



**Universidad**  
Zaragoza

# **Trabajo Fin de Grado**

**Prospección geofísica aplicada al estudio  
de la geometría de valles de fondo plano**

**Geophysical survey applied to the study of  
flat-bottomed valleys geometry**

Autor

**Saúl Sánchez Bailo**

Directores

**Antonio María Casas Sáinz**

**Luis Eduardo Arlegui Crespo**

Departamento de Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias

2021

# ÍNDICE

1. RESUMEN Y ABSTRACT .....	2
2. INTRODUCCIÓN .....	3
2.1 Objetivos .....	3
3. CONTEXTO .....	4
3.1 Localización geográfica.....	4
3.2 Situación geológica .....	5
3.2.1 Estratigrafía.....	6
3.2.2 Valles de fondo plano .....	6
3.3 Comportamiento magnético de las rocas.....	7
4. METODOLOGÍA .....	8
4.1 Trabajo de campo .....	8
4.1.1 Magnetometría .....	8
4.1.2 Susceptibilidad .....	10
4.1.3 Recogida de muestras .....	11
4.2 Trabajo de gabinete.....	12
4.2.1 Tratamiento de datos.....	12
4.2.2 Trabajo de laboratorio .....	12
5. RESULTADOS .....	13
5.1 Prospección magnética .....	13
5.2 Modelización de perfiles 2.5D.....	14
5.3 Valores de susceptibilidad.....	17
5.4 Curvas termomagnéticas.....	18
6. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	19
7. CONCLUSIONS .....	23
8. BIBLIOGRAFÍA .....	24
9. ANEXOS.....	26

## 1. RESUMEN Y ABSTRACT

### ❖ Resumen

Situados en la zona central del valle del Ebro, se encuentran unas morfologías de depósito a lo largo de toda el área, los valles de fondo plano. Estos característicos modelados se encuentran encajados en los yesos miocenos pertenecientes a la Fm. Zaragoza, y se rellenan por materiales cuaternarios como arcillas, limos yesíferos y gravas, dando una topografía aplanada en el centro de los valles.

Mediante la aplicación de diferentes técnicas de prospección magnética en un terreno perteneciente a un valle de fondo plano de primer orden en las cercanías de la localidad de Torrecilla de Valmadrid (Zaragoza), se ha caracterizado su geometría y evolución, así como la morfología del material basal, y el origen de los principales minerales magnéticos que aportan las anomalías del estudio. La prospección magnética realizada incluye estudios como: (I) Trabajo de campo, con el magnetómetro y el susceptómetro, además de la recogida de muestras. (II) Trabajo de gabinete, para analizar las muestras y realizar diferentes mapas y gráficas que aporten utilidad al estudio, así como las modelizaciones 2.5D en profundidad para interpretar la geometría del valle y su relleno.

Las estructuras de origen antrópico, como una vía de ferrocarril que cruzaba toda la zona, van a influenciar en el estudio, provocando multitud de anomalías que harán más compleja la interpretación de los resultados.

Palabras clave: prospección, magnetismo, susceptibilidad, modelización, valles de fondo plano.

### ❖ Abstract

Located in the central area of the Ebro valley, there are some deposit morphologies throughout the entire area, the flat-bottomed valleys. These characteristic models are found on the Miocene gypsum of the Zaragoza Formation, which are filled with quaternary materials such as clays, gypsum silt and gravel, giving a flattened topography in the centre of the valleys.

Different magnetic prospecting techniques have been applied in a field belonging to a first-order flat-bottomed valley near Torrecilla de Valmadrid (Zaragoza, Spain). The geometry and evolution of these valleys have been characterized, as well as the morphology of the basal material and the origin of the main magnetic minerals that contribute the anomalies of the study. The magnetic survey carried out includes studies such as: (I) Field work, with the magnetometer and the susceptometer, in addition to the samples collection. (II) Office work, to analyse the samples and make different maps and graphs that contribute to the study, as well as 2.5D in-depth modelling to interpret the geometry of the valley and its fill.

Structures with an anthropic origin, such as the railway track that crossed the entire area, will influence the study. These structures will cause a multitude of anomalies that will make the interpretation of the results more complex.

Key words: survey, magnetism, susceptibility, modelling, flat-bottomed valleys.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los valles de fondo plano son modelados muy abundantes en el sector central de la Cuenca del Ebro. La incisión de la red de drenaje en la topografía origina unas canalizaciones en forma de barrancos dendríticos que erosionan el relieve yesífero cenozoico de la zona. Los valles han ido cambiando y modificando su morfología, tamaño y orientación a lo largo de los años debido a las fluctuaciones en el clima del valle del Ebro, actualmente con tendencia semiárida, y a las alteraciones antrópicas realizadas desde la antigüedad en épocas Ibero-Romanas (Burillo *et al.*, 1985) hasta el presente para el aprovechamiento de la agricultura en forma de campos de cultivo escalonados. Estos valles de fondo plano se han ido rellenando y colmatando progresivamente con materiales limosos y arcillosos, y debido a esto es imposible ver a simple vista si el basamento del valle tiene una forma de 'U' o en forma de 'V', esta última con más incisión fluvial (Soriano y Calvo, 1987).

Para conocer la morfología en profundidad de este valle, en las cercanías de la localidad de Torrecilla de Valmadrid, se ha decidido realizar una serie de estudios geofísicos utilizando diferentes tipos de prospección del terreno. Para la prospección del área de estudio se llevaron a cabo varias salidas de campo a la zona para tomar datos *in situ*. Primero se realizó una prospección magnética mediante la medición de la variación del campo magnético terrestre y su influencia en la zona, utilizando un magnetómetro móvil y un magnetómetro base. Estos datos indican la localización de las anomalías magnéticas producidas por los materiales subsuperficiales. También se realizó un estudio de la susceptibilidad *in situ* haciendo una malla virtual de mediciones en los materiales de la superficie con un susceptómetro portátil. Además de las mediciones se recogieron muestras de los materiales del suelo a lo largo de toda la zona estudiada.

Con todos los datos del campo recogidos, se pasó a un trabajo de gabinete, que consistió en la medición de la susceptibilidad de cada muestra recogida en el laboratorio. También en la elaboración de unas curvas termomagnéticas que relacionan la susceptibilidad magnética de varias muestras concretas con el aumento y descenso de temperatura, para caracterizar su composición mineralógica. Además de esto, se realizaron diferentes mapas para representar las anomalías magnéticas, el gradiente y la susceptibilidad en relación con el área de la zona del valle de fondo plano estudiada. Y, por último, se realizaron una serie de perfiles 2.5D para modelizar el relleno del valle en profundidad dependiendo de las características magnéticas de cada capa de relleno.

Tras la obtención de los resultados de los diferentes estudios y técnicas, se van a evaluar las propiedades magnéticas de los materiales que rellenan los valles de fondo plano, la mineralogía que da las anomalías magnéticas, y su geometría en profundidad.

### 2.1 Objetivos

Mediante la realización de este Trabajo de Fin de Grado se pretenden cumplir los siguientes objetivos:

- Caracterizar mediante métodos magnéticos el relleno de valles de fondo plano en el entorno de Zaragoza, así como aprender a realizar una prospección magnética y la toma de datos de susceptibilidad en campo.

- Comprender y utilizar los diferentes aparatos de medición de susceptibilidad en el laboratorio, y procesar y modelizar toda la información mediante programas informáticos para analizar los diferentes datos obtenidos en la zona.
- Valorar los resultados y las propiedades de los materiales del terreno, y estudiar la disposición geométrica en la que se disponen los valles de fondo plano.
- Reconocer los factores antrópicos y naturales que han podido causar anomalías magnéticas en las mediciones, incluyendo su origen y la influencia de estos factores al desarrollo de los valles de fondo plano del área.
- Realizar un análisis e interpretación de los resultados mediante los conocimientos adquiridos a lo largo del grado en los diferentes ámbitos de la geología, además de incentivar una búsqueda proactiva sobre nuevos datos e información sobre una base bibliográfica en relación con la zona de estudio.

### 3. CONTEXTO

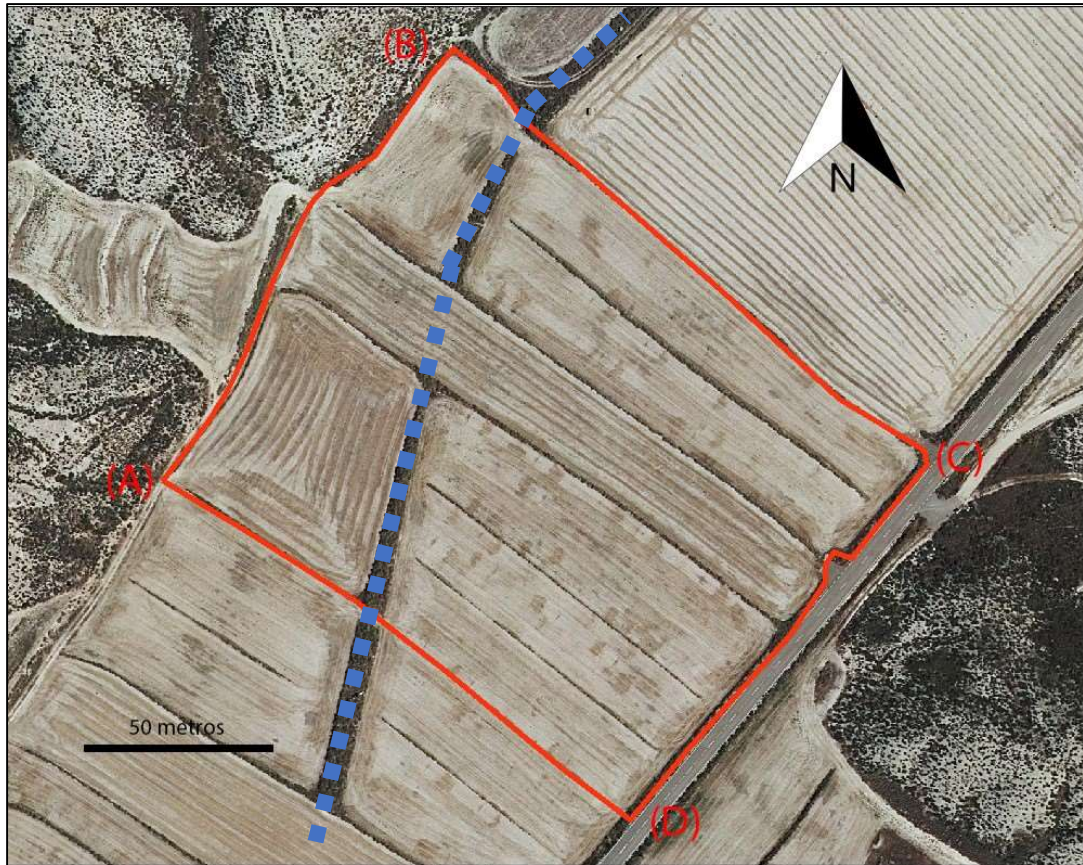
#### 3.1 Localización geográfica

La zona de estudio se sitúa al sur de la ciudad de Zaragoza (Aragón, España), 1,5 km al norte de las proximidades del barrio rural de Torrecilla de Valmadrid (Figura 1).



*Fig. 1.- Localización geográfica del área estudiada (señalada en rojo), situada al norte del barrio rural de Torrecilla de Valmadrid (Zaragoza, España). Modificado de Google Earth Pro, Landsat/Copernicus, 2021.*

Esta área se localiza en el sector central de la Cuenca del Ebro, concretamente en la hoja 384 (Fuentes de Ebro) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. La zona corresponde a un tramo de un valle de fondo plano de primer orden de 40.000 m<sup>2</sup>, siendo un polígono con aproximadamente 220x180 metros de lado, que abarca varios campos de cultivo (Figura 2).



*Fig. 2.- Localización concreta de la zona de estudio (delimitada en rojo) que incluye varios campos de cultivo dentro de un valle de fondo plano de primer orden. De la (A) a la (D) se incluyen los vértices con sus coordenadas UTM a continuación. La línea discontinua en color azul marca el trazado realizado por una antigua vía ferroviaria que pasaba por la zona de camino a Zaragoza, ahora inexistente.*

Las coordenadas de los cuatro vértices de la zona estudiada son las siguientes, con una altitud de aproximadamente 300 metros:

(A): UTM 679687,866E, 4597971,235N, Zona 30T.

(B): UTM 679789,990E, 4598126,849N, Zona 30T.

(C): UTM 679964,412E, 4597978,441N, Zona 30T.

(D): UTM 679854,765E, 4597845,472, Zona 30T.

### **3.2 Situación geológica**

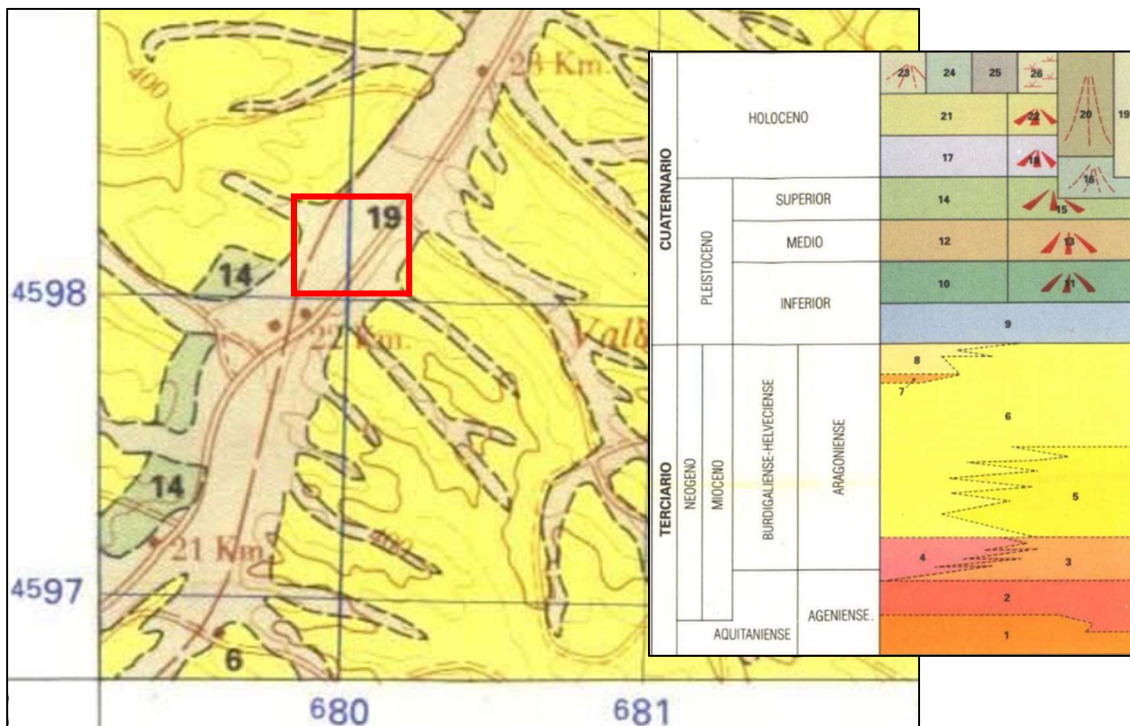
El valle de fondo plano perteneciente a la zona de estudio se sitúa en el sector central de la Cuenca del Ebro. La Cuenca del Ebro se encuentra al noreste de la Península Ibérica, limitada al norte por los Pirineos, al suroeste por la Cordillera Ibérica y al este por la Cordillera Costero Catalana.

