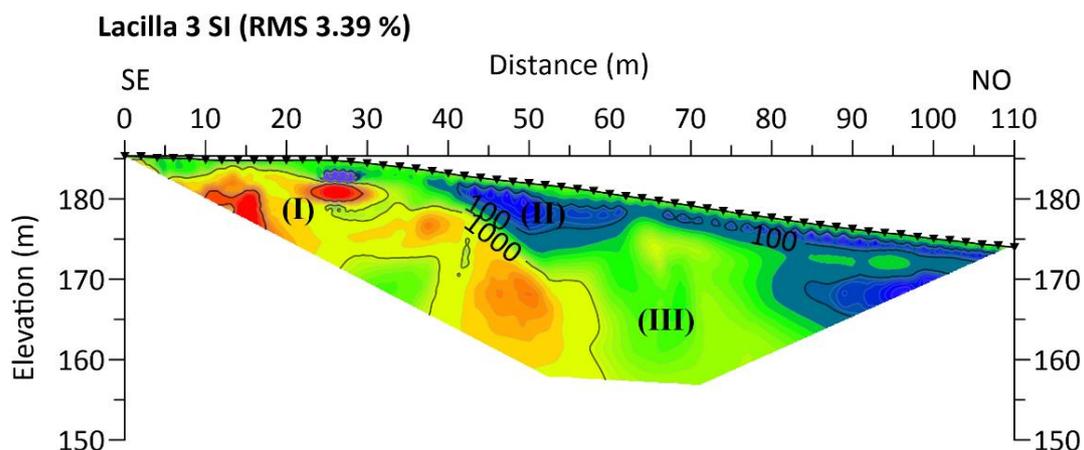
**Figura 26.** Perfil Merged correspondiente a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-1.

El perfil “Lacilla-2” (Fig. 27) abarca varias litologías; comienza en zona de relleno, continúa atravesando cuatro de las unidades de caliza definidas en la cartografía (U-2, U-3, U-4 y U-5) y acaba en las areniscas de la parte superior. La dirección de las capas es perpendicular a este perfil, por lo que se han marcado los contactos de las unidades según la cartografía geológica con línea discontinua negra. A pesar de que no se aprecian cambios litológicos o el buzamiento de las capas, se han detectado dos anomalías (I) y (II) que presentan valores muy elevados compatibles con cavidades. A excepción de esas zonas puntuales, la resistividad se mantiene relativamente media-alta en todo el perfil, pudiendo relacionarse las zonas con menor respuesta resistiva a sectores en los que la caliza se encuentra más alterada o fracturada. En la anomalía (III) es donde se obtienen los valores más bajos de resistividad, coincidiendo con la zona donde aparecen las areniscas.



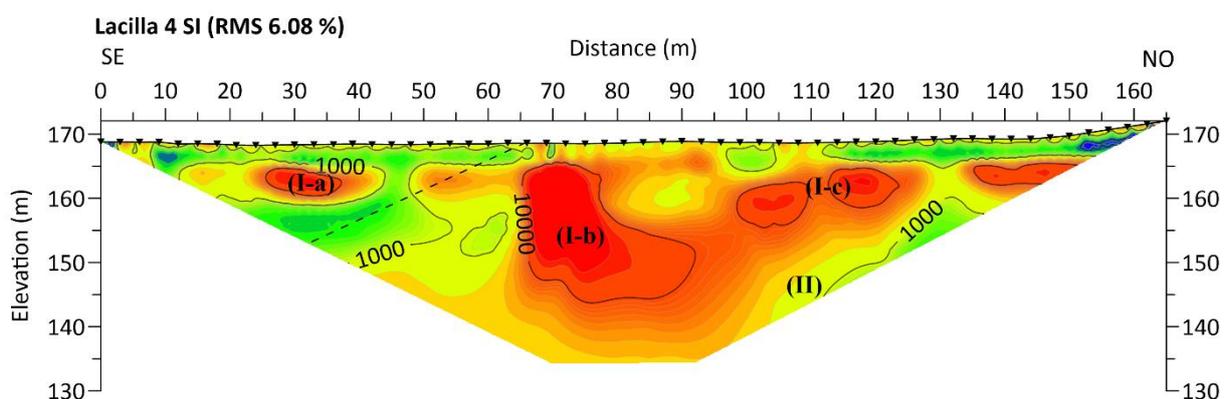
**Figura 27.** Perfil Merged correspondiente a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-2.

