



Universidad de Jaén
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

Fallas recientes y activas asociadas al desarrollo del sector suroccidental de la Cuenca de Granada y su peligrosidad geológica.

Alumno/a: Vinardell Peña, Raquel

Tutor/a: Prof. D. Antonio José Gil Cruz

Prof. D. Jesús Galindo Zaldívar

Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría, Universidad de Jaén

Geodinámica, Universidad de Granada

Resumen

La Cordillera Bética está localizada en el límite entre las placas Euroasiática y de Nubia (África). El contexto geológico de convergencia activa produce una deformación continua, responsable de la sismicidad de la región. La actividad de las fallas constituye uno de los principales peligros de origen geológico. La Falla de Zafarraya, localizada al SO de la Cuenca de Granada, produjo en 1884 el mayor terremoto catastrófico que ha sufrido Andalucía. Las observaciones de campo indican que es una falla normal. Desde 2004 se monitorea mediante una red geodésica GNSS y se ha necesitado un largo periodo de tiempo para proporcionar datos confiables debido a la baja velocidad de deformación. Sorprendentemente, la red geodésica indica un acortamiento de la región opuesto a la extensión asociada a la falla normal. Para mejorar el conocimiento de la falla se ha realizado una campaña geofísica en la que se adquirieron datos de resistividad del subsuelo mediante tomografía eléctrica para la caracterización de la falla y mejorar la correlación con la información geodésica que permiten entender mejor la evolución estructural y tectónica de la región. Se adquirieron y procesaron 5 perfiles eléctrico resistivos que identifican la zona de falla y las estructuras de cuñas clásticas asociadas a movimientos tectónicos bruscos. La correlación de los datos de resistividad obtenidos en los perfiles y la estructura y litologías del área se interpretaron por medio de esquemas geológicos que al integrarlos a la información geodésica explican la evolución estructural del área. La Falla de Zafarraya se interpreta como una falla normal formada por colapso de una antiforma que se desarrolla como resultado de los esfuerzos de compresión que afectan el área de estudio.

Abstract

The Betic Cordillera is located at the boundary between the Eurasian and Nubian (Africa) plates. The geological context of active convergence produces continuous deformation, which is responsible for the seismicity of the region. Fault activity is one of the main geological hazards. The Zafarraya Fault, located to the SW of the Granada Basin, produced the largest catastrophic earthquake in Andalusia in 1884. Field observations indicate that it is a normal fault. Since 2004 it has been monitored by a GNSS geodetic network and it has taken a long period of time to provide reliable data due to the low strain rate. Surprisingly, the geodetic network indicates a shortening of the region opposite to the extension associated with the normal fault. To improve the knowledge of the fault, a geophysical campaign has been carried out in which subsurface resistivity data were acquired by electrical tomography to characterise the fault and improve the correlation with geodetic information, allowing a better understanding of the structural and tectonic evolution of the region. Five electrical resistive profiles were acquired and processed to identify the fault zone and clastic wedge structures associated with seismic tectonic movements. The correlation of the resistivity data obtained in the profiles and the structure and lithologies of the area were interpreted by means of geological cross sections which, when integrated with the geodetic information, explain the structural evolution of the area. The Zafarraya Fault is interpreted as a normal fault formed by collapse of an antiform that develops as a result of the compressive stresses affecting the study area.

Agradecimientos

A los tutores de este TFM por el apoyo y disponibilidad para la realización con calidad de esta investigación.

Al equipo de trabajo para la realización de las campañas geofísicas.

A las Universidades de Jaén y Granada.

El trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto P18-RT-3275 (Junta de Andalucía/FEDER); Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020 Ref. 126344 (University of Jaén); POAIUJA 2021/2022 (University of Jaén); Grupos de investigación de la Junta de Andalucía RNM-148, RNM-282, RNM-370.

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	4
3. Localización y contexto del área de estudio.....	6
3.1. Ubicación geográfica	6
3.2 Contexto geológico	6
3.3 Contexto sísmológico y red de GPS de la Falla de Ventas de Zafarraya.	10
4. Metodología	13
4.1 Tomografía eléctrica	13
4.1.1. Fundamentos Teóricos de la Tomografía Eléctrica	14
4.1.2. Concepto de Resistividad y factores que la determinan.	14
4.1.3. Configuración de Electrodo y adquisición de datos.	15
4.1.4. Equipo de Medida y Procesado	18
5. Resultados	22
6. Discusión	26
7. Conclusiones	30
Bibliografía	31

Índice de Figura

Figura 1:Esquema general de las principales cordilleras montañosas formadas en la orogenia alpina (A) y localización de la Cordillera Bética en el Mediterráneo occidental (B).	1
Figura 2: Mapa de ubicación geográfica del área de estudio (modificado del GEBCO Compilation Group 2021 GEBCO 2021 Grid).....	6
Figura 3: Mapa Geológico simplificado de la Cordillera Bética.....	7
Figura 4: Mapa geológico del área de estudio (Modificado de (Elorza , et al., , 1978)	8
Figura 5: Leyenda del Mapa Geológico del área de estudio.	8
Figura 6: Falla de Zafarraya. A- Evidencia de campo de la superficie de falla de Zafarraya. B- Juegos de estrías normales dexas sobre la superficie de falla. .	9
Figura 7: Secuencia sísmica Granada 2021. (a) Mapa topográfico de la Cuenca de Granada con sismicidad proporcionado por el IGN español (SIS, 2022). En naranja, la sismicidad relacionada con la secuencia sísmica de 2021 (Tomado de Madarieta-Txurruka, A. et. al., 2022).	11
Figura 8: Red GPS en la Falla de Zafarraya y la antiforma de Sierra Tejeda (tomado de Borque, M.J., et. al., 2005).	11
Figura 9: Resultados de la red geodésica local.....	13
Figura 10: La resistividad de rocas, suelos y minerales (Loke,2016).....	15
Figura 11: Esquema de funcionamiento del método de prospección eléctrica en corriente continua.. Dispositivo Schlumberger simétrico. M, N electrodos de potencial, y A, B electrodos de corriente (Figuerola, 1978).....	16
Figura 12: Configuraciones de electrodos: Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo. A y B son los electrodos de corriente mientras que M y N los de potencial (Garofalo, F., 2014).	17
Figura 13	17
<i>Figura 14: A- Primera fase de la toma de datos. La unidad central se coloca entre el segundo y tercer cable. B- Segunda fase de la toma de datos. La unidad central se coloca entre el segundo y tercer cable. C- Tercera fase de la toma de datos. La unidad central s se coloca entre el segundo y tercer cable. (Editado de ABEM, 2006).</i>	<i>18</i>
Figura 15:	19
Figura 16:	20
Figura 17: Mapa de localización de los perfiles de tomografía eléctrica.	22
Figura 18: Modelo de resistividad con topografía Perfil 1.....	23
Figura 19: Modelo de resistividad con topografía Perfil 2.....	23
Figura 20: Modelo de resistividad con topografía Perfil 3.....	24
Figura 21: Modelo de resistividad con topografía Perfil 4.....	24
Figura 22: Modelo de resistividad con topografía Perfil 5.....	25
Figura 23: Esquema de interpretación geológica del perfil 1.....	26
Figura 24:Esquema de interpretación geológica del perfil 2.....	27
Figura 25:Esquema de interpretación geológica del perfil 3.....	27
Figura 26:Esquema de interpretación geológica del perfil 5.....	28

Figura 27: Modelo gráfico de la evolución estructural del área de estudio..... 29

1. Introducción

La Cordillera Bética pertenece al orógeno alpino del Mediterráneo Occidental y junto con el Rif constituye el Arco de Gibraltar (Fig. 1). Se ha desarrollado desde el Cretácico por la interacción entre las placas Euroasiática y Nubia (África). Desde el Mioceno superior, la convergencia en dirección NO-SE con un movimiento relativo actual de 4 mm/año, junto con el desplazamiento hacia el Oeste del Dominio de Alborán, han producido la configuración progresiva de los relieves de la cordillera (Sanz de Galdeano, et al., 2007; DeMets, et al., 2010). La deformación continua y activa asociada a este contexto geológico es responsable de la sismicidad de la región. La mayor parte del relieve actual de la Cordillera está directamente relacionado con el desarrollo simultáneo de pliegues y fallas de tamaño kilométrico desde el Tortoniano. El entorno estructural del área se caracteriza por antiformas predominantemente orientadas E - O constituidas por rocas metamórficas, que están rodeadas por cuencas que en muchos casos están asociadas a sinformas donde las rocas del Neógeno y Cuaternario se preservan de la erosión (Galindo-Zaldívar, 2003).

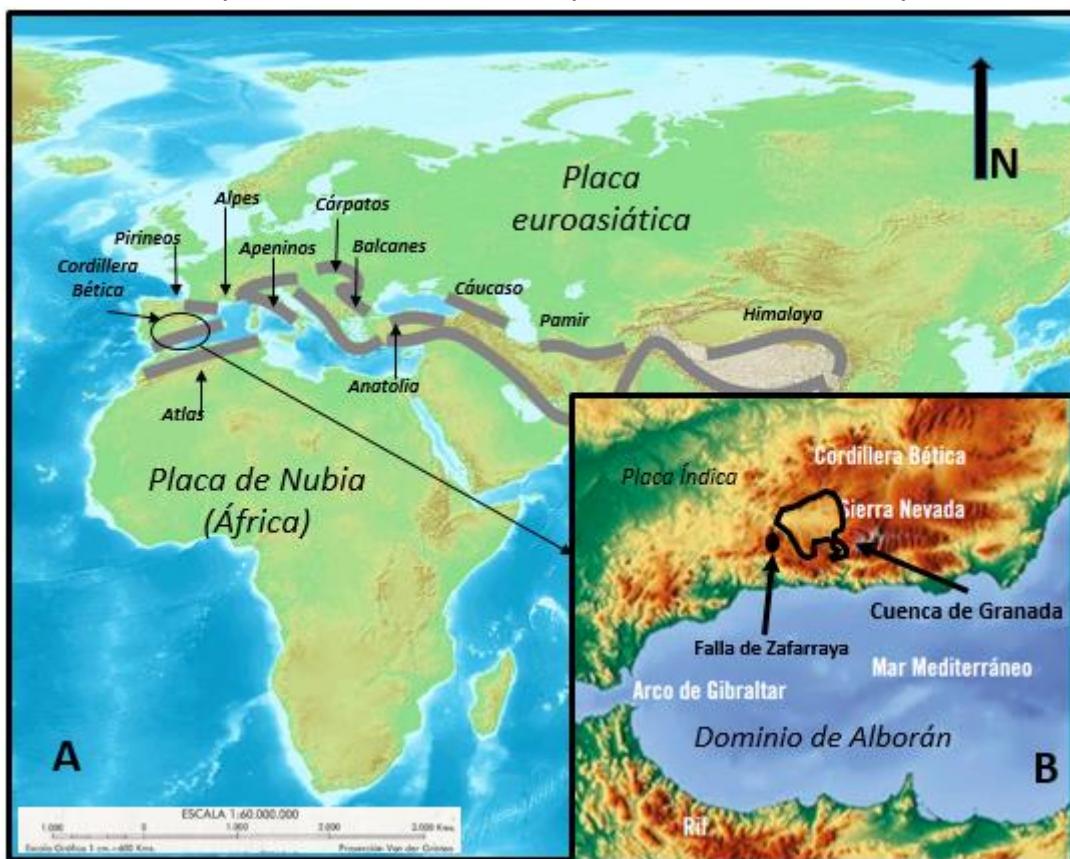


Figura 1: Esquema general de las principales cordilleras montañosas formadas en la orogenia alpina (A) y localización de la Cordillera Bética en el Mediterráneo occidental (B) (Modificado de (Marín Lechado, et al., 2011).

La Cuenca de Granada, una de las cuencas intramontañosas más grandes de la cordillera tiene probablemente la mayor actividad tectónica y tasa sísmica de la Península Ibérica, con gran cantidad de fallas activas capaces de

generar terremotos mayores de magnitud momento (M_w) de 6 (Sanz de Galdeano, et al., 2003, 2012). Está formada por un semigraben complejo que se ha desarrollado desde el Tortonense (11-6.5 millones de años) hasta la actualidad. Las calcarenitas marinas de esta edad se identifican en todo el entorno de la cuenca, lo que indica que se ha producido una elevación en el relieve y el paso progresivo desde medios de depósito marinos a medios continentales. La cuenca se ha formado por la interacción de pliegues y fallas. El desarrollo de los grandes pliegues es heterogéneo, con direcciones próximas a E-O, generalmente asimétricos y algunos de ellos con vergencia N, que determinan la formación de las principales alineaciones montañosas (Galindo-Zaldivar, et al., 2004).