Los materiales que rellenan esta cuenca van desde materiales de sistemas de abanicos aluviales hasta un sistema endorreico que depositó materiales evaporíticos durante el Oligoceno y Mioceno (Pardo *et al.*, 2004). Ya en el Neógeno, la apertura de la cuenca hacia el mar Mediterráneo favoreció la erosión, la acumulación de sedimentos y el origen de los valles de fondo plano que encontramos en la actualidad.

### 3.2.1 Estratigrafía

En el área estudiada y sus zonas circundantes afloran materiales terciarios que pertenecen a los yesos nodulares y tabulares del Mioceno de la Fm. Zaragoza (Quirantes, 1978). Estos yesos generan una topografía escarpada a los laterales de los materiales de relleno de los valles de fondo plano. Esta formación puede llegar a alcanzar una potencia de cientos de metros, con alternancias de niveles de margas y lutitas.

En la margen derecha del barranco aparecen materiales formados por gravas poligénicas, arenas y limos, pertenecientes a un nivel de terraza superior del río Ebro (Barnolas *et al.*, 1998). Este nivel de terraza aparece de forma aislada de otros niveles de terraza contemporáneos, situado más al sur y perteneciente a la misma época, el Pleistoceno Superior.



*Fig. 3.- Mapa geológico de la zona de estudio (encuadrada en rojo). En la leyenda: el color amarillo (6) corresponde a los yesos tabulares y nodulares del Mioceno de la Fm. Zaragoza, el color beige (19) corresponde a cantos, limos yesíferos y arcillas de los valles de fondo plano del Holoceno, y el color verde (14) corresponde con gravas poligénicas, arenas y limos de niveles de terrazas del Pleistoceno Superior. Modificado de Marqués *et al.*, 1991.*

Por encima de estos materiales se depositaron de forma discordante durante el Holoceno los materiales de relleno de los valles de fondo plano (Figura 3). Este relleno está formado por materiales detríticos como cantos, limos yesíferos y arcillas.

### 3.2.2 Valles de fondo plano

El entorno de la zona de estudio situada en la Cuenca del Ebro presenta una red de valles de fondo plano con carácter dendrítico de dirección NNE-SSW (Gutiérrez y Arauzo, 1997) que se han rellenado con materiales limosos y arcillosos del Cuaternario. Esta área se sitúa cerca de la intersección entre el barranco de la Concepción y el barranco de Torrecilla, los dos con una dirección perpendicular al río Ebro.

El área estudiada corresponde a un valle de fondo plano de primer orden dentro de la clasificación jerárquica de los valles de fondo plano; la incisión lineal que desarrolla la etapa erosiva para la génesis del barranco va evolucionando conforme avanza el relleno de los valles en forma de 'V' (Soriano y Calvo, 1987). Cuando el valle de primer orden se ha rellenado o está en su fase final de relleno, se comienza a incidir y erosionar a los márgenes, generando otros barrancos secundarios de menor extensión llamados de segundo orden. Si esto continúa con los valles de segundo orden, se pueden producir valles de tercer orden y consecutivos.

El valle de primer orden que pertenece a la zona tiene una anchura que oscila entre 160 y 220 metros y una longitud kilométrica. Está rellenado por materiales limosos y arcillosos con intercalaciones de arenas y gravas, que se han sedimentado por la acción de corrientes fluviales pasajeras (Montserrat, 2020).

Debido al uso agrario, estos valles de fondo plano no funcionan tan activamente en la actualidad como sistemas de erosión-sedimentación (Attar, 2017). El laboreo, la separación de campos y la organización de estos en terrazas artificiales frenan la evolución natural de las afluencias fluviales que transportan los materiales del relleno, aunque en épocas de tormentas se erosionan enérgicamente. En las imágenes del Anexo 1, se observa como durante el siglo XX, y sobre todo a partir de los años 50, estos valles de fondo plano comienzan a utilizarse de manera más frecuente como campos de cultivo.

Además de los campos de cultivo que abundan la zona, en el año 1904 se inauguró una vía ferroviaria que tenía estación en el pueblo de Torrecilla de Valmadrid. La sociedad Minas y Ferrocarriles de Utrillas, que explotaba los lignitos de las cuencas mineras en Teruel, construyó una vía que conecta Utrillas con Zaragoza, siendo una de sus estaciones la de Torrecilla (Parque Temático de la Minería y Parque Temático de la Minería y el Ferrocarril, en línea).

Tras 62 años en funcionamiento, la vía de tren se cerró en 1966 y se clausuró la línea minera de forma indefinida. El desmantelamiento de la vía se puede observar en el cambio presente entre la ortofoto del vuelo americano de 1956-1957 y las posteriores (Anexo 1). Ni los raíles ni las traviesas se encuentran ya en la zona, pero restos del balastro de esta antigua vía ferroviaria es probable que afecten hoy al magnetismo de la zona.

### **3.3 Comportamiento magnético de las rocas**

Los materiales pueden clasificarse según su susceptibilidad y comportamiento magnético en:

- Diamagnéticos: presentan una magnetización inducida opuesta al campo aplicado. Los átomos y los iones que contienen electrones apareados no presentan un momento magnético permanente, pero ante un campo magnético aplicado, esos electrones originan un campo magnético opuesto (negativo), aunque en general muy débil. Algunos minerales diamagnéticos comunes son el cuarzo o la calcita.
- Paramagnéticos: pueden mostrar un momento magnético permanente bajo la influencia de un campo magnético aplicado. Los momentos de los átomos y los iones tenderán a alinearse en la dirección del campo aplicado, proporcional a la intensidad de este (positivo) y que disminuyen conforme aumenta la temperatura. Algunos minerales paramagnéticos comunes son la biotita, la clorita, piroxenos y anfíboles.



- **Ferromagnéticos:** modifican su momento magnético de forma permanente bajo un campo magnético aplicado. En los materiales ferromagnéticos, dipolos asociados a los electrones libres de los átomos dan lugar a dominios magnéticos, que se disponen de forma paralela dando una fuerte magnetización espontánea (Chikazumi, 1997). Las propiedades de histéresis de estos materiales provocan que contengan magnetismo residual tras dejar de aplicar el campo magnético, dando susceptibilidades muy altas. Solo dejan de exhibir magnetización a unas ciertas temperaturas, llamadas temperaturas de Curie, características para cada material. Algunos de los minerales ferromagnéticos comunes son los minerales del hierro, del cobalto y del níquel.

## **4. METODOLOGÍA**

La prospección geofísica aplicada durante este trabajo consiste en caracterizar y estudiar las propiedades de los materiales del terreno situados en o debajo de la superficie mediante la medida del magnetismo de las rocas.

Esta técnica de prospección magnética relaciona la variabilidad de la intensidad del campo magnético terrestre con respecto a las variaciones de susceptibilidad de los materiales del suelo y subsuelo. Debido a la situación y materiales bien diferenciados que forman los valles de fondo plano, con unos yesos principalmente diamagnéticos que contrastan muy bien con los rellenos del valle formados por limos y arcillas cuaternarias paramagnéticas o ferromagnéticas, esta metodología utilizada aporta datos suficientes para caracterizar y situar la geometría del valle y del relleno, así como los contactos entre los diferentes materiales.

### **4.1 Trabajo de campo**

#### **4.1.1 Magnetometría**

La prospección magnética consiste en el estudio de las variaciones del campo magnético terrestre causadas por diferentes factores, como la latitud y el magnetismo remanente de las rocas del suelo. Con este estudio se pueden relacionar las anomalías magnéticas con cambios en la susceptibilidad magnética de los materiales, y así poder conocer los tipos de materiales que rellenan el valle de fondo plano y su geometría.

El equipo utilizado para el estudio consistió en:

- Un magnetómetro fijo (base, Anexo 2.A) para la medición de la variación magnética diaria a lo largo de las jornadas de trabajo. Este equipo está formado por dos botellas de hidrocarburos y unas varillas, conectado a un control central de medición de campo magnético. Modelo PMG-2 de SatisGeo (PMG-2, 2012).
- Un magnetómetro móvil (Anexo 2.B) para la medición de las variaciones de intensidad del campo magnético terrestre de efecto Overhauser. Este equipo está formado por dos sensores situados medio metro entre ellos y unidos a una vara junto a una mochila de carga, que miden las variaciones verticales del campo magnético. Todo esto se une mediante diferentes cables a un panel de control que se sitúa en la parte delantera del cuerpo, que incluye un sistema GPS para registrar

automáticamente la geolocalización de las medidas tomadas. Modelo GSM-19 v6.0 de GEM Systems (GEM Systems Inc, 2001).

Para el procedimiento de trabajo con los magnetómetros portátiles se siguió el protocolo propuesto por Breiner (1999).

El magnetómetro fijo se instaló en una zona alejada, unos 50 metros más al sur, lejos de tendidos eléctricos y carreteras para evitar anomalías y fallo en las mediciones. Además, esta base debe permanecer inmóvil durante toda la jornada de trabajo en el campo, para que los datos sean lo más precisos posibles.

Para las mediciones con el magnetómetro móvil, el encargado de transportar la mochila con el aparato debe evitar llevar accesorios, ropa u objetos electrónicos que puedan alterar la calidad de las mediciones durante la prospección. Además de esto, la hora de comienzo de la medición tanto del magnetómetro móvil como de la base deben coincidir, para luego en gabinete poder tratar los datos.

La medición con el magnetómetro móvil consistió en trazar un recorrido de líneas paralelas y transversales a los campos. La separación entre cada pasada fue de aproximadamente 2 metros, cubriendo la totalidad de los campos dentro de lo posible y si no lo impedían los montículos o zonas con desnivel de separación de las parcelas, en cuyo caso se dividieron las mediciones en varias pasadas, pero con las mismas características. El objetivo es formar una malla de datos lo más homogénea posible de toda la zona de estudio, como se puede observar en el mapa de la Figura 4.



*Fig. 4.- Mapa de la zona de estudio en la que se indica con un trazado amarillo el recorrido realizado durante la prospección con el magnetómetro móvil.*

#### 4.1.2 Susceptibilidad

La medición de la susceptibilidad permite conocer la sensibilidad de los materiales que rellenan los valles de fondo plano a la magnetización al estar sometidos a un campo magnético externo. Estos datos permiten la caracterización de los materiales del relleno a nivel superficial, que, junto con los datos de la prospección magnética, son útiles para modelizar los valles de fondo plano.

El equipo utilizado para el estudio consistió en:

- Susceptómetro de mano portátil, para analizar la susceptibilidad magnética del suelo, modelo Terraplus KT-20 (Anexo 2.C). Debido a que este aparato no toma las medidas automáticamente, se tomaron medidas una a una sobre el sustrato habiendo tarado antes de cada medida el susceptómetro con el valor del aire.

Para tomar las mediciones se siguió un patrón similar al del magnetómetro móvil, pero en este caso debido a que las medidas se tomaban manualmente y una a una, se decidió establecer una malla que albergase todos los campos de estudio con un patrón definido. Se tomaron 3 medidas de susceptibilidad en cada punto (para establecer un valor medio) y sus coordenadas, con una separación entre puntos de aproximadamente 7 metros, siguiendo rectas paralelas y transversales a los campos, y una separación entre rectas también de 7 metros. El número total de medidas realizadas con el susceptómetro de mano fue de 1.527.

La malla generada con las mediciones (Figura 5) abarca la mayor parte de la zona estudiada, con la que poder hacer un mapa y conocer la distribución de los cambios superficiales del área.



*Fig. 5.- Mapa de la zona de estudio en la que se indica con un puntuado rojo cada uno de los sitios donde se realizaron mediciones durante la prospección con el susceptómetro.*

### 4.1.3 Recogida de muestras

A lo largo de toda la zona de estudio se seleccionaron 26 puntos (Figura 6.C) repartidos de forma homogénea y en zonas con una susceptibilidad destacable, en las que se recogieron muestras de suelo de aproximadamente entre 25 y 45 gramos (Figura 6.A).

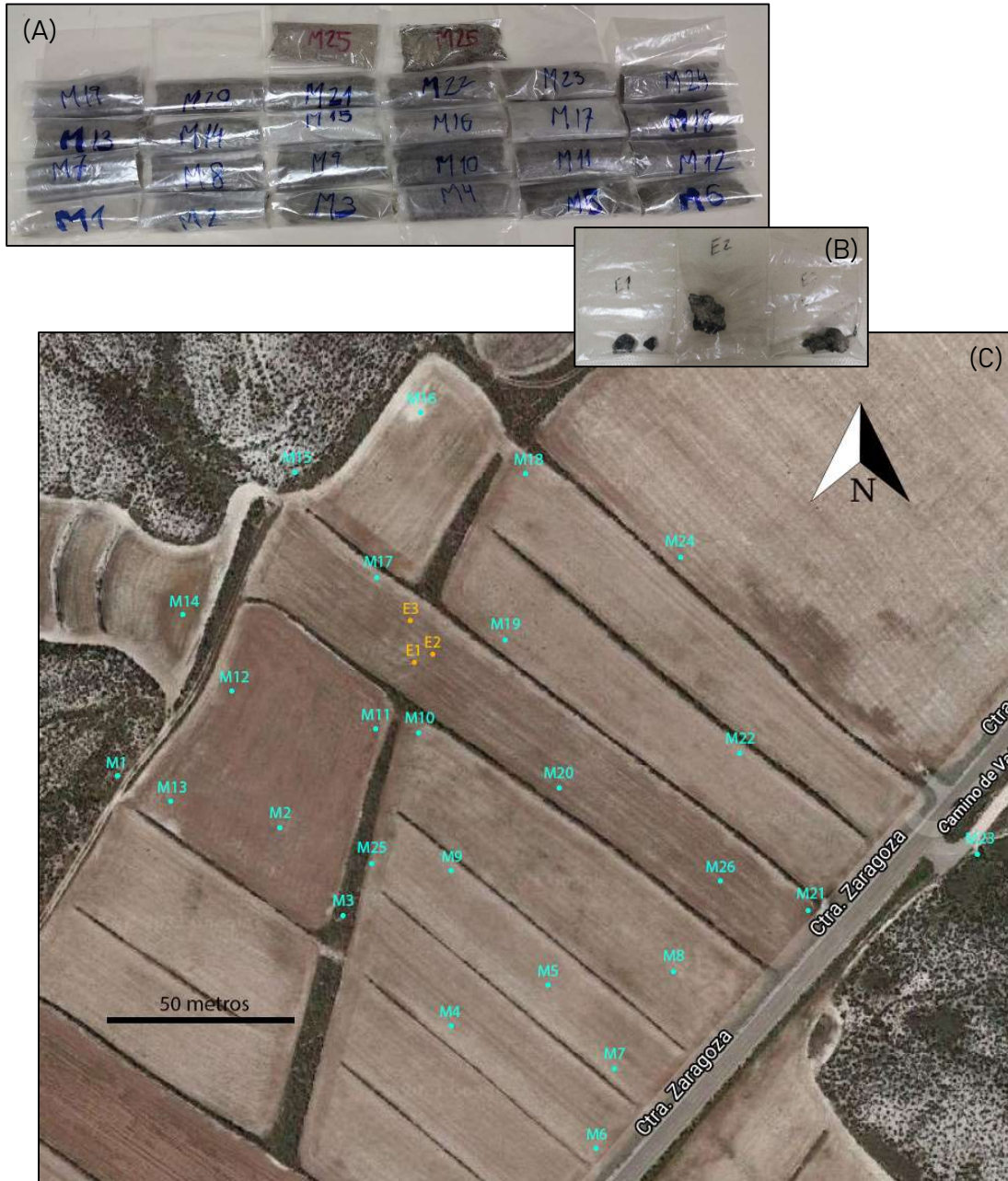


Fig. 6.- (A) Bolsitas con las muestras de material superficial recogidas en la zona, nombradas M1-M26. (B) Bolsitas con las muestras de escoria recogidas en la zona, nombradas E1-E3. (C) Localización geográfica de cada una de las muestras recogidas en la zona de estudio, nombradas M1-M26 (en azul) para las muestras de suelo, y E1-E3 (en naranja) para las muestras de escoria.

