

# **Nuevos datos paleosísmicos para la caracterización de un transecto completo en la Falla de Alhama de Murcia (SE España)**

**Marc Ollé López**

**Dirección:** Eulàlia Masana Closa y Octavi Gómez Novell



**Máster en Recursos Minerales y Riesgos Geológicos  
Especialidad: Riesgos Geológicos**

**Julio 2022**



**UNIVERSITAT DE  
BARCELONA**

**UAB**

**Universitat Autònoma  
de Barcelona**

## Resumen

La Falla de Alhama de Murcia (FAM) es una de las principales fallas sismogénicas de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (EBSZ). Entre Lorca y Totana, la falla se bifurca en múltiples ramas que se considera que se unen en profundidad y, por tanto, cada una tiene su propia contribución en cuanto a la historia sísmica y la tasa de deslizamiento de la falla principal. Un trabajo previo estudió la actividad de la falla realizando un análisis paleosísmico en cuatro de las cinco ramas más importantes de este sector y, por tanto, produciendo el primer transecto paleosísmico en la zona. Sin embargo, una rama adicional no se incluyó en el transecto debido a la falta de sitios paleosísmicos adecuados: la N2a-AMF. Este trabajo se ha centrado en esta rama inexplorada para analizar su potencial sísmico y obtener nuevos datos que permitan completar el transecto paleosísmico realizado previamente en esta zona (El Saltador-La Hoya), con el objetivo de contribuir a generar un modelo de peligrosidad sísmica más realista en la región. Realizamos un estudio geomorfológico detallado para mapear con precisión la N2a-AMF y seleccionar una ubicación adecuada para la excavación de una trinchera paleosísmica. También refinamos el mapeo de N2b-AMF (ya analizada en el estudio previo) para comprender mejor la relación entre ambas ramas y el push-up que delimitan. En la nueva trinchera, observamos evidencias sólidas de deformación recurrente (un mínimo de tres eventos morfogenéticos) en los sedimentos del Pleistoceno superior, lo que implica que N2a-AMF ha tenido actividad al menos durante ese periodo (dataciones en curso). Estos eventos habrían tenido lugar en el intervalo de tiempo estimado entre 82,4 ka y 39,2 ka, presentando una recurrencia mínima de 14,4 ka. Además, calculamos una tasa de desplazamiento vertical mínima de entre 0,010 y 0,011 mm/año para los últimos 82,4 ka.

## Abstract

The Alhama de Murcia Fault (AMF) is one of the main seismogenic faults in the Eastern Betic Shear Zone (EBSZ). Between Lorca and Totana, the fault splits in multiple branches that are considered to join at depth and, therefore, have their own contribution in terms of the seismic history and the slip rate of the main fault. A previous study constrained most of the activity of the fault by carrying out a paleoseismic analysis in four of the five most important branches in this sector and, therefore, producing the first paleoseismic transect analysis in the area. However, an additional branch was not included in the transect due to the lack of adequate paleoseismic sites: the N2a-AMF. This work has focused on this unexplored branch to analyze its seismic potential and obtain new data to complete the paleoseismic transect previously carried out in this area (El Saltador-La Hoya), with the aim of contributing to generate a more realistic seismic hazard model in the region. We conducted a detailed geomorphological study to accurately map the N2a-AMF and to select a suitable location for the excavation of a palaeoseismic trench. We also refined the mapping of N2b-AMF, which has been previously analysed, to better understand the relationship between both branches and the push-up they bound. In the new trench, we observed robust evidence of recurrent deformation (a minimum of three morphogenetic events) in Upper Pleistocene sediments, which implies that N2a-AMF has had activity at least during that period (dating is in course). These events would have taken place in the estimated time interval between 82,4 kyr and 39,2 kyr, presenting a minimum recurrence of 14,4 kyr. Furthermore, we calculated a minimum vertical slip rate of between 0.010 and 0.011 mm/year for the last 82.4 kyr.

# Contenido

1. Introducción y objetivos.....	3
2. Marco geológico.....	4
2.1. Contexto geodinámico.....	4
2.2. Litología.....	6
3. Antecedentes.....	6
4. Metodología.....	7
4.1. Cartografía.....	7
4.2. Paleosismología.....	8
5. Resultados.....	9
5.1. Cartografía.....	9
5.2. Resultados paleosísmicos.....	13
5.2.1. Estratigrafía de la trinchera.....	13
5.2.2. Estructura.....	17
6. Discusión.....	19
6.1. Cronología de las unidades.....	19
6.2. Estructuras de deformación.....	20
6.3. Evidencias de paleoterremotos e interpretación paleosísmica.....	20
6.4. Parámetros sísmicos.....	21
7. Conclusiones.....	22
8. Agradecimientos.....	23
9. Referencias.....	24

## 1. Introducción y objetivos

La Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO), absorbe buena parte de la convergencia entre las placas Euroasiática y Africana (De Larouzière et al., 1988; DeMets et al., 1990, 1994; Kiratzi y Papazachos, 1995; McClusky et al., 2003; Pondrelli, 1999). En esta región se encuentran las fallas sismogénicas más rápidas de la Península Ibérica, entre ellas la Falla de Alhama de Murcia (FAM), para la que se ha estimado una velocidad de  $1.55 \pm 0.14/-0.18$  mm/año (Gómez-Novell, 2021).

Establecer con precisión el potencial sísmico de dicha falla es importante para determinar la peligrosidad sísmica del SE de España, nada despreciable tal como evidenció el terremoto de Lorca de 2011 ( $M=5.2$ ). Sin embargo, debido a su velocidad lenta-moderada, los registros históricos resultan insuficientes para caracterizar la frecuencia de grandes terremotos, por lo que es necesaria la realización de estudios geológicos para comprender su funcionamiento en el pasado.

La FAM, se extiende unos 80 km desde Alcantarilla hasta la zona de Góñar con una orientación NE-SO, y según Martínez-Díaz et al. (2012b) puede dividirse en cuatro segmentos: Góñar-Lorca (28 km), Lorca-Totana (23 km), Totana-Alhama (11 km) y Alhama-Alcantarilla (17 km). Los dos segmentos meridionales (entre los que se encuentra el de Lorca-Totana) son los que muestran más evidencias de actividad reciente, además de presentar mayor expresión geomorfológica. En el área de El Saltador-La Hoya del segmento Lorca-Totana (LT), la falla se divide en 5 ramas subparalelas. Gómez-Novell (2021) analizó la actividad de la FAM en este sector e, integrando datos paleosísmicos de 4 ramas en un transecto, estimó los parámetros paleosísmicos totales de la FAM. No obstante, una de las ramas principales, la rama N2a-AMF, según la nomenclatura de Gómez-Novell (2021), no se tuvo en cuenta dada la ausencia de sitios paleosísmicos adecuados. En el presente estudio se plantea la hipótesis de que dicha rama también ha contribuido a la actividad sísmica durante el Cuaternario, por lo que su análisis resulta indispensable para la completa estimación de los parámetros sísmicos de la FAM en este sector.

Los objetivos de este trabajo consisten en caracterizar la actividad paleosísmica de la rama N2a-AMF mediante un estudio geomorfológico y paleosísmico. Para ello, en primer lugar, se pretende elaborar una cartografía detallada de la geomorfología del abanico de El Saltador y establecer con precisión la traza de la falla. En segundo lugar, se pretende excavar y analizar una trinchera paleosísmica perpendicular a la falla para estudiar la actividad reciente de la misma. A partir del análisis de la trinchera, se espera obtener la velocidad de desplazamiento, salto por evento y recurrencia de terremotos de la citada falla.

En base a los objetivos, se espera que los resultados obtenidos permitan refinar los parámetros paleosísmicos del segmento LT de la FAM. En última instancia, estos resultados serán la base para elaborar estimaciones de peligrosidad sísmica más realistas en el futuro.

El presente estudio se ha realizado en el marco del proyecto NSOURCES (PID2020-119772RB-100), en colaboración con los miembros del equipo del proyecto y con el grupo de investigación RISKMAT.