La caracterización de las estructuras tectónicas y la morfología del relleno de la cuenca se ha realizado mediante la aplicación de diferentes técnicas geológicas y geofísicas: perfiles de sísmica de reflexión (Ruano, et al., 2004; Rodríguez-Fernández y Sanz de Galdeano, 2006) y refracción (Banda, et al., 1993), gravimetría (Morales, et al., 1990; Jiménez-Pintor, et al., 2002; Madarieta-Txurruka, et al., 2021, 2022) y escasos estudios de magnetometría (Jiménez-Pintor, et al., 2002).

La actividad de las fallas constituye uno de los principales peligros de origen geológico. Las fallas están preferentemente localizadas en los bordes nororiental, oriental y suroccidental de la Cuenca de Granada. La actividad de estas fallas se ha analizado y se continúa su análisis mediante redes geodésicas desplegadas por la Universidad de Jaén en colaboración con otras instituciones. Los resultados obtenidos y el análisis multidisciplinar han permitido caracterizar hasta el momento su actividad y mejorar su conocimiento (Galindo-Zaldivar, et al., 2015; Gil, et al., 2002, 2017). Las fallas del sector nororiental han sido las responsables de la reciente serie sísmica de la Vega de Granada (Madarieta-Txurruka, et al., 2021). La Falla de Zafarraya, localizada al SO de la Cuenca de Granada, produjo el mayor terremoto catastrófico que ha sufrido Andalucía, con una magnitud estimada de M , 6.7 y produjo importantes daños en toda la región (Reicherter, et al., 2003). En la zona de la Falla de Zafarraya se instaló una red geodésica (Galindo-Zaldivar, et al., 2003), como parte de la red general que cubre la Cuenca de Granada (Gil, et al., 2002) para caracterizar su deformación. La baja velocidad de estas fallas hace que sean necesarios grandes periodos de observación para establecer su movimiento. Actualmente esta red ya tiene resultados fiables, por lo que su interpretación requiere de un estudio multidisciplinar de la zona de falla en el que se combinen técnicas geofísicas, geológicas y geodésicas. La tomografía eléctrica es una técnica geofísica que permite la localización de superficies de discontinuidad y contactos litológicos. Son muy notables los trabajos en los que se han aplicado estas técnicas para localizar fallas activas en sedimentos cuaternarios recientes (Ahmad, et al., 2020; Fansong, et al., 2020).

2. Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es conocer la estructura y deformaciones recientes de la Falla de Zafarraya, que separa Sierra Tejeda de la cuenca de Zafarraya, en el marco de la interacción de los grandes pliegues y juegos de fallas en el sector central de la Cordillera Bética que determinan la sismicidad y la peligrosidad geológica. Para alcanzar este objetivo se combinan la adquisición e interpretación de nuevos datos geofísicos de tomografía eléctrica junto con observaciones geológicas de campo. Dada la complejidad tectónica de la región, se interpreta el conjunto en el marco de los resultados geodésicos que se han obtenido en la actualidad.

El trabajo pretende los siguientes objetivos específicos:

- Adquirir, procesar e interpretar los datos de resistividad de perfiles de tomografía eléctrica con el fin de caracterizar los perfiles eléctrico-resistivos de la Falla de Zafarraya.
- Interpretación geológica de los perfiles eléctrico-resistivos adquiridos con el fin de comprobar la eficacia de la Tomografía Eléctrica para el estudio de fallas activas.
- Integrar los resultados de la campaña geofísicas con la información geológica y geodésica para determinar la evolución estructural del área de estudio.

El trabajo comprende las siguientes etapas, que se han desarrollado de forma secuencial:

- Revisión detallada de los antecedentes. Se han recopilado y estudiado todos los trabajos geodésicos, geológicos y geofísicos realizados hasta el momento en materiales neógenos y cuaternarios en la parte sudoccidental de la Cuenca de Granada.
- Reconocimiento geológico de campo. A partir de la revisión de los antecedentes se han seleccionado pequeños sectores de interés en los que se han observado las deformaciones tectónicas recientes.
- Adquisición y tratamiento de datos geofísicos. Se han realizado perfiles de tomografía eléctrica. Los datos obtenidos en campo han sido posteriormente tratados e interpretados para establecer modelos de distribución de resistividades, polarizabilidad, y cuerpos geológicos responsables de las anomalías.
- Interpretación conjunta de los datos geodésicos, geofísicos de campo y geológicos. El análisis de diferentes tipos de datos ha permitido, en primer lugar, determinar la geometría en profundidad de la cuenca y de la zona de falla. Los datos geofísicos de tomografía eléctrica han contribuido a

distinguir además diferentes eventos paleosísmicos. Finalmente, los datos geodésicos determinan la actividad de cada segmento de la zona de falla y su variabilidad.

3. Localización y contexto del área de estudio

3.1. Ubicación geográfica

La Falla de Zafarraya (ZF), situada en los límites de las provincias de Málaga y Granada (Fig. 2), limita el Polje de Zafarraya en su borde sur. Hacia el sudeste de la ZF se localiza Sierra Tejeda. Esta zona está localizada en la parte más sudoccidental de la Cuenca de Granada.

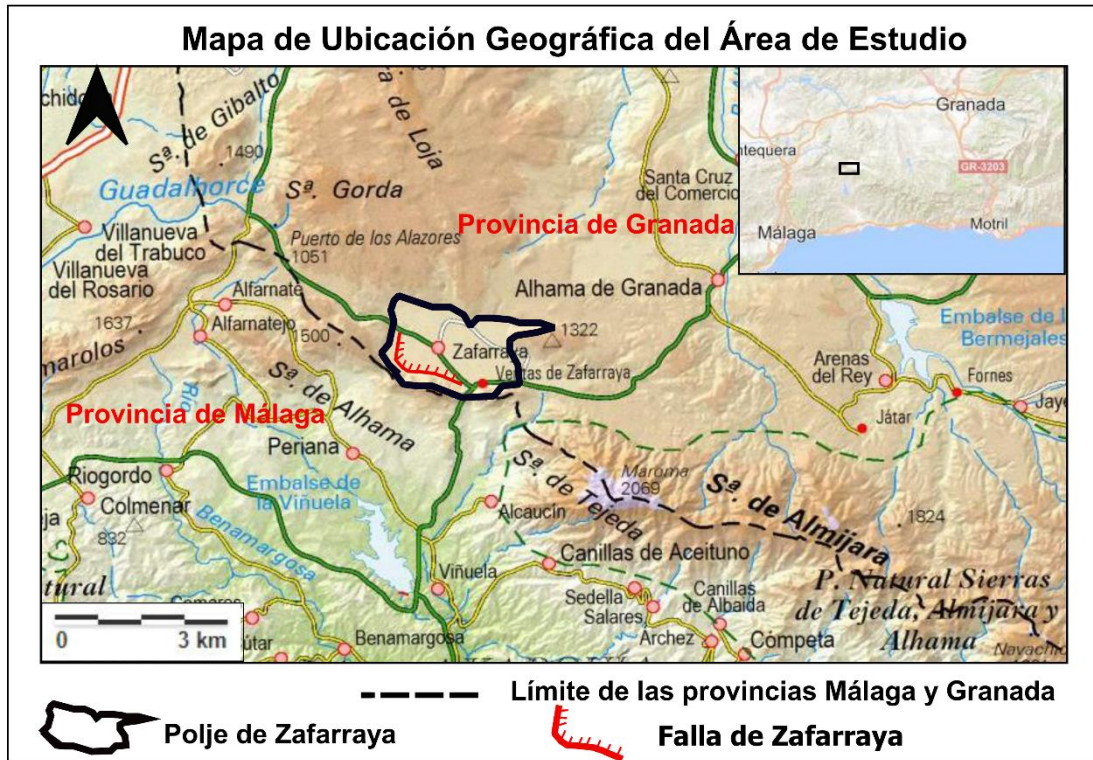


Figura 2: Mapa de ubicación geográfica del área de estudio (modificado del GEBCO Compilation Group 2021 GEBCO 2021 Grid).

3.2 Contexto geológico

Las Cordilleras Béticas se dividen en dos grandes zonas geológicas: la Externa y la Interna (Zona Bética que pertenece al Dominio de Alborán). Además, existe otro dominio, las Unidades del Campo de Gibraltar, también denominadas Unidades de los Flyschs, ampliamente representado en la parte occidental de la Cordillera y en algunas zonas del contacto entre Zona Externa e Interna. Finalmente, sobre estos dominios se sitúan cuencas sedimentarias rellenas por materiales de edad comprendida entre el Mioceno y la actualidad (Sanz de Galdeano, et al., 2007) (Fig. 3).

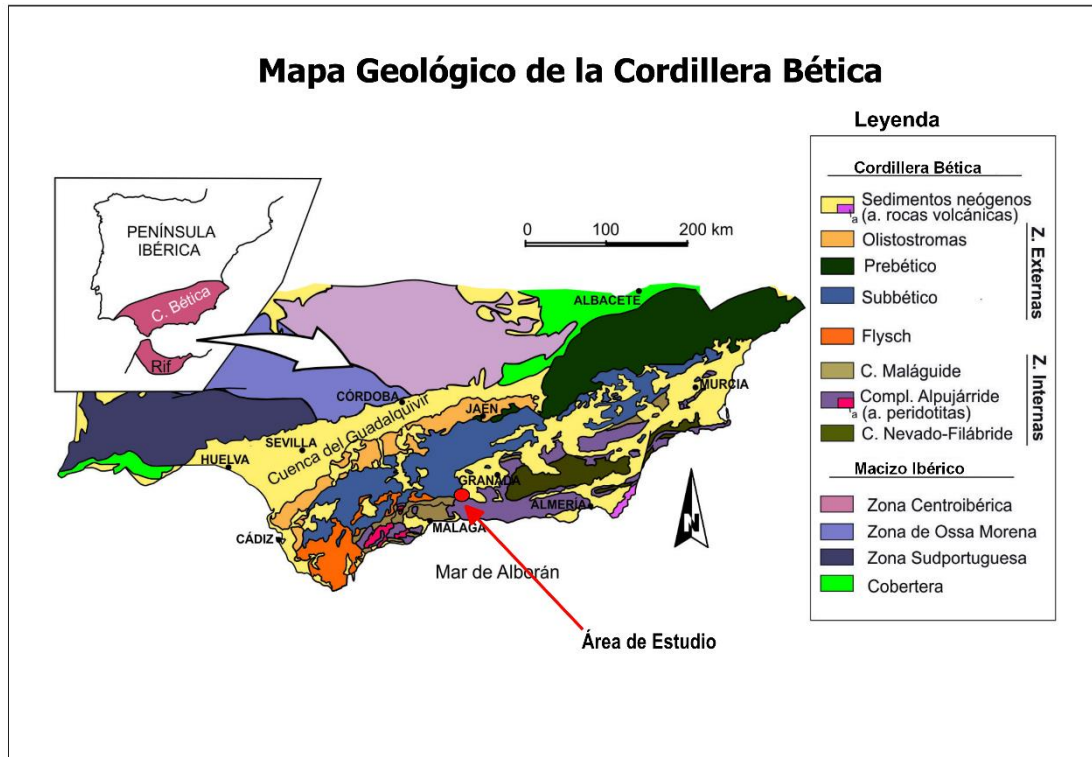


Figura 3: Mapa Geológico simplificado de la Cordillera Bética.

La Zona Externa constituía la cobertura mesozoica y terciaria de la parte S y SE del macizo paleozoico Ibérico. Se subdivide en Prebético, situado cerca del macizo paleozoico, y Subbético. En particular, el área de estudio (Fig. 4) incluye el Subbético. Las formaciones geológicas del Subbético tienen casi 1000 m de calizas blancas liásicas y dolomías grises, seguidas de aproximadamente 500 m de calizas margosas y calizas de edad Jurásico Medio a Cretácico Superior. El Polje de Zafarraya, está relleno de depósitos aluviales y coluviales del Cuaternario y bajo estos materiales se localizan subyacentes las calcarenitas tortonienses que han sido perforadas. La zona de hundimiento dentro del Polje es asimétrica (Ollero y García, 1984), la pequeña cuenca está unida al sur por la Falla de Ventas de Zafarraya y forma un semi-graben.

La Zona Interna está formada por tres complejos superpuestos, de abajo hacia arriba encontramos el Nevado-Filábride, el Alpujárride y el Maláguide. En la zona estudiada afloran los complejos Alpujárride y Maláguide (Fig. 4). El Complejo Maláguide está situado al SO de la zona de estudio y corresponde con esquistos paleozoicos, filitas e incluso lutitas. El Alpujárride forma la Sierra Tejeda, y sus alrededores, sus secuencias litológicas están formadas principalmente por esquistos (edades Paleozoico a Triásico inferior) en la base, y por calizas y mármoles dolomíticos triásicos de más de 700 m de espesor. (Galindo-Zaldívar, et al., 2004).