Además de esto, se recogieron 3 muestras de escoria con una alta susceptibilidad magnética y unas altas propiedades ferromagnéticas (Figura 6.B), situadas en una zona de anomalía magnética que atraviesa el campo de estudio de norte a sur. Estas muestras tienen un tamaño de entre 1 y 4 cm, y un peso de entre 7 y 22 gramos.

## **4.2 Trabajo de gabinete**

### **4.2.1 Tratamiento de datos**

#### ❖ Procesamiento y filtrado

Se recogieron todos los datos del magnetómetro móvil y se realizó la corrección diurna, con los datos de la variación diurna del campo magnético registrados por el magnetómetro base, mediante el programa GEMLink 5.4. Esta corrección sirve para eliminar las variaciones y anomalías del campo magnético debidas a factores externos. Así, se obtiene la diferencia de los valores de un magnetómetro y de otro durante el mismo periodo de tiempo, y como resultado se consiguen los valores de anomalía magnética del área. Con todos los datos tableados en una hoja de cálculo, se filtraron manteniendo los que tenían buena calidad y eliminando los que daban resultados extremadamente anómalos o poco fiables.

Los datos del susceptómetro se recogieron y se tablearon también en una hoja de cálculo, teniendo que transformar las coordenadas de grados-minutos-segundos a UTM, y pasando todos los datos de susceptibilidad uno a uno con su correspondiente medida.

#### ❖ Mapas, perfiles y gráficas

Mediante el programa Surfer19 y los datos tableados anteriormente, se realizaron una serie de mapas para resaltar los diferentes datos de anomalía magnética y susceptibilidad (Anexo 3). Se utilizó el método de triangulación por interpolación lineal para tratar estos datos, y posteriormente se editó la imagen del mapa para superponerla sobre la ortofoto de la zona de estudio.

Para realizar los perfiles y la modelización en 2.5D se utilizó el programa Gravmag32 (Pedley *et al.*, 1993). Para ello se decidieron realizar dos cortes transversales de la zona de estudio (Anexo 4), uno más al norte y otro más al sur. Se tablearon los datos necesarios para cada perfil (distancia entre cada medida, altura de la medida y el dato de anomalía magnética) y se prepararon para que el programa Gravmag32 los lea.

Ya dentro del programa, se indicaron varios parámetros, como la declinación, la inclinación, la intensidad de campo magnético y la dirección del corte. Tras esto, se dibujaron diferentes tipos de polígonos bajo la topografía simulando las capas de material que podrían generar las anomalías magnéticas en superficie, dando diferentes valores de susceptibilidad a cada polígono.

Por último, mediante el programa Cureval8 (AGICO, 2017), se interpretaron los datos obtenidos durante el ensayo de laboratorio para obtener las curvas termomagnéticas. Los datos se suavizaron y se corrigieron con el modelo *freefu33*, para obtener diferentes gráficas con los valores de susceptibilidad total (*Total s.*), volumétrica (*Bulk s.*) y másica (*Mass s. 10*).

### **4.2.2 Trabajo de laboratorio**

#### ❖ Susceptibilidad de las muestras

Las 26 muestras de suelo recogidas en el campo se pesaron dentro de las bolsas en la balanza del laboratorio (Anexo 5.A), y se calculó su densidad rellenando y pesando un cubo de 7,6 cm<sup>3</sup> de volumen (Anexo 5.B).

Con los datos de masa y densidad, se midió la susceptibilidad magnética de cada muestra introduciendo las bolsas con muestra en el sistema modular KLY3-S Kappabridge (AGICO (2003), Anexo 5.C) tras haber compensado las medidas con una bolsa sin muestra. De esta forma se obtuvieron los valores de susceptibilidad total (*Total s.*), susceptibilidad volumétrica (*Bulk s.*) y susceptibilidad másica (*Mass s. 10*).

Además, se calculó el volumen y la masa de las 3 muestras de escoria para obtener su densidad, introduciendo las muestras solidas en un volumen definido de agua y calculando la diferencia, y mediante la balanza del laboratorio, respectivamente.

#### ❖ Curvas termomagnéticas

A continuación, se seleccionaron 3 muestras para su análisis termomagnético. Las muestras M3, M17 y E1 se molieron con un mortero de ágata (diamagnético, que evita la contaminación de las muestras) hasta obtener la fracción más fina posible de las mismas. El peso de las muestras molidas varía aproximadamente entre 0,3 y 0,5 gramos.

El análisis termomagnético se realizó mediante el sistema modular KLY3-S (AGICO, 2003), introduciendo la totalidad de la muestra fina en un tubo de ensayo, además de una varilla termosensora (Anexo 5.D). Esto mide la susceptibilidad magnética y las variaciones de susceptibilidad con la temperatura.

Este aparato somete la muestra a un incremento progresivo de temperatura, desde la temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) hasta los 700°C, mientras toma medidas de la susceptibilidad en intervalos regulares. Cuando se llega a la temperatura máxima (pasado el punto de Curie), se va reduciendo la temperatura progresivamente hasta de nuevo la temperatura ambiente, volviendo a medir datos de susceptibilidad.

## **5. RESULTADOS**

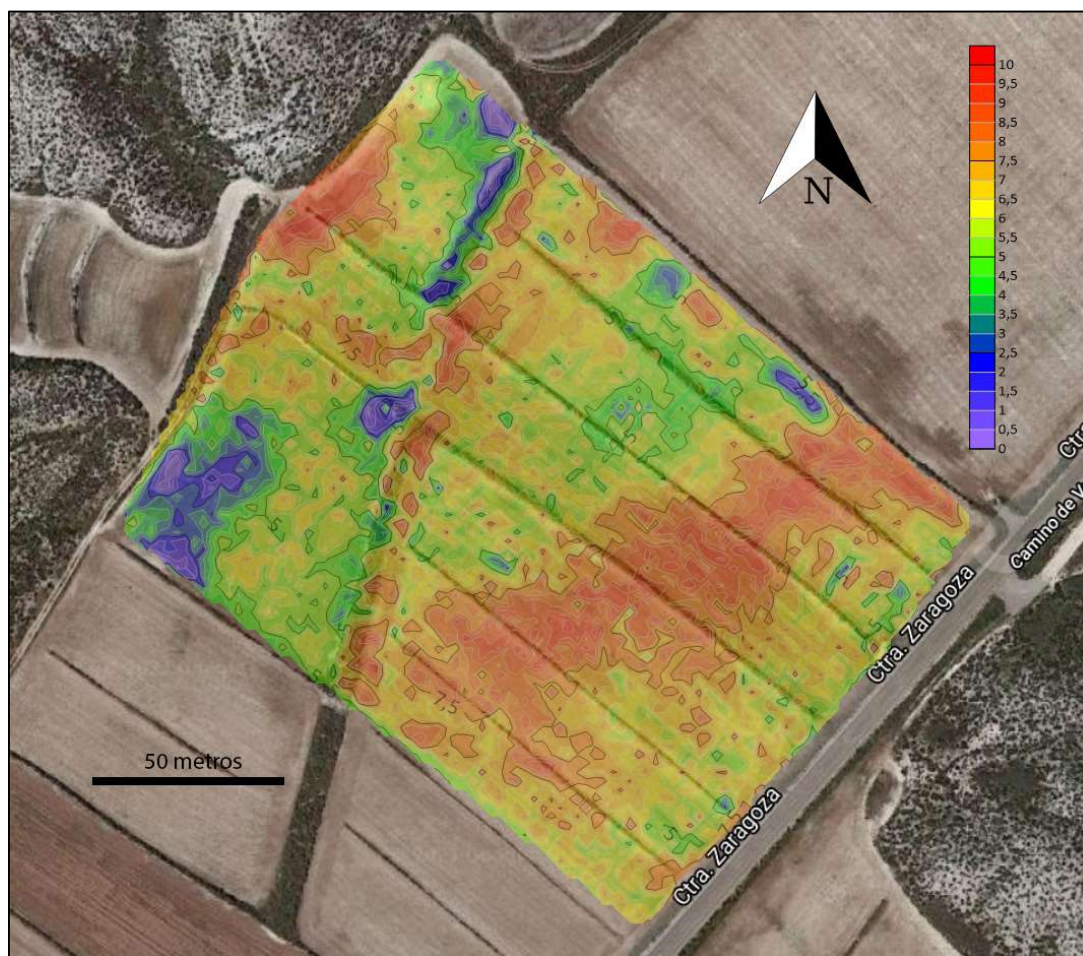
### **5.1 Prospección magnética**

A partir de los datos obtenidos en la prospección magnética del valle de fondo plano perteneciente a la zona de estudio, se realizaron varios mapas para estudiar las anomalías magnéticas presentes, el gradiente magnético y su disposición.

Las medidas registradas con el magnetómetro tras la corrección diurna y el filtrado de datos oscilan entre 0nT y 10nT. Estos datos se procesan y se genera el mapa de anomalías magnéticas (Figura 7), donde se puede observar la distribución de las anomalías a lo largo de la zona.

La distribución es muy heterogénea, presentando valores de 7nT a 10nT en una banda al sur con alta anomalía positiva que recorre la zona de este a oeste. También se observa una franja que recorre toda el área de norte a sur con anomalía dipolar muy positiva con valores superiores al máximo representado, y muy negativa con valores inferiores a 0nT. Esta franja lineal se produce debido al paso de una antigua vía ferroviaria que recorría la zona (Parque Temático de la Minería y el Ferrocarril, en línea), que actualmente se ha removido y actúa como separación física de los campos de cultivo. Puntualmente aparece una anomalía negativa que oscila entre los 0nT y 3nT al oeste, y otra anomalía positiva que oscila entre 7nT y 10nT al noroeste de la zona de estudio, en la unión con un valle de fondo plano de segundo orden.

El resto del área tiene unos valores intermedios, con valores entre 4nT y 7nT, con pequeños puntos al este con anomalías ligeramente negativas.



*Fig. 7.- Mapa de anomalías magnéticas, donde se observan con colores cálidos las anomalías positivas y con colores fríos las anomalías negativas.*

Con los datos de gradiente registrados por el magnetómetro también se ha realizado un mapa de gradientes (Anexo 6) para estudiar las anomalías magnéticas más superficiales. Los valores van de -13nT hasta 15nT, aunque la mayor parte del área estudiada se establece en un rango de entre -3nT a 3nT. Solo se diferencian unos pequeños cambios de gradiente puntuales con tendencia dipolar en la franja norte-sur que atraviesa la zona y que corresponde con la antigua vía de tren, y unos valores de gradiente negativos que aparecen aislados al este.

## 5.2 Modelización de perfiles 2.5D

Mediante las medidas de anomalía del campo magnético y sus alturas tomadas en campo, se realiza un perfil 2.5D con el programa Gravmag32 en relación con los dos cortes propuestos, que modeliza en profundidad las capas de diferentes materiales que puedan dar las anomalías registradas. Estos cortes tienen una dirección NW-SE, y en profundidad se puede observar cómo podría ser la geometría de las unidades del relleno del valle, así como su morfología y estructura.

Tanto en el perfil A (Figura 8) como en el perfil B (Figura 9) se establece un sistema de 4 capas con diferentes valores de susceptibilidad hasta un máximo de 50 metros de profundidad

(en relación con una prospección eléctrica realizada en la zona, Anexo 7). También aparece la influencia de la antigua vía ferroviaria.

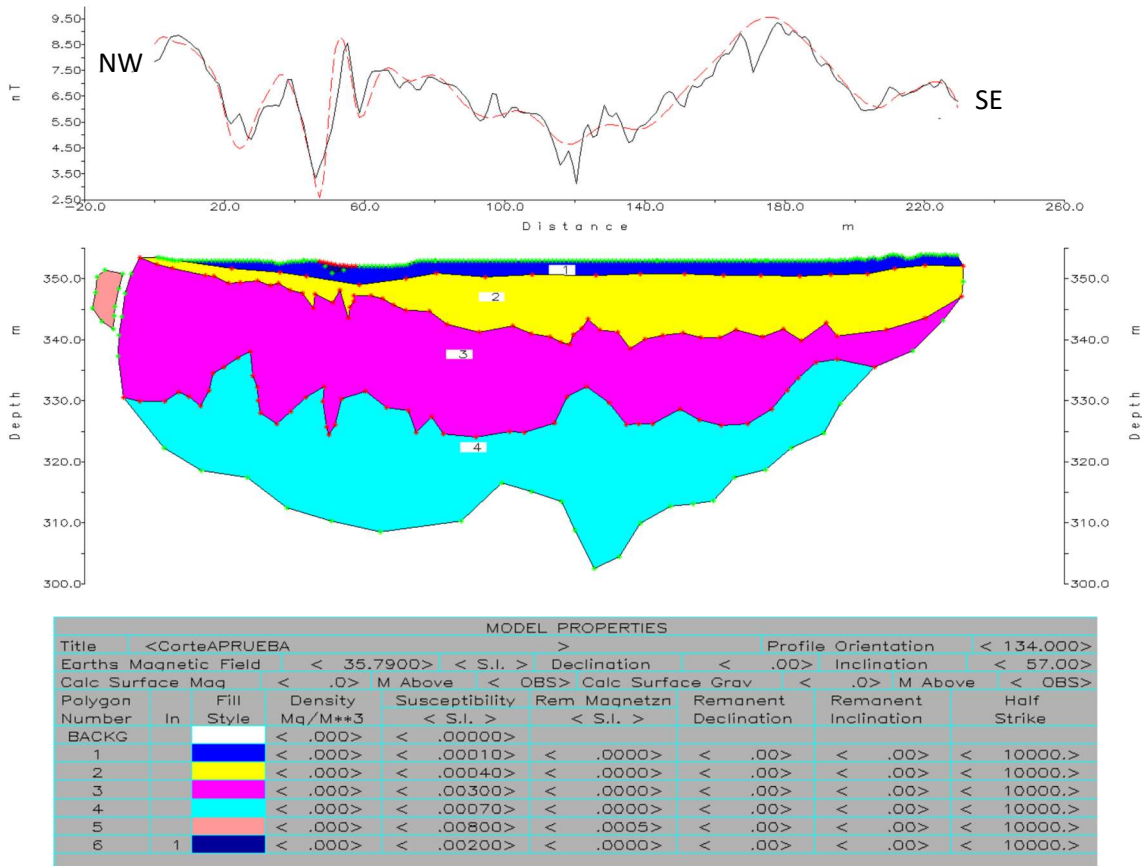


Fig. 8.- Perfil 2.5D del corte A. El gráfico superior representa las anomalías medidas en campo con sus valores en el eje vertical (nT), y en línea discontinua roja la aproximación posible de esas anomalías en relación con el modelo dibujado en la parte inferior. En la tabla de propiedades aparecen cada uno de los polígonos dibujados representados con su color correspondiente, y la medida de susceptibilidad magnética de los materiales que se ha decidido establecer para que coincida con el modelo real.

