



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA**

Curso 2021-2022

**Campaña de caracterización del subsuelo
mediante prospección geofísica para
determinar las patologías y su extensión en
el terreno (Aranjuez, Madrid).**

*Campaign characterization of the subsoil through
geophysical prospecting to determine the
pathologies and their extension on the field
(Aranjuez, Madrid).*

CRISTINA GUTIÉRREZ DE DIEGO

TUTOR/ES: ENRIQUE ARACIL ÁVILA

JULIO GARZÓN ROCA



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA**

Curso 2021-2022

**Campaña de caracterización del subsuelo
mediante prospección geofísica para
determinar las patologías y su extensión en
el terreno (Aranjuez, Madrid).**

*Campaign characterization of the subsoil through
geophysical prospecting to determine the
pathologies and their extension on the field
(Aranjuez, Madrid).*

CRISTINA GUTIÉRREZ DE DIEGO

TUTOR/ES: ENRIQUE ARACIL ÁVILA

JULIO GARZÓN ROCA

Fdo.: Firmado por ARACIL
ÁVILA ENRIQUE - DNI
***9794** el día
27/07/2022 con un
certificado emitido por
AC Sector Público

Fdo.: Firmado por GARZÓN ROCA
JULIO - ***8097** el día
27/07/2022 con un
certificado emitido por
AC FNMT Usuarios



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

D./Dña. CRISTINA GUTIÉRREZ DE DIEGO con NIF 79138450 G, estudiante del Máster INGENIERÍA GEOLÓGICA en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2021-2022, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado “CAMPAÑA DE CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO MEDIANTE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA DETERMINAR LAS PATOLOGÍAS Y SU EXTENSIÓN EN EL TERRENO (ARANJUEZ, MADRID)” y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es son: ENRIQUE ARACIL ÁVILA y JULIO GARZÓN ROCA.

DECLARO QUE:

El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en las referencias bibliográficas. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 28 de julio de 2022

Fdo.:

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a Enrique Aracil el que haya confiado en mí desde comienzos del curso. Por ofrecerme la oportunidad de realizar las prácticas en su empresa y por ayudarme con este Trabajo de Fin de Máster. Además, me gustaría darle las gracias también a Belén, trabajadora de IMIDRA, por facilitarme tanto el proceso, como información importante para realizar este trabajo.

En segundo lugar, me gustaría agradecer en general a todos los profesores que nos han impartido clases durante este curso académico 2021-2022, pero especialmente a Julio Garzón porque sin duda, ha sido uno de los pilares para muchos de nosotros para sacar el Máster adelante.

Por otro lado, me gustaría que quedara reflejado el gran crecimiento que siento haber tenido este año, no solo en lo académico, sino también en lo personal. Ha sido una experiencia muy enriquecedora realizar el Máster fuera de casa y poder compartirlo junto a mi pareja, Andoni Alfonso, a quien le agradezco haberse cruzado en mi camino en aquel primero de carrera y habernos formado juntos desde entonces, codo con codo. Hacemos muy buen equipo.

Por supuesto, agradezco a toda mi familia por todos los ánimos cuando el curso se atragantaba un poco. Agradezco también a mis aitas y a los de Andoni, sin los que, por supuesto, no hubieran sido posibles ninguno de los logros que hemos ido adquiriendo durante todos estos años.

Finalmente, gracias a mis protagonistas, a mi ama, aita y hermano. Por confiar siempre en mí y por demostrármelo cada día, repitiéndome una y otra vez lo orgullosos que estáis. Gracias, porque gracias a vosotros, soy quien soy hoy.

RESUMEN

La presencia de rocas solubles puede verse fuertemente afectada por procesos de disolución asociados a lluvias y especialmente, a aguas subterráneas. Dicho proceso puede dar lugar al colapso del techo de las cavidades que se van generando y generar morfologías denominadas dolinas. Cuando estas se generan en zonas urbanas o en lugares cercanos en los que se desarrollan actividades humanas, pueden llegar a originar un peligro grave, afectando a las estructuras adyacentes.

En el entorno de la localidad de Aranjuez (Madrid), se han desarrollado varias depresiones kársticas asociadas a procesos de disolución de litologías carbonatadas y más concretamente, evaporíticas, como la dolina de El Recuenco o la de Borox.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el subsuelo de la Finca "La Chimenea", en las proximidades de la localidad de Aranjuez, motivado por un socavón aparecido en superficie y por la presencia de grandes grietas en las edificaciones adyacentes. Por ello, mediante técnicas geofísicas, concretamente mediante el uso de la tomografía eléctrica, se pretende conocer la envergadura del socavón, su extensión en el subsuelo y la posible presencia de otros procesos kársticos desarrollados en las proximidades.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2.	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	3
3.	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
4.	PROCESOS KÁRSTICOS.....	8
4.1.	<u>Procesos de endolinización</u>	8
4.2.	<u>Medidas de mitigación</u>	9
4.3.	<u>Actividad de los procesos kársticos en la Finca “La Chimenea”</u> ...10	
5.	METODOLOGÍA.....	13
5.1.	<u>Estudio previo</u>	13
5.1.1.	Método de prospección geofísica más adecuado.....	13
5.1.2.	Equipo empleado.....	14
5.1.3.	Planificación de la campaña de reconocimientos.....	16
5.2.	<u>Trabajo de campo</u>	16
5.3.	<u>Trabajo de gabinete</u>	20
5.3.1.	Procesado de los datos de campo.....	20
5.3.2.	Interpretación de los datos obtenidos.....	20
5.3.3.	Realización modelo 3D.....	21
6.	RESULTADOS.....	22
7.	VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
7.1.	<u>Interpretación litológica</u>	24
7.2.	<u>Características del subsuelo</u>	25
7.3.	<u>Modelización en 3D</u>	29
7.4.	<u>Sectorización de zonas vulnerables</u>	32
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	39
	Anexo I.....	41

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Es bien sabido que la ingeniería geológica es una herramienta muy útil para la caracterización de los terrenos donde se va a realizar alguna actuación constructiva. Es evidente que a lo largo de la historia se han ido desarrollando diferentes métodos de estudio para intentar solventar la variabilidad inherente de la propia naturaleza; ya sea de una observación directa de la misma, o de una medida indirecta. Ésta última se ha podido llevar a cabo a través del desarrollo de la prospección geofísica.

La aplicación de los estudios geofísicos en un proyecto geotécnico, aporta una información complementaria a otras disciplinas imprescindibles, como el conocimiento de la geología de la zona o, incluso, el control hidrogeológico.

En el caso concreto de este Trabajo de Fin de Máster, se ha aplicado la prospección mediante perfiles de tomografía eléctrica, como herramienta para obtener medidas indirectas de las resistividades presentes en el terreno. Los equipos de alta sensibilidad con los que se realiza, nos permiten generar perfiles en 2D tras el procesado de datos; de tal manera que, a partir de ellos, pueden localizarse zonas sensibles. Se trata, por lo tanto, de un recurso que permite centrar las investigaciones en dichas zonas anómalas, ajustando el presupuesto y reduciendo el cronograma establecido para la obra.

La ayuda complementaria de la geofísica abarca varios campos asociados a problemáticas geológicas, como la disolución de materiales, las fugas de agua o de contaminantes, la localización de acuíferos y de fallas, etc. El estudio de un modelo geofísico basado en la tomografía eléctrica aplicado en las cuevas de Atapuerca, por ejemplo, aportó nuevos e importantes datos sobre la configuración y desarrollo del endokarst, así como de sus rellenos (Ortega et al., 2012).

En este caso en concreto, el presente trabajo tiene como objetivo ofrecer una solución geotécnica a una problemática geológica asociada a la disolución de yesos, con la ayuda de la aplicación de técnicas geofísicas. Estas mismas técnicas ya han sido aplicadas con anterioridad para solventar problemáticas relacionadas con los procesos de disolución en el subsuelo. De hecho, la tomografía eléctrica resultó ser una de las herramientas más esclarecedoras para conocer la localización aproximada de las cavidades existentes alrededor de una sima en Madrona (Segovia). Dichas cavidades, además, afectaban claramente a las estructuras antrópicas, suponiendo un riesgo considerable (Gómez, et al., 2009).

Concretamente, la problemática de la zona de estudio del presente trabajo, se debe a procesos de disolución del subsuelo que son visibles a simple vista. La principal razón que motivó a la realización de dicho trabajo fue precisamente, el socavón hallado en superficie, teniendo en cuenta, además, que existen numerosas grietas en los edificios adyacentes, que podrían indicar que no se trata de un proceso aislado, sino que corresponda a una parte de un problema de mayores dimensiones

Mediante la interpretación de los resultados obtenidos a partir de diferentes perfiles de tomografía eléctrica, se ha realizado el estudio del subsuelo en la Finca "La Chimenea", abarcando los siguientes objetivos:

- Caracterizar geológicamente el subsuelo de la zona de estudio y determinar el origen y posible desarrollo de un socavón aparecido en superficie.
- Determinar las zonas susceptibles de sufrir procesos de disolución de yesos.
- Proponer diferentes recomendaciones y posibles soluciones.

2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El lugar de estudio se encuentra en el centro de la Península Ibérica, al SE de la Comunidad de Madrid. Se localiza cerca de la localidad de Aranjuez, concretamente en las proximidades del Cortijo de San Isidro y junto a la carretera Chinchón a Villaconejos M-305, correspondiente a los terrenos de la Finca Experimental “La Chimenea” (Fig. 1).

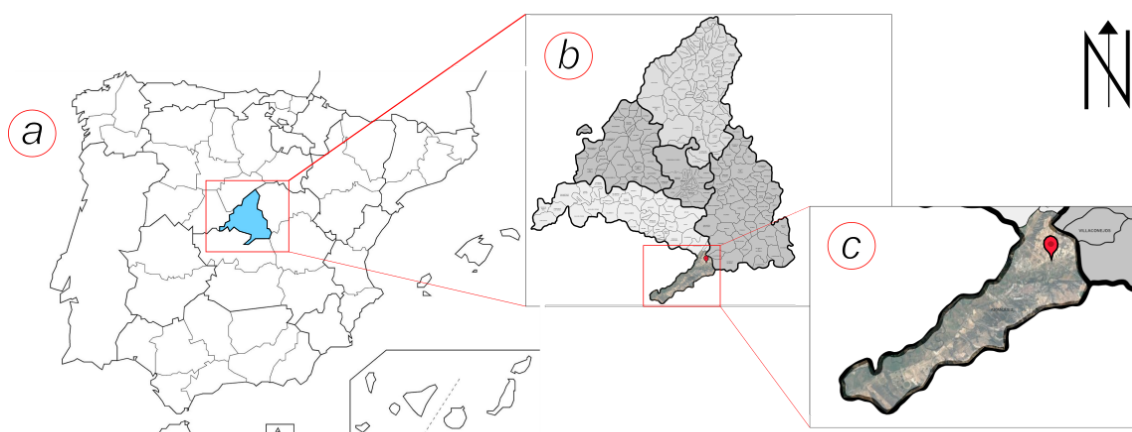


Fig. 1: Localización de La Finca Experimental “La Chimenea”, señalada a una escala cada vez menor. a. Señalado de azul la Comunidad de Madrid, b. su ampliación, en la que se ha superpuesto una imagen de Google Earth de la zona de Aranjuez y en la que se puede observar la localización exacta de la cueva, que ha sido señalizada con una marca de color rojo y c. una ampliación de la misma zona.

Debido a que el origen de las patologías se estima que podría estar relacionado con la disolución de yesos, resulta importante reseñar aspectos relacionados con la hidrogeología y con la climatología; cuyo comportamiento condiciona dichos procesos de karstificación.

Respecto al primer punto, la Finca “La Chimenea”, pertenece a la Cuenca del Tajo, en un lugar cercano al cruce de los ríos Tajo y Jarama. Un aspecto hidrogeológico destacable en la zona de estudio, es el predominio de las formaciones miocenas en las que se han desarrollado, por un lado, pequeños acuíferos ligados a procesos kársticos y, por otro lado, acuitardos desarrollados en tramos detríticos porosos.

Teniendo en cuenta la proximidad al río Tajo y la cota de la parcela estudiada, el nivel freático se localiza cercano a la superficie durante todo el año. La presencia de agua en la zona de estudio, por tanto, es habitual.

En cuanto al clima en esta zona, puede clasificarse como Mediterráneo templado-seco y con un régimen de humedad de semiseco a seco (Papadakis, 1966). Esto se debe a que la climatología de Aranjuez se caracteriza por presentar un verano largo, seco y

caluroso y unos meses de invierno fríos, con numerosos días de heladas y donde se concentran principalmente las precipitaciones. De hecho, a continuación se observa la Tabla 1, que recoge los datos climáticos de las estaciones meteorológicas de la zona (García de Pedraza et al., 1994), que se toman como los más representativos.

Estación meteorológica	Alt.	P	D	T	T. máx.	T. mín.	ETP
Aranjuez	490	425	66	14	20	7	754

* Alt. = Altitud (msnm)

P = Precipitación media anual (mm)

D = Días de lluvia

ETP = Evapotranspiración potencial media anual, según Thornthwaite (mm)

T. máx. = Valor medio anual de las temperaturas máximas (°C)

T. mín. = Valor medio anual de las temperaturas mínimas (°C)

T = Temperatura media anual (°C)

Tabla 1: Resumen de los datos climáticos anuales que se toman como característicos del entorno de la Finca "La Chimenea". Tomado de Rubio Pascual et al., 1991.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra situada al NE de la confluencia de los ríos Jarama y Tajo, zona definida por sistemas de abanicos y llanuras aluviales (Fig. 2). Por un lado, desde el punto de vista geológico, se sitúa en el sector centro-meridional de la Cuenca de Madrid, sobre los depósitos aluviales cuaternarios. Por otro lado, desde el punto de vista geomorfológico, pertenece a la depresión Tajo-Jarama, dando lugar a un valle profundamente encajado y formado por llanuras de inundación y terrazas aluviales.