Mapa Geológico del Área de Estudio

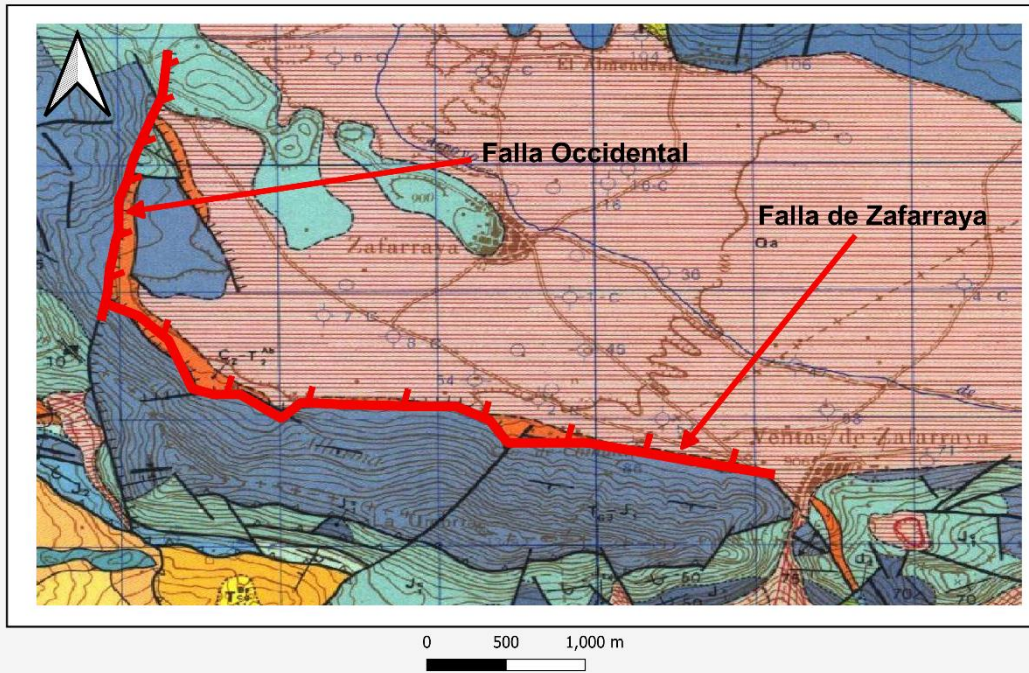


Figura 4: Mapa geológico del área de estudio (Modificado de Elorza, et al.,1978)

Leyenda

UNIDAD DE ZAFARRAYA			
TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO
			PERMICO
			CARBONIFERO
			DEVONICO
			SILURICO

UNIDADES DE LAS ALBERQUILLAS, SIERRA TEJADA Y DE LA HERRADURA SSTR. (MANTO DE LA HERRADURA) ?			
TRIAS.			
PALEOZ.			

TER.	PAL.	EOC.	
CRETAC.			LUTECIENSE
		SUPERIOR	
	INFER.	NEOCOMIENSE	
JURASICO	MALM.	TITHONICO	
	LIAS	DOGGER	
		TOARCIENSE	
	TRIAS.	SUPERIOR	

COMPLEJO MALAGUIDE			
TERCIAR.	PALEOCENO	EOCENO	
			LUTECIENSE
			YPRESIENSE
			JURASICO
			TRIASICO

Figura 5: Leyenda del Mapa Geológico del área de estudio. Mapa geológico del área de estudio (Modificado de (Elorza, et al.,1978)

La Falla de Zafarraya se localiza en la parte central de las Cordilleras Béticas. Es una falla normal cuya longitud total, de acuerdo a observaciones de

campo, supera los 15 km, corta hacia el este el contacto entre las Zonas Externas y las Zonas Internas y se extiende hacia el borde sur de la cuenca de Granada. A lo largo de su trazado, la orientación de la falla varía entre E-O, al Sur de Zafarraya, y NO-SE, en la terminación occidental. El plano de falla buza 60° al N y muestra varios juegos de estrías que indican que es una falla normal (Fig. 6). El salto total es de varios centenares de metros y desarrolla, en su bloque hundido, una cuenca endorreica (Polje de Zafarraya) colmatada por sedimentos de edades comprendidas entre el Tortoniense y la actualidad. Esta falla muestra evidencias de actividad durante el terremoto de Andalucía, que ocurrió el día de Navidad de 1884 con una magnitud estimada cercana a 6,7 (Muñoz y Udías, 1981; Reicherter, et al., 2003; Galindo-Zaldívar, et al., 2004).

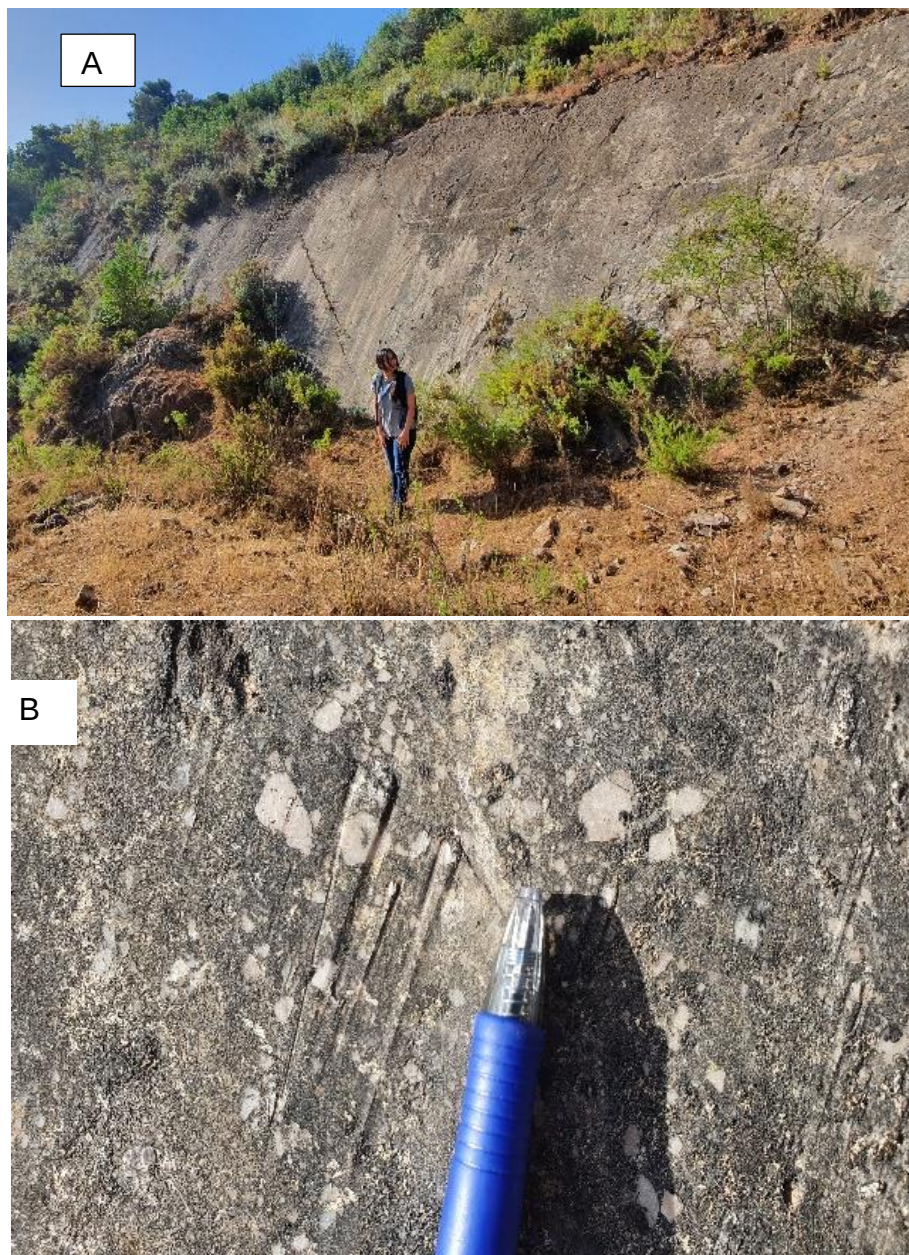


Figura 6: Falla de Zafarraya. A- Evidencia de campo de la superficie de falla de Zafarraya. B- Juegos de estrías normales dexas sobre la superficie de falla.

3.3 Contexto sísmológico y red de GPS de la Falla de Ventas de Zafarraya.

Los esfuerzos actuales en la zona de estudio y la cuenca de Granada fueron determinados por (Galindo-Zaldívar, et al., 1993 y 1999) a partir de soluciones de mecanismo focal y se caracterizan por una extensión NE-SO. Sin embargo, de acuerdo a estos estudios, el campo de esfuerzo en el área es heterogéneo como se documenta por permutaciones de los ejes de tensión. Esencialmente se observan extensión radial, extensión NE-SO y compresión subhorizontal NO-SE; esta última es paralela a la dirección de acortamiento activo bajo el campo de esfuerzos tectónico regional (Buforn, et al., 1988; DeMets, et al., 1990; Galindo-Zaldívar, et al., 1999).

La intersección de fallas normales ortogonales u oblicuas y la alta deformación frágil de la corteza, derivadas de la evolución neógeno-cuaternaria de la Cordillera Bética caracterizan la cuenca de Granada. La sismicidad en esta zona está relacionada con la actividad de estas fallas normales de alto y bajo ángulo (Madarieta-Txurruka, et al., 2021; Rodríguez-Fernández, et al., 2012). Esta depresión, desarrollada desde el Mioceno medio, y sus áreas circundantes, se caracterizan por una actividad sísmica somera de magnitudes bajas a moderadas (Galindo-Zaldívar, et al., 1999; Morales, et al., 1997) donde es frecuente la ocurrencia de micro-terremotos (M_w 3.0), series y enjambres sísmicos (Vidal, 1986; Posadas, et al. 1993; Serrano, 1999; Saccorotti, et al., 2001, Madarieta-Txurruka, et al., 2022) como se muestra en la figura 7. La profundidad de la actividad sísmica varía entre 5 y 15 km hasta un máximo de 20 km e incluye terremotos con $M_w \approx 5$ o más. Las secuencias sísmicas han sido documentadas a lo largo de la historia reciente, la última ocurrió durante el año 2021. Esta secuencia fue perceptible en el área metropolitana de la ciudad de Granada, alcanzando hasta un sismo de mbLg 4.6 (Informe IGN, 2021).

El último evento moderado ocurrió al sur de la depresión de Granada en 1984. La falla de Zafarraya, estuvo activa durante el Terremoto de Andalucía de 1884 con magnitud estimada 6,7 (Morales, et al., 1996).

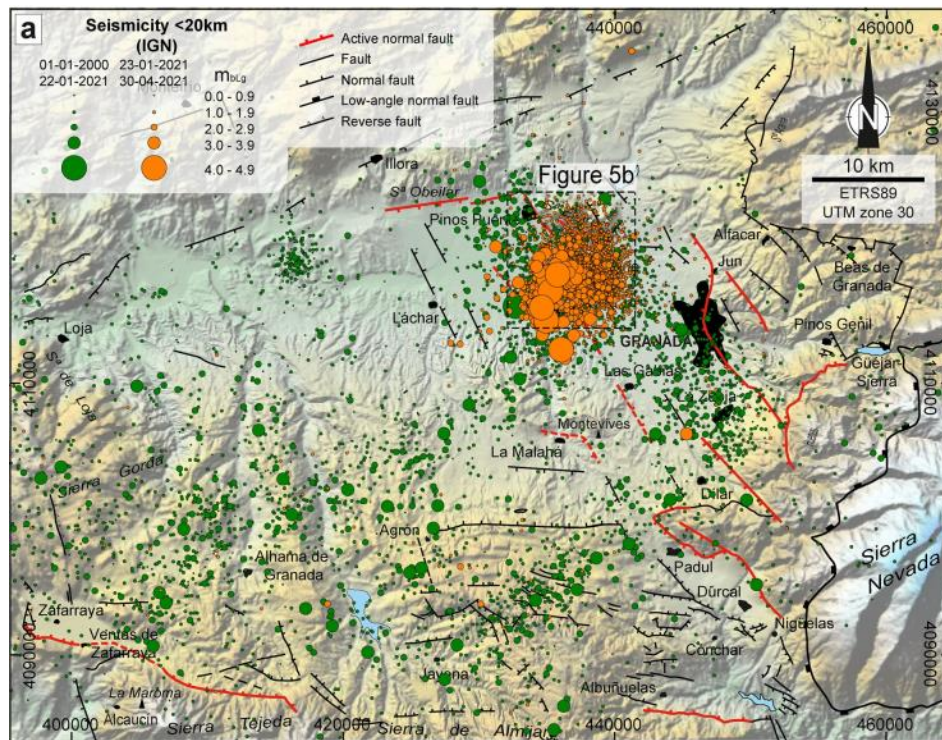


Figura 7: Secuencia sísmica Granada 2021. (a) Mapa topográfico de la Cuenca de Granada con sismicidad proporcionado por el IGN español (SIS, 2022). En naranja, la sismicidad relacionada con la secuencia sísmica de 2021 (Tomado de Madarieta-Txurruka, et al., 2022).