En los dos perfiles se estableció un fondo de base diamagnético de color blanco, que corresponde a yesos de la Fm. Zaragoza y a las zonas escarpadas de los valles de fondo plano. El resto de los materiales que forman el relleno se encajan en estos yesos.

La morfología general del valle tiene una ligera forma de 'V', pero no se aprecia en su totalidad debido a que los perfiles y el estudio están centrados en la zona de relleno del valle de fondo plano sin entrar en las zonas circundantes a este. Además, el espesor es bastante potente, llegando a los 50 metros en su punto más profundo, debido a que el valle estudiado corresponde a un valle de fondo plano de primer orden.

Los dos perfiles realizados dan una morfología similar, en la que se diferencian 4 capas de materiales de relleno. La capa de material 1 de color azul representa el suelo, y tiene una susceptibilidad magnética baja, de  $100 \cdot 10^{-6}$  SI, con un espesor máximo de 2 metros. Bajo el suelo se encuentra la capa de material 2 de color amarillo con una susceptibilidad un poco mayor, de  $400 \cdot 10^{-6}$  SI, que tiene un espesor de hasta 10 metros al SE y se va adelgazando hasta menos de 1 metro al NW.

Bajo esta aparece la capa de material 3 rosada con una susceptibilidad más alta, y principal influyente en las anomalías magnéticas que se detectan en superficie. La susceptibilidad es de



$3.000 \cdot 10^{-6}$  SI, con unos espesores de más de 20 metros al NW y con un adelgazamiento progresivo hacia el SE de hasta aproximadamente 6-7 metros con una ligera forma de 'U'.

Bajo la capa 3 aparece la capa de material 4 de color azul celeste, con una susceptibilidad más baja que la anterior, pero más alta que las capas superiores, de  $700 \cdot 10^{-6}$  SI. Esta capa presenta un engrosamiento en forma de pico desde el centro hacia el SE, con unos espesores que oscilan entre 3-4 metros en la zona más adelgazada y hasta más de 20 metros en la zona más encajada en forma de 'V'. Esto podría significar que esta es la capa de materiales de relleno del valle más profunda, en contacto con los yesos de base diamagnéticos.

Para finalizar, en los dos perfiles aparece representada la anomalía superficial originada por restos de escoria pertenecientes a la antigua vía ferroviaria que atraviesa los campos de norte a sur. Esta pequeña capa, que aflora en superficie sobre la capa 1 azul del suelo, presenta una susceptibilidad magnética alta, de entre  $2.000 \cdot 10^{-6}$  y  $2.500 \cdot 10^{-6}$  SI.

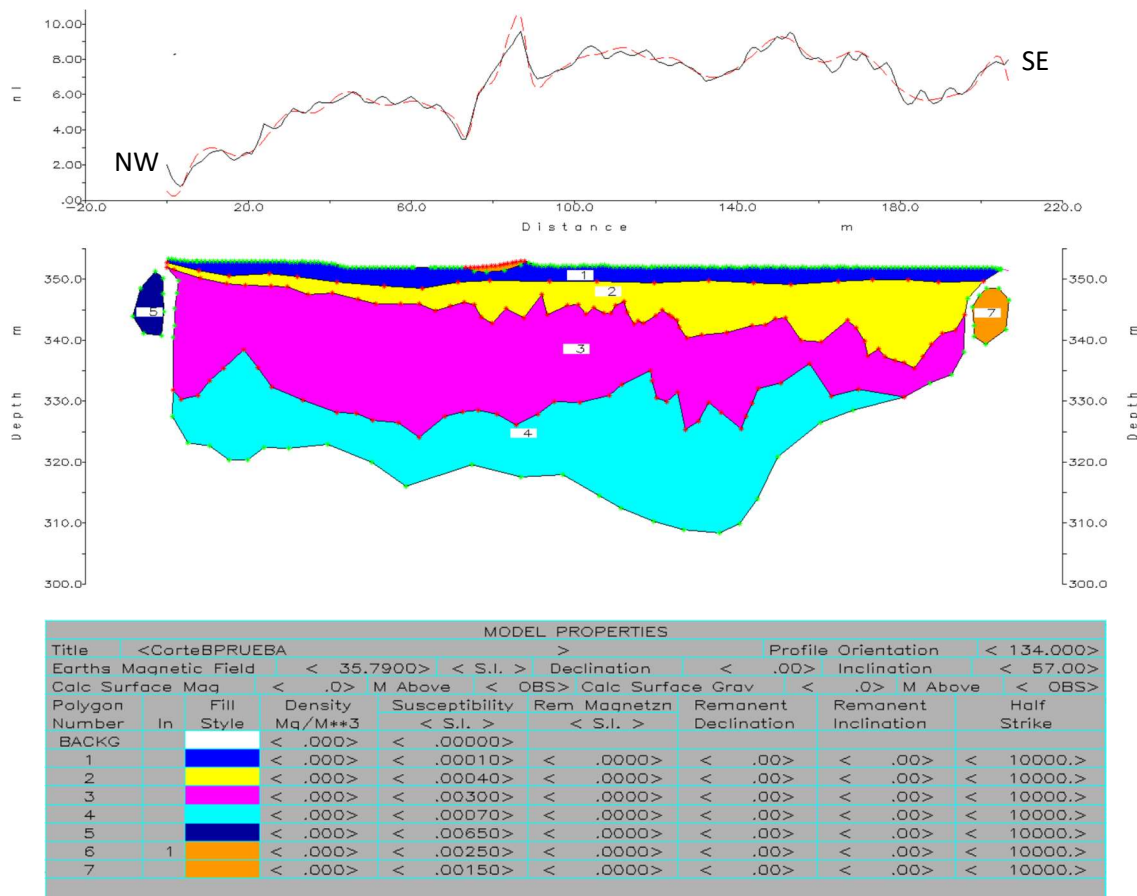


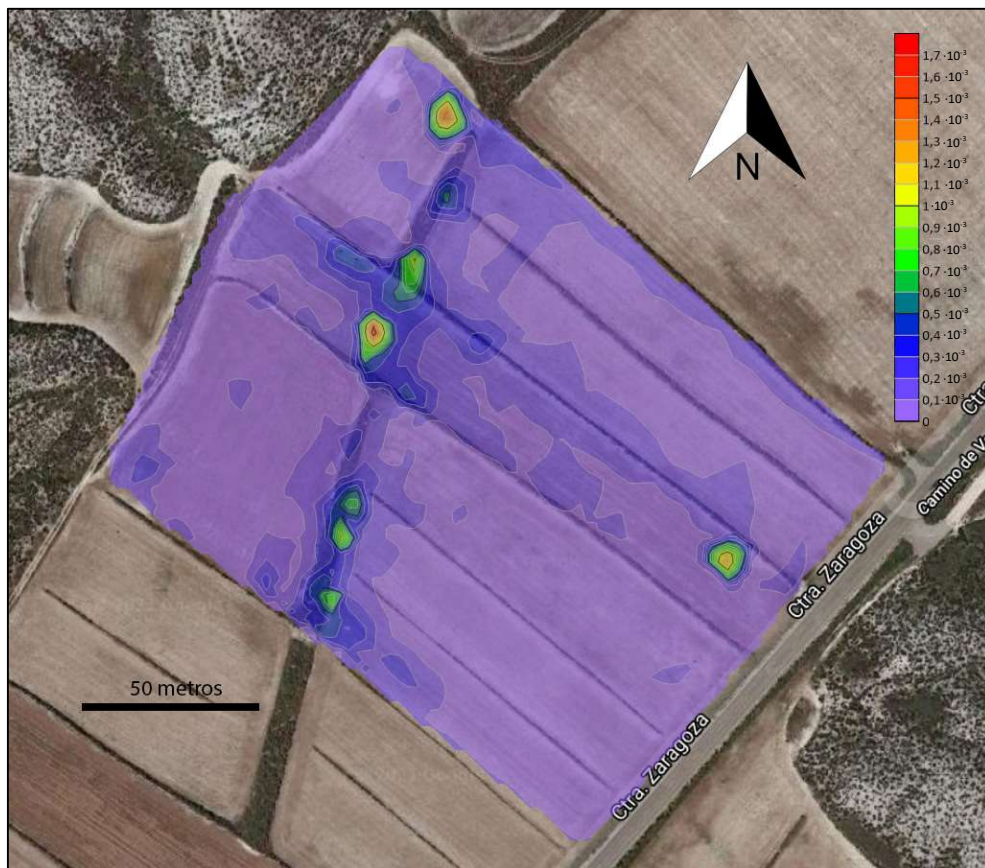
Fig. 9.- Perfil 2.5D del corte B. En el gráfico inferior se representa la topografía con las alturas medidas en el campo, y la profundidad a la que se establecen los polígonos bajo la superficie (m). A partir de esta topografía se dibujan los polígonos con múltiples vértices para que se vayan amoldando a las anomalías dadas representadas con la línea continua negra en el gráfico de arriba.

Estos modelos son una aproximación de lo que podría ser el relleno del valle en profundidad, aunque en la realidad podrían existir variaciones en el espesor y la geometría de las capas. Varios polígonos se han colocado a los lados del modelo para compensar el campo magnético circundante a la zona de estudio originado por factores externos o del límite del valle, conocido como efecto de borde.

### 5.3 Valores de susceptibilidad

A partir de los datos obtenidos en el valle de fondo plano de la zona de estudio mediante el susceptómetro de mano se ha realizado un mapa para estudiar la susceptibilidad magnética (Figura 10), así como las medidas en el laboratorio de las diferentes muestras recogidas en el área. Tras procesar los datos, los valores de susceptibilidad oscilan entre 0 y  $1.700 \cdot 10^{-6}$  SI. En la mayor parte de la zona estudiada los valores son relativamente bajos, entre  $30 \cdot 10^{-6}$  SI y  $200 \cdot 10^{-6}$  SI, siendo la mayoría materiales limosos y arcillosos muy erosionados debido a los trabajos de cultivo en los campos.

A lo largo de una franja de dirección norte-sur aparecen una serie de valores más altos de susceptibilidad, relacionados con la antigua vía ferroviaria que transitaba la zona y que ahora ha sido desmantelada. Estos valores altos oscilan entre  $400 \cdot 10^{-6}$  SI y  $1.700 \cdot 10^{-6}$  SI, sobre todo en la zona central de la franja donde se encontraron las muestras de escoria. Además de esto, unas mediciones aisladas en la parte este de la zona dieron resultados con valores altos de hasta  $1.300 \cdot 10^{-6}$  SI.



*Fig. 10.- Mapa de susceptibilidades magnéticas que representa las mediciones medidas en superficie, donde en colores templados y cálidos aparecen los valores más altos de susceptibilidad.*

Los valores de susceptibilidad de las 26 muestras recogidas en campo y analizadas en el laboratorio se resumen en la tabla del Anexo 8, donde se observa que los resultados de susceptibilidad de los materiales coinciden con los valores tomados *in situ* con el susceptómetro de mano.

Fijándonos en la susceptibilidad volumétrica (*Bulk s*), se ve que la mayoría de los valores se encuentran en un rango relativamente bajo, de entre  $35 \cdot 10^{-6}$  SI y  $210 \cdot 10^{-6}$  SI. Estas medidas

corresponden a zonas con color morado y azul del mapa de la Figura 10, formadas por materiales limosos y arcillosos del relleno del valle. Además de estos valores, las muestras 3 y 17 presentan datos de susceptibilidad más altos, que coinciden con áreas con anomalías magnéticas grandes y con la franja norte-sur por que la pasaba la vía de ferrocarril.

También se ha estudiado la susceptibilidad de los fragmentos de escoria recogidos cerca de la franja por donde pasaba la vía del tren, que dan susceptibilidades altísimas muy por encima de los valores medios de las muestras, lo que indica un alto contenido en material ferromagnético.

## 5.4 Curvas termomagnéticas

Para conocer los minerales que componen el relleno de los valles de fondo plano, principalmente de los minerales magnéticos, se han realizado diferentes gráficas de las curvas termomagnéticas. Estas curvas miden la variación de la susceptibilidad conforme varía la temperatura. Si desciende la susceptibilidad en la curva significará que un mineral determinado ha desaparecido o se ha transformado, sin embargo, si la susceptibilidad aumenta significará que se han formado nuevas fases minerales. Llegada la temperatura de Curie, los minerales con comportamientos ferromagnéticos perderán su magnetización remanente, por lo que la curva descenderá bruscamente y se podrá identificar ese mineral concreto mediante la tabla del Anexo 9.

Las muestras seleccionadas, para las que se observa la variación de la susceptibilidad volumétrica (*Bulk s.*) con la realización de sus curvas termomagnéticas, presentan características que las diferencian del resto de muestras recogidas y analizadas anteriormente. En este caso se han elegido las muestras 3 y 17 debido a que presentan valores de susceptibilidad más altos y pueden dar más datos sobre que minerales aportan estas propiedades magnéticas. También se ha elegido la muestra de escoria 1 para comprobar cómo se comporta y que minerales la forman.