El perfil “Lacilla-3” (Fig. 28) se sitúa en la parte norte de la cantera. En su comienzo en la parte SE corta el afloramiento de una de las unidades de caliza urgoniana para acabar casi en su mayor parte en zona de depósitos cuaternarios y relleno. Los valores de alta resistividad de la parte SE que corresponden a la denominada anomalía (I) alcanzan valores puntuales muy altos (hasta  $50.000 \Omega.m$ ), y coinciden con la zona donde aflora la caliza objeto de explotación. La presencia de una anomalía de resistividad tan elevada inmersa en esa zona de resistividad alta podría asociarse a una posible cavidad en la roca. La zona de menor respuesta dentro de esta anomalía (I) puede relacionarse con relleno arcilloso en la zona de la cavidad o un mayor grado de fracturación. Por otro lado, existe un claro contraste hacia el final de la línea, dado que la respuesta resistiva disminuye notablemente. La anomalía (II) se asocia a los depósitos cuaternarios y de relleno de la pista, que, al presentar menor densidad, compacidad y por tanto mayor porosidad, dan las anomalías tan bajas obtenidas; además, debido a la magnitud de esta anomalía, no se descarta que la roca se encuentre alterada en profundidad. La anomalía (III) representa una zona con valores de resistividad muy bajos en profundidad, llegando a mínimos por debajo de  $400 \Omega.m$  que se relacionan con una zona de roca alterada que podría presentar cualidades mineras inferiores a las requeridas para su explotación.



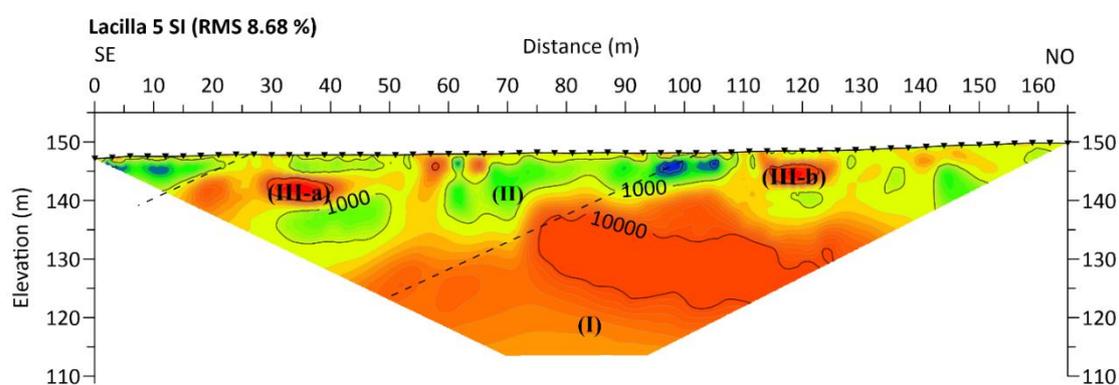
**Figura 28.** Perfil SI correspondiente a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-3.

La línea “Lacilla-4” (Fig. 29) se localiza en uno de los bancos de la explotación minera, destacando en este la alta resistividad que se obtiene en casi la totalidad del mismo, llegando puntualmente a valores muy altos que incluso superan los 100.000  $\Omega.m$ . Estas zonas que presentan una resistividad tan alta (anomalías I-a I-b, I-c) podrían relacionarse con posibles cavidades kársticas rellenas total o parcialmente por aire. Las zonas en las que la respuesta resistiva es alta sin llegar a valores tan elevados corresponden a zonas en las que la propia roca presenta una mejor calidad (valores de resistividad hasta 20.000  $\Omega.m$ ), con mayor interés desde el punto de vista minero. Cabe destacar el contacto entre las unidades U-1 y U-2 de caliza urgoniana en la parte SE, donde aparece una zona de menor resistividad que podría estar originada en el pequeño nivel arcilloso que las separa.