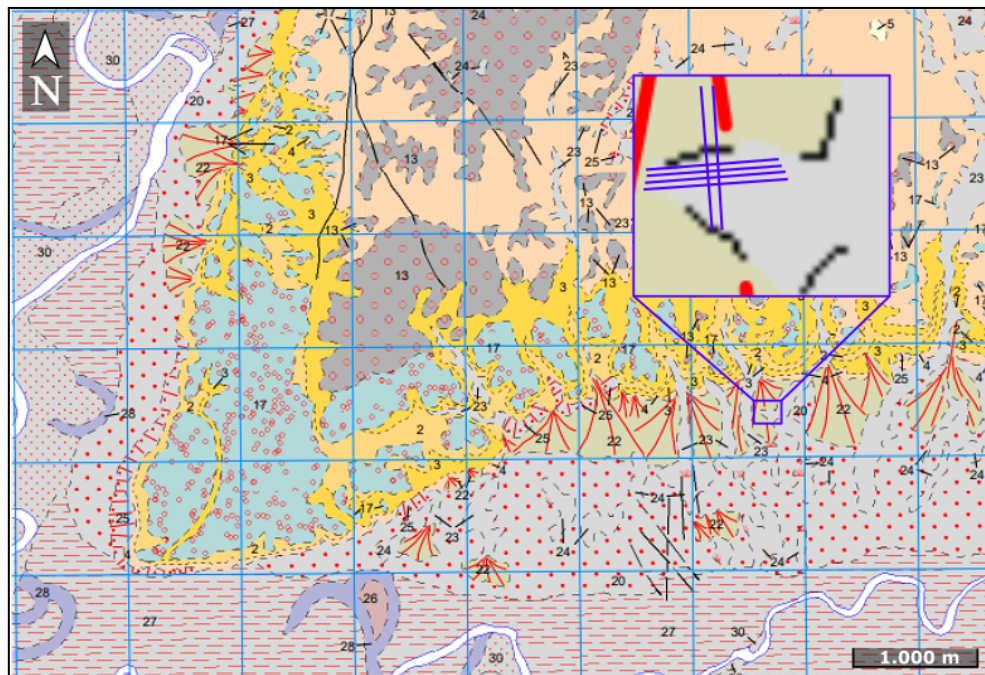


Fig. 2: Mapa geológico en el que se encuadra la zona de estudio (recuadro de color azul): Se ha ampliado la zona de la parcela para identificar la posición de los perfiles de tomografía eléctrica (en color azul de la figura ampliada). Mediavilla et al., 1991. Mapa geológico y Memoria de la Hoja nº 605 (Aranjuez). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición.

En la zona abarcada por la Hoja Geológica de Aranjuez (nº 605), Plan MAGNA E: 1/50.000, se diferencian cuatro unidades principales que, de muro a techo, son las siguientes:

- Unidad Inferior del Mioceno: Corresponde a la unidad más antigua (Calvo et al., 1996; Alonso Zarza et al., 2004) definida por cambios laterales de facies hacia el SW: conglomerados, arenas y limos con costras carbonatadas (Unidad 1), lutitas con niveles de arenas (Unidad 2), lutitas rojas y verdes con nódulos de yeso (Unidad 3) y yesos secundarios y lutitas verdes (Unidad 4). Sin embargo, cabe destacar una presencia mayor de depósitos yesíferos hacia el techo de la unidad y hacia el NE.

- Unidad Intermedia del Mioceno: Dicha unidad presenta unos espesores que oscilan entre 35 metros y más de 150 metros y presenta afloramientos distribuidos por toda la Hoja (Calvo et al., 1989; Rodríguez - Aranda, 1995). Sin embargo, el más extenso presenta una dirección NNE-SSW y se sitúa entre los valles de los ríos Tajo y Jarama. Dicha unidad se compone principalmente de materiales detríticos, que afloran al NW, y materiales yesíferos y carbonatados, predominantes en la zona E.
- Unidad Superior del Mioceno: Dicha unidad presenta un espesor máximo de 15 m (Rubio Pascual et al., 1991) y se define por un cambio lateral de facies entre arcillas rojas con calcretas (Unidad 10) y calizas (Unidad 11).
- Cuaternario: Dichos depósitos están relacionados con el sistema fluvial Jarama-Tajuña-Tajo y se encuentran rellenando las depresiones de la Hoja.

En el caso de la zona de estudio, los materiales aflorantes son los del Cuaternario (Fig. 3), que se apoyan discordantemente sobre las unidades Media e Inferior. El área se encuentra en el valle del Jarama, donde ocurren colapsos y pipes (Calvo et al., 1984; Rodríguez - Aranda, 2002), con desarrollos verticales de hasta 10 metros, debido a un proceso de disolución de los yesos de la Unidad Inferior, provocando los colapsos de las lutitas y carbonatos de la Unidad Intermedia y del Cuaternario suprayacente.

LEYENDA



Fig. 3: Leyenda del mapa geológico donde se enmarcan las litologías que se observan (cuadro de color rojo) en el área de estudio. Modificada de Mediavilla et al., 1991. Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición.

Teniendo en cuenta las características geológicas y retomando las hidrogeológicas y climáticas comentadas anteriormente, se considera que el entorno de la zona de estudio resulta un lugar propicio a sufrir procesos de disolución, dado el predominio de los materiales yesíferos y el flujo de agua continuo por su cercanía al río Tajo.

4. PROCESOS KÁRSTICOS

La disolución de las rocas solubles presentes en el terreno, combinado con los procesos de erosión y deformación, puede llegar a producir unas depresiones en el mismo, denominadas sumideros o dolinas (Williams, 2003).

4.1. Procesos de endolinización

Dicha geomorfología suele asociarse a procesos de subsidencia o colapso y suelen tener un mayor desarrollo en paisajes kársticos. En este proyecto, tanto los materiales geológicos presentes en la finca, como la problemática observada en superficie y en los edificios adyacentes, son coherentes con este tipo de procesos.

Una primera diferencia entre los mecanismos de subsidencia y de colapso, reside en la velocidad con la que se forman, siendo los últimos, mucho más bruscos y repentinos que los procesos de subsidencia. Dicha diferencia, a su vez, está relacionada con la peligrosidad que presentan; de hecho, los fenómenos de colapso constituyen el riesgo más importante asociado a los procesos kársticos.

Por un lado, las dolinas de subsidencia (Fig. 4-A) se generan en lugares en los que existe una cobertera potente de suelo, o cuando las formaciones geológicas de la zona, son fácilmente deformables por su plasticidad. La formación de las mismas puede darse por la existencia de discontinuidades en un sustrato soluble que, con la presencia de agua, provoca un ensanchamiento de las mismas, generando así, conductos por los que circula un mayor caudal. Este hecho, a su vez, genera una mayor disolución de los materiales solubles y un arrastre de finos que, finalmente, puede provocar una deformación dúctil de la cobertera y una depresión cónica (Guerrero, 2003). El proceso de subsidencia generado por la disolución de unas formaciones evaporíticas localizadas en Teruel y Calatayud, por ejemplo, constituyeron un importante riesgo geológico para la realización de obras lineales y edificaciones (Gutiérrez Santolalla, 1998).

Por otro lado, en el caso de las dolinas de colapso (Fig. 4-B), su origen se encuentra en la existencia de cavidades en el sustrato, ligadas a procesos de disolución y a la caída de partículas de una cobertera detrítica cementada. El fenómeno ocurre cuando la cavidad va avanzando hacia la superficie, hasta que finalmente, se supera la resistencia mecánica de la cobertera rígida y cede, dando lugar, precisamente, al colapso (Brutau Quintana, 2017). Uno de los lugares que se han visto gravemente afectados por este fenómeno, ha sido Zaragoza. De hecho, Simón et al., 2009,

analizan desde varios puntos de vista el riesgo que provocan las dolinas aluviales que se desarrollan en el karst de yesos en el entorno de la capital de Aragón.

En la Fig. 4 se observan de manera esquematizada, los dos modelos evolutivos básicos de las dolinas descritas mediante los mecanismos de subsidencia y de colapso:

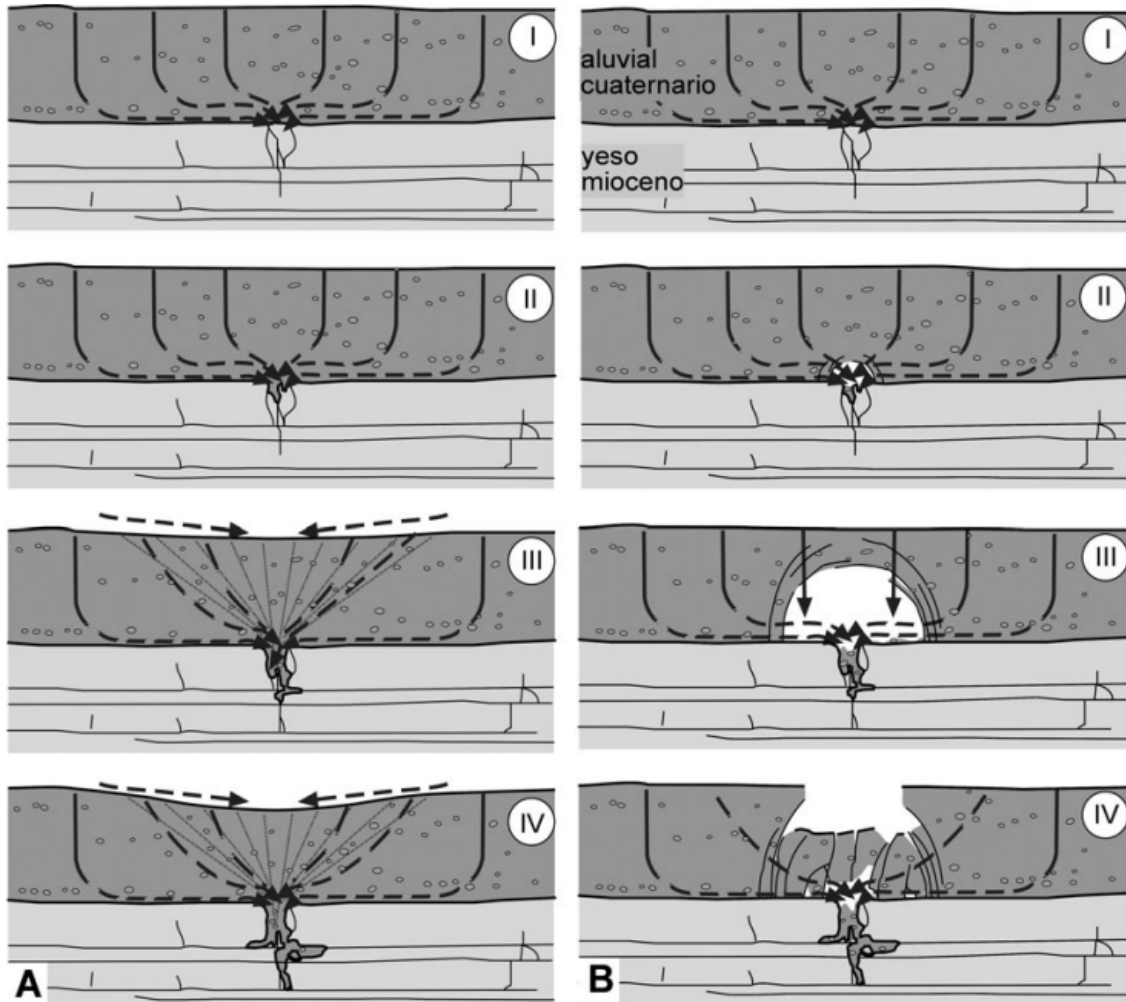


Fig. 4: Esquemas en los que se observan los dos modelos evolutivos de las dolinas. A) Dolina formada por una subsidencia lenta. B) Dolina formada por un colapso brusco. Tomada de Simón J.L., Soriano A. et al., 2009.

4.2. Medidas de mitigación

Sin duda, la estrategia de mitigación que resulta más segura y efectiva, es evitar las áreas que son susceptibles a desarrollar cualquier tipo de hundimientos. Para ello, habría que respetar las áreas delimitadas como peligrosas y limitar la urbanización en dichas zonas (Paukstys et al. 1999; Richardson, 2003).

Sin embargo, en muchas ocasiones resulta una tarea complicada de realizar, ya que, se trata de procesos que resultan complicados de prever. Por ello, cuando se trata de áreas ya urbanizadas, los riesgos deben mitigarse reduciendo la actividad de la karstificación o el riesgo que generan.

Es muy complicado controlar los procesos de disolución y posteriores hundimientos del subsuelo; por ello, las medidas de mitigación se basan principalmente en una planificación cuidadosa y una aplicación de los recursos ingenieriles de los que se disponen actualmente (Gutiérrez et al., 2008).

Entre las medidas correctivas que procuran disminuir la actividad de los procesos, encontramos (Milanovic, 2000):

- Evitar la extracción de agua y, por lo tanto, la disminución del nivel freático.
- Realizar el revestimiento de canales y zanjas.
- Hacer un control de riesgo.
- Impermeabilizar la superficie afectada mediante el uso de geomembranas o geotextiles.
- Desviar la escorrentía superficial gracias al uso de sistemas de drenaje adecuados.
- Rellenar las cavidades que se encuentran en el subsuelo mediante espumas o lechada.
- Mejorar el terreno mediante procesos de compactación del mismo o mediante inyecciones de lechada, con el fin de aumentar la resistencia y la capacidad de carga del suelo.
- Construir pantallas de lechada para evitar la circulación de agua.

4.3. Actividad de procesos kársticos en la Finca “La Chimenea”

Los sumideros activos en áreas urbanizadas pueden llegar a provocar situaciones de riesgo considerable, además de las implicaciones económicas y sociales que pueden suponer. Por poner un ejemplo, la disolución de las sales en el subsuelo, produjo el abandono de un pueblo de Puilatos, localizado en Galicia (Zarroca et al., 2017).

Existe una gran cantidad de casos reales en los que los procesos kársticos, concretamente, la formación de dolinas, han provocado grandes catástrofes. Por ello, se les debe dar la importancia que realmente tienen.

Por lo general, las grietas o fisuras, suelen ser los primeros síntomas de que en el terreno sobre el que se asientan las edificaciones en las que aparecen, han ocurrido asientos diferenciales excesivos.