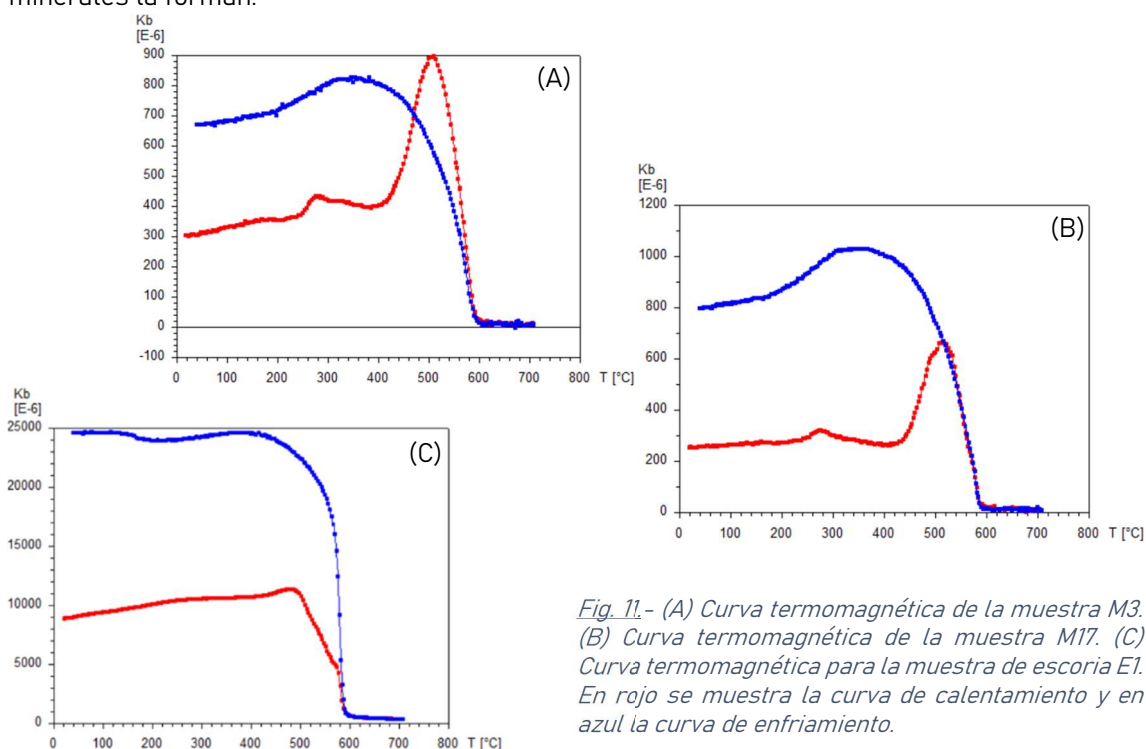


Fig. 11.- (A) Curva termomagnética de la muestra M3. (B) Curva termomagnética de la muestra M17. (C) Curva termomagnética para la muestra de escoria E1. En rojo se muestra la curva de calentamiento y en azul la curva de enfriamiento.

Tanto en la curva de la muestra 3 (Figura 11.A) como en la curva de la muestra 17 (Figura 11.B) se puede observar un comportamiento similar. Conforme va aumentando la temperatura, la susceptibilidad se mantiene estable y sube ligeramente hasta llegar a los 260°C, donde se produce un pequeño pico de susceptibilidad en ambas muestras. Tras esto, la susceptibilidad sigue estable, aunque bajando ligeramente con la temperatura hasta llegar a los 430°C, momento en el que se produce un gran pico de susceptibilidad.

Este pico llamado '*pico de Hopkinson*' (Hroudda *et al.*, 1997) se produce en el momento en el que el óxido de hierro cambia de fase, lo que da susceptibilidades mayores. En la muestra 3 la susceptibilidad llega a alcanzar los  $900 \cdot 10^{-6}$  SI, y en la muestra 17 se llegan a alcanzar los  $650 \cdot 10^{-6}$  SI. Esta diferencia de altura en el pico de la gráfica es debida a la cantidad de material magnético que contiene la muestra.

Tras este pico se produce un descenso general de la susceptibilidad hasta llegar a la temperatura de Curie, donde se desmagnetizan los minerales existentes, aproximadamente a los 580°C.

En la curva de descenso de la temperatura desde los 700°C se provoca un regreso de la magnetización de los minerales a partir de los 580°C. Esta curva es muy diferente a la del aumento de temperatura debido a que los materiales que han desaparecido o se han transformado durante el calentamiento son diferentes a los que se forman durante el enfriamiento.

En el caso de la curva de la muestra de escoria 1 (Figura 11.C) se puede observar que varía bastante respecto a las anteriores, sobre todo en los niveles de susceptibilidad que se llegan a medir, pudiendo llegarse a registrar los  $25.000 \cdot 10^{-6}$  SI.

La temperatura comienza a ascender, igual que lo hace la susceptibilidad ligeramente hasta llegar a los 480°C, punto máximo en el que la magnetización comienza a descender rápidamente desde los  $11.500 \cdot 10^{-6}$  SI hasta los  $4.500 \cdot 10^{-6}$  SI. A partir de este punto y alcanzados los 580°C, se llega a la temperatura de Curie y la magnetización remanente de los minerales desaparece.

La curva de descenso de temperatura es más parecida a la de las muestras 3 y 17, pero con las medidas de susceptibilidad en proporción. Se va enfriando desde los 700°C hasta llegar a los 580°C, donde la susceptibilidad magnética aumenta súbitamente hasta llegar a los  $25.000 \cdot 10^{-6}$  SI. Después de alcanzar estas medidas se mantiene estable hasta llegar a temperatura ambiente.

## **6. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Con los resultados obtenidos mediante los diferentes tipos de prospección geofísica y los análisis realizados en el gabinete, se han obtenido multitud de datos y de representaciones gráficas que permiten conocer y valorar la veracidad de estos resultados. Además, han resuelto diferentes cuestiones que se han ido planteando, como la composición mineralógica de los rellenos del valle de fondo plano, su geometría y sus propiedades magnéticas.

En relación con la susceptibilidad magnética de la zona, los valores más altos están influenciados por la antigua vía de tren que pasaba por estos campos y con parada en la localidad de Torrecilla de Valmadrid, ahora desmantelada. Los resultados obtenidos mediante

medición *in situ* con el susceptómetro portátil concuerdan con los valores de susceptibilidad de las muestras medidas en el laboratorio. Además, en el mapa de la Figura 10 se observan unos valores altos de susceptibilidad aislados en la zona más al este. Esta anomalía seguramente sea provocada por dos factores posibles: la proximidad de la parte este del área de estudio con la Ctra. Zaragoza y posibles materiales antrópicos que provengan de esta, o debido a que como la zona de estudio son campos de cultivo, a la hora de trabajarlos y arar el campo se haya movilizadado la escoria residual de la vía ferroviaria de más al oeste hacia el este.

En relación con las curvas termomagnéticas (Figura 11), si contrastamos las subidas y bajadas de temperatura representadas en las gráficas con la tabla del Anexo 9, se puede concluir que:

- Comparando las temperaturas de Curie de cada mineral con los valores que tenemos en las curvas de las muestras M3 y M17, se puede concluir que el mineral principal que provoca el brusco ascenso y la posterior bajada a aproximadamente 580°C es la magnetita.
- Además de este componente principal, a unos 280°C se observa un ligero pico también en estas dos muestras, que corresponde con la presencia de sulfuros, ya que 280°C entra dentro de la horquilla de posibilidades para minerales con una temperatura de Curie de estas características.
- En la muestra de escoria E1, el punto de magnetización más alto se encuentra a unos 480°C antes de producirse una fuerte bajada y posteriormente descender bruscamente a los 580°C. El primer pico de los 480°C está relacionado con diferentes óxidos de hierro, como la magnesioferrita o la ferrita de cobre, pero no se sabe su determinación exacta debido a la falta de pruebas mineralógicas. El descenso final a 580°C es producido por el mismo mineral que las muestras anteriores, la magnetita.

Las tres muestras estudiadas se recogieron en zonas cercanas a la localización donde se emplazaba la antigua vía de ferrocarril, la cual produce unas anomalías magnéticas mayores. En el caso de la muestra de escoria E1, esta roca está prácticamente toda magnetizada compuesta por minerales metálicos provenientes de casquería o del balastro de la vía de tren.

En relación con las anomalías magnéticas del campo total representadas en la Figura 7, de norte a sur se puede localizar una franja dipolar con medidas dispares, de entre más de 10nT y menos de 0nT. Este dipolo se encuentra justo en la misma localización y con la misma orientación que la vía ferroviaria desmantelada que pasaba por la zona, de la que no hay ningún elemento visible que indique de su pasada existencia excepto pequeños restos de escoria diseminados por el suelo cercano.

Respecto a las anomalías de origen natural, que son las que solo aparecen en la Figura 7 y que no aparecen representadas en el mapa de gradientes debido a su carácter más superficial (Anexo 6), la franja de anomalías magnéticas altas que atraviesan toda el área con dirección SWW-NEE, con valores de 7nT a 10nT, corresponden a la zona con más potencia del relleno del fondo del valle. Esto se puede observar ligeramente en la modelización en profundidad realizada en los perfiles 2.5D. Además de esta, aparecen en la mitad izquierda de la zona dos grandes anomalías, una negativa al oeste y otra positiva al noroeste, en la unión del valle de fondo plano

de primer orden que se está estudiando con otros de segundo orden perpendiculares a este (uno más grande cultivado y otro más pequeño al noroeste sin cultivar).

La anomalía positiva puede coincidir con la zona de máxima potencia de estos valles de segundo orden y su unión con el valle de primer orden. Esta zona de unión se puede seguir tímidamente en la Figura 7, como una franja de anomalía positiva oeste-este. Su sedimentación y aportes afectarían al contenido de material magnético detectado en el área estudiada. Respecto a la anomalía negativa del oeste, podría indicar un menor espesor de los materiales de relleno del valle con una disposición irregular (aunque en las modelizaciones de las Figuras 8 y 9 no aparezca este adelgazamiento, en el caso de los perfiles 2.5D se ha intentado ajustar lo máximo posible a la curva de anomalía datada, y que la modelización sea coincidente aun con los efectos de borde), o un relleno formado por materiales más diamagnéticos como yesos. Para conocer con precisión la aparición de estas dos anomalías habría que estudiar más a fondo los materiales que rellenan tanto los valles de fondo plano de segundo orden como los campos anexos a la zona de estudio de más al sur.

Con estos mapas de anomalías magnéticas (Figura 7) y de gradientes (Anexo 6) se puede concluir que:

- De forma natural, se produce un incremento de la susceptibilidad magnética, por lo que se crean anomalías magnéticas positivas en zonas donde el valle incide más topográficamente, y por tanto hay una mayor potencia del relleno.
- Además de esto, en el extremo oeste de la zona, junto a la unión del valle de fondo plano principal y un par de valles de segundo orden perpendiculares a este, aparecen dos anomalías, una parte negativa al oeste, y una parte positiva al noroeste. Estas anomalías pueden producirse debido a los aportes y el aumento de potencia influenciado por los valles de segundo orden en el caso de la anomalía positiva, y a una elevación irregular de la base del valle o una acumulación de materiales yesíferos en el caso de la anomalía negativa. Debido a que no se tienen datos suficientes de las zonas circundantes al área de estudio no se puede sacar una conclusión clara sobre estas dos anomalías.
- A nivel superficial, se observan diversas alteraciones magnéticas, todas provocadas por la construcción humana de diferentes emplazamientos. La más notable atraviesa la zona de sur a norte, y es originada por una antigua vía ferroviaria con parada en la localidad de Torrecilla de Valmadrid. También aparecen al este unas pequeñas anomalías negativas superficiales relacionadas con la proximidad del área del estudio con la Ctra. Zaragoza que pasa cerca, al este.

En relación con las modelizaciones en los perfiles 2.5D (Figuras 8 y 9), en ambas existe una base tanto por debajo como a los lados del relleno del valle, cuyos materiales diamagnéticos son el principal relieve en la topografía de la zona, los yesos de la Fm. Zaragoza. Los materiales de relleno se dividen en 4 capas (establecidas así debido a los resultados del sondeo eléctrico vertical del Anexo 7), con una susceptibilidad magnética que va aumentando desde la más superficial a la más profunda, con excepción de la capa 3 que tiene unas cantidades más altas de material magnético. Esta disposición de capas y sus susceptibilidades son la forma más precisa para hacer coincidir las anomalías magnéticas registradas.

En relación con la geometría, se observa una ligera forma en V del valle, con un pequeño pico que afecta a los rellenos de la capa 4, aunque debido a que el estudio se ha realizado en la

zona central del relleno sin abarcar los márgenes y topografía de zonas escarpadas no se define con precisión. Según Gutiérrez y Arauzo (1997), el barranco de Torrecilla experimentó una evolución compleja muy influenciada por fenómenos de subsidencia kárstica sinsedimentaria, que provocaron el engrosamiento de las capas del relleno durante su sedimentación. Estos eventos afectaron principalmente a las capas más profundas en la base del relleno que ahora se observan con mayor potencia. En la capa 3 del modelo, la susceptibilidad es bastante superior al resto de las capas del relleno, aunque también su gran espesor respecto a las capas superiores hace que tenga una gran influencia en las anomalías magnéticas. Es posible que el aumento de la potencia de la capa 3 en el margen NW se deba a los aportes sedimentarios de los valles de segundo orden que desembocan al oeste del área estudiada. Esto también afectaría a la capa 2, cuyo adelgazamiento en la zona oeste se relacionaría con el aumento de potencia de la capa 3 en la margen izquierda del valle. En la capa 1 del modelo se ha tenido en cuenta la gran anomalía que produce la antigua vía ferroviaria en superficie, situada más al NW de los perfiles realizados. Esta instalación aportó materiales magnéticos al sedimento circundante, pero las posibles influencias magnéticas en el relleno solo afectarían a las capas más superficiales de la zona.

Por último, es interesante conocer el origen de los materiales ferromagnéticos que rellenan los valles de fondo plano. Debido a que el área fuente principal de estos valles son las zonas con una topografía más elevada, los materiales de relleno deberían corresponder a minerales diamagnéticos como los yesos de la Fm. Zaragoza o minerales con menor susceptibilidad magnética que la que aparece en realidad en la zona.

Los valles de fondo plano de la Cuenca del Ebro, entre los que se incluyen los de la zona de estudio, han sido utilizados desde hace siglos como campos de cultivo con principal uso para la agricultura de las poblaciones que se asentaban en pueblos y ciudades cercanas. Esto ha provocado que siempre hayan tenido una alta actividad antrópica materializada de diferentes formas a lo largo de la historia, con especial interés en el siglo XX. Tanto las herramientas de trabajo, la maquinaria de labranza, como el empleo de fertilizantes de cultivo ricos en hierro, son una gran influencia del aporte antrópico de elementos magnéticamente importantes a los sedimentos y al suelo. Además de esto, en la zona en la que se sitúa el estudio realizado pasó durante más de 60 años una vía ferroviaria dedicada al transporte de lignitos que atravesaba los campos de sur a norte, conectando la localidad minera de Utrillas con la capital de provincia, Zaragoza, siendo una de las paradas del recorrido la que se encontraba en la localidad cercana de Torrecilla de Valmadrid.