Red de GPS

Con el fin de cuantificar la deformación que se está produciendo actualmente en la Falla normal de Zafarraya y la antiforma de Sierra Tejeda, en el año 2003 fue instalada la primera red GPS no permanente en dicha zona que fue medida a partir de 2004. Esta red GPS está compuesta por una red local en el área de Zafarraya y una red regional que se extiende hasta la línea de costa, tal y como se puede apreciar en el mapa de la figura 8.

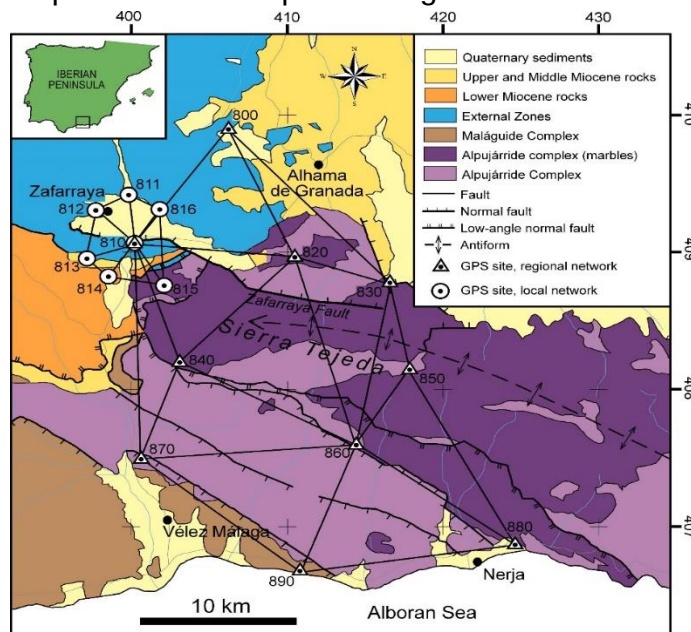


Figura 8: Red GPS en la Falla de Zafarraya y la antiforma de Sierra Tejeda (tomado de Borque, et al., 2005).

La red regional, formada por dieciséis pilares de hormigón armado anclados a roca (Borque, et al., 2005), permite monitorear el movimiento local a lo largo de la falla de Zafarraya y el desarrollo regional de la Antiforme de Sierra Tejeda. Con el fin de asegurar que las antenas se colocan exactamente en la misma posición en diferentes reocupaciones, los pilares llevan incorporado un sistema de centrado forzado. La red local está compuesta por 7 puntos localizados en la zona de falla. Los resultados del monitoreo de esta red se representan en el mapa de la figura 9 y en la Tabla 1 se muestran los datos con las tasas de desplazamientos registrados. Los desplazamientos, (representados por las flechas azules) indican un acortamiento en la zona de la falla de Zafarraya intensificándose hacia el oeste en sentido contrario al movimiento esperado que tendría la falla, siendo esta de tipo normal.

Pilar	Coordenadas		Velocidad		Incertidumbres		Velocidad residual (Iberia)		Velocidad residual (Pilar 810)	
	Long. (°E)	Lat. (°N)	ast	orth	ast	orth	ast	orth	ast	orth
10	-4.120	36.956	17.6	16.6	0.3	0.4	2.3	.1		
11	-4.125	36.987	8.0	6.1	0.3	0.3	2	0.4	.3	0.5
12	-4.148	36.977	7.3	5.9	0.4	0.5	2.6	0.6	0.3	0.7
13	-4.155	36.946	8.0	7.7	0.4	0.6	1.9	.2	.4	.1
14	-4.139	36.934	7.7	7.3	0.3	0.6	2.2	.8	.1	.7
15	-4.099	36.929	7.3	6.7	0.3	0.4	2.7	.1	0.4	
16	-4.104	36.977	8.0	6.9	0.4	0.4	1.9	.3	.4	.2

Tabla 1: Tasas de desplazamiento de la estación GNSS. Velocidades absolutas este y norte, incertidumbres (mm año⁻¹) y velocidades residuales respecto al marco de referencia fijo de Iberia y respecto al pilar estable 810.

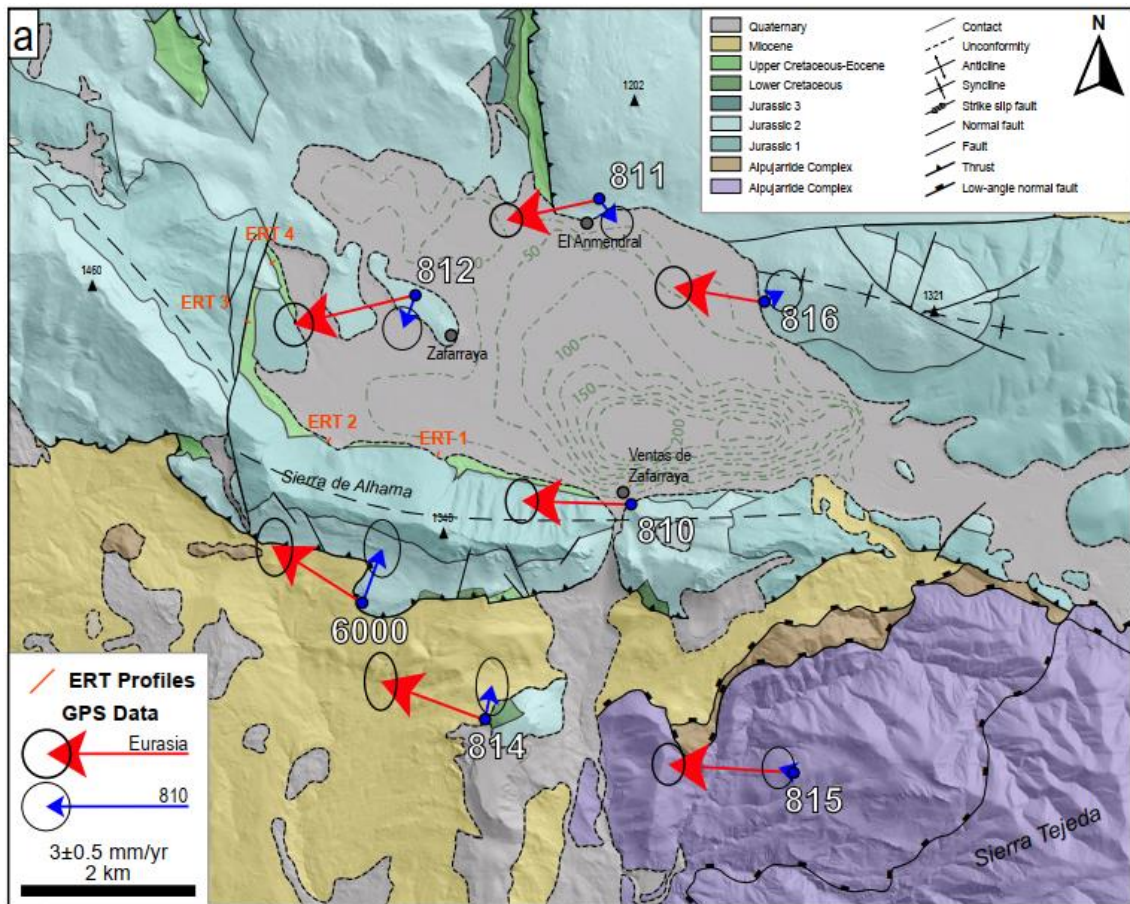


Figura 9: Resultados de la red geodésica local (Tomado de Madarieta-Txurruka, et. al., artículo entregado).

4. Metodología

4.1 Tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica estudia el comportamiento de los materiales ante el paso de la corriente eléctrica. Es la técnica geofísica que determina el parámetro físico de la resistividad eléctrica y la cargabilidad, mediante polarización inducida, con el fin de identificar diferentes estructuras o cuerpos en el subsuelo. Este método geofísico permite establecer la distribución real de la resistividad del subsuelo, introduciendo una corriente eléctrica continua en la superficie del terreno a través de dos electrodos y midiendo el voltaje en otro par de electrodos a lo largo de un perfil de medida. Al aumentar el espaciado entre electrodos se aumenta el rango de profundidad alcanzado. Las medidas obtenidas corresponden a los valores de resistividad aparente. Si se estudia además el decaimiento del paso de la corriente eléctrica, se obtienen además valores de cargabilidad aparente; una vez procesadas las medidas, se obtiene información sobre la resistividad real del subsuelo y cargabilidad, que es característica de cada tipo de material.

4.1.1. Fundamentos Teóricos de la Tomografía Eléctrica

El principio físico más importante de los métodos eléctricos es la ley de ohm, que caracteriza el paso de la corriente eléctrica por un conductor. Está definido de la siguiente manera:

$$\Delta V = I * R$$

Donde, ΔV , es la diferencia de potencial en V (voltios), I es la intensidad de la corriente en A (amperios) y R , es la resistencia en Ω (ohmios). La diferencia de potencial, ΔV , que se da entre los extremos de un conductor es proporcional a la intensidad de la corriente en circulación, I , y depende de un factor de proporcionalidad, denominado por Ohm, como resistencia eléctrica, R .

La resistencia, depende del tipo de material y de la forma del mismo. Es por ello que en prospección eléctrica se utiliza el parámetro resistividad para caracterizar los materiales.

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

Donde ρ es la resistividad en $\Omega.m$ (ohmios. metro), R es la resistencia en Ω (ohmios), A el área en m^2 (metros cuadrados) y L la longitud del material en m (metros).

4.1.2. Concepto de Resistividad y factores que la determinan

La resistividad es la propiedad que un determinado material posee para oponerse al paso de la corriente eléctrica. Midiendo dicha propiedad, al introducir corriente eléctrica en el terreno, es posible estudiar las características del subsuelo.

Existen tres tipos de conducción de la corriente eléctrica: dieléctrica, cuando está asociada a medios poco conductores o aislantes; electrónica, si son materiales con electrones libres como metales; y electrolítica cuando depende del movimiento de los iones presentes en un fluido en el subsuelo. El último modo de conducción mencionado es el de mayor interés para estudios geofísicos, permitiendo asociar rangos de resistividad aparente a diferentes rocas y materiales en el terreno como se muestra en la figura 10. Entre los factores que pueden afectar la resistividad se pueden mencionar (Whortington, 1976) el grado de saturación del terreno, la temperatura, la porosidad y la forma de los poros, la salinidad del fluido, el tipo de roca, los procesos geológicos que afectan a los materiales, la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

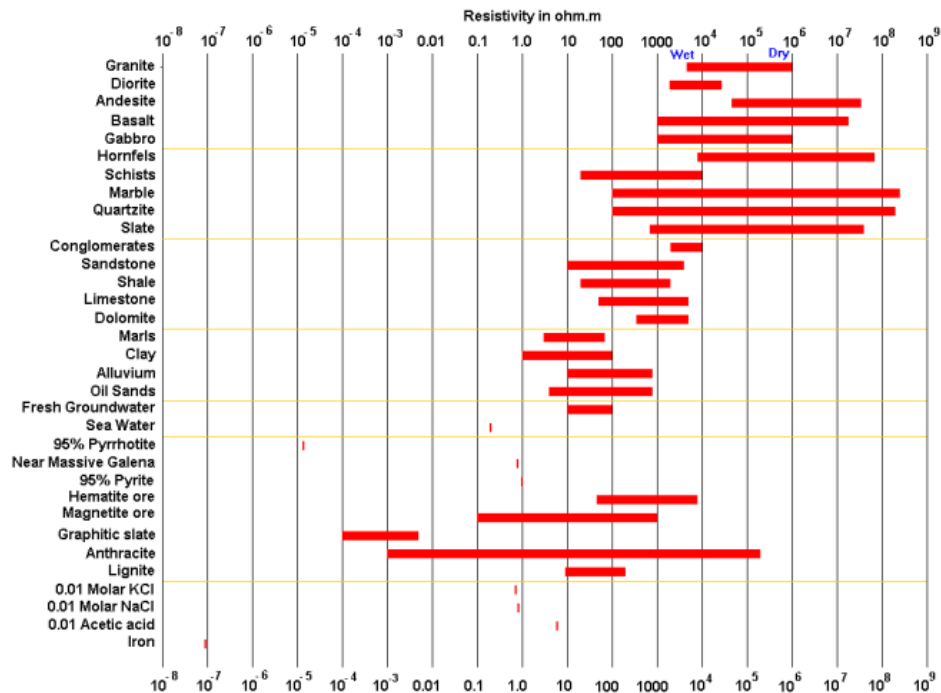


Figura 10: La resistividad de rocas, suelos y minerales (Loke, 2016).

4.1.3. Configuración de Electrodo y adquisición de datos.

La tomografía eléctrica requiere la obtención de un número muy elevado de datos, con un pequeño espaciado entre medidas, y también que las medidas se realicen involucrando de forma progresiva varios rangos de profundidad. En cada dato, el instrumental recoge información sobre las variaciones verticales y horizontales de la resistividad del subsuelo. El resultado final, después del procesado de los datos, es una imagen en 2D distancia-profundidad que muestra la resistividad real del subsuelo, y que puede ser interpretado en términos geológicos, de forma similar a un corte geológico (Lugo, et al., 2008).