Todas las estructuras presentan cierta deformabilidad hasta alcanzar finalmente la rotura. Esta se da cuando la combinación del peso de la propia estructura, más los esfuerzos generados por los asientos diferenciales, superan la resistencia a tracción o a compresión de los materiales.

Por otro lado, cobra gran importancia tanto la forma, como la dirección y ubicación de las grietas que aparecen en los edificios, ya que, ayuda a comprender los movimientos que haya podido experimentar la estructura y a diagnosticar las causas que han provocado el fallo de la cimentación.

Es de vital importancia, por tanto, realizar un estudio de reconocimiento de superficie y observar posibles manifestaciones que puedan indicar la existencia de procesos kársticos. Siguiendo esto, el 24 de marzo del 2022 se realizó una visita a la Finca “La Chimenea” y se reconocieron grietas en los edificios adyacentes al socavón encontrado en superficie. Dichas edificaciones son de ladrillo, por lo que se produjeron por el agotamiento de la resistencia a tracción, a favor de las juntas de los mismos.

El socavón fue visto por primera vez, el 3 de noviembre del 2021. Sin embargo, las grietas de los edificios llevan desarrollándose desde hace más de 9 años. De hecho, en las grietas que se observarán a continuación, se colocó un extensómetro en el 2015 y actualmente indica una separación algo mayor a 10 mm en la zona de mayor desarrollo.

Resulta importante también conocer que el socavón no ha aumentado su tamaño desde su formación a finales del 2021. Desde que se desarrolló, se le colocó una chapa de unas dimensiones algo mayores y se delimitó la zona con cintas de balizamiento y no fue a más.

En una primera instancia y teniendo en cuenta también la existencia del socavón, pudieron estar provocadas por asientos diferenciales ligados a procesos de disolución que se dan en el subsuelo. Esta hipótesis viene apoyada también por la orientación que presentan las grietas. Todo ello motivó a la realización de dicho estudio.

A continuación, se muestra un esquema del paramento en el que se observan las grietas. Tal y como se define en la Fig. 5, y tomando de referencia el socavón, se localizan al E. En dicho paramento puede apreciarse claramente que las grietas muestran un abatimiento hacia el S, precisamente hacia donde se encuentra dicho socavón en superficie.

El análisis de la dirección donde se produce el abatimiento de las grietas resulta un dato importante, ya que, su origen se está relacionando con procesos de disolución del subsuelo y, por lo tanto, su orientación indica el lugar hacia donde la estructura se está quedando descalzada; con lo cual, puede relacionarse directamente con los procesos de karstificación existentes en la zona de estudio.

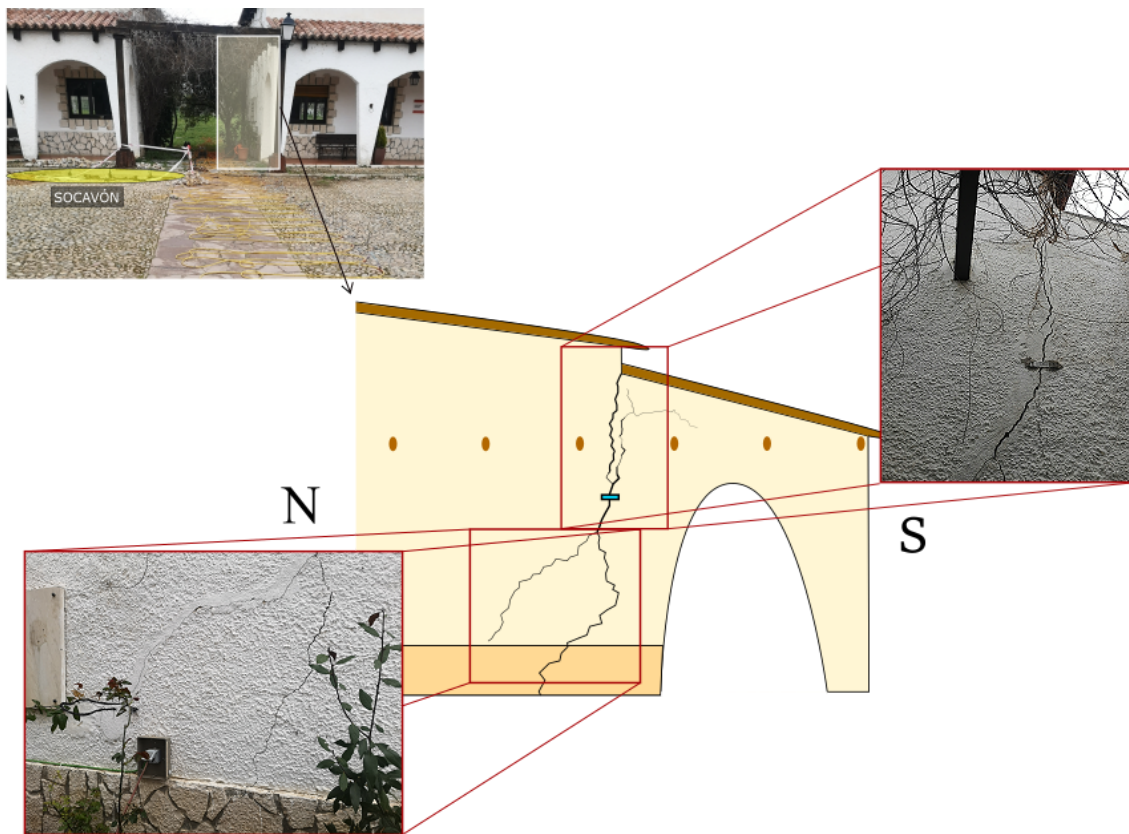


Fig. 5: En la imagen superior se observa el frente del edificio y se ha señalado tanto el socavón, como el paramento en la que aparecen las grietas. Se muestra también un esquema de dicho paramento con la tendencia de abatimiento hacia el S que muestran las grietas, así como las imágenes tomadas en campo.

5. METODOLOGÍA

Se pretende caracterizar geológicamente el subsuelo e identificar así el origen del socavón observable en superficie. Para ello, se define la unidad detrítico-yesífera problemática sobre la que se asienta la zona de estudio y se intenta ofrecer una solución geotécnica. Resulta necesario realizar un estudio previo para definir ciertos aspectos, una labor de campo para llevar a cabo los perfiles y una labor de gabinete para poder procesar los datos y obtener una interpretación y una posterior solución.

5.1. Estudio previo

5.1.1. Método de prospección geofísica más adecuado

El método de prospección geofísica considerado más adecuado para abordar los objetivos, es la prospección eléctrica mediante perfiles de tomografía eléctrica. Esto se debe a que, mediante esta técnica, pueden analizarse los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico; es decir, ofrece una diferenciación de los materiales presentes en la zona de estudio, de acuerdo al valor de resistividad que presenten. Este parámetro se ha considerado que puede mostrar muchas variaciones en el subsuelo de la finca, en función de las características del terreno. Dicho valor dependerá de la naturaleza y composición de las rocas; pero, sobre todo, del incremento de porosidad debido a la posible alteración que pudieran presentar, así como de la presencia o no, de fluidos y de su quimismo.

Se trata de un método de resistividad multielectrónico y su objetivo se basa en obtener secciones 2-D de las resistividades obtenidas del subsuelo (López, 2006). A partir de la interpretación de dichas secciones, se pueden llegar a determinar las diferentes unidades geológicas, sus contactos y la presencia de zonas anómalas, relacionadas en muchas ocasiones, con procesos de disolución debidos a filtraciones.

El funcionamiento de la tomografía eléctrica consiste en introducir en el terreno un campo eléctrico de corriente continua a través de dos electrodos de corriente (A y B), que están conectados mediante un miliamperímetro. Por otro lado, mediante otros dos electrodos (M y N) conectados a un milivoltímetro, se mide la diferencia de potencial eléctrica entre ambos puntos. A partir de dicho parámetro, por lo tanto, se calcula la resistividad en el punto medio del dispositivo y una profundidad concreta. La tomografía eléctrica permite colocar y medir, simultáneamente con numerosos pares de electrodos de corriente y con numerosos pares de electrodos de potencial para

conseguir, más que una representación 1-D de las resistividades del subsuelo, secciones 2-D de dicho parámetro (Telford, 1990).

Por otro lado, al introducir la corriente eléctrica en el terreno, ésta puede propagarse de tres maneras diferentes (Telford, 1990):

- Conducción dieléctrica. Cuando los materiales son mayoritariamente aislantes.
- Conducción electrónica. Asociada a materiales con electrones libres, como los metales.
- Conducción electrolítica. Ligada al movimiento libre de los iones, presentes en los fluidos intersticiales del terreno.

En este caso en concreto, el estudio se centra en la existencia de unos socavones (Fig. 6) que pueden o no, estar rellenos de agua. Si, efectivamente, lo estuvieran, la resistividad disminuiría, pues el agua permite una mayor circulación de la corriente eléctrica y si no lo estuvieran, ocurriría lo contrario, debido al carácter dielectrónico del aire. En cualquiera de los dos casos, por lo tanto, mostrarán un contraste con el resto de materiales presentes, haciendo que la tomografía eléctrica sea una técnica muy útil para la localización de dichos sectores anómalos del subsuelo.

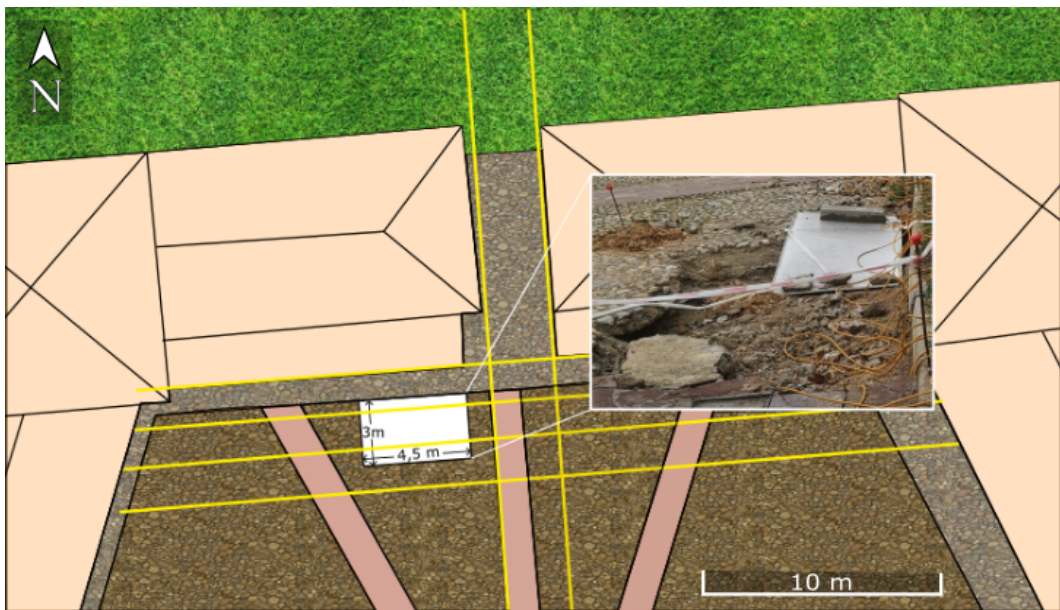


Fig. 6: Esquema de la zona de estudio realizada mediante Inkscape en el que se observa el socavón visible en superficie, de 4,5x3 m aproximadamente; así como su imagen tomada en campo.

5.1.2. Equipo empleado

El equipo necesario para ejecutar el método seleccionado, consta del propio equipo de medida, los electrodos que se clavan en el terreno, los cables multiconductores que

unen éstos con el equipo de medida, los conectores, una batería para generar la corriente y un ordenador portátil.

- Los cables multiconductores (Fig. 7.A) son los encargados de transmitir la corriente eléctrica a lo largo de todo el perfil.
- Los electrodos (Fig. 7.A), son barras metálicas de acero por las que se transmite la descarga eléctrica al terreno y su número es variable en función de las necesidades del proyecto.
- La cinta métrica; elemento complementario que, en este caso, es necesario para conocer la separación exacta definida entre los electrodos.
- Los conectores (Fig. 7.A) se encargan de unir las diferentes bobinas de cable con los electrodos y transmitir así, la corriente eléctrica al terreno.
- Mediante el ordenador portátil y gracias al software Electre Pro, se define la configuración de electrodos elegida.
- La unidad central (Fig. 7.B), es la encargada de ejecutar de manera automática la secuencia de medidas definida anteriormente y verificar el buen estado de todas las conexiones. Además, permite también almacenar todos los resultados obtenidos en campo.
- La batería (Fig. 7.B), es la fuente de alimentación de todo el sistema.

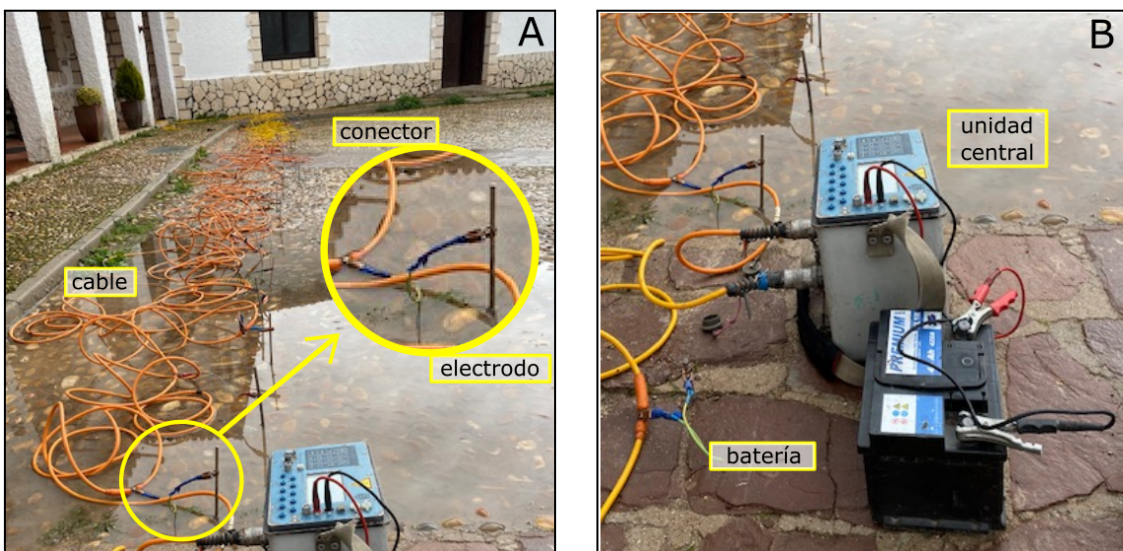


Fig. 7: En la imagen A, se muestran los cables, conectores y electrodos utilizados en el campo y en la imagen B, tanto la unidad central, como la batería utilizada.