A pesar de que las influencias en materiales de alta susceptibilidad de origen antrópico son grandes, estas afectan principalmente a las capas más actuales y superficiales del relleno del valle. Para que estas influencias externas afectaran con la intensidad de los valores que se registran actualmente se necesitaría una actividad antrópica mucho más intensa y contaminante. Para dar explicación a los valores magnéticos registrados en las capas inferiores del relleno, se va a optar por una vía principalmente natural y climática. Según varios autores (Maxbauer *et al.*, 2016 y Orgeira *et al.*, 2018), la formación de estos minerales ferromagnéticos de origen natural estaría condicionada por el drenaje del suelo, el pH, la presencia de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en un momento climático determinado.

El paleosuelo del relleno habría sido sedimentado tras la última glaciación (Soriano y Calvo, 1987), que habría evolucionado en un clima de transición subatlántico que favorecería la

aparición de vegetación abundante y fauna. Esto aportaría las condiciones necesarias para la génesis de óxidos de hierro que, junto a la actividad bacteriana presente, se captaría y fijaría el hierro al proceso de formación de suelo, cada vez más magnético a lo largo de los milenios. Tras esto, con un desarrollo del clima de todo el territorio cada vez más árido durante los últimos miles de años, se acelerarían los procesos de erosión, con un cambio en los materiales del depósito cada vez menos magnéticos por encima de estos paleosuelos con alto contenido ferromagnético. El enterramiento de estos suelos con grandes contenidos en materia orgánica en el fondo del relleno produciría unas condiciones de pH, Eh y temperatura que favorecerían la transformación de los óxidos de hierro a minerales como hematites o magnetita.

## 7. CONCLUSIONS

Near Torrecilla de Valmadrid, a magnetic survey has been made in the field, collecting measurements in different parameters of the study. From 22.299 measures with the magnetometer, 1.527 measures with the susceptometer, and 29 field samples measured in the laboratory, the following conclusions can be obtained:

- An ancient railway crossed the study area affecting the measurements of every survey do. These railway shows dipolar anomalies with a S-N direction. The anomalies detected affect mostly at the surface layers of the filling of the flat-bottomed valley. Besides this, the highroad of Zaragoza appears in the side east of the area, being able to produce anthropic contamination.
- The thermomagnetic curves shows that the main magnetic mineral in the valleys is magnetite. Moreover, the little peaks in the graphic evidence the existence of other minerals in the soil, like iron oxides and sulphides.
- In the anomalies map, the main anomaly that crosses the map in W-E direction shows the points of the valley with more depth and more thickness of the layers. This can be seen in the 2.5D models, with a lightly morphology in 'V'. The bulk of the filling can be 50 meters of deepness.
- The secondary flat-bottomed valleys provided sediments to the main valley and affected the thickness of the third layer, and the second layer indirectly.
- The materials on both sides of the valley are form of gypsums of the Zaragoza Formation. The filling formed of clay and silt have a susceptibility increasing with the depth. But, in the third layer, there are many magnetic materials that affect prospecting.
- The concentration of magnetic minerals in the deepest layers of the filling of the valley can be formed in different situations. The anthropic influence is important for the layers at the top of the filling, but not is the main process in the accumulation of ferromagnetic minerals in the bottom.
- To explain this amount of magnetic concentration at the bottom, natural factors have been chosen as the most likely to produce the formation conditions. The climate change after the last glaciation, the change in the conditions of the soil and the bacterial action could be the main reasons of the formation and accumulation of ferromagnetic minerals underground.



Complementary field methods like borehole drilling, gravimetric or seismic surveys, or in laboratory like XRD, could be a good extension for known and expand the contents of this work.

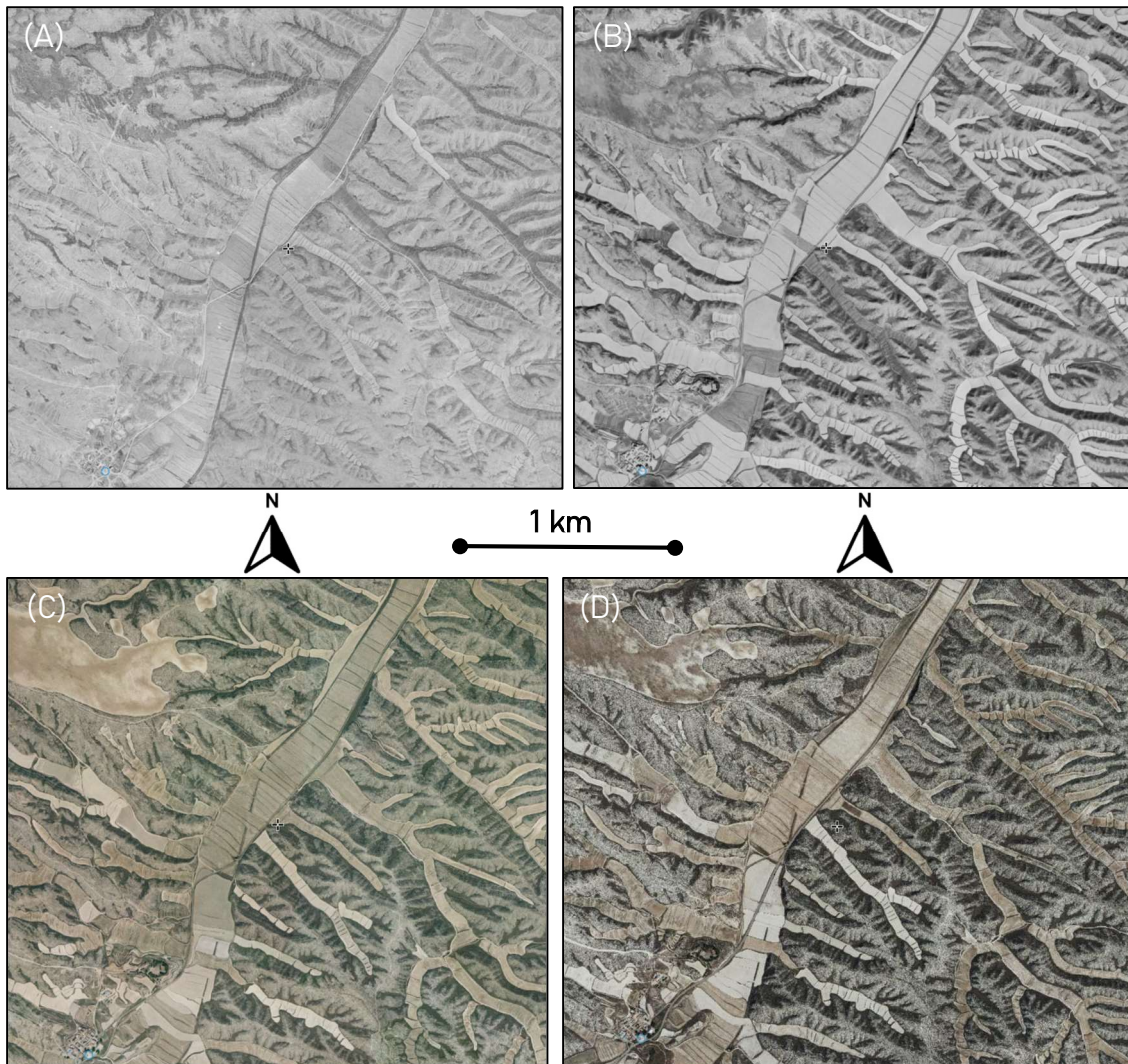
## 8. BIBLIOGRAFÍA

- AGICO (2003). *KLY-3/KLY-3S/CS-3/CS-L/CS-23, User's Guide*. Modular system for measuring magnetic susceptibility, anisotropy of magnetic susceptibility, and temperature variation of magnetic susceptibility. Advanced Geoscience Instruments Co. (AGICO), Brno, Czech Republic. **83 p.**
- AGICO (2017). *Cureval8, Thermomagnetic Curve Analyzer*. Software Manual. Ver. 1.0.1. Advanced Geoscience Instruments Co. (AGICO), Brno, Czech Republic. **18 p.**
- Attar, A. (2017). *Prospección geofísica aplicada al estudio de la geometría de valles de fondo plano*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Zaragoza. **46 p.**
- Barnolas, A., Robador, A., et al. (1998). *Fuentes de Ebro (384, 28-15)*. Memoria del Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000. Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE), Segunda serie – Primera edición, IGME. **42 p.**
- Breiner, S. (1999). *Applications manual for portable magnetometers*. Geometrics, San Jose, California (USA). **58 p.**
- Burillo, F., Gutiérrez, M. y Peña, J.L. (1985). *Las acumulaciones holocenas y su datación arqueológica en Mediana de Aragón (Zaragoza)*. Cuadernos de Investigación Geográfica, Tomo XI: **193-207**.
- Chikazumi, S. (1997). *6. Ferromagnetism*. Part 3, Magnetic ordering. Physics of Ferromagnetism, 2<sup>nd</sup> Ed. (C.D. Graham Jr., Ed.). Oxford Science Publications, International Series of Monographs on Physics, 94: **118-133**.
- GEM Systems Inc (2001). *GSM-19 v6.0 Instruction Manual*. Ontario, Canada. **85 p.**
- Gutiérrez, F. y Arauzo, T. (1997). *Subsistencia kárstica sinsedimentaria en un sistema aluvial efímero: El Barranco de Torrecilla (Depresión del Ebro, Zaragoza)*. Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza. Cuadernos de Geología Ibérica, núm. 22, Madrid. **349-372**.
- Hroudda, F., Jelínek, V. y Zapletal, K. (1997). *Refined technique for susceptibility resolution into ferromagnetic and paramagnetic components based on susceptibility temperature variation measurement*. Geophysics, 129: **715-719**.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. y Banerjee, S.K. (1995). *Magnetic properties of rocks and minerals*. Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants (T.J. Ahrens, Ed.), AGU, Washington D.C. **189-204**.
- Marqués, L.A., Santos, J.A., Esnaola, J.M. y Gil, C. (1991). *Mapa de Fuentes de Ebro (384, 28-15)*. Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000 (A. Barnolas y A. Robador (ITGE), Sup., IGME). Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras S.A. (ENADIMSA). **1 mapa**.

- Maxbauer, D.P., Feinberg, J.M. y Fox, D.L. (2016). *Magnetic mineral assemblages in soils and paleosoils as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges*. Earth-Science Reviews, 155: **28-48**.
- Montserrat, P. (2020). *Prospección magnética aplicada al estudio de valles de fondo plano en los alrededores de Zaragoza*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Zaragoza. **41 p**.
- Orgeira, M.J., Chaparro, M.A.E., Ozán, I.L. y Gargiulo, J.D. (2018). *Magnetismo Ambiental en suelos vírgenes y antropizados*. Magnetismo ambiental y cambio climático. (G. Vázquez y B. Solís, Coords.). Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. **85-138**.
- Pardo, G., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Pérez-Rivarés, F.J., Vázquez-Urbez, M. y Villena, J. (2004). *La Cuenca del Ebro*. Geología de España (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid. **533-542**.
- Parque Temático de la Minería (en línea, última modificación en 2016-2017). *Ferrocarril Utrillas - Zaragoza*. Minas de Utrillas. Fecha de consulta: **20/05/2021**. Disponible en:  
<<https://web.archive.org/web/20161221000923/http://www.minasdeutrillas.com/htm/es/tren/ferrocarrilutrillas.htm>>
- Parque Temático de la Minería y el Ferrocarril (en línea, última modificación en 2017). *Compañía Minas y Ferrocarril de Utrillas (M.F.U.)*. Utrillas minero. Fecha de consulta: **24/05/2021**. Disponible en:  
<<https://parquemineroutrillas.com/utrillas-minero/#1492788454361-a9302ae7-15af>>
- Pedley, R.C., Busby, J.P. y Dabek, Z.K. (1993). *GRAVMAG user manual*. Interactive 2.5D gravity and magnetic modelling. British Geological Survey, Technical Report WK/93/26/R. **73 p**.
- PMG-2 (2012). *Operation manual*. Specifications. Czech Republic. **4-5**.
- Quirantes, J. (1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza. **200 p**.
- Soriano, M.A. y Calvo, J.M. (1987). *Características, datación y evolución de los valles de fondo plano de las inmediaciones de Zaragoza*. Cuaternario y Geomorfología, vol. 1.: **283-293**.

## 9. ANEXOS

**ANEXO 1** – Ortofotos de vuelos históricos existentes del área de estudio.



(A) Ortofoto del vuelo americano, serie B de 1956-1957.

(B) Ortofoto del vuelo OLISAT, de 1997-1998.

(C) Ortofoto del vuelo PNOA, de 2006.

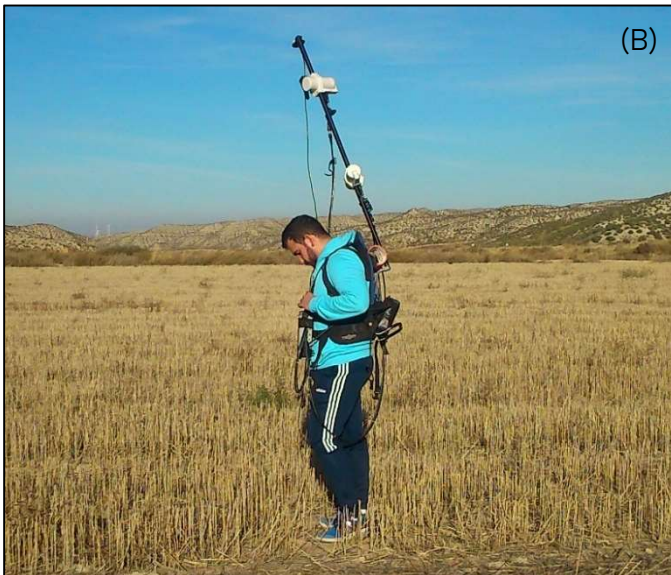
(D) Ortofoto del vuelo PNOA, actual.

**ANEXO 2** – Aparatos utilizados durante la prospección del terreno.



(A)

(A) Magnetómetro fijo (base), modelo PMG-2 de SatisGeo (PMG-2, 2012).