La tomografía eléctrica se basa en una configuración de 4 electrodos bajo el mismo funcionamiento teórico que el resto de métodos eléctricos. Por los electrodos A y B (conectados a un miliamperímetro) se introduce un campo de corriente continua de una intensidad determinada en el subsuelo (Fig. 11), mientras que los otros dos (M, N) conectados a un milivoltímetro nos permitirán medir la diferencia de potencial entre ambos puntos.

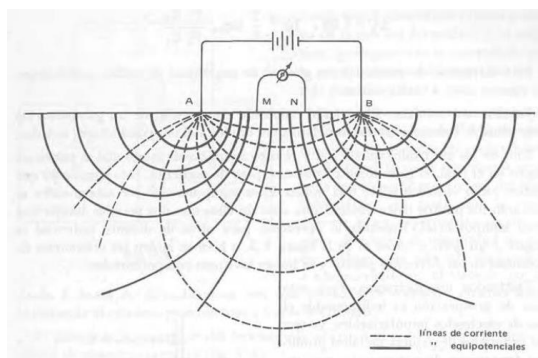


Figura 11: Esquema de funcionamiento del método de prospección eléctrica en corriente continua.. Dispositivo Schlumberger simétrico. M, N electrodos de potencial, y A, B electrodos de corriente (Figuerola, 1978).

En la actualidad, todos los procedimientos de adquisición de datos son automatizados, lo cual hace que esta técnica sea muy ventajosa con respecto a los métodos eléctricos convencionales (Loke, et al., 2013). El dispositivo de medida, una vez instalados los electrodos con el espaciado elegido, se encargará de realizar todas las combinaciones de 4 electrodos posibles que satisfagan la secuencia de medidas previamente establecidas por el investigador.

Conocidas la intensidad de corriente y la diferencia de potencial, podemos calcular el valor de la resistividad en el punto medio de la configuración electródica establecida a una profundidad determinada. La disposición de los 4 electrodos se modifica automáticamente y de esta forma se irá obteniendo la variación de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente.

Las configuraciones que comúnmente se utilizan para la modelación de resistividad son Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo (Fig. 12). Las dos primeras poseen una mayor sensibilidad a detectar los cambios verticales en la resistividad, y son más apropiadas para estudiar estructuras horizontales. En cambio, dipolo-dipolo es más sensible a los cambios horizontales, permitiendo detectar con mayor facilidad la presencia de estructuras verticales (Dahlin y Zhou, 2004; Locke, 2004).

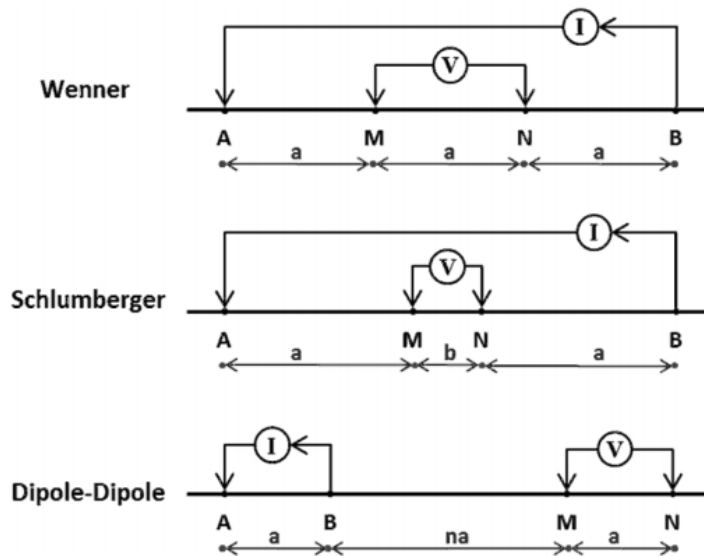


Figura 12: Configuraciones de electrodos: Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo. A y B son los electrodos de corriente mientras que M y N los de potencial (Garofalo, 2014).

La elección de la mejor configuración electródica para un estudio de campo depende del tipo de estructura que se quiere estudiar, la sensibilidad del equipo y el nivel de ruido de fondo.

Entre las características a tener en cuenta para elegir una determinada configuración electródica están:

- La profundidad de la investigación
- la sensibilidad de la configuración electródica a los cambios verticales y horizontales en la resistividad del subsuelo
- la cobertura horizontal de datos
- la intensidad de la señal

Los electrodos se clavan en el terreno lo suficiente como para garantizar un buen contacto electrodo-suelo, y luego se conectan al cable por medio de los conectores (Fig. 13).



Figura 13: Modo de conexión y empleo de los electrodos para la adquisición de datos de resistividad de subsuelo.

En la investigación de la Falla de Zafarraya se utilizó una combinación de las configuraciones Wenner y Schlumberger (ABEM, 2006), el protocolo “4 channel multiple gradient” (Loke, 2012), que se divide en dos ciclos con características diferentes. La toma de datos se ha realiza en tres fases usando diferentes bobinas de cable (Fig. 14) que tienen 21 tomas, 11 rojas e interncaladas 10 azules. Se mide en cada posición dos ciclos sucesivos. el ciclo largo (GRAD4LX8) consiste en realizar medidas con la mitad de los electrodos (tomas rojas) de todas las bobinas, con la finalidad de obtener información en profundidad, a cambio de obtener una densidad menor de datos. El ciclo corto (GRAD4S8) usa todos los electrodos (tomas rojas y azules) pero solo de las bobinas centrales, por lo que consigue mayor resolución en las zonas más someras.

El dipsoitivo de medida se colocan en las 3 posiciones posibles de conexión de cables, con el fin de aumentar el área estudiada. El primer paso (A) solo se hace uso de las primeras tres bobinas de cable. Con esta configuración la unidad central se coloca entre los cables 2 y 3. En el segundo paso (B) se hace uso de las cuatro bobinas de cable y la unidad central se coloca entre los cables 2 y 3. En el último paso (C) se lleva a cabo el mismo proceso que en el primer paso, pero se hace uso de los cables 1, 2 y 3 y la unidad central se coloca ente los cables 2 y 3.

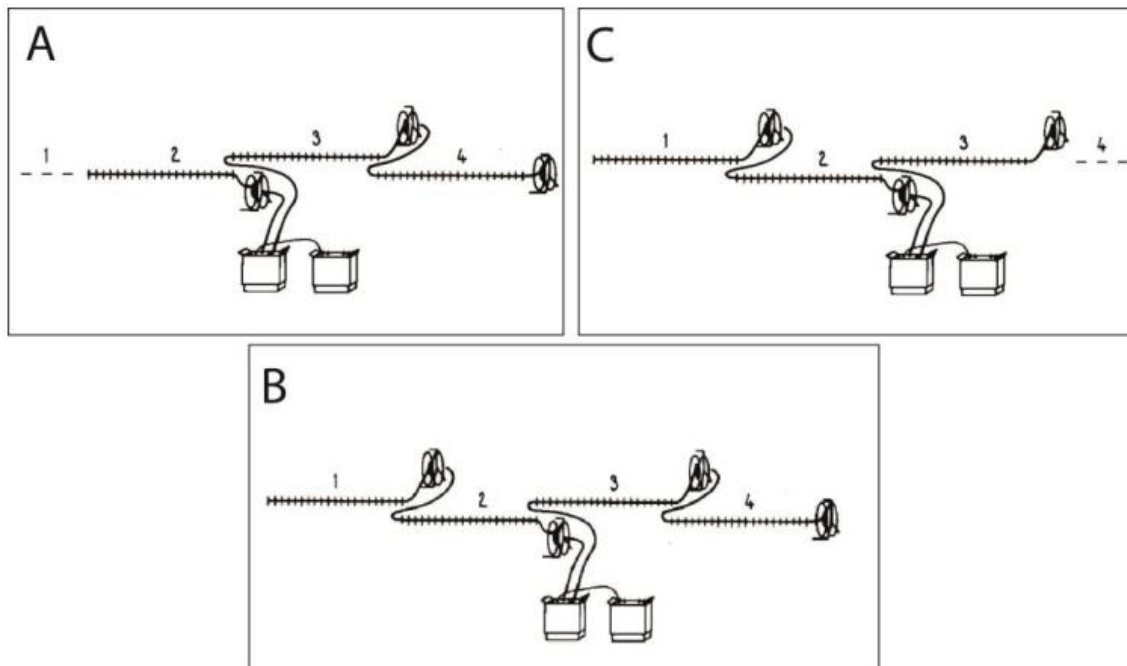


Figura 14: A- Primera fase de la toma de datos. La unidad central se coloca entre el segundo y tercer cable. B- Segunda fase de la toma de datos. La unidad central se coloca entre el segundo y tercer cable. C- Tercera fase de la toma de datos. La unidad central s se coloca entre el segundo y tercer cable. (Editado de ABEM, 2006).

4.1.4. Equipo de Medida y Procesado

El equipo utilizado para la realización de los perfiles de tomografía eléctrica ha sido el Abem Terrameter SAS 4000 (Fig. 15), perteneciente a la Universidad de Granada. Tiene cuatro canales de entrada que facilitan y aceleran la toma de medidas, resolución de 1 μV para 0.5 s de tiempo de integración, tres rangos de medida automática de $\pm 250\text{mV}$, $\pm 10\text{V}$ y $\pm 400\text{V}$ y obtiene precisiones mayores de 1% en todo el rango de temperaturas.

Dispone de una unidad central formada por una microcomputadora con memoria interna de hasta un millón de puntos de medida, una caja de conexiones y una batería de 12V para alimentar el equipo con los respectivos cables de conexión. Se encarga de ejecutar la secuencia de medidas predeterminada, verificar el buen estado de las conexiones, así como almacenar digitalmente los resultados obtenidos.

El equipo lo completan 81 electrodos de acero inoxidable, 4 bobinas de cable de hasta 100m con conexiones cada 5 m a las que se conectan los electrodos para que les llegue la corriente transmitida por el equipo y se puedan registrar las diferencias de potencial entre electrodos, 84 conectores para conectar los electrodos al cable (en los puntos de terminación y de inicio de cable se realizan dos conexiones) y otros 2 conectores para conectar las diferentes bobinas de cable entre sí.



Figura 15: Equipo completo Abem Terrameter SAS4000. A- microcomputadora. B- caja de conexiones. C- conectores de bobinas de cable. D- electrodos. E- Conectores de cable con electrodos. F- Batería de 12 V.

La topografía se obtiene a través del GPS diferencial (Leica Zeno) que proporciona precisiones submétricas. El GPS diferencial recibe las correcciones de la red de posicionamiento andaluza a través de la conexión a la red de

telefonía móvil (<http://www.ideandalucia.es/portal/web/portal-posicionamiento>) (Fig. 16).



Figura 16: Equipo GPS Leica Zeno empleado para obtener la posición con precisiones submétricas.

La descarga de datos se realiza con el programa SAS4000 Utilities de Abem con el que se convierten los archivos obtenidos del equipo de terminación especial (.s4K) en archivos de texto (.dat). Los datos de la topografía se introducen manualmente en los archivos de texto. El software para el procesamiento de datos que se utilizó fue RES2DINV siguiendo los siguientes pasos. Primero, se eliminan los datos erróneos para no alterar los datos reales y entorpecer la inversión matemática de los resultados. Después, se realiza la inversión matemática con el fin de transformar los valores de resistividad y cargabilidad (polarización inducida, IP) aparentes en reales. Para ello existen diferentes tipos de inversión. Para este trabajo se ha realizado una inversión de mínimos cuadrados estándar y otro robusto. Una vez obtenidos los modelos teóricos se ha comprobado que en el método estándar se obtenían resultados más claros e interpretables. En la inversión se calculan los valores de resistividad e IP reales y se calcula el error cuadrático medio RMS comparando los valores de resistividad e IP aparentes con una pseudo-sección de valores aparentes calculados a partir de la inversión. Para obtener un modelo teórico adecuado, el RMS debe estar por debajo del 10% y por ello, el programa realiza las iteraciones necesarias hasta obtener un RMS aceptable.

Una vez procesados los datos se ha utilizado una escala de color normalizada para su representación para cada zona de trabajo mediante la cual un mismo color corresponde a un mismo valor de resistividad en todos los perfiles, permitiendo que la comparación, análisis e interpretación sea más fácil y con mayor rigor.

Se procedió así mismo a realizar un análisis de la profundidad de investigación (DOI por sus siglas en inglés) de los perfiles (Oldenburg y Li, 1999). Este parámetro se obtiene realizando dos inversiones de cada uno de los perfiles en las cuales la resistividad inicial era 100 veces mayor en la segunda inversión que en la primera (Loke, 2013). El empleo de este parámetro permite delimitar la profundidad en los modelos de resistividad a partir de la cual los datos dejan de ser confiables y por lo tanto poder trazar una línea que indique donde dejan de ser representativos los valores para la interpretación de los perfiles (Marescot, et al., 2003).