5.1.3. Planificación de la campaña de reconocimiento

Una vez que se ha seleccionado el método de tomografía eléctrica como el más adecuado para el estudio a realizar, existen una serie de aspectos importantes que son necesarios definir en la fase de planificación de la campaña de campo:

- Definir y ajustar los objetivos perseguidos.
- Determinar el número de perfiles necesarios y su ubicación.
- Determinar la profundidad máxima de investigación.
- Determinar tanto el número, como la separación de electrodos.
- Determinar el dispositivo electródico de medida.

5.2. Trabajo de campo

Se trata de conocer el origen del socavón observable en superficie e investigar su posible desarrollo en el subsuelo. Para abordar este objetivo, el 24 de marzo del 2022 se realizó una campaña de prospección geoelectrónica mediante 6 perfiles de tomografía eléctrica centrados en la patología identificada en superficie (Fig. 8).



Fig. 8: Imagen satélite de la zona de estudio en la que se observan los perfiles de tomografía eléctrica realizados y sus inicios señalizados con un círculo amarillo; así como la localización del socavón observado en superficie.

Para cubrir la zona de investigación con el número más resolutorio de perfiles, se consideró realizar, por un lado, cuatro perfiles, dispuestos en una dirección

aproximada E-W separados 1,5 m entre ellos y por otro lado, otros dos perfiles colocados de manera perpendicular en la dirección N-S, separados una distancia aproximada de 2,5 m (Fig. 8). Mediante esta disposición de los perfiles se consideró que se podría abarcar la zona de la patología y la existencia o no, de su desarrollo a otras áreas de los alrededores.

A la hora de colocar los electrodos de los perfiles, es fundamental determinar correctamente cuál es el origen y cuál el final de cada uno de ellos, todo ello con el fin de no tener problemas en la fase de interpretación. Por ello es importante señalarlos adecuadamente en la Fig.8.

A continuación, se lleva a cabo la fase de implantación de los electrodos en la superficie del terreno con una separación constante que, en este caso, fue de 0,5 m para tener buen compromiso entre resolución y profundidad de investigación. Dichos electrodos se clavan en el suelo comúnmente con la ayuda de un martillo; sin embargo, parte de la zona de estudio presentaba una solera (Fig. 9), por lo que, en alguna ocasión, fue necesaria la ayuda de un taladro, para realizar unos agujeros previos a la introducción de los electrodos correctamente y garantizar el buen contacto entre estos y el terreno.



Fig. 9: Imágenes tomadas en la zona de estudio, en las que se observa la superficie del terreno compuesta por solera.

Una vez introducidos los electrodos en el terreno, se procede a colocar el cable y retranquearlo, para colocar las conexiones de los electrodos acorde a la separación definida. La necesidad de retranquear los cables, se debe a que la separación entre las conexiones de los mismos, es de 5 m; por lo que, al ser superior a la separación

establecida en el proyecto, es necesario ajustarlos a la distancia de 0,5 m (Fig. 10). Fueron necesarios, por tanto, cuatro bobinas de cable multiconductor por cada uno de los perfiles, con el fin de tener perfiles de 35,5 m de longitud, con los que alcanzar la profundidad de 7 m con una gran resolución.



Fig. 10: Imágenes en las que se observa el retranqueo realizado en cada cable, para hacer coincidir sus conexiones con la separación de electrodos previamente definida.

A continuación, se unen todos los electrodos a las conexiones de los cables mediante los conectores que, en este caso, fueron un total de 72 y, por lo tanto, se definieron perfiles con una longitud de 35,5 metros (Fig. 11).



Fig. 11: La imagen de la izquierda corresponde al inicio del perfil 1 y la de la derecha, al final del mismo. Además, pueden observarse cuatro rollos, correspondientes a los cuatro cables que componen el perfil.

Finalmente, mediante la unidad central se configuran todas las variables del dispositivo (Tabla 2):

Longitud del perfil	35,5 m
Número de electrodos	72
Separación entre electrodos	0,5 m
Profundidad máxima de investigación	7 m
Número de medidas por perfil	4.562

Tabla 2: Resumen de los parámetros necesarios para la realización de los perfiles de tomografía eléctrica.

En este trabajo se utilizó la configuración mixta de Schlumberger y Dipolo-Dipolo. La elección de dichas configuraciones se debe a que el primer dispositivo muestra mayor sensibilidad a los cambios horizontales mientras que, el segundo, a los verticales (López, 2006). El procesado mixto de ambos, generará unos resultados que, en principio, son más acordes con la realidad del subsuelo.

La diferencia entre ambos dispositivos (Fig. 12) reside en su configuración, ya que, mientras que en el dispositivo Schlumberger los electrodos potencial (M y N) se localizan en el centro del cuadrípolo, en el dispositivo Dipolo-Dipolo, se encuentran a un lado .

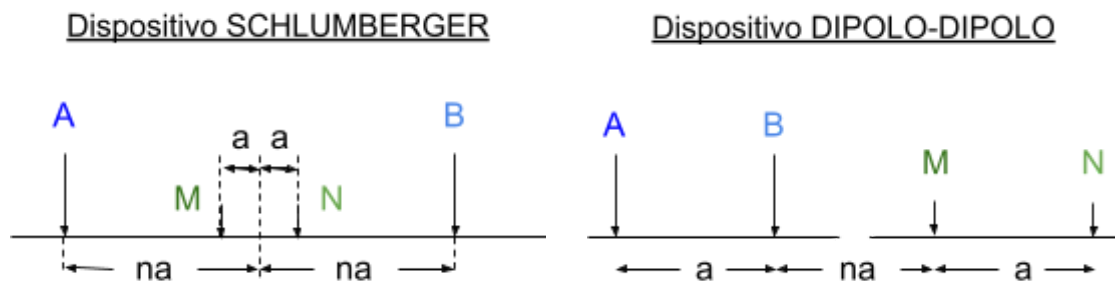


Fig. 12: La imagen de la derecha corresponde al dispositivo Schlumberger; mientras que, el de la derecha, al dipolo-dipolo.

Finalmente, teniendo en cuenta los dispositivos seleccionados (Schlumberger y Dipolo-Dipolo), la profundidad de investigación es aproximadamente de $\frac{1}{3}$ de la longitud del perfil. Por lo tanto, la profundidad máxima de investigación resultante, alcanzó cerca de 7 m en el tercio central del perfil. Dicha información se introdujo en la unidad central, así como las configuraciones utilizadas.

5.3. Trabajo de gabinete

5.3.1. Procesado de los datos de campo

A partir de los datos obtenidos en el campo, se generaron secciones 2-D de las resistividades medidas. Para ello, es necesario un programa de inversión que permita obtener resistividades reales a partir de las aparentes obtenidas en el campo.

En primer lugar, se emplea el programa específico Electre Pro, que permite crear los archivos de medida y verificar el correcto funcionamiento de la adquisición de datos.

A continuación, una vez realizadas las mediciones en el campo, se filtran todos los valores obtenidos mediante el programa específico Prosys II. Mediante dicho programa, se identifican y eliminan; en definitiva, se aíslan los datos que se encuentran por debajo del umbral definido.

Finalmente, mediante el programa RES2DINV, se interpolan e interpretan los datos de campo de resistividades eléctricas. La inversión de los datos de resistividad, se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, relacionado con los métodos de elementos finitos y de diferencias finitas. Mediante dicho programa, se invierten los datos y se obtiene una visualización en 2D de los perfiles de tomografía eléctrica.

5.3.2. Interpretación de los resultados obtenidos

Una vez procesados los datos y obtenidos los perfiles de tomografía eléctrica, se procede a diferenciar todas las unidades litológicas presentes en la zona de estudio. A continuación, se identifican dichas litologías en los perfiles y se delimitan los contactos así como posibles discontinuidades interpretables.

Por otro lado, no solo se trabaja sobre los perfiles; si no que también se interpretan los resultados sobre una imagen satélite. Sobre ella, se definen tanto las unidades diferenciadas, como las posibles zonas anómalas detectadas y posibles discontinuidades observadas. De esta manera, se pretende encontrar relaciones y obtener una imagen general de lo que abarca la problemática en cuestión, su desarrollo en superficie y su proyección en el subsuelo.

5.3.3. Realización modelo 3D

La modelización 3D no se trata de una metodología a la que se recurra en abundancia. Ha sido aplicada en ocasiones para presentar cortes horizontales del terreno (Negri et al., 2008), o para determinar las dimensiones de unas posibles tumbas en el interior de la Iglesia del Espíritu Santo de Occhiolà, localizada en Italia (Leucci et al., 2012). En este caso, se pretende realizar una modelización en 3D que pueda ayudar a comprender la evolución de las posibles anomalías detectadas en el subsuelo. Por ello, se han escogido los perfiles paralelos 3, 4, 5 y 6, por abarcar una superficie mayor y con mucha más información.

Para llevar a cabo la modelización en 3D se ha utilizado el software Voxler V4. Se trata de una herramienta con múltiples componentes para modelos geológicos y geofísicos, entre otros. Sin embargo, es necesario generar la base de datos asociada a los perfiles de tomografía eléctrica realizados para poder visualizarla mediante dicho programa.

En primer lugar, es necesario obtener un archivo "topres.dat" a partir de la inversión realizada mediante el programa RES2DINV. A continuación, dicho archivo se introduce en el programa SURFER para obtener las variables de resistividad y su posición en cada perfil. Mediante él se crea un modelo digital del terreno georreferenciado. Por lo tanto, los datos obtenidos a partir de dicho programa permiten crear una hoja de cálculo y asociar cada valor de resistividad de cada perfil, a una posición "Z" determinada.

A continuación, es necesario generar otra hoja de cálculo que recoja las coordenadas X e Y de cada punto seleccionado, así como su posición dentro de cada perfil. Existen diferentes maneras de realizarlo pero, para este proyecto, se llevó a cabo con la ayuda de Google Earth y se escogió el metro inicial, medio y final de cada perfil, obteniéndose 9 puntos; 3 por perfil. Por lo tanto, a cada posición denominada "Z", se le asignaron sus coordenadas "X" para los valores de longitud e "Y", para los de latitud.

Mediante el programa Oasis, se genera la base de datos necesaria interpolando las dos hojas de cálculo generadas anteriormente y que tienen en común la variable "Z", creando así un único archivo con las variables X, Y, Z y resistividad, por lo que, al obtener los valores de cada punto en las tres direcciones y sus variables de resistividad, se puede proceder a su visualización mediante el software Voxler V4.

6. RESULTADOS

Los perfiles de tomografía eléctrica, muestran una escala de colores que abarcan valores desde muy baja resistividad eléctrica, en torno a 2-5 $\text{ohm}\cdot\text{m}$; hasta valores de resistividad eléctrica altos, de entre 1.500 y 2.000 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. A continuación se muestran dos de los perfiles (Fig. 13 y Fig. 14) que se tomarán como referencia para conocer la escala de colores / valores de resistividad, de la zona de estudio. En el caso del perfil 1, se tomará como representativo también del perfil 2 y en el caso del perfil 3, se tomará como representativo de los perfiles 4-5-6.

Cada una de las tonalidades o conjunto de tonalidades de los perfiles, se han hecho corresponder con las diferentes litologías presentes en la zona de acuerdo al estudio geológico realizado y la cartografía geológica existente.

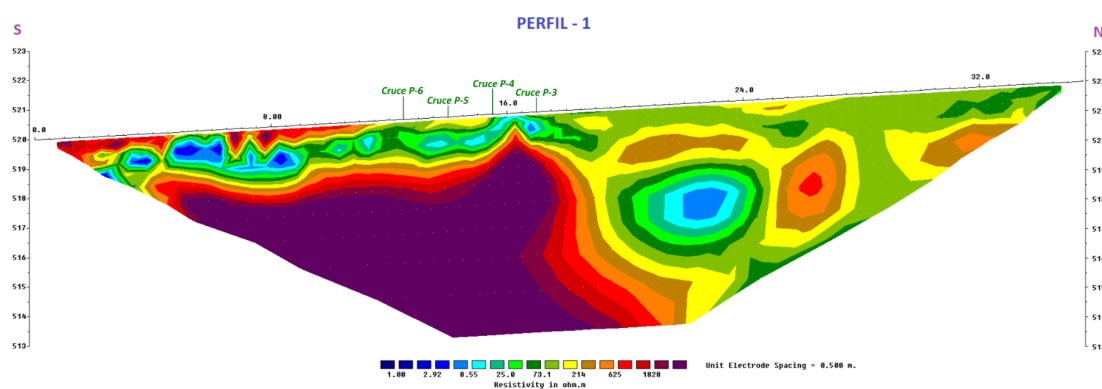


Fig. 13: Perfil de tomografía eléctrica nº 1 en el que se observa la escala de colores y en el que se ha señalado la intersección con los perfiles que se disponen perpendicularmente al mismo.

En primer lugar, los tonos azulados, corresponden a los materiales de menor resistividad; es decir los más conductores, o a zonas anómalas, con valores comprendidos entre 1 y 10 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. Se localiza puntualmente en las zonas más superficiales y, de forma más localizada, a unos 5 m de profundidad en los perfiles 1, 3 y 5.

En segundo lugar, los colores verdosos corresponden a materiales con una resistividad moderada de entre 25 y 100 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. Se trata de una capa continua que se observa en todos los perfiles y de un espesor variable entre 0,5 y 1,5 m.