## 2. Marco geológico

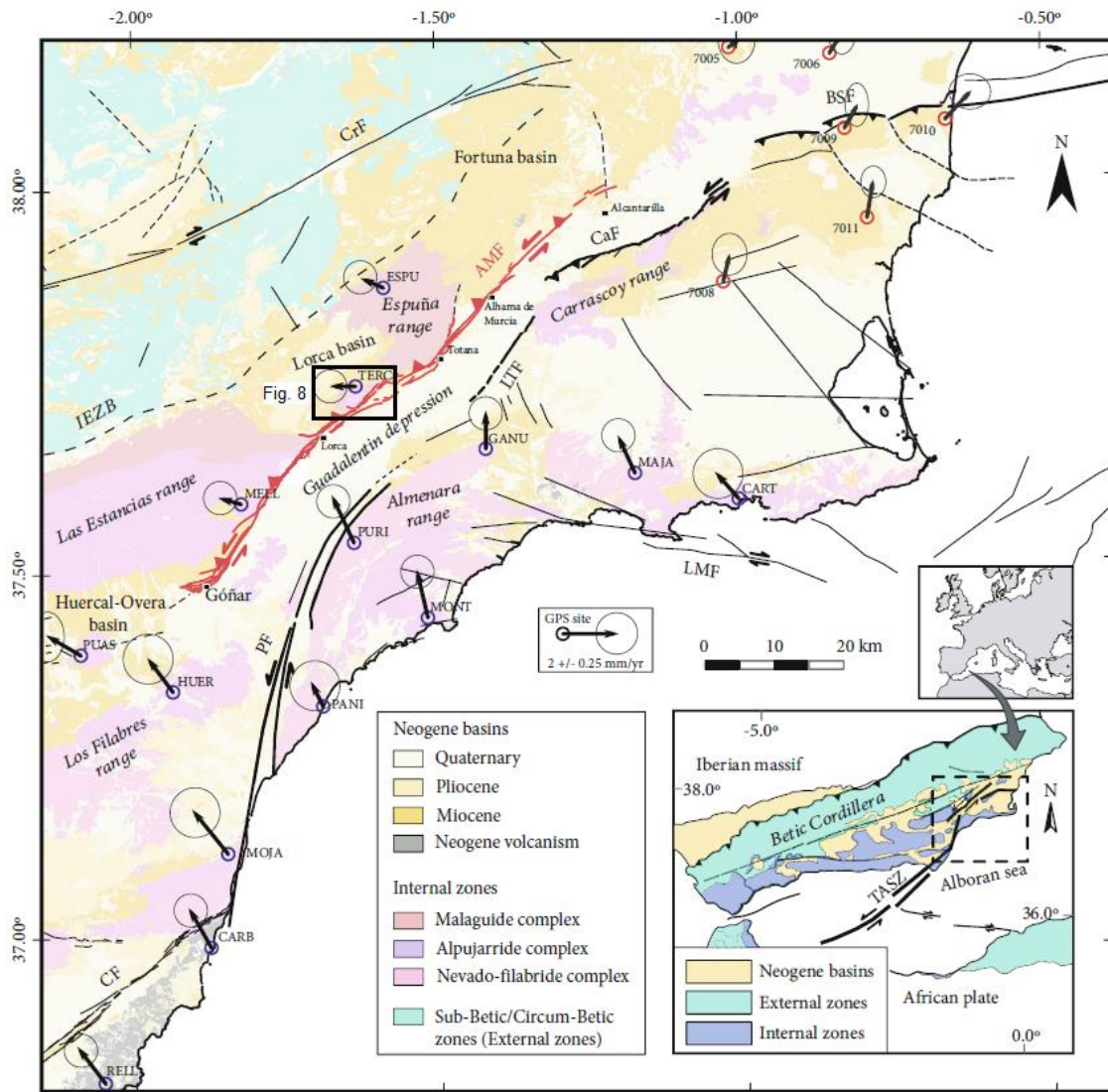
### 2.1. Contexto geodinámico

La zona de estudio se sitúa en la parte central de la ZCBO, considerada como la zona sismogénicamente más activa de la Península Ibérica. Concretamente, se sitúa en la Región de Murcia (SE de España), entre la Sierra de la Tercia y la Depresión del Guadalentín (Fig. 1).

La ZCBO acomoda, en la parte Ibérica, una fracción importante de la convergencia entre las placas Euroasiática y Africana, que se estima entre 4 y 6 mm/año (DeMets et al., 2015). Esta convergencia tiene dirección NO-SE, que en la ZCBO da lugar a una zona de cizalla con desplazamiento lateral mediante grandes fallas levóginas y contractivas con orientación NE-SO. Las principales fallas de la zona son: Falla de Alhama de Murcia (FAM), al oeste de la Depresión del Guadalentín; y Falla de Carrascoy (FC) y Falla de Palomares (FP), al este de dicha depresión (Fig. 1).

Algunas de estas fallas se originaron durante el Neógeno como fallas normales debido a un régimen extensivo en la región (Aldaya et al., 1991). Esto permitió la formación de cuencas como la de Lorca o la de Fortuna durante el Mioceno (Bousquet et al., 1978). A lo largo del Plioceno, se produjo una importante inversión tectónica que provocó que las fallas previamente normales pasaran a comportarse como inversas y con un cierto desplazamiento lateral (Martínez-Díaz et al., 2012b). Este hecho dio lugar a la formación de las distintas sierras que bordean la actual cuenca del Guadalentín (Espuña, La Tercia, Las Estancias, Almenara y Carrascoy), algunas de las cuales llegan a alcanzar los 1200 metros de altitud. Se estima que durante el Plioceno se produjo el 85% de la elevación tectónica total de la antigua cuenca de Lorca (Silva et al. 1992b). Posteriormente, ya durante el Pleistoceno medio, la elevación se ralentizó, pero, en cambio, se intensificó la componente lateral del movimiento, por lo que las fallas pasaron de una cinemática de inversa, a una principalmente direccional. Este régimen tectónico es el responsable de la formación de la Depresión del Guadalentín y es el que se ha mantenido hasta la actualidad (Martínez-Díaz et al., 2012b).

Por lo que respecta a la FAM, esta falla fue descrita por Bousquet y Montenat (1974) como una falla direccional sinistral con orientación NE-SO. Sin embargo, en el segmento Lorca-Totana de la FAM, su dirección varía ligeramente hacia el este, hasta orientarse hacia N60°, lo que provoca que los esfuerzos regionales le afecten de manera más perpendicular, generando cierta componente inversa en la deformación (Martínez-Díaz et al., 2012b). Debido a ello, en esta zona la FAM se ha ramificado, generando distintas fallas inversas que han distribuido la deformación a lo largo de un área de aproximadamente 2,5km de amplitud. Esta situación ha dado lugar a un *restraining bend* en forma de estructura en flor positiva, especialmente visible en la zona de La Hoya, tal como ha sido demostrado por Martínez-Díaz et al. (2012b).



**Figura 1.** Mapa geológico sintético del entorno de la falla de Alhama de Murcia (marcada en rojo), mostrando las principales unidades estructurales de la Cordillera Bética Oriental. Las principales estructuras representadas en el mapa son AMF: Falla de Alhama de Murcia; CF: Falla de Carboneras; PF: Falla Palomares; LTF: Falla de Los Tollos; CaF: Falla de Carrascoy; BSF: Falla del Bajo Segura; CrF: Falla de Crevillente; LMF: Falla de Las Moreras; IEZB: Límite de zona interna-externa (línea discontinua). Se indica la zona estudiada a lo largo del presente trabajo. El recuadro inferior derecho muestra el marco geológico regional en el SE de la Península Ibérica y la ubicación de la Zona de Cizalla Trans-Alborán (TASZ). Las flechas representan la red GPS CuaTeNeo (con círculos azules) y la red GPS Bajo Segura (con círculos rojos) en el marco de referencia fijo de Eurasia. Modificado de Alonso-Henar et al. (2021)

## 2.2. Litología

En el área estudiada, se observan materiales con un rango de edades y litologías muy diverso, fruto de la actividad tectónica que ha provocado la exhumación de materiales del basamento.

La zona central de la Sierra de la Tercia está formada por rocas metamórficas paleozoicas, fundamentalmente pizarras y filitas. Estos materiales constituyen el basamento de la región y corresponden a los complejos Alpujárride y Maláguide, formando parte del dominio de las Zonas Internas de las Béticas. Se encuentran altamente tectonizados y metamorfozados y afloran principalmente en la parte central de la sierra, ya que es la zona que ha experimentado un mayor levantamiento tectónico. Por otro lado, también se pueden encontrar materiales neógenos de la Cuenca de Lorca recubriendo las rocas paleozoicas. Estos materiales están constituidos esencialmente por conglomerados, areniscas y margas (Marín-Lechado et al., 2011).

El relleno de la Depresión del Guadalentín está formado en su base, por margas, yesos y conglomerados/brechas tortonienses. A techo, se encuentran materiales del Plio-Cuaternario, depositados en forma de discordancia progresiva sobre los materiales miocenos. Esta unidad está constituida por abanicos aluviales proximales formados por arenas y gravas. Se originaron durante el periodo de máximo crecimiento de la Sierra de la Tercia (Silva et al. 1992b).