5. Resultados

La falla normal de Zafarraya ha sido estudiada en investigaciones precedentes mediante análisis paleosismológico y el uso del radar de penetración terrestre (GPR) (Reicherter, et al., 2003). Los resultados de los trabajos de Tomografía Eléctrica llevados a cabo en este estudio contribuyen a las investigaciones que se desarrollan para el determinar la estructura, así como a la interpretación de la información obtenida de la red geodésica instalada en 2004 para caracterizar la deformación de la falla.

Se han realizado cinco perfiles (Fig. 17), tres de los cuales (perfil 1, perfil 2 y perfil 3) se ubicaron perpendiculares a la falla normal de Zafarraya. Otros dos perfiles (perfil 4 y perfil 5) fueron realizados hacia el NO de la falla. Los perfiles estudian el sector con más actividad registrada por la red de GPS existente. Las tomografías se han realizado con una longitud de 80 m y un espaciado de 1 m entre electrodos.



Figura 17: Mapa de localización de los perfiles de tomografía eléctrica.

Los perfiles realizados perpendiculares a la falla de Zafarraya, muestran una variación en los valores de la resistividad desde 4 ohm.m hasta 16932 ohm.m y se han obtenido datos desde los 5 m aproximadamente, hasta los 75 m de longitud de la tomografía para los tres perfiles. En los perfiles 1, 2 y 5 resalta un cuerpo con resistividades intermedias que oscilan de 143,33 ohm.m a 472,53 ohm.m. Los primeros 28 m corresponden a la zona de mayor altura topográfica y se encuentran los mayores valores de resistividad con un comportamiento homogéneo.

Las tomografías eléctricas 4 y 5 se realizaron perpendiculares a la Falla Occidental, una falla localizada en la terminación de la falla de Zafarraya hacia

el NO, ubicada al oeste del Polje de Zafarraya. Se decidió estudiar esta zona ya que en ella se registró el mayor desplazamiento por la red de GPS. Los datos registrados en el perfil 4 carecen de la información necesaria para ser interpretados, varios electrodos fallaron.

Los valores de resistividades de transición entre las zonas más resistivas y conductoras de los perfiles se podrían correlacionar con la superficie de falla, representando la discontinuidad de este tipo de estructuras en los perfiles.

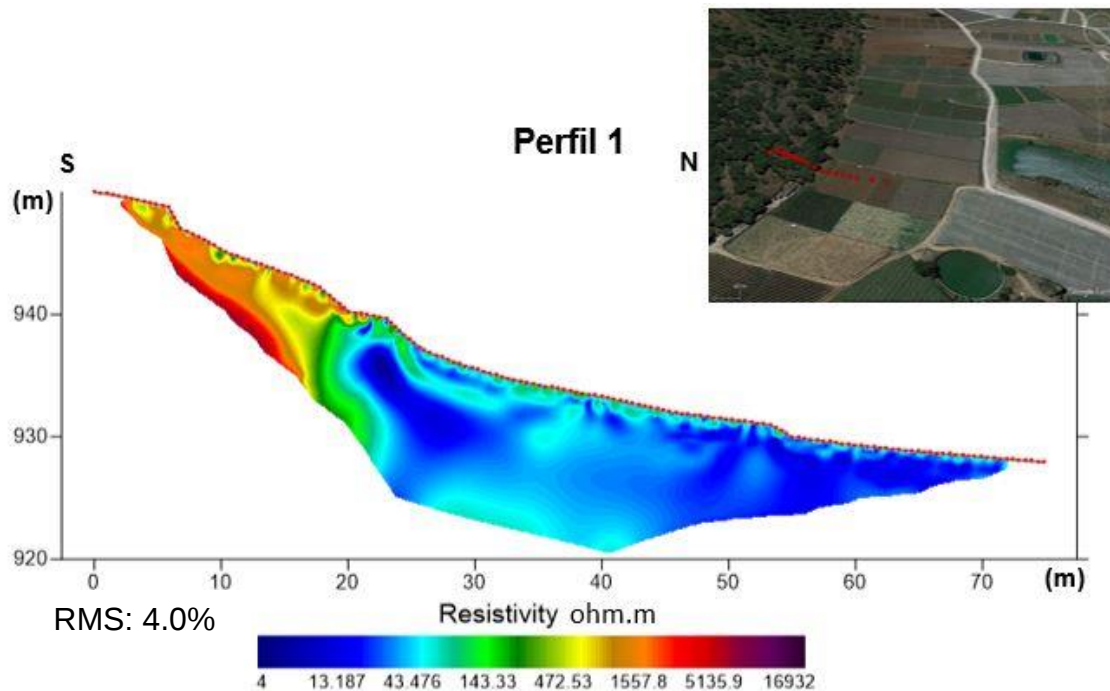


Figura 18: Modelo de resistividad con topografía Perfil 1.

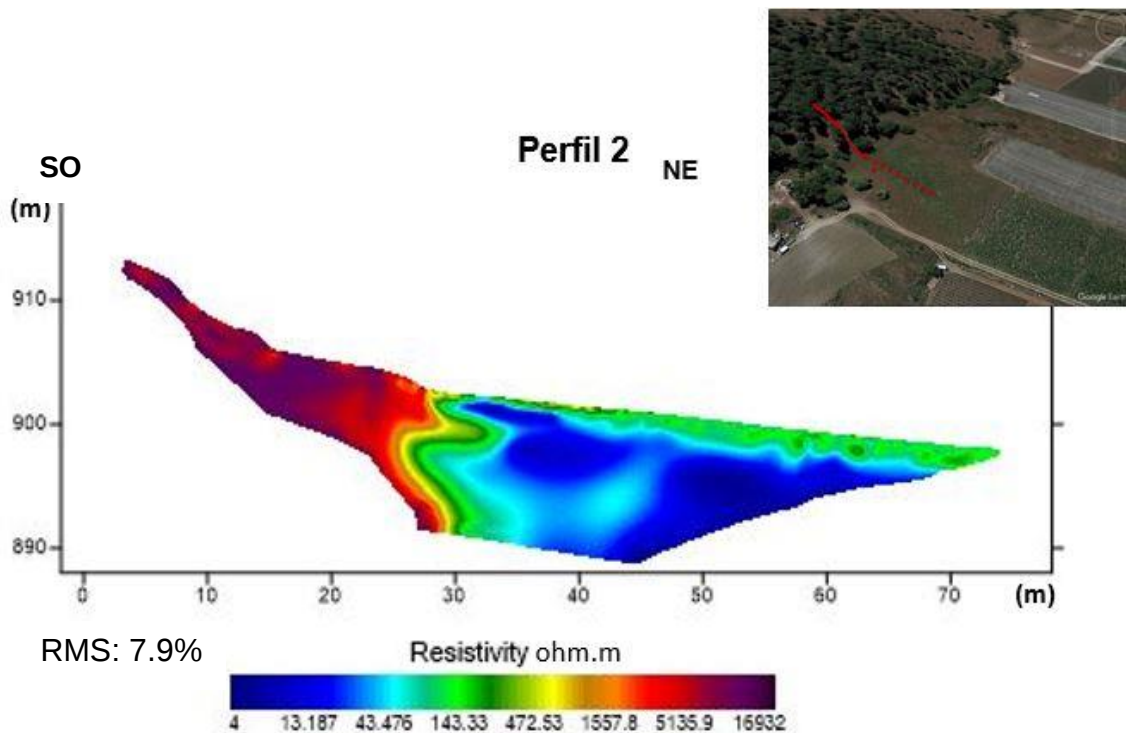


Figura 19: Modelo de resistividad con topografía Perfil 2.

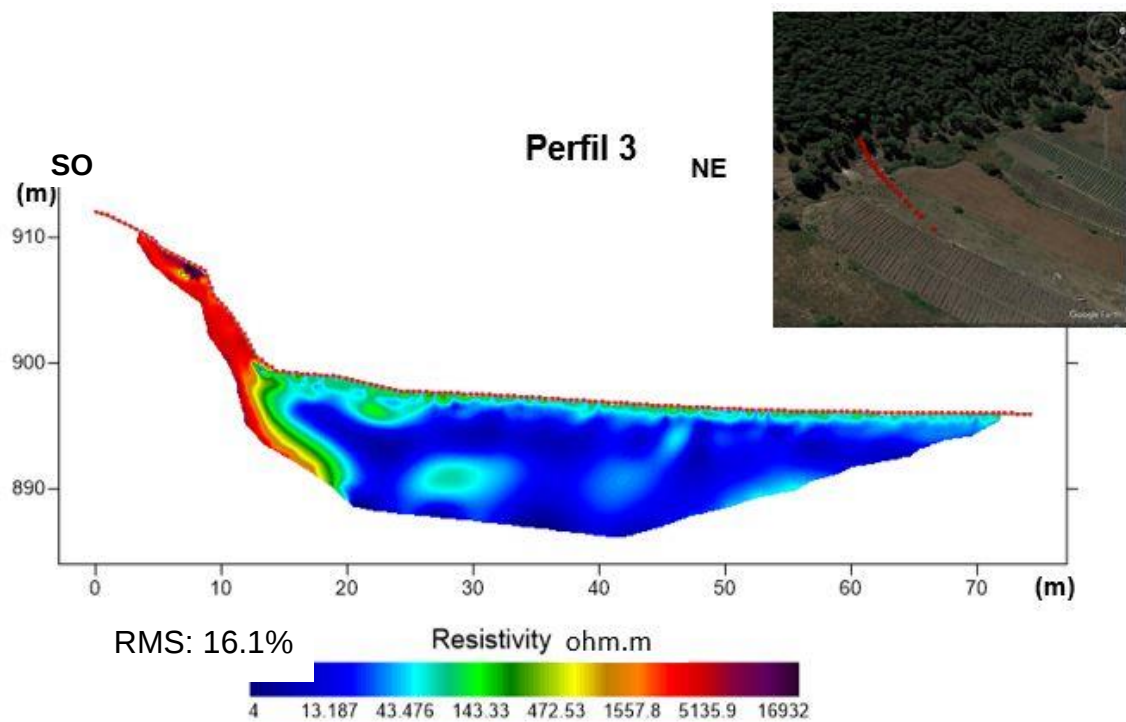


Figura 20: Modelo de resistividad con topografía Perfil 3.