En tercer lugar, los colores amarillos corresponden a materiales con resistividades medias entre 100 y 400 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. En los perfiles 1 y 2 se localizan de manera puntual en el sector N, mientras que en el resto de perfiles, se observa principalmente en el sector W, mayoritariamente en los perfiles 3 y 4.

En cuarto lugar, los colores anaranjados y rojizos corresponden a materiales de mayor resistividad eléctrica; es decir, de menor conductividad, con un rango de valores entre 400 y 900 ohm·m. Puede observarse que en los perfiles 3, 4, 5 y 6 dichos colores forman una capa superficial relativamente continua, de 0,5 m de espesor aproximadamente. Sin embargo, en los perfiles 1 y 2, dicha capa superficial desaparece a partir del metro 11 desde el inicio del, para el caso del perfil 1, y a partir del metro 15, para el caso del perfil 2.

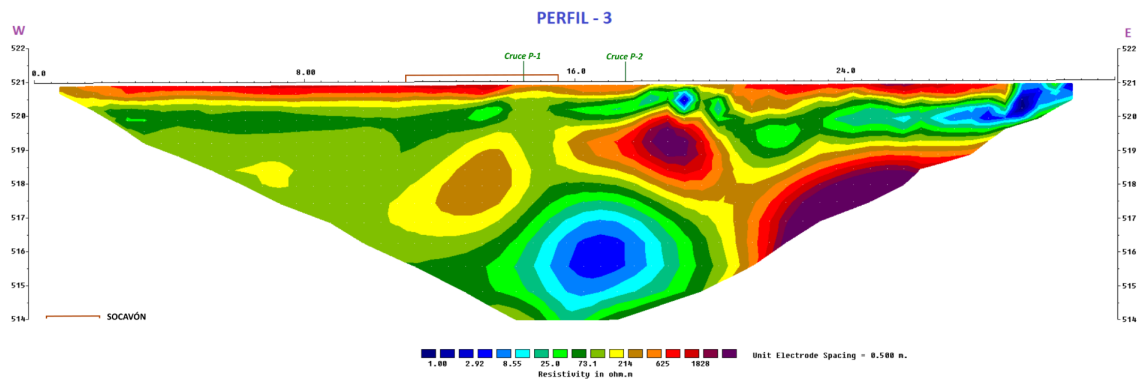


Fig. 14: Perfil de tomografía eléctrica n° 3 en el que se observa la escala de colores y en el que se ha señalado la intersección con los perfiles que se disponen perpendicularmente al mismo; así como la presencia del socavón visible en la superficie.

Finalmente, los valores más resistivos de los perfiles corresponden a los tonos granates que presentan valores mayores de 1.000 ohm·m. En los perfiles 1 y 2, se observa un cuerpo de grandes dimensiones en el sector S. En el resto de perfiles, los cuerpos son más moderados y se localizan principalmente en la zona central y el sector E.

7. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Interpretación litológica

Todas las tonalidades se encuentran presentes en los 6 perfiles realizados por lo que, en todos ellos, pueden diferenciarse cuatro unidades principales de acuerdo a sus valores de resistividad. A continuación, se va a describir el perfil 1, como representativo del conjunto de perfiles (Fig. 15).

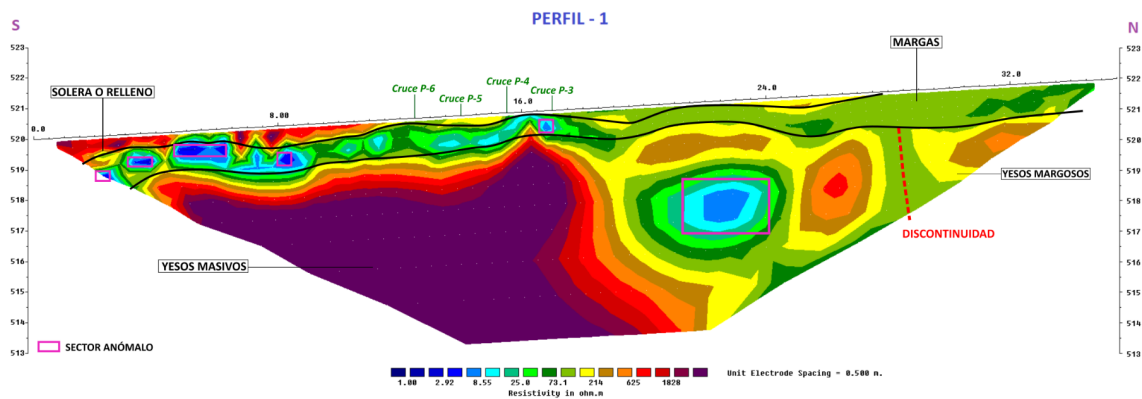


Fig. 15: Perfil de tomografía eléctrica nº 1 en el que se observan todas las litologías presentes en la zona, así como el resalte de las zonas anómalas y las discontinuidades observables.

- Unidad de solera o relleno: Corresponde a la zona superior de los perfiles, con un espesor variable que oscila entre 0,5 m y 1 m. Dicha unidad tapiza la superficie del terreno y se identifica por los colores rojizos y anaranjados.
- Unidad de margas: Los valores de resistividad, en este caso, son mucho más moderados, típicos de las margas bajo el nivel freático, correspondiendo a las tonalidades verdes que presentan un espesor relativamente constante a lo largo del área de estudio. La similitud, tanto en los valores de espesor, como en los de resistividad que posee esta unidad en todos los perfiles, indica que se trata de una unidad muy homogénea composicionalmente y que posee una escasa variación lateral.
- Nivel de yesos margosos: Se sitúa por debajo de la unidad de margas, presentando el contacto cercano a la superficie, a unos 2 m y prácticamente paralelo a la misma. Se trata, por lo tanto, de un contacto mayoritariamente horizontal, pero con una gran variabilidad en su espesor. Los valores de resistividad que presenta son mayores que en el caso anterior, correspondiendo a las tonalidades más amarillentas.

- Nivel de yesos masivos: Mediante un cambio lateral de facies de la unidad de yesos margosos, se identifica este nivel de yesos más compactos y masivos, de acuerdo a los valores tan altos de resistividad que presentan, correspondiendo a las tonalidades granates.

Por otro lado, existen diferentes zonas que se han catalogado como anómalas. Son aquellas que se han señalado con un recuadro rosa en la Fig. 15 y pueden ser tanto superficiales (hasta -1 m), como profundas (hasta -5 m). Corresponden a los colores más azules y, por lo tanto, a zonas en las que las resistividades son menores. Según esto, dichas anomalías pueden asociarse a zonas alteradas, con un cierto grado de saturación, también a la presencia de acumulaciones de finos o incluso, derrubios de posibles dolinas que se hubieran formado.

Finalmente, se ha interpretado que, tanto los yesos margosos como los masivos, se encuentran afectados por una serie de discontinuidades con trazados más o menos verticales. En dichas zonas los valores de resistividad son menores, lo que podría indicar la existencia de agua, de zonas alteradas y saturadas o de zonas con humedad y acumulación de finos.

7.2. Características del subsuelo

Aunque en un principio se hayan tomado los perfiles 1 y 3 como representativos del resto, es cierto que existen diferencias destacables entre ellos, que ayudan a comprender la evolución de los materiales en el subsuelo.

En primer lugar, se observan en la Fig. 16 los perfiles 1 y 2, que presentan una orientación aproximada de N-S y son perpendiculares al resto.

En cuanto a la unidad de solera o relleno, a diferencia del resto de perfiles, en ambos casos se observa que no presenta una continuidad hasta el final, si no que finaliza en su extremo N, dando lugar al afloramiento de las margas, al comienzo del césped en superficie. Sin embargo, esa misma unidad de margas, presenta zonas posiblemente alteradas o saturadas en el extremo S de los perfiles, aunque se observa que presenta un mayor desarrollo en el primero de ellos, por lo que dicha anomalía se va disipando hacia el E.

Por otro lado, en cuanto a los yesos masivos, son mucho más homogéneos en el caso del perfil 1, por lo que su presencia es mucho más abundante en el cuadrante SW de

la zona de estudio. En el segundo perfil, sin embargo, parecen presentar un grado de alteración algo mayor.

Por el contrario, hacia el N puede observarse una variación lateral de facies hacia los yesos margosos que parecen presentar mayores anomalías hacia el W, tal y como puede observarse en el perfil 1, a unos -3 m de bajo la superficie, pero más profundas hacia el E.

Finalmente, por lo que se respecta a los dos perfiles, en ambos casos puede interpretarse una discontinuidad en sus respectivos extremos N, por lo que, tras la correlación de ambas, puede deducirse que la dirección de la misma es E-W.

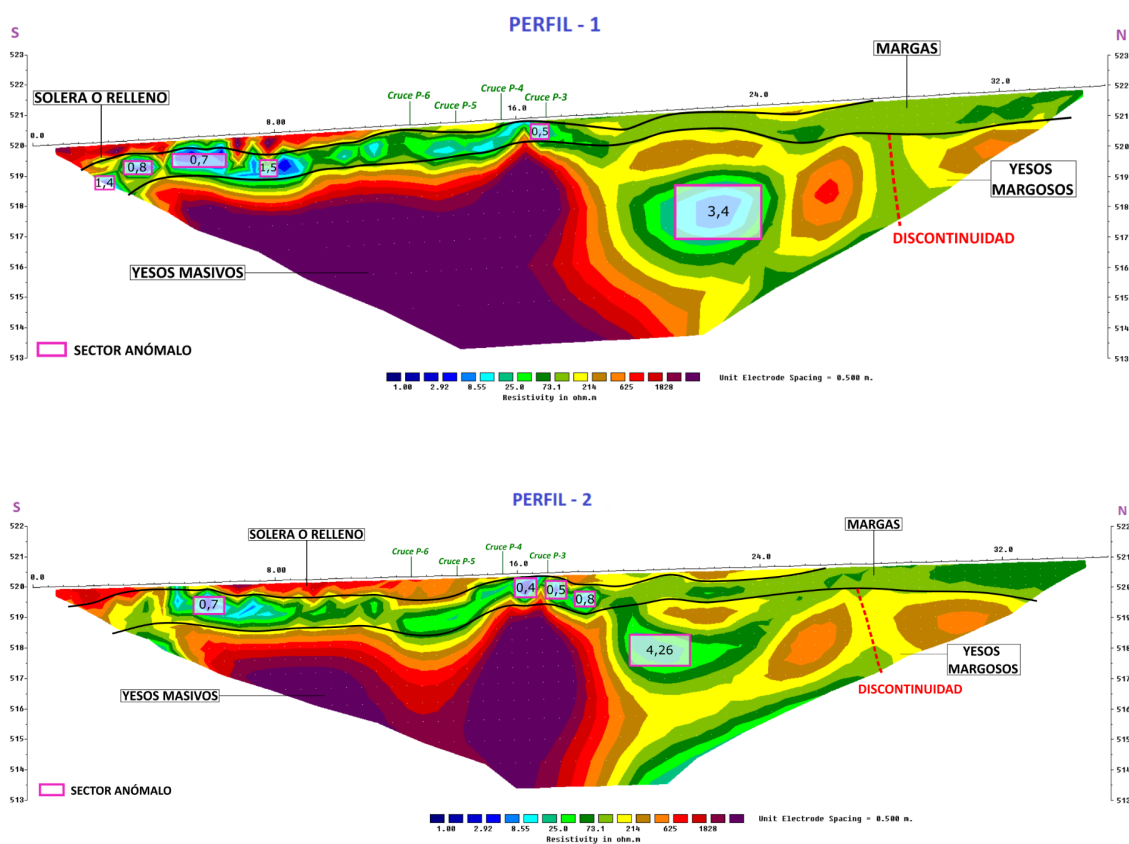


Fig. 16: Perfiles de tomografía eléctrica nº 1 y 2, en los que se observan todas las litologías presentes en la zona, así como el resalte de las zonas anómalas y las discontinuidades observables.

En segundo lugar, se muestran a continuación las interpretaciones realizadas para el conjunto de los perfiles paralelos nº 3, 4, 5 y 6, en las que pueden observarse las evoluciones de las anomalías destacadas (Fig. 17).

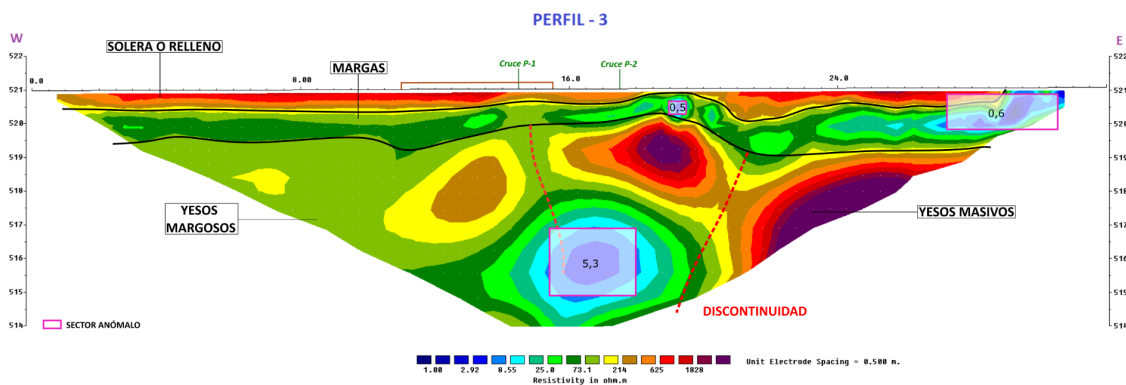
En cuanto al nivel de relleno, puede observarse claramente que el socavón encontrado en superficie, abarca los perfiles 4 y 5 por lo que, teniendo en cuenta la separación existente entre los mismos, su efecto debe extenderse como máximo, 4,5 m en la

horizontal. Sin embargo, hacia el SE y a la altura del segundo, en los perfiles 5 y 6 puede apreciarse también la existencia de otra anomalía superficial, de dimensiones mucho menores.

Además, en el extremo oriental de estos cuatro perfiles, se observa también otra anomalía superficial y de resistividades mucho menores que las anteriores, pudiendo asociarse a un sector de mayor grado de alteración de los materiales margosos, incluso con la presencia de agua.