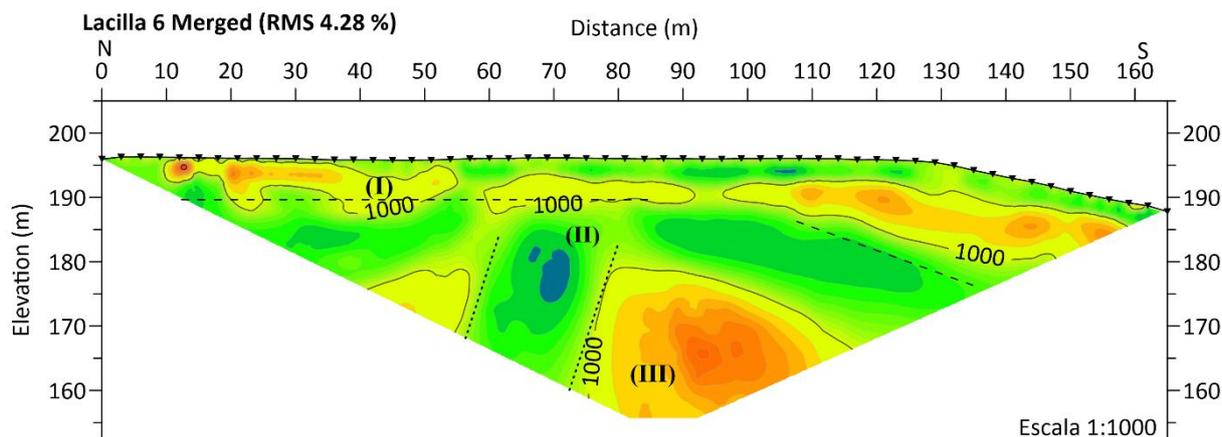
**Figura 29.** Perfil SI correspondiente a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-4.

La línea “Lacilla-5” (Fig. 30) se sitúa en otro de los bancos de la explotación de las calizas. En general la resistividad aumenta con la profundidad. La zona de la anomalía (I) presenta valores altos de resistividad, con valores que alcanzan su máximo en 20.000  $\Omega$ .m. Dichos valores se pueden relacionar con la roca que aparece en profundidad, que en este caso presenta mayor homogeneidad y mayor interés desde el punto de vista minero. Justo por encima aparece la anomalía (II), con valores menores de resistividad que pueden relacionarse con el contacto entre las dos unidades masivas de calizas. Por último, en la parte más superficial vuelven a aparecer menores resistividades que pueden deberse a una mayor alteración de la propia roca más superficial. Destacan las anomalías (III-a y III-b), que llegan a tener valores cercanos a 40.000  $\Omega$ .m, compatibles con posibles cavidades kársticas.



**Figura 30.** Perfil SI correspondiente a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-5.

Finalmente, la línea “Lacilla-6” (Fig. 31) se sitúa en la parte más alta de la cantera en la zona oeste. Discurre paralela a la estratificación hasta la mitad, cuando se produce el cambio de dirección de las capas, entonces la línea continua perpendicular a estas. En la parte más superficial aparece una zona de mayor resistividad, que en el norte es horizontal, mientras que hacia el sur presenta una ligera inclinación (I); en cualquier caso, se mantiene paralela a la superficie y aumenta de espesor hacia el sur. Este cambio de espesor coincide con el cambio de orientación de las capas, y el buzamiento en el extremo sur es similar al buzamiento de las areniscas observado en campo. Por tanto, la base de esta anomalía podría corresponder con el límite entre capas. La anomalía (II), con morfología subvertical, es un sector de baja resistividad que se relaciona con una zona más fracturada en la parte norte, y que coincide con una de las fallas cartografiada en el mapa geológico. Presenta una extensión lateral de unos 18 metros y se ha delimitado con una línea de puntos negros. Por último, en la zona de la anomalía (III) empiezan a registrarse valores más altos (6.000  $\Omega$ .m) que pueden ser debidos a la presencia de la arenisca menos alterada.