Seguidamente se pueden encontrar distintas generaciones de abanicos aluviales cuaternarios. Estos abanicos están constituidos por arenas y gravas y, en ocasiones, limos (Silva, 2014). Su morfología está condicionada por el relieve generado por la actividad de las fallas, ya que existen algunas estructuras de tipo *push-up* que llegan a confinar los abanicos.

Finalmente, se encuentran sedimentos fluviales holocenos en los lechos de los cauces actuales y recubriendo toda la llanura aluvial del Guadalentín (Silva, 2014).

## 3. Antecedentes

La Región de Murcia es una de las zonas con mayor actividad sísmica de la Península Ibérica. Buena parte de los eventos sísmicos ocurridos en esta zona han tenido relación con la Falla de Alhama de Murcia.

El terremoto reciente más destructivo en España tuvo lugar el 11 de mayo de 2011, con epicentro en Lorca. Se produjo un sismo de una magnitud  $M_w$  de 4,5, seguido por un terremoto aún mayor, de  $M_w$  5,2, tras el cual se produjo también una serie de réplicas con magnitudes entre  $m_bLg$  0,4 y  $M_w$  3,9 (Martínez-Díaz et al., 2011). Este terremoto provocó 9 muertos, centenares de heridos y graves daños materiales en la ciudad.

La FAM ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, habiéndose intensificado su estudio en los años posteriores al citado terremoto. En el segmento Lorca-Totana de la FAM, en los últimos años destacan los trabajos paleosísmicos de Masana et al. (2004), Martínez-Díaz et al. (2012b) y Ferrater et al. (2016). Todos ellos han contribuido a comprender y refinar algunos de los parámetros sísmicos de la FAM

Recientemente, Gómez-Novell (2021) ha realizado el primer transecto paleosísmico en el segmento LT, en la zona de El Saltador-La Hoya. En este trabajo, se estudiaron 4 de las 5 ramas de la FAM en esta zona, realizando un transecto casi completo a través de la falla. Sin embargo, la rama N2a-AMF no fue estudiada por falta, a priori, de sitios paleosísmicos adecuados.

## 4. Metodología

Teniendo en cuenta los objetivos se plantearon dos tareas diferentes para llevar a cabo una cartografía geomorfológica de la zona y un análisis paleosísmico de la rama en estudio.

### 4.1. Cartografía

Fue necesaria la elaboración de una cartografía geológica y geomorfológica de detalle de la zona de El Saltador-La Hoya, más allá y con mucho más detalle de las que ya se habían hecho en la zona y que dejaban dicha traza de falla en un segundo término. También se amplió esta cartografía a toda la vertiente SE de la Sierra de la Tercia con el objetivo de cartografiar las distintas ramas de la FAM y los principales grupos litológicos presentes en la zona, a fin de obtener una visión global del conjunto. Se prestó especial atención al trazado de las ramas N2a-AMF y N2b-AMF para así poder comprender mejor la relación existente entre ambas. Esta cartografía tiene por objetivo refinar la cartografía de la región, y ayudar a la correcta comprensión de las unidades y estructuras presentes.

Para la elaboración de la cartografía, se emplearon los siguientes datos, combinando trabajo de campo y de gabinete:

- Cartografía geológica MAGNA a escala 1:50000 (Hoja 953, Lorca) (Marín-Lechado et al., 2011).
- Otras cartografías geológicas de detalle previas en la zona (Masana et al., 2004; Martínez-Díaz et al., 2012b; Ferrater et al., 2016; Gómez-Novell, 2021)
- Fotointerpretación a partir de fotografías aéreas tanto actuales (Instituto Geográfico Nacional, IGN, 2016 y 2018), como antiguas (vuelo estadounidense 1956-1957 a escala 1:33000).
- Modelo Digital del Terreno (MDT) con malla de 0,5 metros generado a partir de datos LiDAR (2013) obtenidos gracias al proyecto SHAKE del Ministerio de Ciencia e Innovación (ref: CGL2011-30005-C02-01) y disponible en el siguiente repositorio: <https://figshare.com/s/2e9295e7359f363629f8>

El tratamiento de los distintos datos y la elaboración de la cartografía se han llevado a cabo mediante el software SIG (Sistema de Información Geográfica) ArcGIS® 10.7 de ESRI.

La nueva cartografía se llevó a cabo teniendo en cuenta los indicadores geomorfológicos que puedan suponer indicios de actividad tectónica reciente, tales como canales dislocados, canales decapitados, lomos de presión, lomos de obturación, etc.

Los datos de campo se adquirieron mediante dos campañas distintas. En la primera, llevada a cabo en el mes de marzo de 2022, se buscaron evidencias que permitiesen definir la traza de las fallas N2a-AMF y N2b-AMF, con la finalidad de seleccionar el mejor emplazamiento para la excavación de una trinchera paleosísmica en la falla N2a-AMF. En la segunda campaña, realizada durante el mes de mayo del mismo año, se realizó una exploración de campo general tanto del abanico de El Saltador como de sus alrededores para refinar la nueva cartografía, con especial atención en el trazado de las distintas ramas de la FAM.



## 4.2. Paleosismología

A partir de la cartografía elaborada, se analizó la traza de la rama N2a-AMF a lo largo del abanico de El Saltador para determinar un sitio adecuado para la realización del estudio paleosísmico.

Una vez identificado el sitio idóneo, se excavó mediante retroexcavadora una trinchera perpendicular a la falla, (denominada trinchera "Torre", a partir de ahora). Se seleccionó este emplazamiento por la observación de la falla en la pared NE del contiguo barranco de El Saltador. El lugar, además, resultaba adecuado para la ejecución de un análisis paleosísmico debido a la presencia suficiente de sedimentos recientes.

La trinchera excavada presenta una orientación NO-SE, perpendicular a la traza de la falla. Tiene unas dimensiones de aproximadamente 66x3 m y una profundidad de unos 2,5 m (Fig. 2). Se construyó un bancal en la pared NE con el objetivo de aportar una mayor estabilidad (a pesar de la mayor dificultad que comporta durante la fase de análisis e interpretación).



**Figura 2.** Vista general desde el NO de la nueva trinchera excavada.

Posteriormente a la excavación de la trinchera, se llevó a cabo un trabajo de limpieza de las paredes, se instalaron niveles verticales y horizontales de control y se realizó un análisis preliminar para identificar las grandes unidades y detectar posibles evidencias de actividad neotectónica.

Se tomaron medidas de posicionamiento con un GPS diferencial RTK, con el que se midió la posición tanto de la trinchera como de la ubicación de la falla en ella, con el objetivo de ilustrar con la máxima precisión la localización de las distintas estructuras en la nueva cartografía.

A continuación, se realizó un trabajo de fotogrametría de la trinchera para obtener un fotomosaico de sendas paredes. El objetivo era digitalizar las paredes y generar una base sobre la que poder trazar las interpretaciones realizadas (unidades, fallas, horizontes evento, etc). Para ello, se aplicó una primera metodología consistente en la toma sistemática de múltiples fotografías de las paredes completas, para posteriormente generar un fotomosaico 3D a partir de un procesado por medio del software Agisoft Metashape Pro (<https://www.agisoft.com>), siguiendo el flujo de trabajo definido por Reitman et al. (2015). Los resultados de dicho método se muestran en el Anexo 1.

Debido a la aparición de problemas técnicos y a defectos en los resultados, se procedió a aplicar una segunda metodología para la obtención de los fotomosaicos. En este caso, se ejecutó un segundo escaneado de las paredes utilizando una cámara fotográfica y un sensor LiDAR incorporados en un iPad Pro (Apple Inc.). A partir de este escaneado, se obtuvo un modelo 3D sobre el que se proyectó una ortofotografía de las paredes de la trinchera mediante el software Blender (<https://www.blender.org/>). Esta segunda técnica solamente se llevó a cabo sobre el sector central de la trinchera (de aproximadamente 11 metros de longitud), ya que resultó ser aquel con mayor interés paleosísmico.

Sobre las imágenes obtenidas mediante este segundo escaneado, se realizó la interpretación estratigráfica y estructural en el campo, a partir de un estudio detallado in situ para definir las distintas unidades presentes y la relación entre ellas. Dicha interpretación fue refinada y digitalizada posteriormente mediante trabajo de gabinete.