Por otro lado, en cuanto a la presencia de los yesos margosos, va disminuyendo hacia el S y, de hecho, presentan una anomalía muy poco resistiva en el perfil 3 a unos 5,3 m de profundidad y que se extiende hasta el perfil 5, atenuándose a 2,8 m de profundidad aproximadamente, pero que parece aumentar a los 6,5 m. Esta anomalía, podría vincularse a un proceso de alteración ligada a la presencia de agua, ya que, parece representar el desarrollo de una discontinuidad que, en el perfil 6 puede intuirse, pero que en el resto parece observarse con claridad. Dicha discontinuidad, por lo tanto, presentaría una orientación aproximada de N-S.

Finalmente, en el extremo E de los perfiles se observa la presencia de los yesos masivos, que va en aumento hacia el cuadrante SE de la zona de estudio. De hecho, puede intuirse una discontinuidad en todos los perfiles, que va siendo cada vez más evidente, hacia los perfiles 3 y 4; por lo que, de nuevo, presentaría una orientación aproximada de N-S.



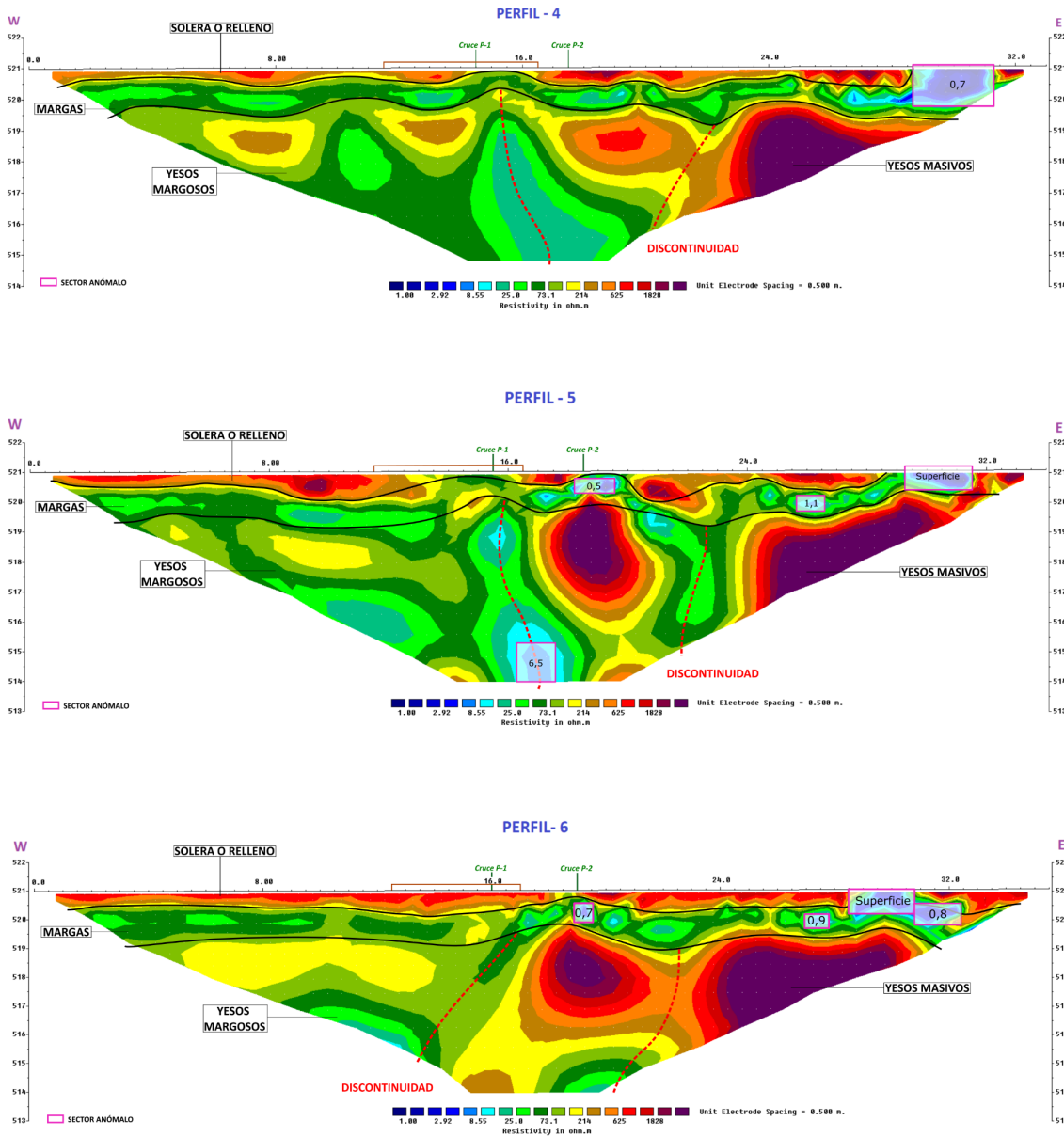


Fig. 17: Perfiles de tomografía eléctrica nº 3, 4, 5 y 6, en los que se observan todas las litologías presentes en la zona, así como el resalte de las zonas anómalas y las discontinuidades observables.

Finalmente, como resumen de lo expuesto, se muestra en la Fig. 18 la disposición en planta y la extensión de todos los materiales, incluidos los más vulnerables a sufrir procesos de disolución y las zonas determinadas como anómalas.

El hecho de calcular la extensión aproximada de los materiales en planta, resulta importante, ya que, permite conocer la magnitud de las posibles zonas vulnerables.

Además, se han señalado las discontinuidades, que se comentaban anteriormente, para conocer si existe entre ellas alguna relación y, sobre todo, para conocer su continuidad, porque son zonas de debilidad por las que se puede dar la circulación de

agua que acelere el proceso de disolución. A su vez, pueden tener un papel muy importante sobre la profundidad a la que se desarrollan las anomalías, por lo que es muy importante conocer su desarrollo.



Fig. 18: Imagen satélite en la que se observa la disposición en planta de los materiales más vulnerables a experimentar procesos de disolución; así como la extensión en superficie, que presentan.

Puede observarse que las unidades de yesos abarcan una gran extensión de la zona de estudio, siendo los materiales predominantes en la Finca “La Chimenea”. Los yesos masivos predominan en el sector NW y los yesos margosos, en el SE, dando lugar al desarrollo prácticamente superficial de dos zonas anómalas. Sin embargo, el sector en el que coinciden las anomalías superficiales y profundas es el sector centro, donde confluyen las dos litologías.

7.3. Modelización en 3D

El modelado en 3D es un proceso que permite realizar una representación más visual del terreno y que, en muchas de las ocasiones, facilita la comprensión. Para este proyecto se ha elaborado un modelo en 3D para facilitar la observación en el subsuelo del desarrollo de las anomalías detectadas.

Como se ha mencionado con anterioridad, se han representado los perfiles 3, 4, 5 y 6 por ser el área con mayor información, tal y como se observa en la Fig. 19.

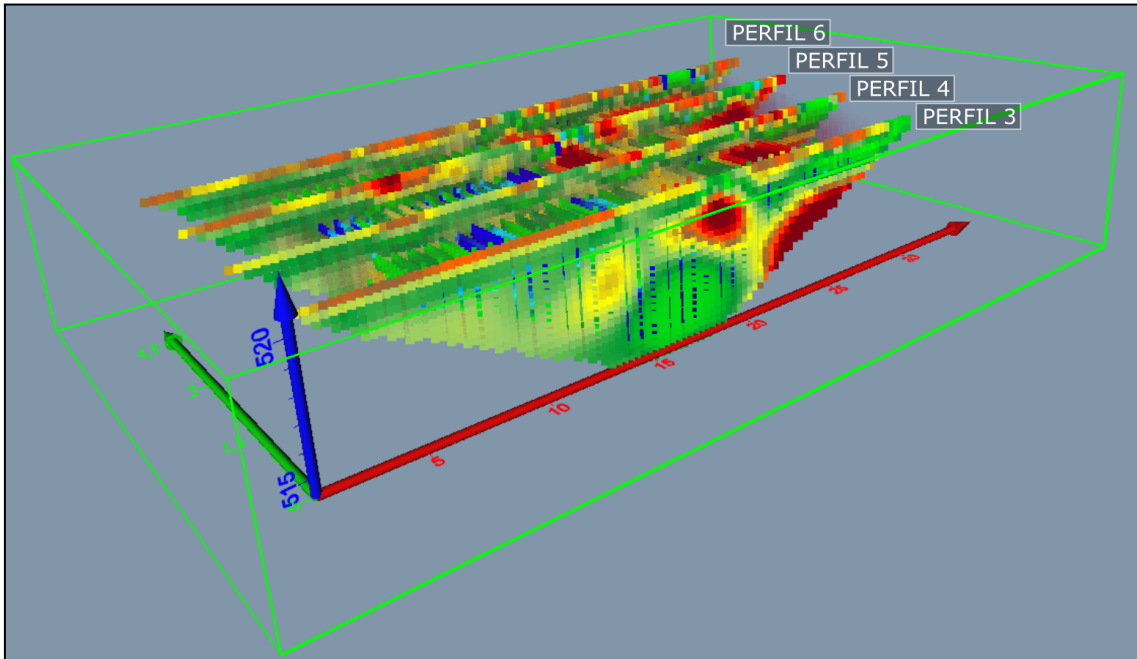


Fig. 19: Modelo en 3D de los perfiles 3, 4, 5 y 6 de tomografía eléctrica.

La orientación del conjunto de perfiles de la Fig. 20 permite observar el desarrollo que muestran las anomalías detectadas con anterioridad. Así, tras analizar las figuras de representación tridimensional, se puede incluir lo siguiente:

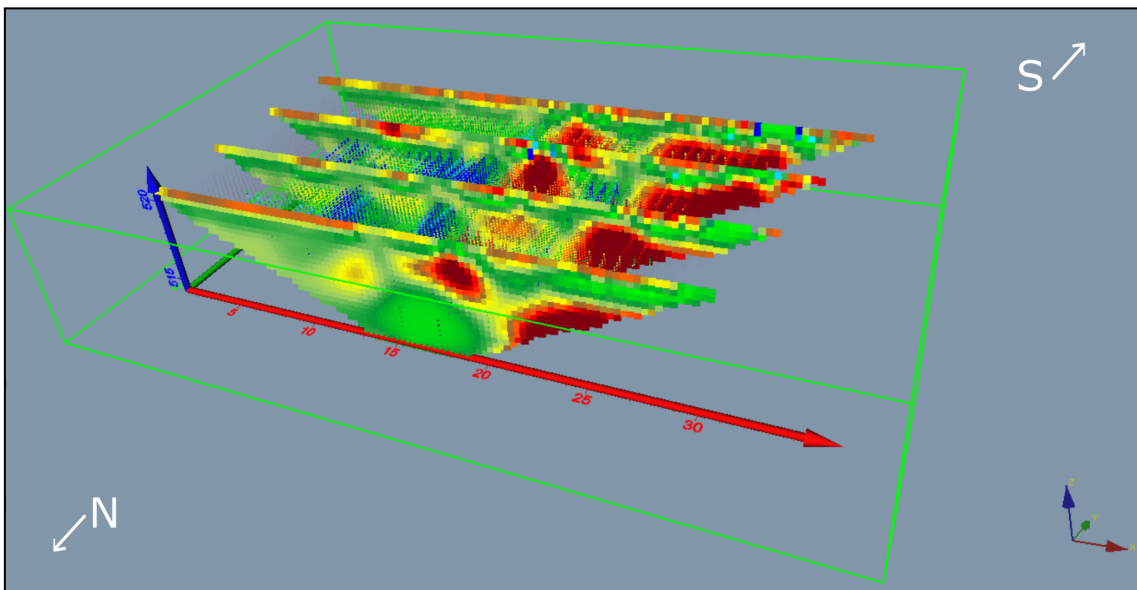


Fig. 20: Modelo 3D en el que se observa el desarrollo de las anomalías detectadas en profundidad.

En primer lugar, en cuanto a las anomalías poco resistivas interpretadas en profundidad, puede observarse su desarrollo a lo largo de los perfiles 3 y 4 de una manera más puntual o localizada y en el perfil 5, con un desarrollo mayor.

En segundo lugar, en cuanto a los valores más resistivos, puede observarse que la presencia de los yesos margosos va disminuyendo hacia el S y los yesos masivos se localizan principalmente en el extremo E de los cuatro perfiles, presentando un desarrollo mayor en el perfil 5. Sin embargo, en la zona central puede observarse también la presencia de dichos yesos que va disminuyendo hacia el N.

Observando los modelos 3D, por lo tanto, se interpreta que los yesos masivos son mayoritarios en el sector S y que progresivamente, va aumentando la presencia de los yesos margosos y las anomalías menos resistivas hacia el N.

La perspectiva de la Fig. 21 permite estudiar de una manera más general la disposición y el desarrollo de los materiales comentados anteriormente. En ella se observa precisamente, el predominio de las resistividades mayores hacia el E y las menores hacia el W.