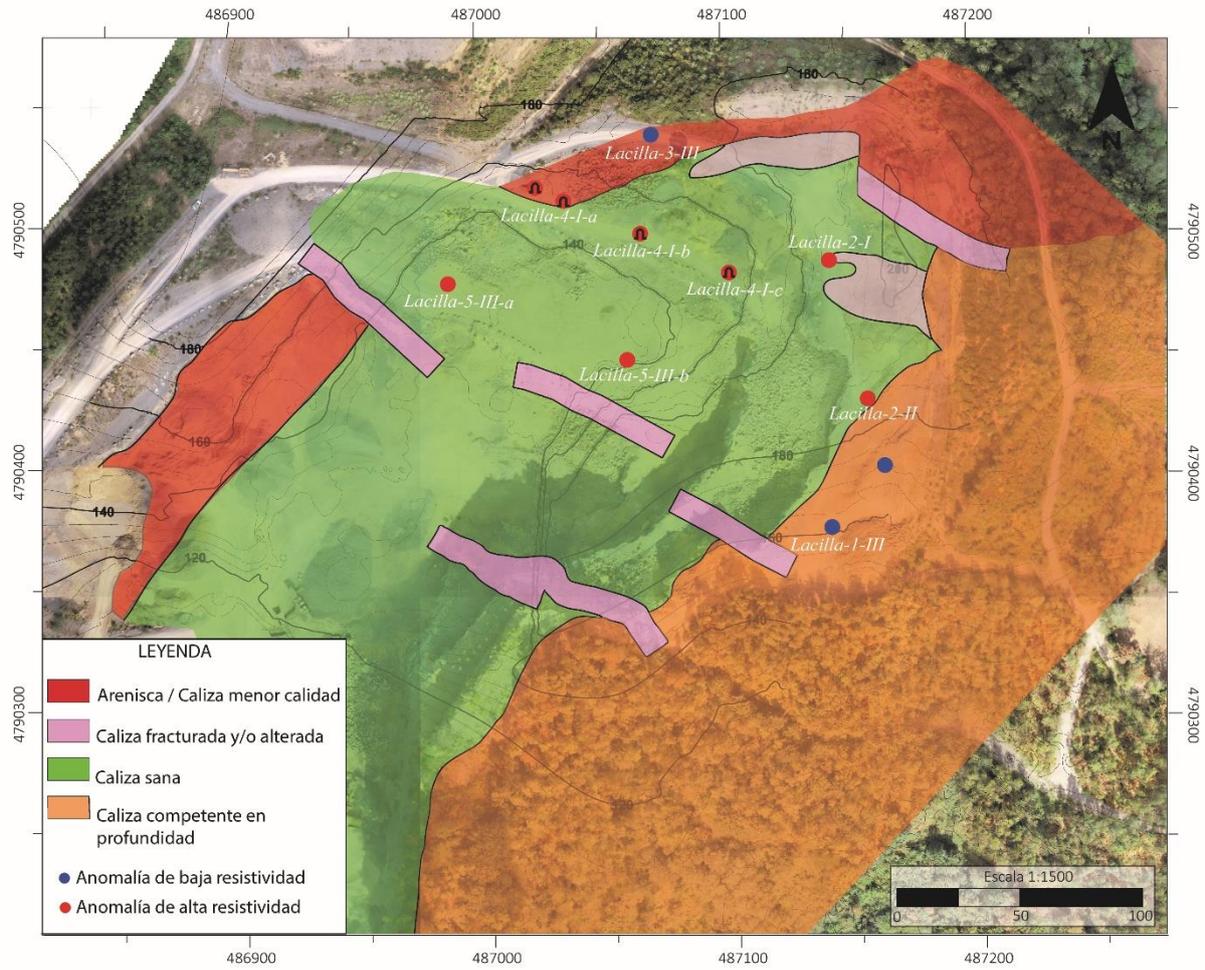
**Figura 31.** Perfil Merged correspondiente a la línea de tomografía eléctrica Lacilla-6.