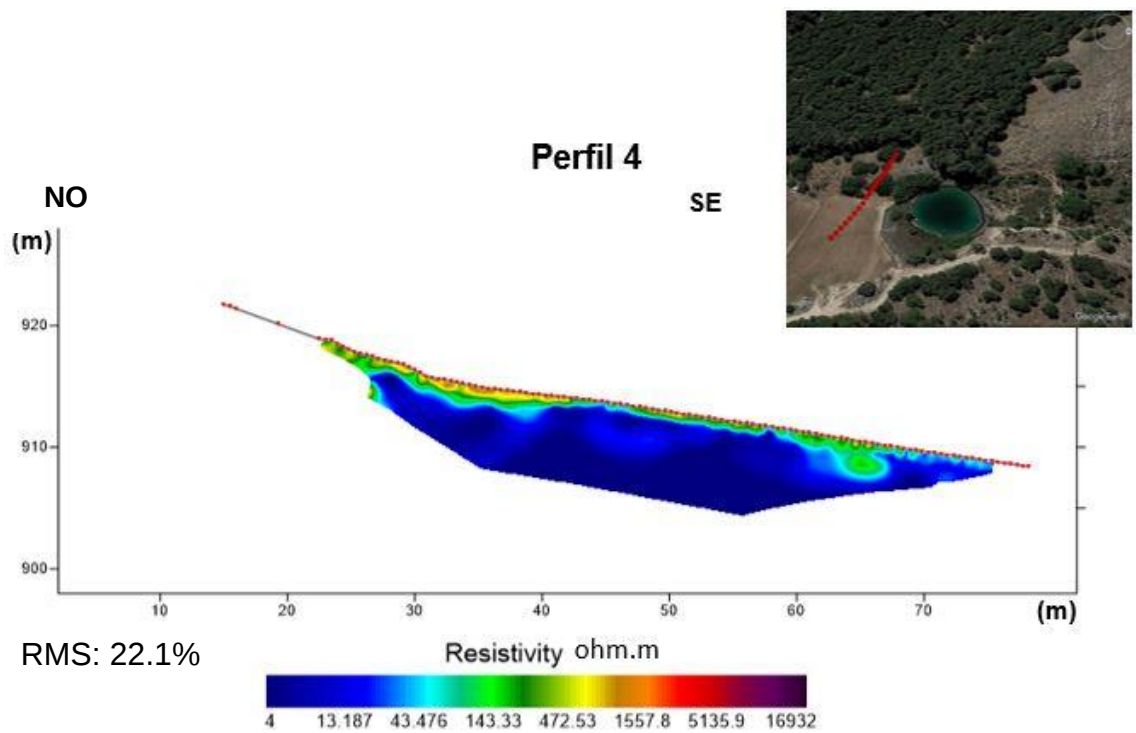


Figura 21: Modelo de resistividad con topografía Perfil 4

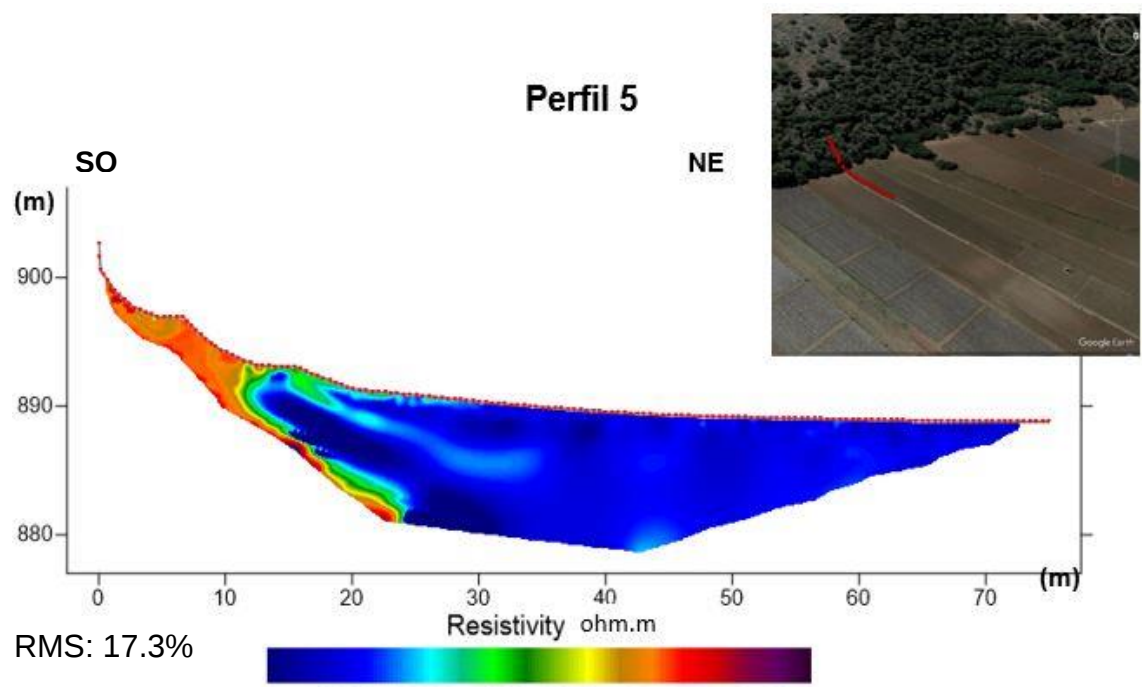


Figura 22: Modelo de resistividad con topografía Perfil 5.

6. Discusión

A partir de los resultados de resistividades de cada uno de los perfiles eléctrico-resistivos se realizaron esquemas geológicos donde se relacionan estos valores con las litologías presentes en el área de estudio permitiendo una interpretación y caracterización del comportamiento de la falla y su influencia en la modificación y creación de nuevas estructuras geológicas.

La zona de transición entre los valores de resistividades altos y bajos de los perfiles se asocian a la superficie de la falla de Zafarraya representándose en los esquemas geológicos (Fig. 23, 24, 25, 26) con un alto ángulo de buzamiento. El área de mayor altura topográfica corresponde al bloque de muro de la falla normal de Zafarraya, donde los altos valores de resistividad se asocian a las dolomías y calizas. Los valores de resistividad más bajos del perfil están asociados al relleno sedimentario del semi graben que forma el bloque de techo de la falla, principalmente relleno por limos, arcillas y arenas.

En las figuras 23, 24 y 26 la zona con resistividades intermedias y formas triangulares se asocia a la presencia de cuñas clásticas de grano grueso. Estos depósitos en forma de cuña aumentan su potencia hacia el plano de falla y son estructuras sedimentarias que se relacionan a la deformación cosísmica. Este tipo de estructura sedimentaria, junto a los grabens y semigrabens se asocian a la actividad sísmica de las fallas normales. Un estudio más detallado de estas cuñas permitiría la posibilidad de estimar las paleomagnitudes y las tasas de deslizamiento en activo de la falla de Zafarraya.

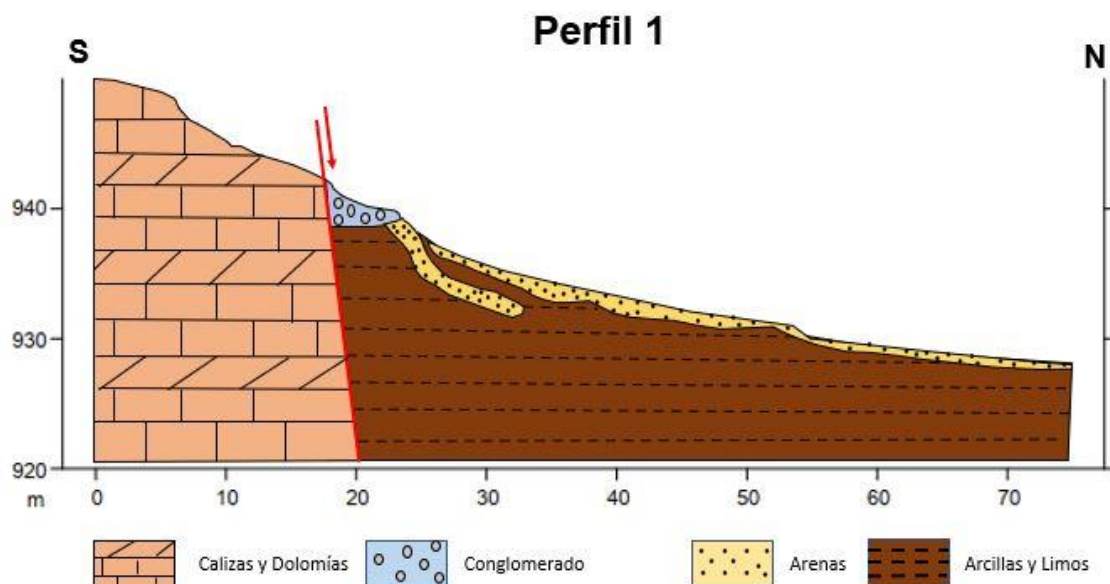


Figura 23: Esquema de interpretación geológica del perfil 1.

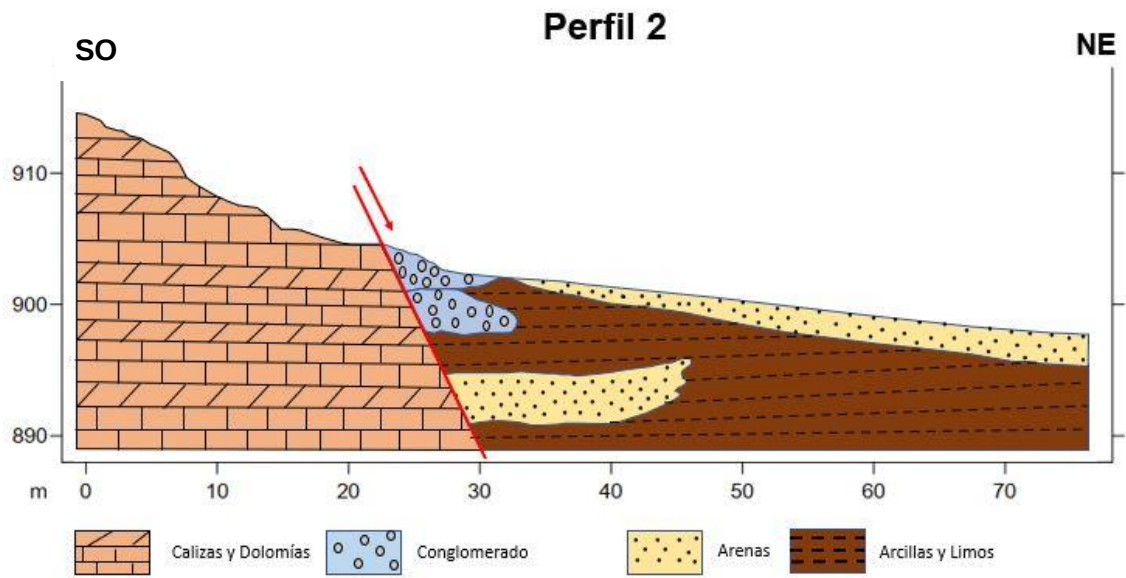


Figura 24: Esquema de interpretación geológica del perfil 2.

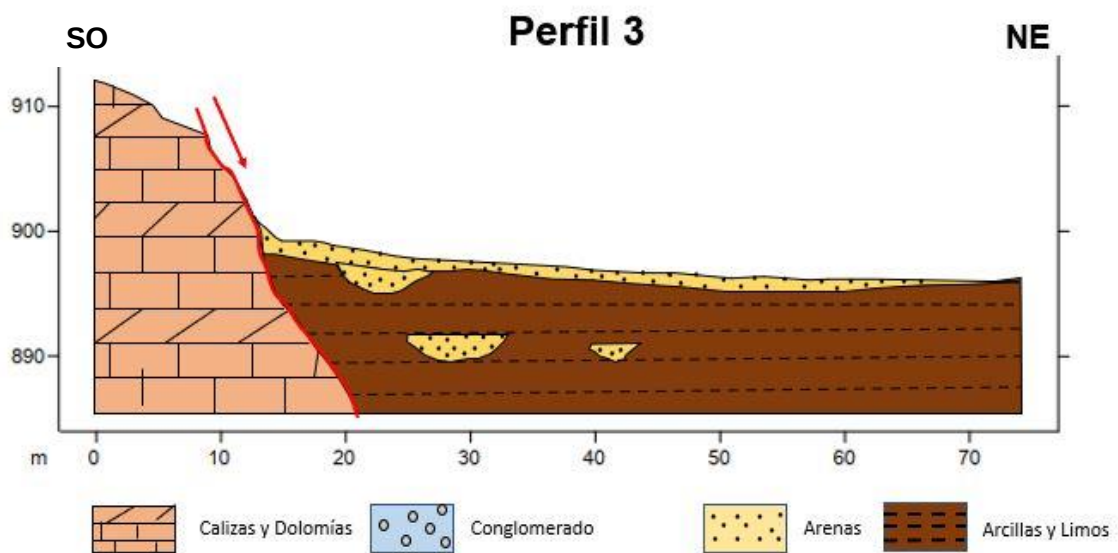


Figura 25: Esquema de interpretación geológica del perfil 3.

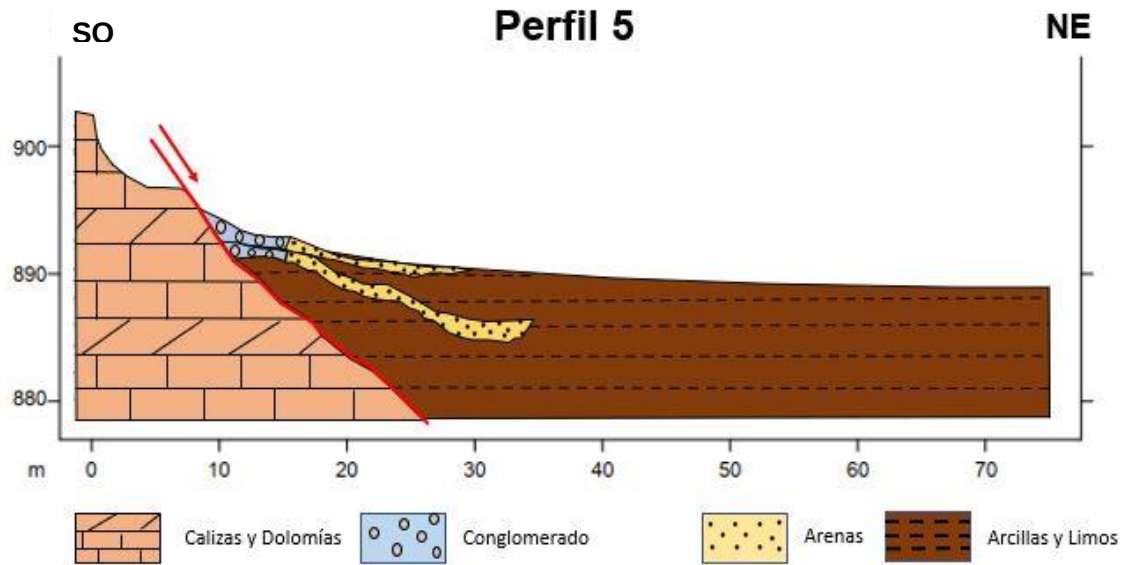


Figura 26: Esquema de interpretación geológica del perfil 5.