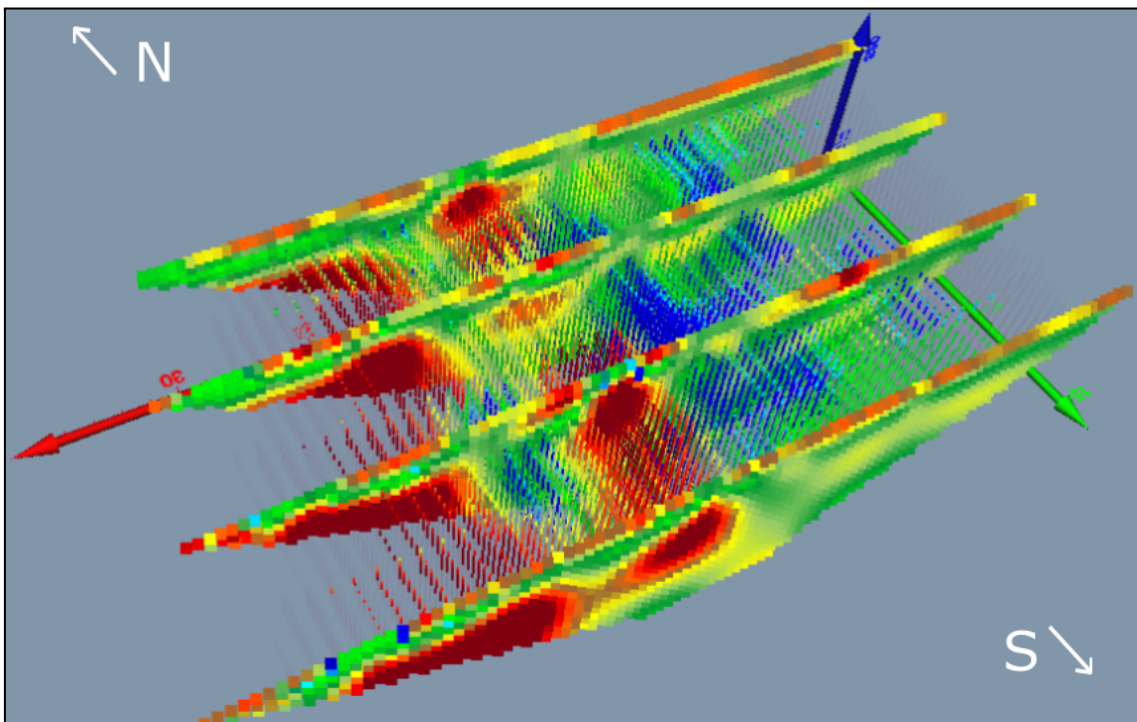


Fig. 21: Modelo en 3D que permite observar el desarrollo de los materiales presentes en el subsuelo.

7.4. Sectorización de zonas vulnerables

Teniendo en cuenta la interpretación de los perfiles realizada, se ha procedido a sectorizar la zona de estudio de acuerdo a la sensibilidad que presenten los materiales, a dar lugar a socavones o a patologías similares (Fig. 22).

En primer lugar, el sector más problemático observado en la zona de estudio, es el denominado sector centro, señalado de color rojo y que se localiza, precisamente, en la zona central de todos los perfiles.

En este primer sector, puede apreciarse una zona relativamente profunda y posiblemente saturada, sombreada de color verde en la Fig. 19. En los perfiles puede observarse que en la zona más septentrional, la profundidad es aproximadamente de -2 m y va descendiendo a favor de las posibles discontinuidades presentes en la unidad yesífera, hasta -5 m aproximadamente. En cuanto a las dimensiones de dicha zona vulnerable o afectada, sus efectos presentan una extensión de unos 10 m en la dirección NW-SE y una anchura variable pero que, en conjunto, puede afectar a una superficie de unos 38 m².

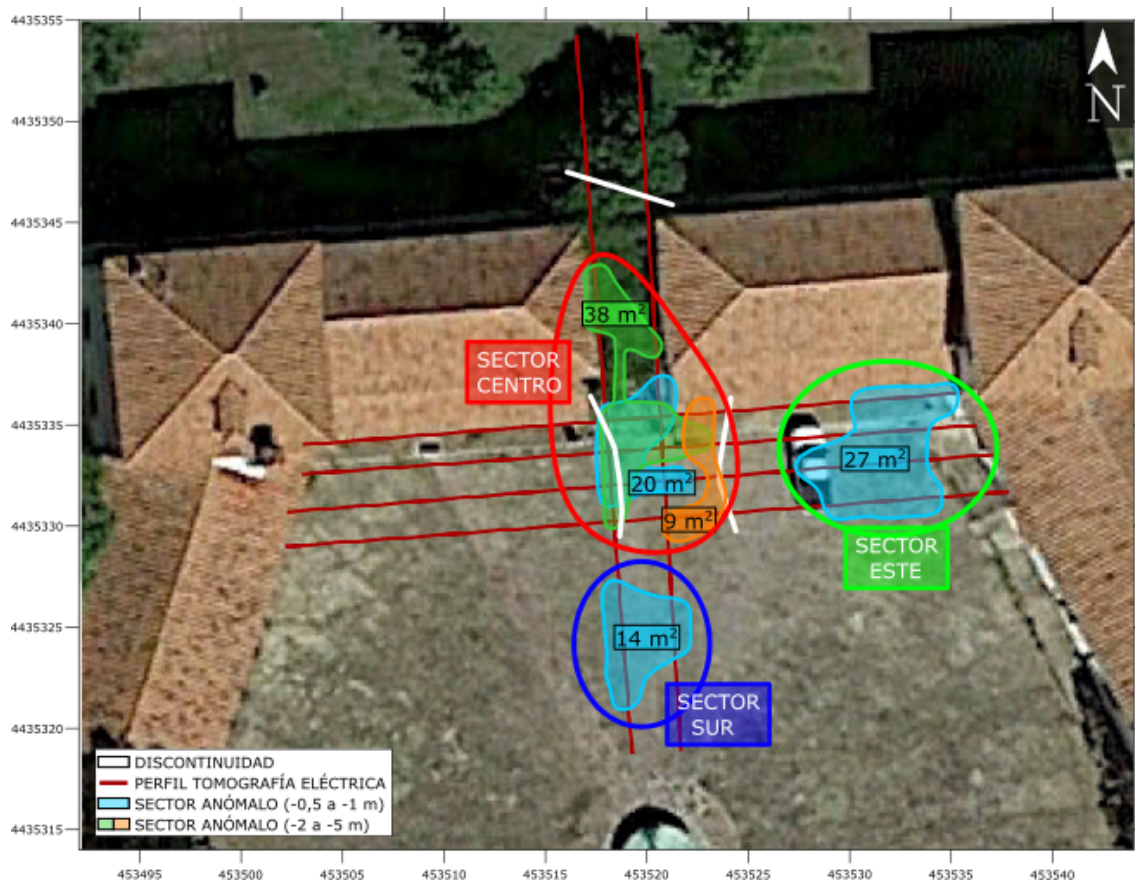


Fig. 22: Imagen satélite en la que se observa la sectorización realizada de acuerdo a la vulnerabilidad de los materiales; así como la extensión en superficie, que presentan.

Por otro lado, en el sector centro, se define también una zona sombreada de color azul, localizada sobre la zona anterior. En este caso, corresponde a un subsector aparentemente saturado en la parte más cercana a la superficie, entre -0,5 y 1 m, con una extensión aproximada de unos 20 m².

Ambas zonas se caracterizan por presentar una disminución de los valores de resistividad, probablemente ligado a zonas alteradas o que hayan sufrido procesos de disolución, dando lugar a la presencia de finos de decantación.

Finalmente, en cuanto al sector centro se refiere, se diferencia una zona de carácter mucho más resistivo que en los dos casos anteriores y que ha sido señalizada de color naranja. Aunque se han caracterizado como yesos muy compactos, cabe la posibilidad de que estén asociados a la existencia de una cavidad vacía. Sin embargo, se trata de una zona con resistividades muy elevadas y que aparece casi en continuidad del resto de yesos compactos, por lo que es probable que se trate de yesos masivos; aun así, no puede saberse con certeza únicamente mediante la realización de la tomografía eléctrica. En cualquier caso, presenta una dirección aproximada N-S a -2 m de profundidad, aproximadamente y unos 2-3 m de anchura.

En segundo lugar, se ha diferenciado otra zona, denominada sector sur, ya que, se encuentra al inicio de los perfiles 1 y 2. En este caso, se observa de nuevo la disminución de los valores de resistividad, que podría ser debido a la presencia de una zona saturada. Se localiza cercano a la superficie, por encima de -1 m de profundidad y se extiende en una superficie de unos 14 m².

Finalmente, se ha determinado un último sector, denominado sector este, por identificarse al final de los perfiles 3, 4, 5 y 6 y caracterizado de nuevo, por la disminución de los valores de resistividad. Presenta las mismas características que en el caso anterior; es decir, se localiza por encima del metro de profundidad y es probable que se asocie a la presencia de una zona saturada. En este caso, se extiende en una superficie de unos 27 m².

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han realizado 6 perfiles de tomografía eléctrica en la Finca “La Chimenea”, con el fin de conocer el área afectada por el socavón hallado en superficie y determinar posibles zonas anómalas asociadas a procesos de disolución de subsuelo y que pudieran tener relación con las grietas existentes en los edificios adyacentes.

El análisis detallado de los perfiles de tomografía eléctrica junto con el modelado en 3D ha permitido identificar una serie de sectores caracterizados por respuestas anómalas en comparación con las resistividades presentes en el subsuelo, identificándose con ello 5 sectores sensibles.

En primer lugar, uno de los sectores presenta un carácter más resistivo que el resto. Dicha anomalía se ha interpretado como una unidad de yesos masivos muy compactos, aunque cabe la posibilidad de que esté ligada a la presencia de una cavidad. Sin embargo, al mostrar una gran continuidad lateral y una gran homogeneidad, la primera interpretación de que se trate de una unidad de yesos masivos, podría ser la más acertada. En cualquier caso, presenta una dirección aproximada de N-S, unos 2-3 m de anchura, se localiza aproximadamente a -2 m de profundidad y se extiende a lo largo de unos 9 m² en el sector definido como Sector centro.

En segundo lugar, otro de los subsectores sensibles, se sitúa también en la zona central y se extiende entre los dos edificios, en una superficie de unos 38 m². Se trata de una zona posiblemente saturada y relativamente profunda; ya que, se encuentra aproximadamente a los -2 m en la parte más septentrional y desciende hasta los -5 m hacia el S. Se trata, de hecho, de la anomalía más profunda destacada en la zona. Es muy probable que el descenso de cota hacia el S, se produzca a favor de las discontinuidades que se han interpretado.

Finalmente, tres de los subsectores, corresponden a capas más superficiales localizadas entre -0,5 y -1 m bajo el sustrato. En estos casos, sus extensiones son horizontales y presentan aspectos tabulares. Los valores que caracterizan a dichos sectores son resistivos, por lo que pueden asociarse a los materiales localizados sobre la formación yesífera con presencia de zonas saturadas o con un mayor grado de humedad. Además, dicha presencia de agua podría estar ligada a la existencia de fugas de las canalizaciones próximas al edificio, o incluso a fugas desde las canalizaciones de la fuente central.

Se interpretan así los siguientes tres sectores:

- Uno de los sectores, se sitúa en la parte central (Sector centro, Fig. 22) y se extiende por una superficie de unos 20 m².
- Otro de los sectores, se localiza en la parte S de la zona de estudio (Sector sur, Fig. 22 y presenta una superficie de unos 14 m².
- Finalmente, el tercer sector se encuentra en la parte más oriental (Sector este, Fig. 22), abarcando una superficie de unos 27 m².

Teniendo en cuenta, por tanto, los resultados obtenidos, se concluye que existe una zona central más sensible que el resto, ya que presenta una concentración mayor de anomalías detectadas.

Es importante destacar también que no se ha interpretado en los perfiles que atraviesan el socavón detectado en superficie (Perfil 3-4-5-6), ninguna prolongación del mismo, en ninguna de las direcciones. De tal manera que se interpreta como un hecho aislado. Sin embargo, sí puede interpretarse que los procesos de karstificación presentes en la Finca "La Chimenea", están asociados a dolinas de colapso. Se ha podido observar en los perfiles, que las anomalías se desarrollan en profundidad y van ascendiendo hacia la superficie, por lo que, si el proceso continuara a favor de las fallas detectadas, hasta la superficie, se podría superar la resistencia de la solera y dar lugar a colapsos, mayoritariamente en la zona central.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta las limitaciones que presenta un estudio geofísico basado en la tomografía eléctrica. Se trata de un método que, si bien tiene la ventaja de que permite identificar bien las zonas conductoras, aunque sean de pequeño tamaño o espesor, tiene como desventaja que las muestra generalmente con unos desarrollos magnificados, debido a la prevalencia de las líneas de flujo de corriente a transcurrir por esos sectores de mayor conductividad. Esto favorece la localización, pero dificulta el dimensionamiento y el cubicaje, sin el apoyo de otras técnicas. Por ello, se consideran diferentes recomendaciones que se creen necesarias para obtener un estudio completo de la problemática del lugar:

- Se han observado anomalías superficiales, que se han interpretado como materiales con un grado relativamente alto de humedad; por ello, podría realizarse una calicata en uno de los sectores señalizados y comprobar si efectivamente presentan dicha humedad. En tal caso, sería recomendable localizar la posible fuga de la tubería.

- En cuanto a las anomalías interpretadas a una profundidad mayor, se recomienda la realización de un sondeo. Mediante él, se espera corroborar si efectivamente, se trata de una formación de yesos masivos o si, por el contrario, se trata de una cavidad.

Se recomienda, por lo tanto, que el sondeo sea de recuperación de testigo continuo y se propone un punto en el que sería adecuado realizarlo (Fig. 23). Se trata del punto señalado de color amarillo y debería realizarse un sondeo hasta unos -7 m de profundidad, en cuyo caso se atravesaría tanto la unidad resistiva más profunda identificada, como la menos resistiva y superficial. En el Anexo I, además, se observa la figura realizada para facilitar la localización del sondeo y de los materiales presentes en el subsuelo.



Fig. 23: Imagen satélite en la que se observan las anomalías detectadas y sobre la que se ha situado el sondeo de recuperación de testigo continuo propuesto.

A continuación, se muestra la columna estratigráfica esperada si se realizara el sondeo en el lugar señalado (Fig. 23).

Tal y como se observa en la Fig. 24, se espera atravesar aproximadamente medio metro de solera o relleno. A continuación, se prevé atravesar aproximadamente un metro de margas con la presencia de la zona anómala más superficial; es decir, con una zona de mayor grado de saturación, o incluso, alteración. Debajo de ellas, se espera atravesar aproximadamente 1,5 m de yesos masivos y progresivamente, cada

vez más margosos hasta -4,5 m de profundidad aproximadamente. Finalmente, la previsión es alcanzar los yesos karstificados y con presencia de finos, o con un mayor grado de saturación.