Por último, dado su utilidad de interés minero, se ha elaborado un mapa en el que se delimitan distintos sectores en función del grado de “calidad” de la roca, entendiendo como tal su grado de alteración y los valores de resistividad medidos. Para ello, se han integrado los datos geológicos y los resultados de los perfiles de tomografía eléctrica, señalando la situación de las principales anomalías geofísicas de alta y baja resistividad (Fig. 32).

En el mapa se representaron en tono rojo las zonas sin interés minero, que corresponden a areniscas, rellenos antrópicos y los sectores donde se ha determinado un mayor grado de alteración de la caliza por mostrar menores valores de resistividad ( $< 100 \Omega.m$  en el caso del perfil 3, anomalía Lacilla-3-III). En general, estas zonas se localizan en la parte norte y oeste serían las que, a priori, evidencian menor interés minero. Los sectores que mostrarían menor calidad minera han sido representados en tono morado. Se trata, principalmente, de aquellas zonas de falla observadas en superficie y en profundidad, que presentan valores de resistividad inferiores a  $100 \Omega.m$  (es el caso de la anomalía Lacilla-1-III). En color naranja se han representado aquellas zonas donde afloran las areniscas, pero en profundidad aparecen las calizas, siendo factible su explotación si se retiran los niveles detríticos. Por último, en tono verde se identifican las zonas con mayor interés minero. Estas corresponden a aquellos afloramientos de caliza inalterada, que continúa en profundidad, a juzgar por las resistividades observadas que, en general, llegan hasta  $20.000 \Omega.m$ .

Las anomalías de elevada resistividad marcadas en el mapa con un punto rojo: Lacilla-2-I, Lacilla-2-II, Lacilla 4-I (a, b y c), Lacilla-5-III (a y b) superan los  $50.000 \Omega.m$ , siendo interpretadas como posibles cavidades kársticas.

Este mapa supone un sustancial avance en la forma de gestionar la explotación, dado que identifica las zonas de mayor y menor interés minero, establecidas con un doble criterio geológico y geofísico. Asimismo, permite anticipar potenciales peligros relacionados con los ámbitos laborales y logísticos ya que se han definido aspectos asociados a riesgos naturales que deben tenerse en cuenta para el desarrollo de labores seguras.



**Figura 32.** Mapa de la explotación minera donde se recogen las zonas de interés y las principales anomalías eléctricas registradas.

## 5 Conclusiones

Este Trabajo Fin de Máster ha abordado la caracterización geológica y geofísica (mediante el método de tomografía eléctrica) del entorno de la explotación minera denominada “Cantera Lacilla” (Sopuerta, País Vasco). Como principales resultados, se pueden reseñar los siguientes.

- Se han identificado cuatro unidades geológicas principales. En la base aparecen las areniscas de grano medio del Weald, seguidas por la unidad de calizas urgonianas. En esta unidad (objeto de explotación en la cantera) se han diferenciado seis subunidades, mostrando las dos inferiores un mayor contenido detrítico (Calcarenitas y U-1) y las cuatro superiores un mayor contenido en carbonatos (U-2 a U-5). Por encima, se reconoce otra unidad de areniscas. Sobre el sustrato aparecen diversas formaciones superficiales y algunos rellenos antrópicos.
- Estas unidades, de acuerdo con la cartografía geológica realizada a escala 1:2.500 del entorno de la cantera, se disponen de forma homoclinal con buzamiento hacia el SE. Asimismo, se observan pliegues muy abiertos que cambian ligeramente (unos 20°) la dirección de las capas cuya orientación es NO-SE y fallas con la misma dirección.
- El estudio geofísico sustentado en 18 perfiles procedentes de la realización de 6 líneas geofísicas de tomografía eléctrica evidencia que la resistividad de terreno en los primeros 25-30 metros aumenta con la profundidad, excepto en aquellas zonas más fracturadas, en las que se observa una disminución. Asimismo, la información obtenida ha complementado la caracterización geológica en profundidad, pudiendo relacionar los sectores de menor resistividad con las superficies de estratificación asociadas a los pequeños niveles arcillosos y con zonas de mayor fracturación; y asociar las zonas con mayor respuesta resistiva a la roca competente. Por otro lado, la distribución de la resistividad en el subsuelo ha permitido identificar zonas con mayor interés minero, así como a identificar las de escaso o nulo interés: zonas de falla, cavidades o zonas alteradas.
- Las principales anomalías geofísicas de muy elevada resistividad (valores mayores de 50.000  $\Omega$ .m) se relacionan con la presencia de posibles cavidades kársticas rellenas total o parcialmente vacías.
- La integración de toda la información geológica y geofísica, aplicando criterios de interés minero, ha permitido elaborar un modelo del terreno válido para optimizar las labores de explotación y gestión de la cantera. La distinción de zonas con mayor y menor interés minero y la delimitación de zonas asociadas a riesgos naturales puede utilizarse como guía para las futuras labores de explotación.