(B)

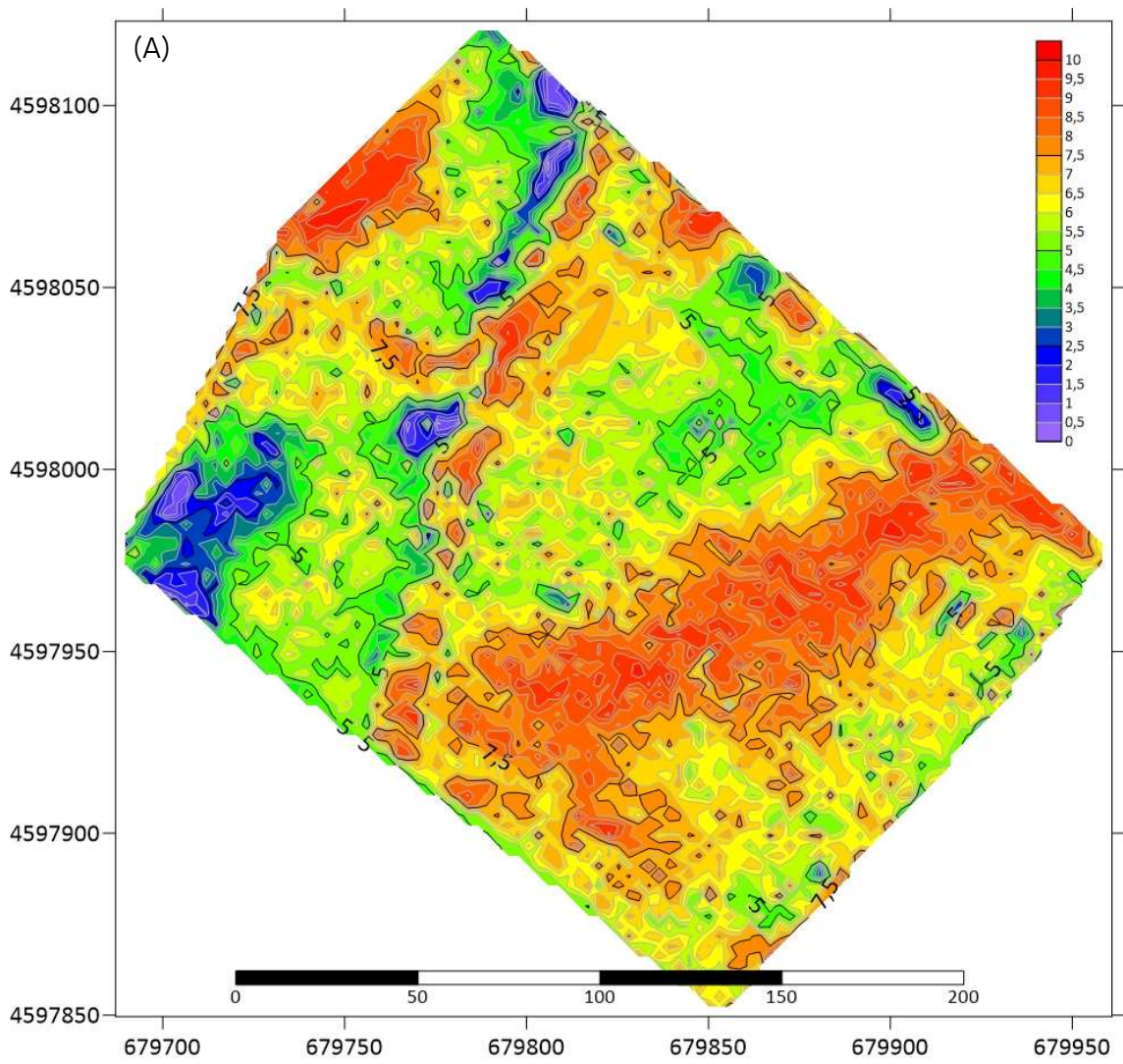
(B) Magnetómetro móvil, modelo GSM-19 v6.0 de GEM Systems.



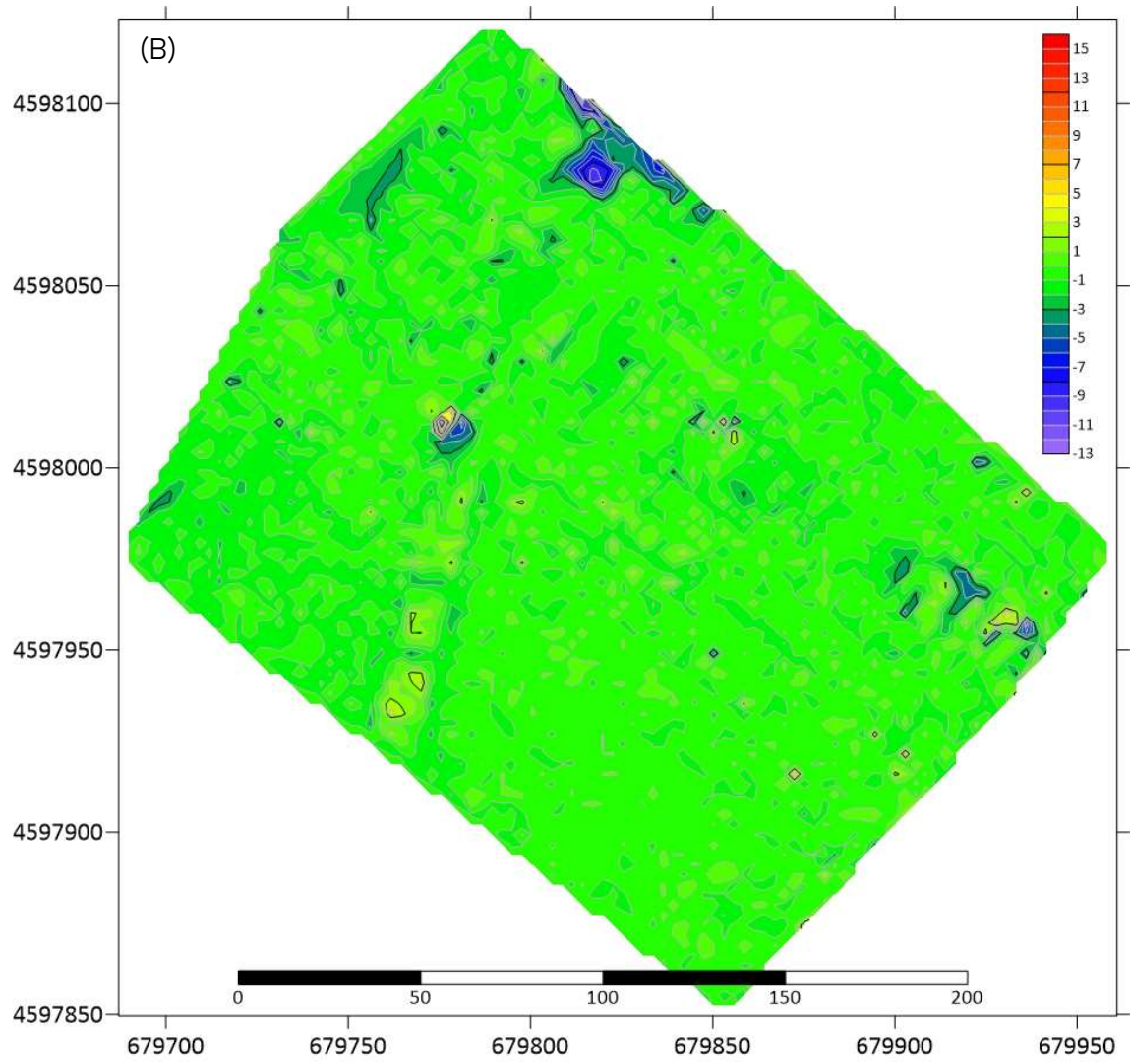
(C)

(C) Susceptómetro de mano portátil, modelo KT-20 de Terraplus.

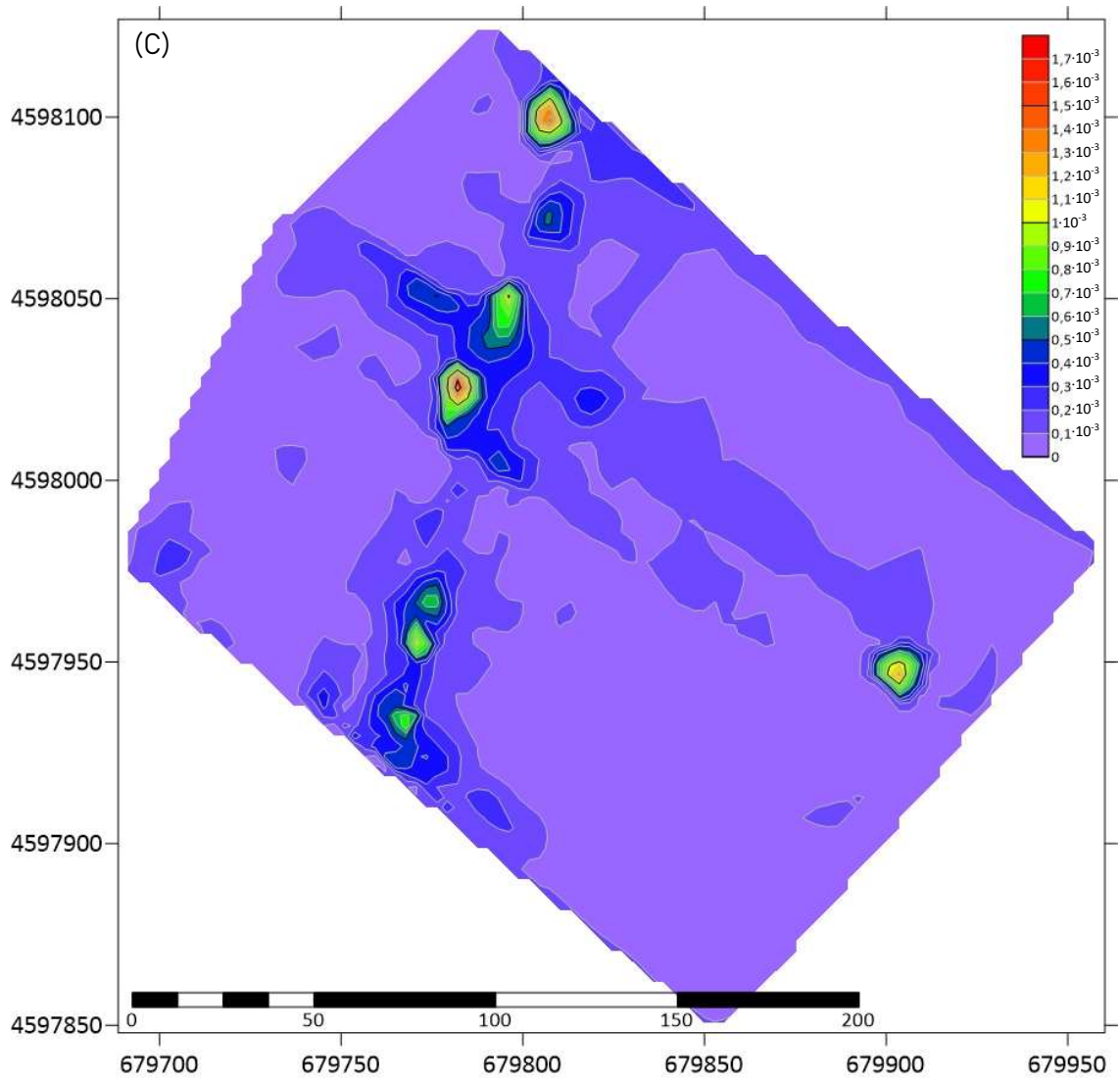
**ANEXO 3** - Mapas elaborados con el programa Surfer19.



(A) Mapa de anomalías magnéticas.

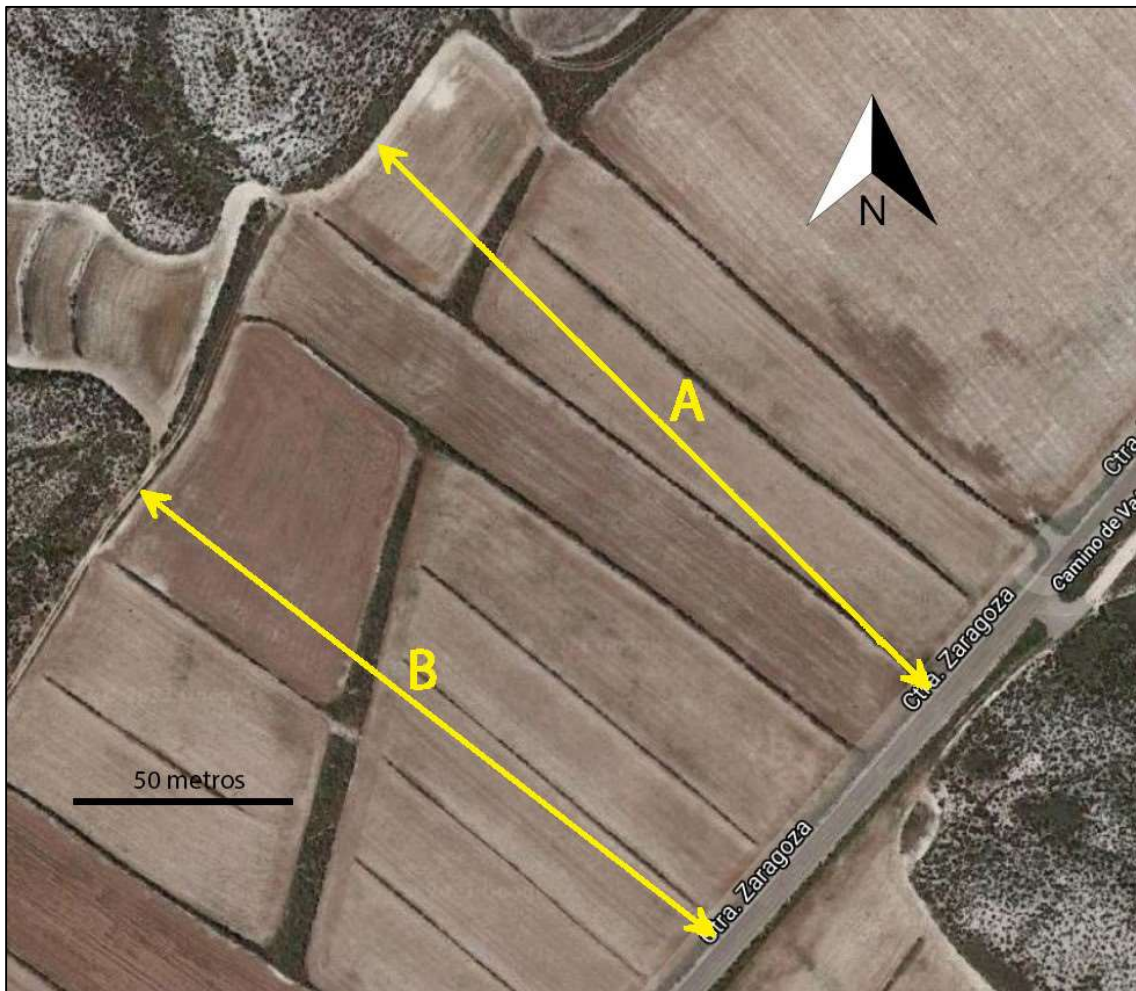


(B) Mapa de gradientes magnético.



(C) Mapa de susceptibilidad magnética.