A partir de la caracterización de la falla de Zafarraya y su interpretación en los modelos geológicos se determina como una falla de tipo normal. Sin embargo, teniendo en cuenta los datos registrados por la red geodésica el movimiento en la zona, en principio, no se corresponde con el comportamiento que tendría este tipo de falla, por lo que la correlación de ambos resultados permite definir la evolución estructural del área de estudio como se muestra en la figura 27. En la zona predominan los esfuerzos horizontales de compresión que generaron plegamientos que posteriormente se verían afectados por fallas de tipo normal debido a colapsos o rupturas de las zonas externas de las antiformas, a partir de los cuales se pueden justificar la presencia de fallas normales. Los depósitos de cuñas aluviales serían el resultado del movimiento sísmico de la falla.

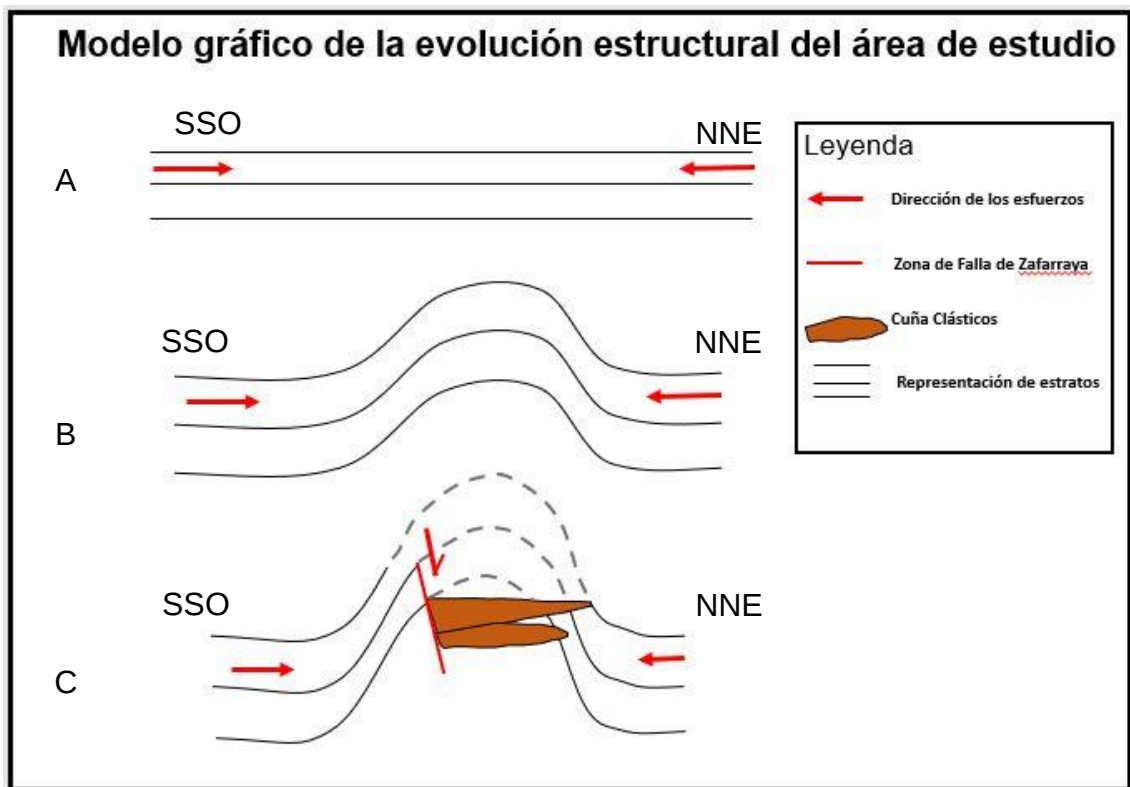


Figura 27: Modelo gráfico de la evolución estructural del área de estudio (A- Situación inicial no hay falla. Comienza el acortamiento con compresión horizontal, B- Sigue el acortamiento y se forma un gran pliegue, C- Continúa el acortamiento y se colapsa el pliegue formando la falla normal).

7. Conclusiones

La falla de Zafarraya es una falla normal de dirección ONO-ESE, buzamiento al N y longitud que supera los 15 km cuya actividad se asocia al terremoto de Andalucía (Mw, 6.7) que ocurrió en 1884. Sin embargo, la instalación y medida desde 2004 de una red geodésica de precisión de GPS demuestra que la zona más occidental está sometida a un acortamiento de dirección N-S, simultáneo a la extensión N-S de esta falla normal.

Se han estudiado varias secciones de la Falla de Zafarraya mediante tomografía eléctrica que es una técnica geofísica adecuada para el análisis de la falla y depósitos asociados, ya que separa rocas de diferente resistividad. Se realizaron un total de cinco perfiles eléctrico-resistivos mediante protocolos denominados GRAD4L y GRAD4S que se basan en una combinación de las configuraciones Wenner y Schlumberger. La longitud de los perfiles fue de 80 metros, espaciado entre electrodos de un metro y profundidades de investigación de 20 a 25 m. Los datos obtenidos son muy precisos en todos los perfiles, excepto en el perfil 4 debido a la presencia de brechas en superficie con poca matriz asociados a una de las cuñas clásticas que disminuyó el contacto entre los electrodos y el suelo.

El bloque levantado está compuesto por calizas del triásico superior al jurásico inferior muy resistivas que contrastan con el bloque hundido formado por sedimentos detríticos muy conductores. Además, la presencia de derrubios desarrollados durante la actividad de la falla y la formación de los escarpes produce cuñas clásticas de materiales detríticos gruesos y resistividad intermedia.

La falla de Zafarraya podría ser considerada una estructura de colapso de un pliegue antiformal teniendo en cuenta la interpretación de los datos de la red geodésica existente en la zona que indican acortamiento simultáneo a la actividad de esta falla normal que muestra una extensión local. Las identificaciones de cuñas clásticas mediante tomografía eléctrica confirman el carácter sísmico de la falla.

Esta metodología desarrollada integra datos geofísicos, geológicos y geodésicos y es de aplicación al estudio de las características de otras fallas activas, de especial importancia en la evaluación de la peligrosidad sísmica.

Bibliografía

- Ahmad, N., Xiaodong, L., Zhijun, G., y Abbas, A. (2020). Electrical resistivity imaging of active faults in palaeoseismology: case studies from Karachi Arc, southern Kirthar Fold Belt, Pakistan. *Nriag Journal of Astronomy and Geophysics*.
- Banda, E., Gallart, J., Garcia-Dueñas, V., Dañobeitia, J. J., y Makris, J. (1993). Lateral variation of the crust in the Iberian peninsula: new evidence from the Betic Cordillera. *Tectonophysics*, 221, 53-66.
- Bufo, E., Udias, A., y Colombas, M. A. (1988). Seismicity, source mechanisms and tectonics of the Azores–Gibraltar plate boundary. *Tectonophysics*, 152:89–118.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. F., y Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophys J Int*, 101:425-478.
- DeMets, C., Gordon, R., y Argus, D. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181:1-80.
- Elorza, J. J., García Dueña, V., González Donoso, J. M., Martín García, L., y Matas González, J. (1978). Mapa geológico de España escala 1:50000 (Magna 50) Hoja 1040.
- Fansong, M., Gang, Z., Yaping, Q., Yadong, Z., Xueqin, Z., y Kaibo, G. (2020). Application of combined electrical resistivity tomography and seismic reflection method to explore hidden active faults in Pingwu, Sichuan, China. *Open Geosciences*.
- Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F., y Jabaloy, A. (1993). Stress and palaeostress in the Betic-Rif cordilleras (Miocene to the present). *Tectonophysics*, 27:105–12.
- Galindo-Zaldívar, J., Gil, A. J., Borque, M. J., Gonzalez-Lodeiro, F., Jabaloy, A., Marín-Lechado, C., . . . Sanz de Galdeano, C. (2004). Desarrollo simultáneo reciente de pliegues y fallas en las Cordilleras Béticas: la Falla de Zafarraya y el Pliegue de Sierra Tejeda. *Geo-Temas*, 6, 147-150.
- Galindo-Zaldívar, J., Gil, A. J., Borque, M. J., Jabaloy, A., Marín-Lechado, C., Ruano, P., y Sanz de Galdeano, C. (2003). Active faulting in the internal zones of the central Betic Cordilleras (SE, Spain). *Journal of Geodynamics*, ., Gonzalez-Lodeiro, F, 36.
- Galindo-Zaldívar, J., Jabaloy, A., Serrano, I., Morales, J., González-Lodeiro, F., y Torcal, F. (1999). Recent and present-day stresses in the Granada Basin (Betic Cordilleras): example of a late Miocene–present-day extensional basin in a convergent plate boundary. *Tectonics*, 18:686–702.
- Garofalo, F. (2014). *Physically constrained joint inversion of seismic and electrical data for near-surface applications*. Politecnico di Torino. Ph.D. Thesis.
- Jiménez Pintor, J., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P., y Morales Soto, J. (2001). Anomalías gravimétricas y magnéticas en la Depresión de Granada (Cordilleras Béticas): tratamiento interpretación. *Geogaceta*, 31: 143-146.
- Loke, M. H. (2016). *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.

- López-Chicano, M., Calvache, M. L., Martín-Rosales, W., y Gisbert, J. (2002). Conditioning factors in flooding of karstic poljes—the case of the Zafarraya polje (South Spain). *Catena*, 49, 331–352.
- Lugo, E., Playá, E., y Rivero, L. I. (2008). Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas. *Geogaceta*, 44: 223-226.
- Madarieta-Txurruka, A., Galindo-Zaldívar, J., González-Castillo, L., Peláez, J. A., Ruiz-Armenteros, A. M., Henares, J., y Gil, A. J. (2021). High-and Low-Angle Normal Fault Activity in a Collisional Orogen: The Northeastern Granada Basin (Betic Cordillera). *Tectonics*, 40(7).
- Madarieta-Txurruka, A., González-Castillo, L., Peláez, J. A., Catalán, M., Henares, J., Gil, A. J., y Galindo-Zaldívar, J. (2022). The role of faults as barriers in confined seismic sequences: 2021 seismicity in the Granada Basin (Betic Cordillera). *Tectonic*, 41(9).
- Marín Lechado, C., Pedrera Parias, A., Pérez Muñoz, A., Rodríguez Fernández, R., Rubio Campos, J., Ruiz Constán, A., y Villalobos Megía, M. (2011). *Parque Nacional de Sierra Nevada Guía Geológica*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Morales, J., Vidal, F., De Miguel, F., Alguacil, G., Posadas, A., Ibañez, J., y Guzmán, A. (1990). Basement structure of the Granada basin, Betic Cordilleras, southern Spain. *Tectonophysics*, 177: 337-348.
- Ollero, E., y García, J. L. (1984). Morfología del sustrato y geometría del acuífero aluvial del Polje de Zafarraya. *Ist Congreso Español Geol*, 4:307–315.
- Reicherter, K. R., Jabaloy, A., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P., Becker-Heidmann, Morales, . . . González-Lodeiro. (2003). Repeated palaeoseismic activity of the Ventas de Zafarraya fault (S Spain) and its relation with the 1884 Andalusian earthq. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 912-922.
- Reicherter, K. R., Jabaloy, A., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P., Becker-Heidmann, P., Morales, J., . . . González-Lodeiro, F. (2003). Repeated palaeoseismic activity of the Ventas de Zafarraya fault (S Spain) and its relation with the 1884 Andalusian earthquake. *International Journal of Earth Sciences*, 92(6), 912-922.
- Rodríguez-Fernández, J., y Sanz de Galdeano, C. (2006). Late orogenic intramontane basin development: the Granada basin, Betics (southern Spain). *Basin research*, 18: 85-102.
- Ruano, P., Galindo-Zaldívar, J., y Jabaloy, A. (2004). Recent tectonic structures in a transect of the Central Betic Cordillera. *Pure and applied geophysics*, 161: 541-563.
- Ruiz-Armenteros, A. M., Delgado, J. M., Sousa, J. J., Hanssen, R. F., Caro, M. J., Gil, A. J., . . . Sanz de Galdeano, J. (2015). Deformation monitoring in Zafarraya fault and Sierra Tejeda antiform (betic cordillera, Spain) using satellite radar interferometry. *Proc. 'Fringe 2015 Workshop', Frascati, Italy* 23–27, ESA SP-731, May.

- Sanz de Galdeano, C., Peláez Montilla, J., y López Casado, C. (2003). Seismic Potential of the Main Active Faults in the Granada Basin (Southern Spain). *Pure and Applied Geophysics*, 160, 1537-1556.
- Sanz de Galdeano, C., Galindo-Zaldívar, J., Alfaro, P., y Ruano, P. (2007). El relieve de la cordillera bética. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (15.2) 185-195.
- Sanz de Galdeano, C., García-Tortosa, F. G., Peláez, J. A., Alfaro, P., Azañón, J. M., Galindo-Zaldívar, J., . . . Ruano, P. (2012).). Main active faults in the Granada and Guadix-Baza Basins (Betic Cordillera). *Journal of Iberian Geology*, 38, 209-223.
- Sanz de Galdeano, C., Peláez, J. A., y López Casado, C. (2003). Seismic Potential of the Main Active Faults in the Granada Basin (Southern Spain). *Pure and Applied Geophysics*, 160, 1537-1556.