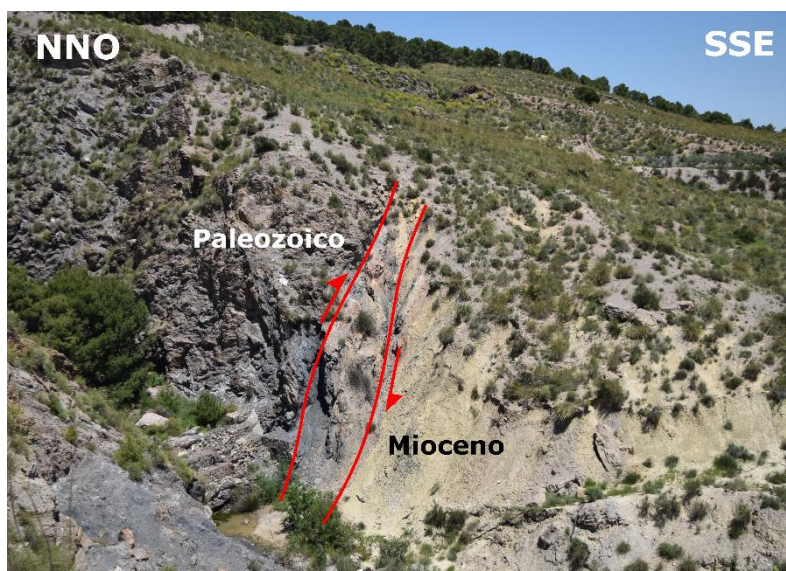
Una vez identificadas las distintas unidades y estructuras presentes, se tomaron mediciones de buzamientos y de salto vertical. También se recogieron muestras de sedimento para su posterior datación mediante la técnica de luminiscencia estimulada ópticamente (OSL). Esta técnica de datación numérica proporciona una estimación de la edad de la última exposición de los minerales a la luz solar, asumiendo que dicha exposición se produjo durante la fase de erosión y transporte de los sedimentos, y previamente a su deposición y enterramiento. Para ello, se basa en el principio de que ciertos minerales (especialmente cuarzo y feldespatos) son capaces de atrapar electrones del medio en los defectos de su red cristalina (Medialdea, 2012). Sin embargo, cuando son expuestos a la luz solar, se produce el vaciado de dichas posiciones cristalinas y la expulsión de los electrones atrapados previamente. Esta técnica aprovecha este principio para medir la dosis de radiación recibida por los cristales (la cual es proporcional al tiempo de exposición a la radiación ambiental) y, posteriormente, asumir que el tiempo de exposición obtenido es el periodo por el cual la muestra se ha encontrado enterrada.

Las dataciones se encuentran en proceso en la actualidad.

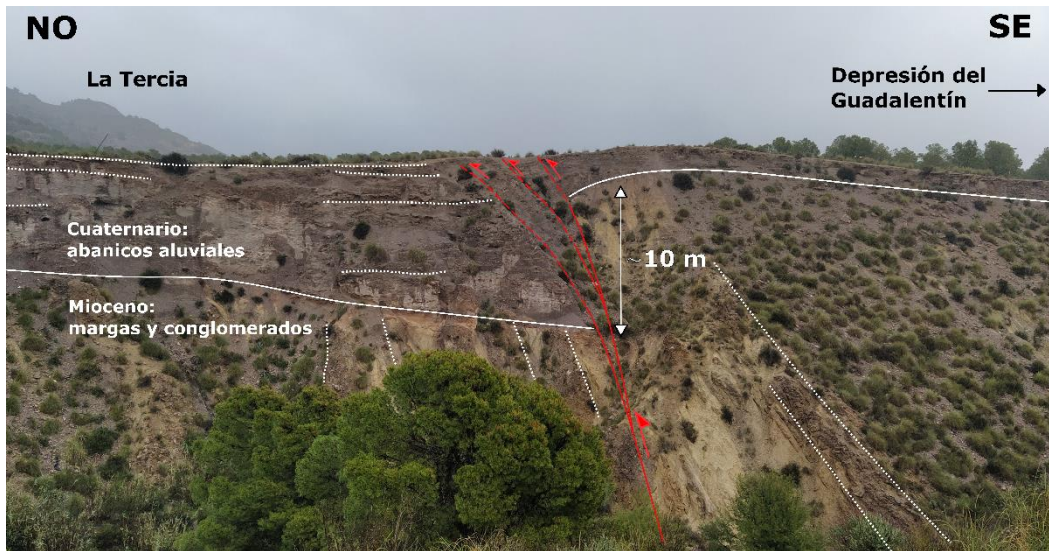
## 5. Resultados

### 5.1. Cartografía

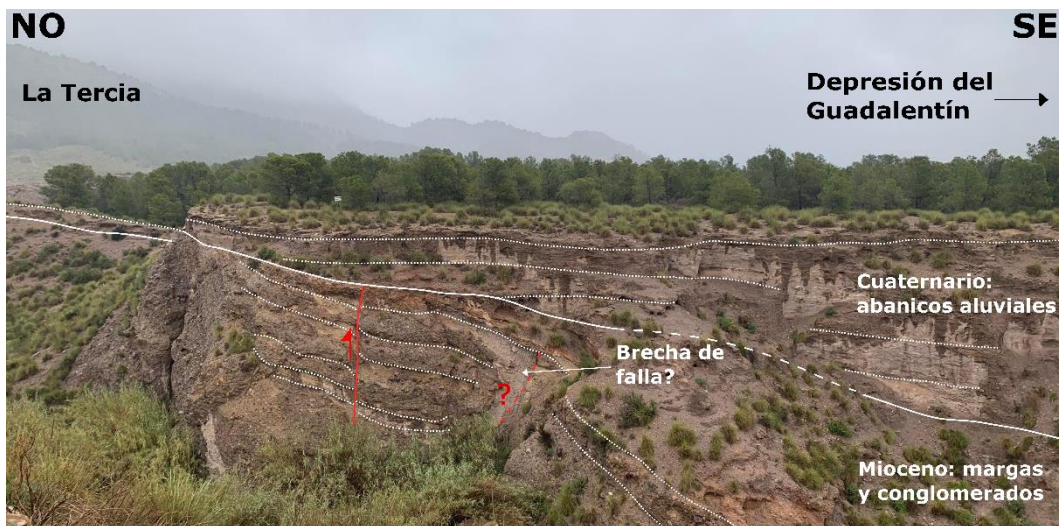
A partir de la exploración de campo centrada en el abanico de El Saltador y alrededores, se encontraron varios afloramientos de las distintas fallas, tanto en el barranco como en el abanico de El Saltador. Los diferentes afloramientos observados se muestran en las figuras 3-7.



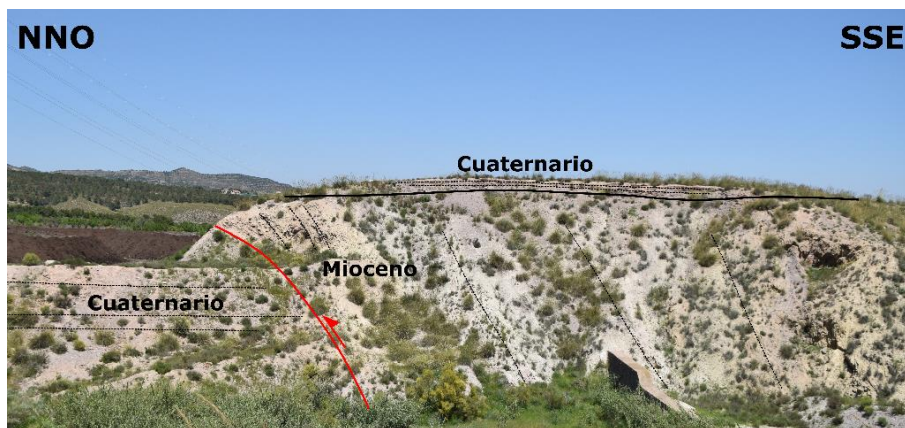
**Figura 3.** Afloramiento 1. Falla N1-AMF en el margen NE del barranco de El saltador. Al ser una de las ramas con mayor salto acumulado del conjunto, muestra una zona de falla amplia (aproximadamente 3 metros), rellena por brecha de falla.



**Figura 4.** Afloramiento 2. Falla N2a-AMF en el margen NE del barranco de El Saltador. Puede observarse la flexión laxa producida por la actividad de la falla en los materiales cuaternarios (Q3) del bloque superior.



**Figura 5.** Afloramiento 3. Falla N2b-AMF en el margen NE del barranco de El Saltador. Los materiales cuaternarios (Q3) se encuentran fosilizando esta rama de la falla en este sector.



**Figura 6.** Afloramiento 4. Falla S-AMF en el margen NE del barranco de El saltador. Destaca la diferencia de potencia del cuaternario (Q3) entre ambos bloques de la falla.