**ANEXO 4** – Localización de los cortes realizados para los perfiles 2.5D.



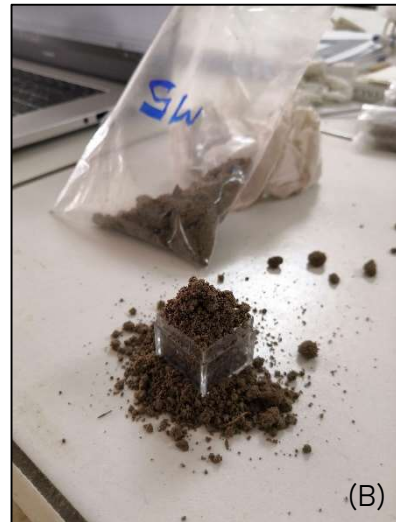
Localización de los cortes transversales para la realización de los perfiles la zona de estudio y los modelos 2.5D, nombrados A (más al norte) y B (más al sur).



**ANEXO 5** – Aparatos utilizados en el laboratorio.



(A) Balanza del laboratorio que mide en gramos con precisión de hasta dos decimales.



(B) Cubo transparente de 7,6 cm<sup>3</sup> de volumen utilizado para calcular la densidad de las muestras.

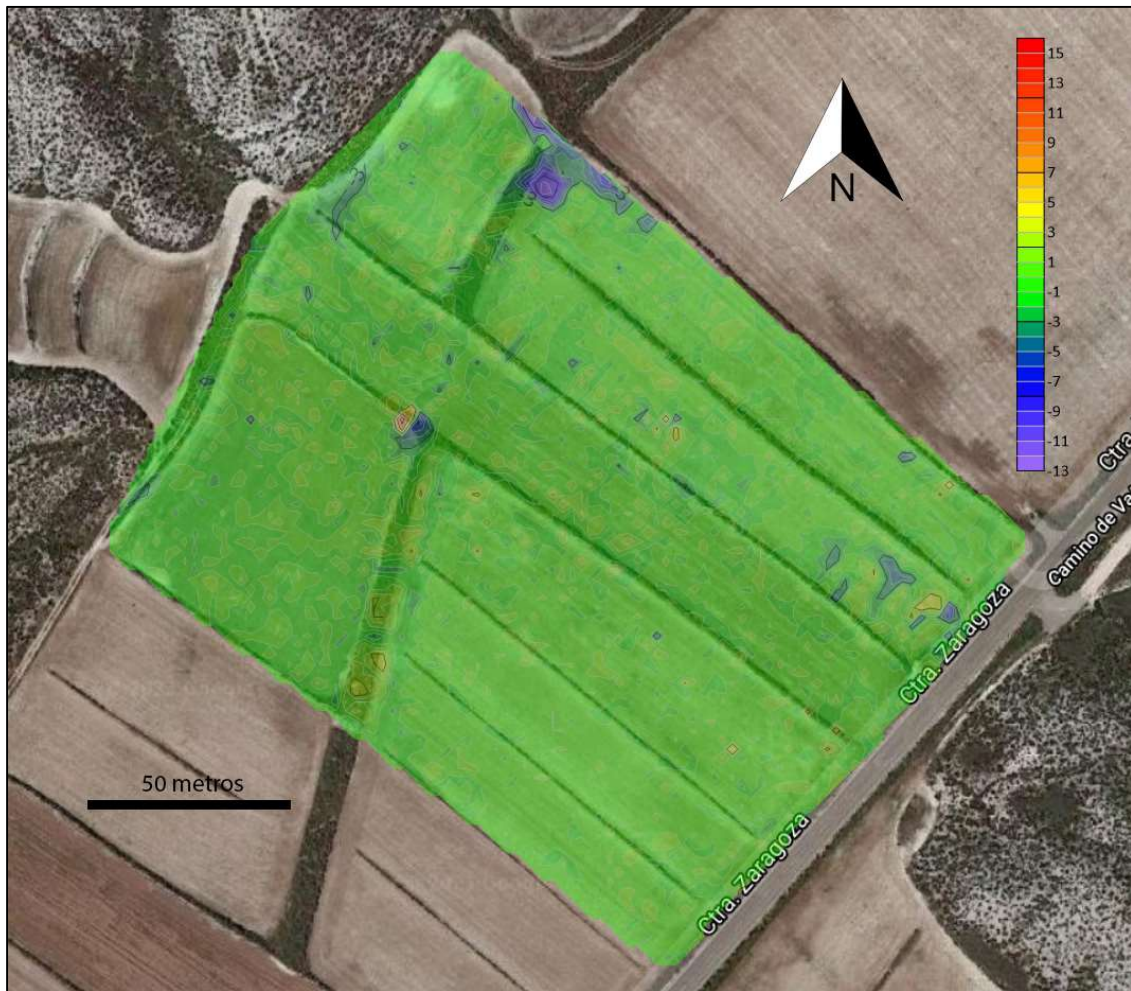


(C) Sistema modular KLY3-S Kappabridge de AGICO.



(D) Tubo de ensayo con varilla termosensora CS-L (AGICO, 2003).

**ANEXO 6** – Mapa de gradientes magnético.

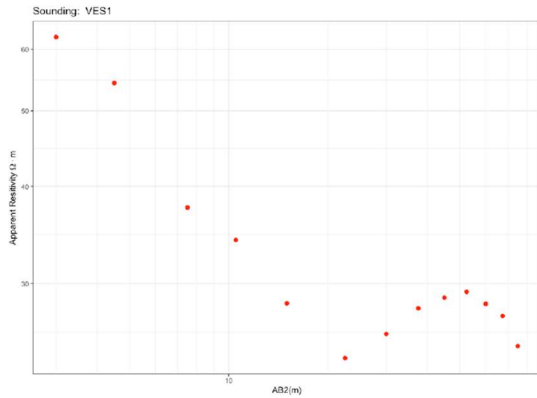


Mapa de gradientes que representa alteraciones magnéticas en las zonas más superficiales del terreno. En colores fríos aparecen anomalías negativas y, puntualmente, en colores cálidos aparecen anomalías positivas.

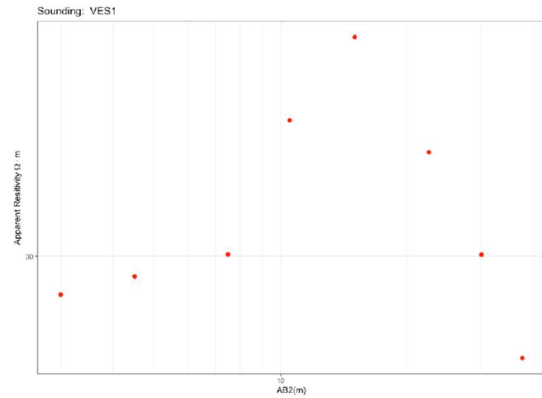
**ANEXO 7** – Sondeo eléctrico vertical.

Este sondeo eléctrico vertical fue realizado por los estudiantes de Geotecnia y prospección geofísica del grado de Geología de la Universidad de Zaragoza.

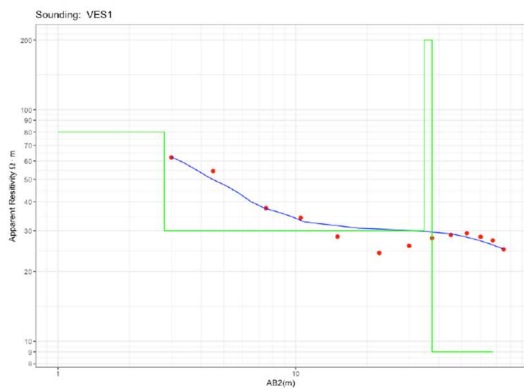
La localización de los sondeos se sitúa unos 100 metros al sureste del área que abarca este Trabajo de Fin de Grado, pero sirven para hacerse una idea de las capas y materiales que aparecen en profundidad en las zonas circundantes al terreno estudiado.



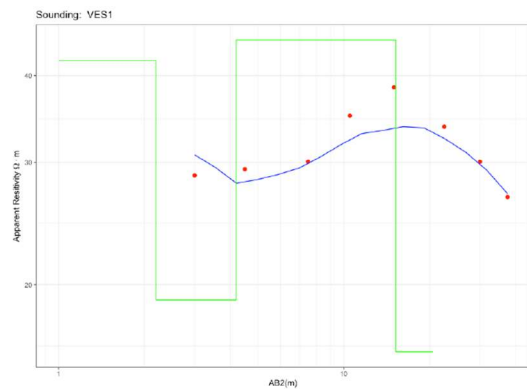
SEV del borde de la val de Torrecilla



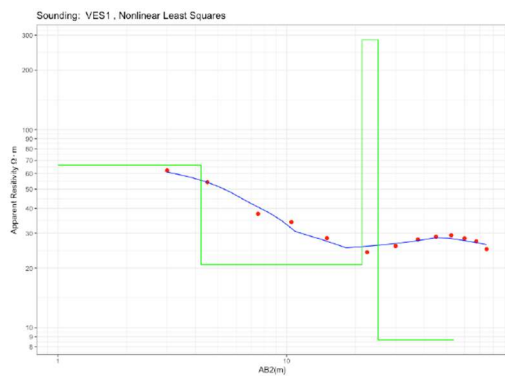
SEV del camino



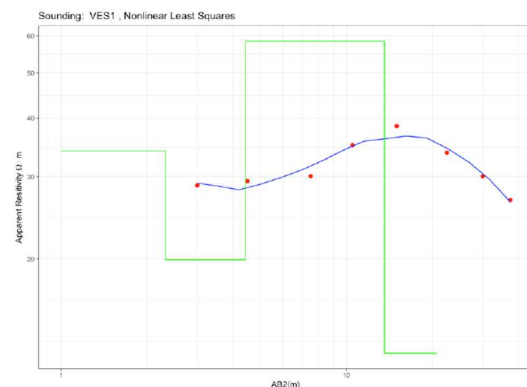
Modelo a partir de la solución de los ábacos



Modelo a partir de ábacos:



Ajuste auto tras 100 iteraciones (con 20 sale igual)



Ajuste auto tras 100 iteraciones

SEV "camino"		SEV "centro de la Val"	
$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Espesor (m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Espesor (m)
66.35	3.20	34.04	1.32
20.96	17.30	19.89	2.10
281,91	3.76	58.44	9.17
8.95	-	12.56	-

**ANEXO 8** – Tabla de susceptibilidades de cada una de las muestras recogidas.

Valores de Masa (g), Volumen (cm<sup>3</sup>), Susceptibilidad total (*Total s.*, 10<sup>-6</sup> SI), Susceptibilidad volumétrica (*Bulk s.*, 10<sup>-6</sup> SI) y Susceptibilidad másica (*Mass s.*, 10<sup>-6</sup> SI) de cada una de las muestras recogidas en la zona de estudio. Se incluyen también las muestras de escoria.

	<b>Masa (g)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Susceptibilidad total (<i>Total s.</i>)</b>	<b>Susceptibilidad volumétrica (<i>Bulk s.</i>)</b>	<b>Susceptibilidad másica (<i>Mass s. 10</i>)</b>
<b>Muestra 1</b>	25.93	28.62	100.48	35.11	38.75
<b>Muestra 2</b>	41.11	43.78	416.02	95.02	101.20
<b>Muestra 3</b>	25.06	36.74	2196.77	597.84	876.61
<b>Muestra 4</b>	36.60	40.94	404.84	98.89	110.61
<b>Muestra 5</b>	34.75	40.08	350.54	87.46	100.87
<b>Muestra 6</b>	32.02	34.25	327.56	95.65	102.30
<b>Muestra 7</b>	37.28	41.75	357.38	85.61	95.86
<b>Muestra 8</b>	28.28	31.74	270.41	85.20	95.62
<b>Muestra 9</b>	37.25	38.36	434.67	113.31	116.69
<b>Muestra 10</b>	29.25	33.05	717.60	217.12	245.33
<b>Muestra 11</b>	36.08	36.85	592.36	160.73	164.18
<b>Muestra 12</b>	41.16	44.12	383.54	86.94	93.18
<b>Muestra 13</b>	43.71	40.85	417.53	102.21	95.52
<b>Muestra 14</b>	58.76	50.61	518.49	102.44	88.24
<b>Muestra 15</b>	41.83	40.14	150.27	37.43	35.92
<b>Muestra 16</b>	40.87	41.37	269.86	65.24	66.03
<b>Muestra 17</b>	34.08	37.66	1425.32	378.50	418.23
<b>Muestra 18</b>	40.81	48.87	752.66	154.00	184.43
<b>Muestra 19</b>	44.37	49.69	1029.34	207.17	231.99
<b>Muestra 20</b>	36.34	40.15	426.28	106.16	117.30
<b>Muestra 21</b>	35.95	39.38	320.86	81.49	89.25
<b>Muestra 22</b>	36.90	42.71	363.81	85.18	98.59
<b>Muestra 23</b>	34.92	40.23	373.88	92.94	107.07
<b>Muestra 24</b>	46.58	49.08	770.99	157.08	165.52
<b>Muestra 25</b>	33.71	35.30	543.50	153.97	161.23
<b>Muestra 26</b>	45.47	48.84	459.98	94.18	101.16
<b>Escoria 1</b>	7.16	2.52	3104.86	12332.73	4336.40
<b>Escoria 2</b>	22.59	12.54	14792.86	11800.24	6548.41
<b>Escoria 3</b>	14.57	8.04	29859.22	37154.95	20493.63

**ANEXO 9** – Tabla de minerales y temperaturas de Curie.

Propiedades magnéticas y temperaturas de Curie para diversos minerales. Tabla sacada de Hunt *et al.*, 1995.

Mineral	Composition	Magnetic Order	$T_c^a$ (°C)	$J_s^b$ (Am <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )
<i>Oxides</i>				
cobalt ferrite	CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ferrimagnetic	520	80
copper ferrite	CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ferrimagnetic	455	25
hematite	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	canted antiferromagnetic	675	0.4
maghemite	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ferrimagnetic	~600	70–80
ilmenite	FeTiO <sub>3</sub>	antiferromagnetic	-233	
magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	ferrimagnetic	575–585	90–92
ulvöspinel	Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	antiferromagnetic	-153	
magnesioferrite	MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ferrimagnetic	440	21
jacobsite	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ferrimagnetic	~300	77
trevorite	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	ferrimagnetic	585	51
<i>Sulfides</i>				
troilite	FeS	antiferromagnetic	305	
pyrrhotite	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>	ferrimagnetic	320	20
greigite	Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	ferrimagnetic	~333	~25
<i>Oxyhydroxides</i>				
goethite	α-FeOOH	antiferromagnetic/weak ferromagnetic	~120	<1
feroxyhyte	δ-FeOOH	ferrimagnetic	~180	<10
lepidocrocite	γ-FeOOH	antiferromagnetic(?)	-196	
<i>Metals and Alloys</i>				
cobalt	Co	ferromagnetic	1131	161
wairauite	CoFe	ferromagnetic	986	235
iron	Fe	ferromagnetic	770	218
nickel	Ni	ferromagnetic	358	55
awaruite	Ni <sub>3</sub> Fe	ferromagnetic	620	120

<sup>a</sup> $T_c$  = Curie temperature (ferromagnetic materials) or Néel temperature (ferrimagnetic and antiferromagnetic materials).

<sup>b</sup> $J_s$  = Saturation magnetization at room temperature.