## 6 Bibliografía

- Barnolas, A. y Pujalte, V. (2004): La Cordillera Pirenaica: definición, límites y división. En: Vera, J.A. (ed.), Geología de España. SGEIGME, Madrid, pp 233-241.
- Bodego, A. y López-Horgue, M. A. (2014): Las calizas urgonianas: un mar tropical lleno de vida. En Geología de la Cuenca Vasco-Cantábrica UPV, pp 45-52
- Burger, H. R. (1992): Exploration Geophysics of the shallow subsurface. Prentice Hall, Upper Saddle River, ew Jersey, 489 pp.
- Cuevas, J., Aranguren, A., Badillo, J. M. y Tubia, J. M. (1998): Tectónica de inversión en el sector central del Arco Vasco (Cuenca Vasco Cantábrica). En Geogaceta, 24, pp 95-98.
- Cuevas, J., Aranguren, A., Badillo, J. M. y Tubia, J. M. (1999): Estudio estructural del sector cetral del Arco Vasco (Cuenca Vasco-Cantábrica). En Boletín Geológico y Minero, Vol, 110-1 pp 3-18.
- Damas Mollá, L., Fano, H., Aramburu Artano, A., García Garmilla, P. (2014): El “rojo ereño” y el “negro Markina” nuestras rocas más internacionales. En: Geología de la Cuenca Vasco Cantábrica. Eds.: Bodego et al. (2014). Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao, 176-178.
- Espina, R. G. (1994): Extensión mesozoica y acortamiento alpino en el borde occidental de la Cuenca Vasco Cantábrica. En Cuaderno Lab. Xeológico de Laxe. Vol. 19, pp 137-150.
- Everett, M. E. (2013): Near-Surface Applied Geophysics, UK, 403 pp. Cambridge University Press
- Fernández Mendiola, P. A. (1987): “El complejo urgoniano en el sector oriental del anticlinorio de Bilbao”. En Bizkaiko Foru Aldundia N° XVI.
- Fernández Mendiola, P. A. y Velasco (1996): The Troya Zn-Pb carbonate-hosted sedex deposit, northern Spain. En Society of Economic Geologists, Special Publication N°4, pp 364-377
- Feuillée y Rat (1971) : Structures et paléogéographies Pyrénéo-Cantabriques. En J. Debyser, X. Le pichon y L. Montadert (eds), Histoire Structurale du Golfo de Gascogne. Publications de l'Institut Français du Pétrole, Collection Colloques et Séminaires, 22. Éditions Technip, Paris, 2, V.1.1-V.1.48.
- Gil Crespo, P.P., Herrero, J. M., Yusta, I., Pesquera, A., Arostegi, J. y Velasco, F. (2014): Yacimientos de minerales metálicos en la Cuenca Vasco-Cantábrica. En: *Evolución geológica de la Cuenca Vasco-Cantábrica* (Eds.: Bodego et al.). Servicio Editorial de la UPV/EHU, Bilbao, 209-216.
- García Mondejar y Robador (1986-1987): Sedimentación y paleogeografía del Complejo Urganiano (Aptiense-Albiense) en el área de Bermeo (región Vasco-Cantábrica septentrional). En: Acta geológica hispánica, t 21-22, pp 411-418.
- García Mondejar, J., Agirrezabala, L. M., Aramburu, A., Fernández Mendional, P. A., Gómez Pérez, I., López Horgue, M. y Rosales, I. (1996): Aptian-Albian tectonic pattern of the Basque-Cantabrian basin (northern Spain). En Geological Journal, Vol. 3, pp 13-45.
- Herrera (2009): Métodos de prospección arqueológica intensiva en el marco de un proyecto regional: el caso de la comarca de la Serena (Badajoz). En: Trabajos de Prehistoria, 66. N°1, pp 7-26
- Hernaiz, P. P., Serrano, A., Malagón, J. y Rodríguez Cañas, C. (1994): Evolución estructural del margen SO de la Cuenca Vasco Cantábrica. En: Geogaceta, 15, pp 143-146.
- Lowrie y Fichtner (1997): Fundamentals of Geophysics, Third Edition. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 419 pp.
- Mediato, J.F., Solé, X., Larrondo, E. y Hernaiz, P. (2009). Caracterización estratigráfica sedimentológica de las unidades del Albiense de los alrededores de Santander. Implicaciones