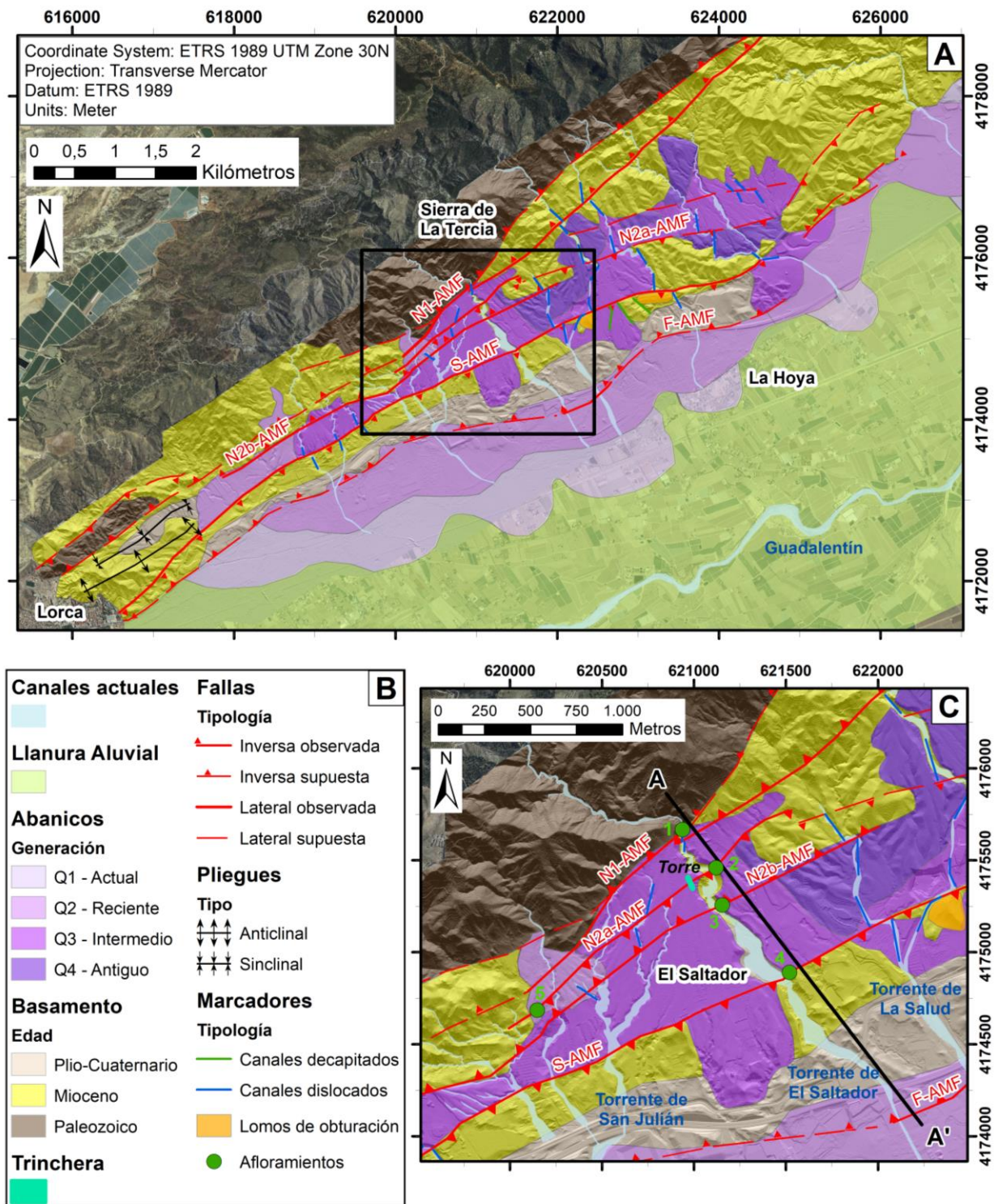


**Figura 7.** Afloramiento 5. Posible escarpe de falla asociado a la falla N2a-AMF en el lecho de un torrente (zona oeste del abanico de El saltador), sobre materiales de la base del cuaternario. El movimiento relativo entre los bloques resulta contrario a lo que cabría esperar. Esta podría ser una evidencia de componente lateral en dicha falla.

A partir del estudio geomorfológico y con la ayuda de los datos recopilados en campo, se pudo elaborar una cartografía de detalle del sector SE de la Sierra de la Tercia, con especial énfasis en la zona del abanico de El Saltador. (Fig. 8).

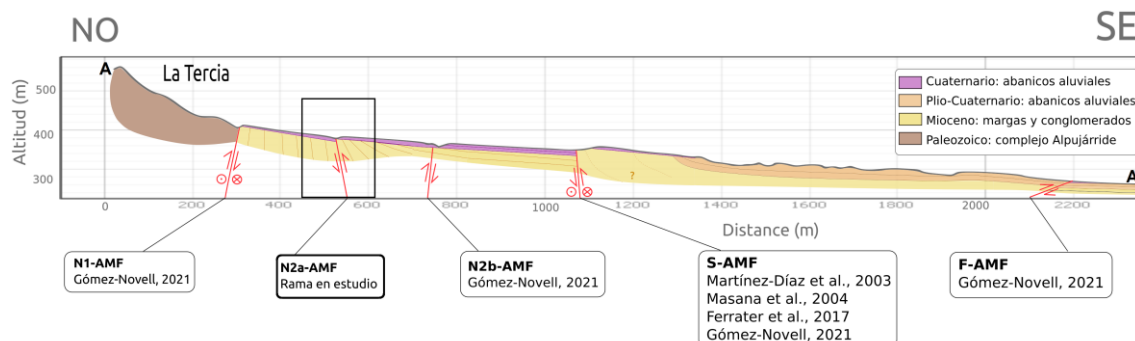
La geología de la zona se ha simplificado para facilitar la comprensión y visualización de las estructuras. Se han definido 4 grupos litológicos fundamentales: Paleozoico, Mioceno, Plioceno, y Cuaternario. En el cuaternario, se han podido distinguir 4 generaciones de abanicos aluviales (Q1, Q2, Q3 y Q4, siendo Q1 la más reciente), el relleno de la depresión del Guadalentín y los sedimentos fluviales que constituyen los lechos de los ríos y torrentes actuales.

Se han podido identificar estructuras asociadas a la actividad de las distintas fallas, también conocidas como indicadores geomorfológicos. Destaca la presencia de 2 lomos de obturación (*shutter ridges*), múltiples canales dislocados y algunos canales decapitados. A partir de esta información, se ha trazado la ubicación de las 5 ramas principales de la FAM en la zona de El Saltador-La Hoya, prestando especial interés a las ramas N2a-AMF y N2b-AMF. Además, se han identificado nuevas posibles ramas menores que requerirían estudios detallados para confirmar o desmentir su existencia.



**Figura 8.** A) Cartografía general del margen SE de la Sierra de la Tercia elaborada mediante un estudio geomorfológico. Para la realización de esta cartografía se ha utilizado como base topográfica un DEM con resolución de 0,5m obtenido en un proyecto anterior (proyecto SHAKE). También se han empleado ortofotografías actuales (2016 y 2018, IGN) y antiguas (Vuelo americano 1956-57) y se ha consultado la cartografía geológica previa [Cartografía geológica MAGNA a escala 1:50000, Hoja 953, Lorca (Marín-Lechado et al., 2011)]. B) Leyenda de la cartografía elaborada. C) Detalle de la zona del abanico de El Saltador. La cartografía de este sector se ha complementado con información recopilada mediante trabajo de campo, por lo cual, se indican los principales afloramientos de interés y la localización de la nueva trinchera “Torre”. También se indica el trazado del corte geológico sintético.

A partir de toda la información generada, se ha elaborado un corte geológico sintético del transecto completo desde la Sierra de la Tercia hasta la zona de La Hoya, cruzando el abanico de El Saltador, a lo largo del barranco del mismo nombre (Fig. 9). En dicha figura, se muestran las distintas ramas de la FAM en esta sección, además de poderse observar la disposición y relación entre las distintas unidades geológicas.



**Figura 9.** Corte geológico sintético. Se indican las diferentes ramas de la FAM en este sector y los distintos estudios paleosísmicos llevados a cabo previamente en cada una de ellas.

## 5.2. Resultados paleosísmicos

### 5.2.1. Estratigrafía de la trinchera

La excavación permitió estudiar materiales cuaternarios de la parte superior de la secuencia del abanico de El Saltador (correspondiente a la generación aluvial Q3). Estos materiales provienen de la erosión del sector central de la sierra de La Tercia, donde afloran las unidades internas de dicha sierra, por lo que están compuestos predominantemente por clastos de rocas paleozoicas ligeramente cementados mediante cemento carbonático.