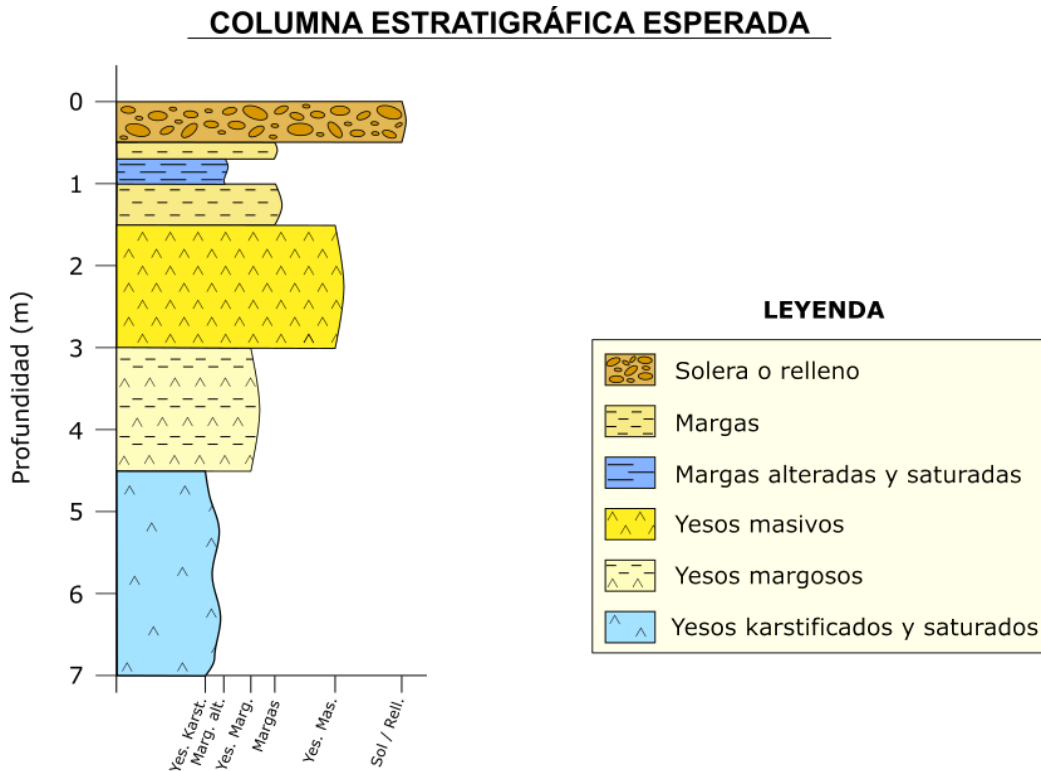


Fig. 24: Columna estratigráfica esperada si se realiza el sondeo en el lugar señalado.

Finalmente, en el caso de que no hubiera opción de realizar el sondeo recomendado, la mejor opción entre todas las medidas de mitigación que se conocen actualmente y que se han mencionado anteriormente, sería el relleno con espumas. Concretamente, el relleno con espumas de poliuretano. Se trata de una de las soluciones más económicas y eficaces aplicables a la problemática localizada en la Finca “La Chimenea”, ya que, se trata de un método de mejora del suelo que presenta significativas ventajas (Che Lat et al., 2020).

En primer lugar, se trata de un material no degradable y, por lo tanto, una vez inyectado en el terreno, no existe la problemática de que se desintegre con el tiempo. En segundo lugar, el poliuretano es un polímero más rígido que el poliéster y, por consiguiente, presenta una relación directa con la mejora de las características del terreno. Por otro lado, no se trata de un material que absorba agua, por lo que evita las posibles filtraciones que redujeran la resistencia al corte del terreno. Finalmente, las espumas de poliuretano son materiales livianos que reducen la carga adicional

aplicada sobre el terreno subyacente y evitan así problemas de sobrecarga que se tradujeran en asientos diferenciales.

Se concluye, por tanto, que en la zona central de la Finca “La Chimenea” se identifica una zona más vulnerable que el resto a sufrir procesos de disolución que pueden llegar a dar lugar a dolinas de colapso. Por ello, se recomienda realizar un sondeo para corroborar las hipótesis planteadas y se considera como mejor opción el relleno de los huecos mediante la aplicación de espuma de poliuretano. Dicha aplicación se considera principalmente en la zona central al haberse interpretado como la que presenta las patologías más desarrolladas.

9. BIBLIOGRAFÍA

Alonso Zarza, A. M., Calvo, J. P., Silva, P., Torres, T. (2004). Cuenca del Tajo. In: Cuenas Cenozoicas (Ed.), Geología de España (pp. 556-561). SGE - IGME.

Brutau Quintana, P. J. (2017). Estudio de soluciones para la estabilización de un área afectada por dolinas en Alcalá de Ebro (Zaragoza): Estudio geotécnico. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia.

Calvo, J. P., Ordóñez, S., Hoyos, M., García del Cura, M. A. (1984). Caracterización sedimentológica de la Unidad Intermedia del Mioceno Sur de Madrid. In: Facultad de ciencias geológicas, Revista de materiales y procesos geológicos (pp. 145-176). Universidad Complutense de Madrid.

Calvo, J. P., Ordóñez, S., García del Cura, M. A., Hoyos, M., Alonso Zarza, A. M., Sanz Montero, M. E., Rodríguez Aranda, J. P. (1989). Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid. In: Facultad de ciencias geológicas, Acta geológica hispánica, (pp. 281-298). Universidad Complutense de Madrid.

Calvo, J. P., Alonso Zarza, A. M., García del Cura, M. A., Ordóñez, S., Rodríguez Aranda, J. P. y Sanz Montero, M. E. (1996). Sedimentary evolution of lake systems through Miocene, Madrid Basin. In: Paleoclimatic and Paleohydrological constraints, (Eds. Friend, P. y Dabrio, C.), Tertiary Basins of Spain (pp. 264-269). Cambridge University Press.

Che Lat, D., Ali, N., Bagus Mohamed Jai, I., Zurairahetty Mohd Yunus, N., Razali, R., Rosseira, A., Talip, A. (2020). A review of polyurethane as a ground improvement method. Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences, 16, 70-74.

García de Pedraza, L. y Reija Garrido, A. (1994). Tiempo y Clima en España. Meteorología de las Autonomías. Madrid: Dossat, S.A.

Gómez Ortiz, D., Crespo, T. M. y Maganto González, M. F. (2009). Aplicación conjunta de georradar y tomografía eléctrica para la evaluación del riesgo de colapso en la Sima Madrona (Segovia). Geogaceta, 46, 35-38.

Guerrero, J., Gutiérrez, F. y Lucha, P. (2003). Paleosubsidence and active subsidence due to evaporite dissolution in the Zaragoza area (Huerva River valley, NE Spain): proceses apatial distribution and protection measures for transport routes. Engineering Geology, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.10.002>

Gutiérrez Santolalla, F. (1998). "Fenómenos de subsidencia por disolución de formaciones evaporíticas en las fosas neógenas de Teruel y Calatayud (Cordillera Ibérica)". Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 569 pp.

Gutiérrez F., Cooper A.H. y Johnson K.S. (2008). Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. Environmental Geology, <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0728-4>

Leucci, G. y Greco, F. (2012). 3D ERT Survey to Reconstruct Archaeological Features in the Subsoil of the Spirito Santo Church Ruins at the Site of Occhiolà (Sicily, Italy). Archaeology, <https://doi.org/10.5923/j.arqueología.20120101.01>

López Hidalgo, A. A., Loke, M. H., Óscar Fantón, G., Cara Rubí, E. (2006). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D). Geoelectrical, 36 p.

- Mediavilla, R., Rubio, F. J., Serrano, A., García, A. (1991). Mapa geológico de la Hoja nº 605 (Aranjuez). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.
- Milanovic, P. T. (2000). Geological engineering in karst: dams, reservoirs, grouting groundwater protection, water tapping, tunneling. Belgrade, Yugoslavia : Zebra.
- Negri, S., Leucci, G. y Mazzone, F. (2008). High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface. *Journal of Applied Geophysics*, 65, 111-120.
- Ortega, A., I., Benito Calvo, A., Porres, J., PérezGonzález, A., Martín Merino, M. A. (2012). Prospección geofísica por tomografía eléctrica en el karst de la Sierra de Atapuerca. Área de Ingeniería del terreno. Universidad de Burgos, 34-48.
- Papadakis, J. (1966). *Climates of the world and their agricultural potentialities*. Buenos Aires.
- Paukstys, B., Cooper, A. H. y Arustiene, J. (1999). Planning for gypsum geohazard in Lithuania and England. *Engineering Geology*, 52, 93-103.
- Richardson, J., Jesse J. (2003). Local land use regulation of karst in the United States. *Journal of ASCE*, [https://doi.org/10.1061/40698\(2003\)45](https://doi.org/10.1061/40698(2003)45)
- Rodríguez Aranda, J. P. (1995). *Sedimentología de los sistemas de llanura lutítica - lago salino de Mioceno en la zona oriental de la Cuenca de Madrid (Tarancón - Auñón)*. Tesis Doctoral, UCM.
- Rodríguez Aranda, J. P., Calvo, J. P. y Sanz Montero, M. E. (2002). Lower Miocene gypsum paleokarst in the Madrid Basin (Central Spain): dissolution, diagenesis, morphological relics and karst end products. *Journal of Sedimentology*, 49, 1385-1400.
- Rubio Pascual, F. J., Mediavilla López, R., Portero García, J. M., Sanz Montero, M. E., Rodríguez Aranda, J. P., Galán de Frutos, L. A., Vivar, V., Baltuille Martín, J. M. (1991). Memoria asociada al mapa de la Hoja 605. Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.
- Simón Gómez, J. L., Soriano, M. A., Pocovi, A., Arlegui Crespo, L. E., Casas Sáinz, A. M., Liesa Carrera, C. L., Luzón, A., Pérez García, A., Pueyo Anchuela, O., Pueyo Morer, E. L., Mochales, T., Gracia Abadías, F. J., Ansón, D. (2009). Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: el caso de Zaragoza, *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Asociación española para las enseñanzas de Ciencias de la Tierra, 17(3), 303-315.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. y Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>
- Williams, P. (2003). Dolines. In: Gunn J (Ed.), *Encyclopaedia of caves and karst science*, Fitzroy Dearborn, (pp. 304-310). New York, London.
- Zarroca, M., Comas, X., Gutiérrez, F., Carbonel, D., Linares, R., Roqué, C., Mozafari, M., Guerrero, J., Pellicer, X.M. (2017). The application of GPR and ERI in combination with exposure logging and retrodeformation analysis to characterize sinkholes and reconstruct their impact on fluvial sedimentation. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 1049– 1064.

ANEXO I

REFERENCIA DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS RESPECTO A LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Teniendo en cuenta las recomendaciones realizadas, se ha confeccionado la Fig. 25, en la que se referencian los elementos constructivos presentes en la finca, como los muros, esquinas, columnas... Se trata de una “herramienta” que, con sus referencias métricas, ayude a localizar las anomalías detectadas en campo y a emplazar en el terreno más fácilmente el sondeo recomendado.

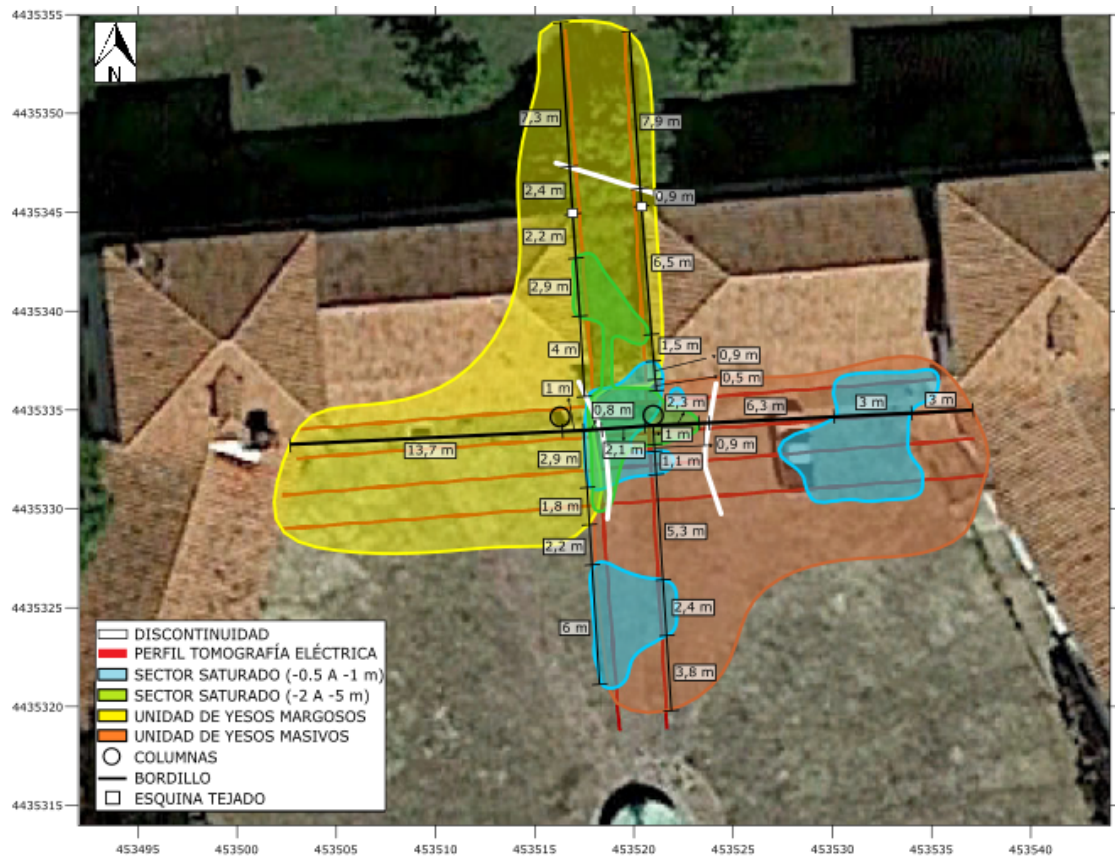


Fig. 25: Imagen satélite en la que se observan las diferentes unidades definidas mediante el estudio de tomografía eléctrica, con sus respectivas dimensiones y referenciadas teniendo en cuenta los elementos constructivos de la zona de estudio.