- paleogeográficas y estructurales. En: 6º Simposio sobre el margen Ibérico Atlántico, Oviedo 1-5 diciembre de 2009.
- Mussett y Khan (2000): Looking into the Earth, An introductory to geological geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 470 pp.
- Orellana, E. (1972): Prospección geoelectrica en corriente continua. Ed. Paraninfo, Madrid 580 pp.
- Perconig E., Ortiz Ramos, A., Esnaola, J. M., Moreno de Castro, E., del Pan Arana, T., Martín García, L., Febrel, T., Argüelles, A., de las Heras, A. (1975): Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº61 (Bilbao) y memoria. IGME, Madrid, 38 p.
- Quintana, L. (2012): Extensión e Inversión Tectónica en el sector central de la Región Vasco-Cantábrica (Cantabria-Vizcaya, norte de España). Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. Vol. I (memoria) 560 pp.
- Quintana, L. (2023): Geological Map of the Lacilla Quarry (Biscay, North Spain). En: Smartmining. Progress Report. Final Report. Informe inédito TerraDat Geophysics S.L.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002): An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd, Cornwall, Inglaterra, 281 p.
- Rat (1988): The Basque-Cantabrian basin between the Iberian and European plates some facts but still many problems. En Rev. Soc. Geol. España, 1 (3-4)
- Robles, S. (2014). Evolución geológica de la Cuenca Vasco-Cantábrica. En: *Evolucion geologica de la Cuenca Vasco-Cantabrica* (Eds.: Bodego, et al.). Servicio Editorial de la UPV/EHU, Bilbao, 9-103 pp.
- Robles, S., Aranburu, A. y Apraiz, A. (2014a): La Cuenca Vasco-Cantábrica: génesis y evolución tectonosedimentaria. En: Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra (22.2), 99-114 p.
- Rosales (2001): Tectonic and environmental controls on platform geometry and facies architecture: The late Aptian-early Albian carbonate episode of the Castro Urdiales platform margin (Cantabria, northern Spain). En: *Geogaceta*, 30 pp 135-138.
- Serrano, A. y Martínez del Olmo, W. (1990): Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro, Cadenas Periféricas y de la zona de Levante. Barcelona, 39-53 p.
- Sharma (1997): Geophysical Methods in Geology. Second Edition. Elsevier Science Publishing, New York, 442 pp.
- Udías, A. y Mezcuá, J. (1997): Fundamentos de Geofísica. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 419 p. Alianza editorial, S. A. Madrid.

**Consulta web:**

- Grupo Enkarterri, <https://enkarterri.com/book-empresas/aridos-canteras-del-norte-s/> [Consulta realizada en fecha 02/04/2023]
- Cantera Elejalde, <https://canteracalizaelejalde.com/> [Consulta realizada en fecha 02/04/2023]
- Cantera Santullán, <https://santullan.com/> [Consulta realizada en fecha 02/04/2023]
- Cantera Carranza, <https://canteracarranza.com/#empresa> [Consulta realizada en fecha 02/04/2023]
- Cantera Lacilla, <https://grupolacilla.eus/cantera-lacilla/> [Consulta realizada en fecha 02/04/2023]