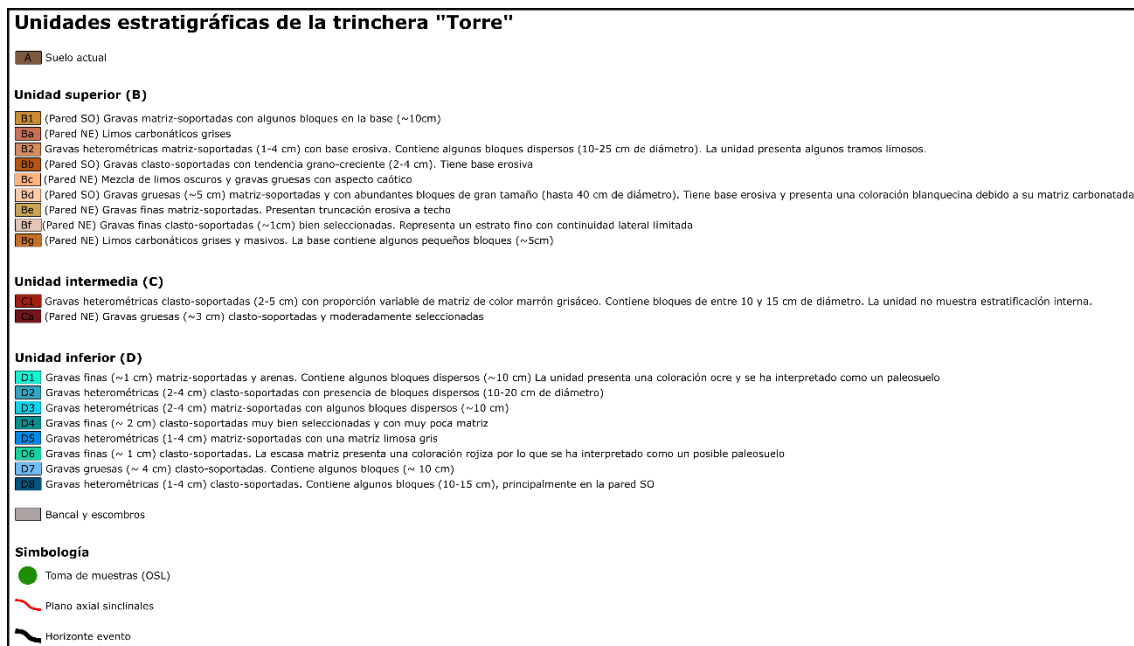
Las unidades definidas están formadas predominantemente por gravas y arenas. La proporción de matriz es variable entre las unidades y, en ocasiones, se producen variaciones laterales dentro de una misma unidad. Por lo tanto, se pueden encontrar estratos tanto grano-soportados como matriz-soportados. Se ha podido observar una tendencia al alza en el contenido de matriz en las unidades superiores (y, por lo tanto, más recientes). En base a este criterio y a su estratigrafía, se han agrupado las unidades identificadas en 4 grandes paquetes (La descripción más detallada de las distintas unidades diferenciadas se muestra en la figura 10):

- **Suelo actual (A):** materiales afectados por los procesos edáficos actuales. No presenta significación estratigráfica, pero la edafización ha alterado el aspecto de los materiales, dificultando la identificación de estructuras sedimentarias internas. Por ello, se ha decidido destacarla como una unidad diferenciada.
- **Unidad superior (B):** conjunto de estratos generalmente matriz-soportados. Es frecuente la presencia de tramos ricos en limos e, incluso, aparecen unidades formadas únicamente por este tipo de material. Algunas de las unidades destacan por su aspecto canaliforme y su marcada base erosiva.

- **Unidad intermedia (C):** estratos considerados transicionales. Están formados por gravas heterométricas subangulares y matriz-soportadas, con algunas áreas más ricas en matriz que otras. Su estratigrafía es de baja calidad, por lo que no ha sido posible diferenciar más de dos unidades en este paquete.
- **Unidad inferior (D):** conjunto de estratos predominantemente clasto-soportados. Están formados generalmente por gravas angulares con poca matriz. Se pueden encontrar algunas unidades compuestas de gravas bien seleccionadas y con un contenido de matriz prácticamente nulo. Han podido identificarse dos paleosuelos dentro de esta unidad.

Es frecuente la presencia dispersa de bloques decimétricos en distintas unidades. Sin embargo, en la pared SO se ha detectado una unidad donde el contenido en bloques resulta destacado (especialmente de aquellos bloques de mayor tamaño). Por ello y por su base erosiva, se ha interpretado esta unidad como un gran paleocanal (Unidad Bd).

Como ya se ha comentado, algunas unidades presentan tramos ricos en limos, pero en la pared NE se han identificado dos unidades compuestas totalmente por limos (Unidades Ba y Bg). Se han recogido 2 muestras de sedimento de la unidad Bg (una muestra en la base y otra en el techo) y otra muestra más en la unidad Ba. El objetivo es llevar a cabo dataciones mediante la técnica de luminiscencia estimulada ópticamente (OSL).



**Figura 10.** Leyenda y descripción detallada de las distintas unidades

La naturaleza aluvial (predominantemente gravas) del afloramiento y su posición muy proximal ha dificultado el estudio estratigráfico (dificultad en diferenciar estratos u horizontes isócronos). A pesar de ello, a partir de un análisis detallado de las paredes de la trinchera, ha sido posible identificar distintas unidades estratigráficas, como se muestra en las figuras 11 y 12. A ello hay que añadir que la mayor parte de unidades detectadas tienen una continuidad lateral limitada, lo que no permite, en algunos casos, correlacionar todas las unidades entre ambas paredes de la trinchera. Debido a los distintos inconvenientes, se decidió concentrar los esfuerzos en el análisis únicamente del tramo de la trinchera más próximo a la posible falla.

### Trinchera "Torre", Pared NE



### Trinchera "Torre", Pared NE

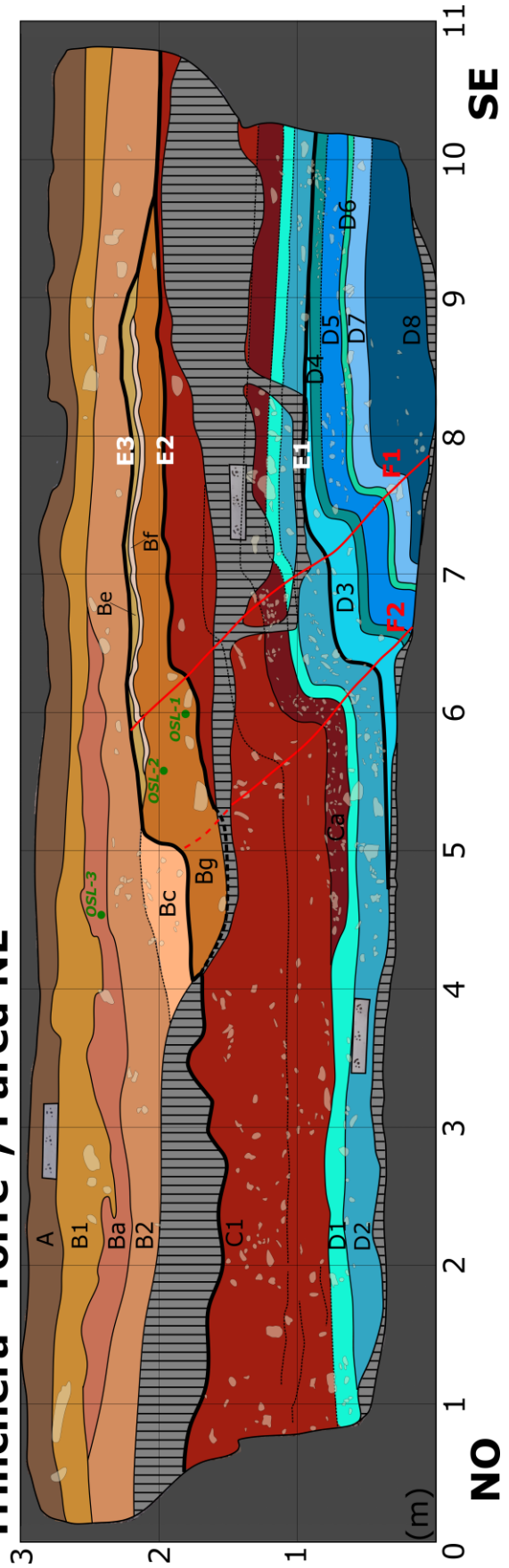
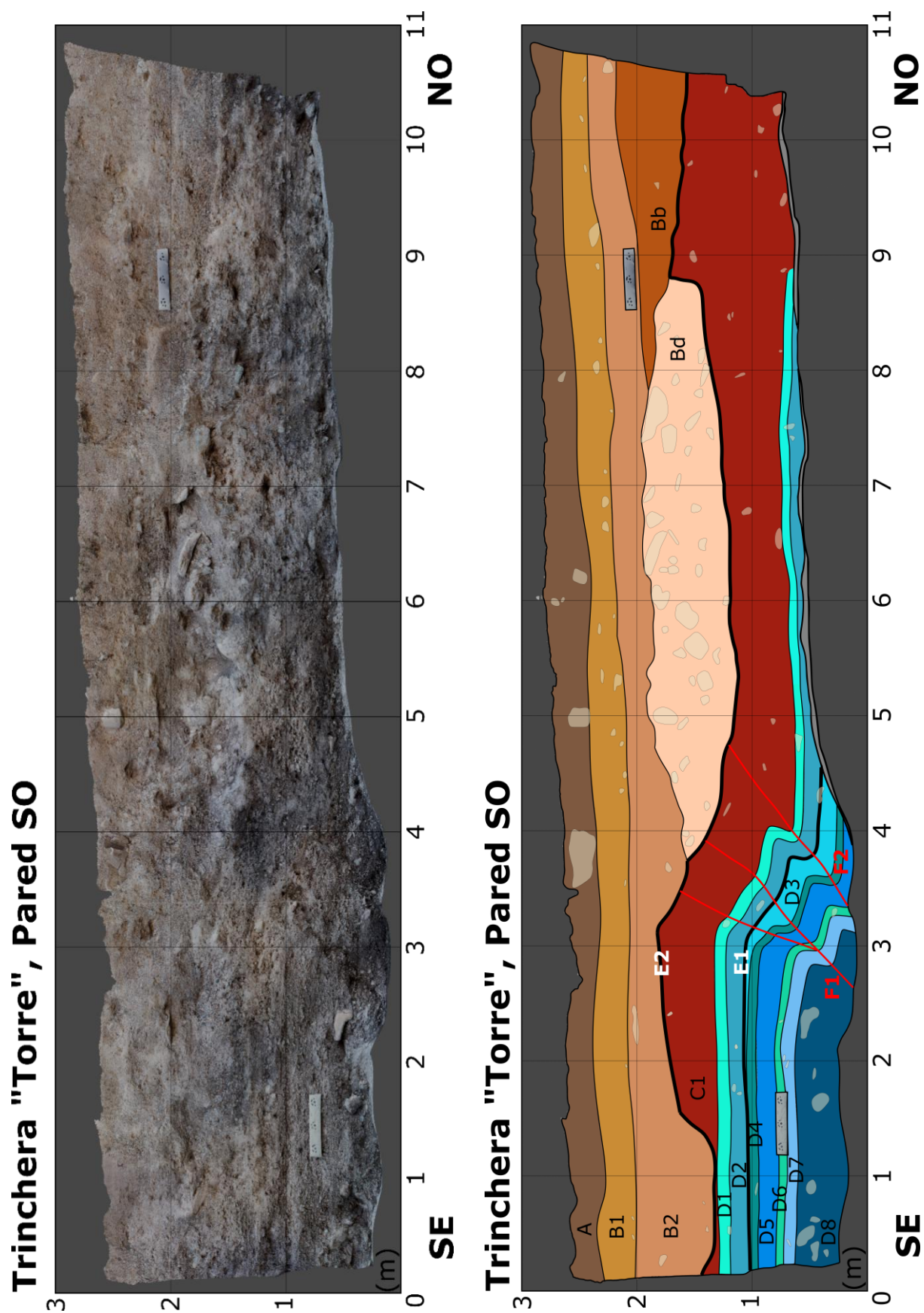


Figura 11. Pared NE escaneada sin interpretación (izquierda) e interpretada (derecha).





**Figura 12.** Pared SO escaneada sin interpretación (izquierda) e interpretada (derecha).

## 5.2.2. Estructura

En ambas paredes se ha podido identificar una zona de deformación con una amplitud variable entre 1,2 y 1,5 metros, en la que se han distinguido distintos pliegues monoclinales contiguos.

Los planos axiales de los pliegues sinformales se han escogido como referencia para establecer el alcance de la deformación hacia la superficie (por ello se han dibujado en rojo en los perfiles). No se tratarían de fallas, sino de superficies axiales, pero a efectos prácticos para la interpretación, se han usado como ramas de la falla N2a-AMF y se han denominado en los perfiles geológicos como F1 y F2, habiéndose localizado una bifurcación de la rama F1 únicamente en la pared SO.

En la pared NE, ambas fallas se encuentran separadas por una distancia de entre 75 y 95 centímetros. En el caso de la pared SO, la distancia entre las fallas varía entre 45 y 65 centímetros. Se observa una tendencia a la apertura de la zona de deformación en ambas paredes al aproximarse a la superficie.

Se han realizado distintas mediciones del salto vertical producido por ambas fallas en las distintas unidades, los resultados de las cuales se muestran en las tablas 1 y 2. Las medidas de salto vertical corresponden siempre al techo de las respectivas unidades indicadas en las tablas.

<b>PARED NE</b>												
<b>Falla F1</b>												
	<b>Buzamiento (°)</b>	<b>Salto vertical (cm)</b>										
		<b>Unidad</b>										
		<b>Bf</b>	<b>Bg</b>	<b>C1</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>
<b>Mínimo</b>	47	4	3	20	18	16	23	24	32	38	34	33
<b>Máximo</b>	54	7	6	25	23	21	25	42	40	41	41	38
<b>Falla F2</b>												
	<b>Buzamiento (°)</b>	<b>Salto vertical (cm)</b>										
		<b>Unidad</b>										
		<b>Bg</b>	<b>Ca</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>						
<b>Mínimo</b>	42	18	37	36	35	33						
<b>Máximo</b>	52	20	42	42	43	41						
<b>Salto vertical total (Unidad D1)</b>												
<b>Mínimo</b>	52											
<b>Máximo</b>	57											

**Tabla 1.** Mediciones de salto vertical y buzamiento de las dos ramas de la falla en la pared NE.

<b>PARED SO</b>										
<b>Falla F1</b>										
	<b>Buzamiento (°)</b>	<b>Salto vertical (cm)</b>								
		<b>Unidad</b>								
		<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>	
<b>Mínimo</b>	36	30	37	31	41	36	36	35	34	
<b>Máximo</b>	44	35	39	37	42	38	41	39	37	
<b>Falla F2</b>										
	<b>Buzamiento (°)</b>	<b>Salto vertical (cm)</b>								
		<b>Unidad</b>								
		<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>				
<b>Mínimo</b>	34	27	27	27	28	30				
<b>Máximo</b>	38	31	31	32	35	37				
<b>Salto vertical total (Unidad D1)</b>										
<b>Mínimo</b>	64									
<b>Máximo</b>	72									

**Tabla 2.** Mediciones de salto vertical y buzamiento de las dos ramas de la falla en la pared SO.

A partir de los resultados de las mediciones, se han podido detectar grupos de unidades que presentan valores de salto vertical similares entre ellas, pero diferentes a los de los otros grupos. La existencia de estos paquetes puede sugerir la presencia de distintos eventos en esta zona.

Por otro lado, a pesar de que la deformación se encuentra concentrada en una franja relativamente estrecha alrededor de ambas ramas de la falla, la afectación de la falla podría extenderse por varios metros en los materiales por medio de una flexión de longitud de onda métrica. Este hecho resulta visible en el afloramiento de la falla en el barranco de El Saltador (Fig. 4). Debido a ello, la medida total del levantamiento producido por la falla N2a-AMF en los materiales recientes (considerando la suma de ambas ramas detectadas) debería tomarse realizando una extrapolación a partir de la pendiente original de las unidades a ambos lados de la falla. Para ello, se necesitaría medir capas que fuesen visibles y continuas a una distancia suficiente a ambos lados de la falla, hecho complicado en la trinchera actual debido a la continuidad lateral tan limitada de las distintas unidades. Sin embargo, se ha podido realizar una estimación de la deformación total a partir de mediciones en la unidad D1 en la pared SO. Se ha establecido una pendiente mínima y máxima posible para el estadio indeformado de esta unidad y se ha medido el salto a partir de estas pendientes, extrapolando la prolongación de la unidad a ambos lados de la falla. Para ello, ha sido necesario realizar las mediciones abarcando un área mayor a la interpretada en los fotomosaicos (figs. 11 y 12), ya que esta zona podría encontrarse sutilmente deformada a gran escala. Se ha obtenido un valor de deformación total estimada (mínima) para la unidad D1 de  $87 \pm 4$  cm.

Como se ha mencionado anteriormente, en la pared NE, destacan dos unidades de limos con alto valor para la comprensión de la actividad cuaternaria de la falla. Una de las unidades ha sido afectada por ambos planos de rotura, mientras que la otra (situada en una posición más elevada en el perfil) no se muestra deformada (Fig. 11). Debido a ello se han tomado muestras para realizar dataciones mediante la técnica OSL. Estas dataciones se encuentran en proceso en la actualidad, pero se espera que sirvan para acotar el rango temporal de los últimos paleoterremotos ocurridos en la falla N2a-AMF.

## 6. Discusión

### 6.1. Cronología de las unidades

Generalmente en esta trinchera predominan las unidades formadas por gravas, con un contenido variable de matriz limosa. La mayoría de estratos se han interpretado como de origen aluvial y se habrían generado durante los procesos de obliteración derivados de la propia dinámica de los abanicos aluviales. Esto explicaría su escasa continuidad lateral.

Por otro lado, algunos niveles presentan tonalidades ocres o rojizas y mayor concentración de fracción fina. Esta constitución se ha asignado a la acción de procesos edáficos, por lo que estas unidades se han interpretado como paleosuelos. Se da la situación de que unidades con características muy similares han sido localizadas en otras trincheras realizadas en el abanico de El Saltador. Concretamente, tanto Ferrater et al. (2016) como Gómez-Novell (2021) localizaron en sendas trincheras paleosuelos muy similares a los identificados en nuestra trinchera.

Tanto las características de las propias unidades identificadas, como su estratigrafía, concuerdan en gran medida con las unidades que conformarían la generación aluvial Q3 según Gómez-Novell (2021). Además, su posición en el abanico de El Saltador, se corresponde con materiales aluviales de la unidad Q3 según la nueva cartografía elaborada en este trabajo. Dicha generación Q3 corresponde a materiales del Pleistoceno superior, los cuales conforman la mayor parte del abanico (Ferrater, 2016).

En base a todo ello, se ha realizado una estimación de la edad de los materiales estudiados, a partir de dataciones previas elaboradas por Gómez-Novell (2021). En primer lugar, según Gómez-Novell (2021), los materiales más antiguos del abanico tendrían una edad mínima de 101 kiloaños (ka). Teniendo en cuenta las suposiciones realizadas anteriormente y la posición superficial de la trinchera sobre el abanico, se ha considerado que las unidades analizadas en nuestra trinchera deberían de corresponder a la parte superior de la generación Q3, por lo que tendrían una edad menor a 101 ka. Debido a ello, para llevar a cabo la estimación de la edad se han utilizado dataciones de Gómez-Novell (2021) realizadas en unidades equivalentes a esta posición en la parte superior de la generación Q3. Dichas dataciones se han obtenido de la trinchera “El Roser” (T1), ya que sería la que se encontraría en la posición con mayor similitud a la de nuestra trinchera en el contexto del abanico (zona media-apical del abanico de El Saltador).

A partir de esta trinchera de Gómez-Novell (2021) hemos obtenido una edad máxima posible de  $76,8 \pm 5,6$  ka, correspondiente a la unidad 6.2 de “El Roser”; y una edad mínima posible de  $39,6 \pm 0,4$  ka, correspondiente a la unidad 2.2, también de “El Roser”. Por lo tanto, los materiales estudiados en esta trinchera tendrían una edad estimada entre 82,4 ka y 39,2 ka (deducida a partir de correlación regional).

Debe tenerse en cuenta que la edad máxima estimada proviene de dataciones elaboradas en una unidad de la parte baja de la generación Q3; mientras que la edad mínima provendría de dataciones en una unidad de la base de la generación Q2 según Gómez-Novell (2021). Debido a ello, resultaría lógico pensar que el rango de edades posible para los materiales de nuestra trinchera fuese sustancialmente menor, teniendo en cuenta que posiblemente tanto la edad mínima como la edad máxima deducidas se encuentran sobreestimadas debido a la ausencia de más dataciones.

Los resultados de las dataciones en proceso permitirán acotar las edades estimadas en un futuro.

## 6.2. Estructuras de deformación

Los dos planos de deformación identificados se han interpretado como la prolongación de dos ramas de la falla N2a-AMF hacia la superficie. Debido al aspecto dúctil que presenta la deformación, creemos que estos pliegues detectados podrían corresponder a pliegues de propagación (*fault propagation fold*). Sin embargo, la transición entre falla y pliegue no se presenta de forma clara.

La posición de los planos de deformación es meramente indicativa y se ha trazado únicamente en el plano axial de los pliegues sinclinales. Esto se ha decidido así porque en el caso de continuar la deformación, la rotura de los materiales habitualmente tendería a producirse por el plano axial de dichos pliegues sinclinales (Suppe y Medwedeff, 1990).

## 6.3. Evidencias de paleoterremotos e interpretación paleosísmica

Hemos interpretado un mínimo de tres eventos ocurridos en la falla N2a-AMF durante el cuaternario:

- **E1:** El primero de estos eventos habría dado lugar a la rama F1. Este evento se habría producido cuando la unidad D3 se encontraría en la superficie, por lo que solamente habría afectado a las unidades D8-D3 (ya que las posteriores todavía no se habrían formado). Posteriormente a la ocurrencia del terremoto, se habría producido una erosión de la unidad D3 en el bloque superior, la cual habría eliminado el escarpe de falla generado en la superficie (en ese momento) a raíz del evento. Este hecho puede probarse debido a la pérdida de potencia de la unidad D3 y a la truncación erosiva que se observa en su superficie observando su estructura interna. El salto vertical producido por este evento sería de entre 5 y 15 cm, en base a la diferencia de salto observada en ambas paredes entre las unidades anteriores y posteriores a D3.
- **E2:** Este evento habría dado lugar a la rama F2, además de implicar de nuevo a la F1. Se habría producido posteriormente a la deposición de las unidades D2-C1, por lo que habría afectado a toda la secuencia D8-C1. Dicho seísmo habría dado lugar a dos escarpes de falla en la superficie de la unidad C1, la cual sería la unidad expuesta en superficie en ese momento. Ambos escarpes se encontrarían a contrapendiente, por lo que habrían podido actuar como trampa de sedimento, permitiendo el estancamiento de la unidad Bg. Dicha unidad está formada por limos masivos con algunos bloques en su base y se ha interpretado como un depósito cosísmico asociado a la sacudida provocada por un gran terremoto. Tal como ha sido explicado por otros autores como Rockwell et al., (2014), la vibración de un terremoto genera grandes cantidades de polvo. Este polvo puede ser lavado y transportado con las lluvias posteriores y puede quedar retenido en zonas donde se haya generado un escarpe de falla debido al reciente seísmo, generando una unidad muy local embalsada contra el escarpe. Por lo tanto, estas unidades pueden significar una evidencia cosísmica relevante cuando se encuentran en coincidencia con zonas de falla. Estructuras similares han sido observadas por Ferrater et al. (2016) y Gómez-Novell (2021) en sus respectivas trincheras en la falla S-AMF, avalando esta posibilidad. El salto vertical producido por este evento se situaría en aproximadamente 30 cm en la rama F2 y entre 20 y 25 cm en la rama F1. Es un evento visible en ambas paredes y constituiría el seísmo con mayor salto vertical identificado en esta trinchera.

- **E3:** El último de los eventos detectados habría implicado de nuevo a la rama F1. Dicho terremoto habría afectado al conjunto de unidades D8-Be, hasta la que sería la superficie topográfica en ese momento. Se habría generado un salto vertical de  $5\pm 2$  cm, solamente visible en la pared NE, aunque una erosión posterior habría eliminado el pequeño escarpe de falla generado en la superficie de Be. Cabe la posibilidad de que este seísmo también hubiese reactivado la rama F2, afectando a la unidad Bg. Sin embargo, la litología de la unidad Bg no presenta estructura interna, por lo que no se pueden observar evidencias de deformación en dicha unidad.

Esta interpretación de los distintos eventos implicaría que los paleoterremotos acaecidos habrían alcanzado una magnitud importante, ya que se considera que los terremotos requieren de una Mw superior a 6 - 6,5 para llegar a generar escarpes en superficie (McCalpin, 2009; Baize et al., 2019).

En cualquier caso, los paleoterremotos propuestos representan un mínimo de eventos, ya que aquellos con una magnitud inferior a 6,5 no suelen generar escarpes en el terreno, por lo que pasan inadvertidos frente a los estudios paleosísmicos. Además, debido al carácter discontinuo de la sedimentación en entornos aluviales como este, algunos eventos podrían no haber sido registrados debido a la ausencia de sedimentación, o directamente podrían haber sido borrados por acción de la erosión.

La unidad Bd se ha interpretado como un paleocanal que cruzaría la zona de falla de manera oblicua. Sin embargo, no se aprecian evidencias de deformación en esta unidad, por lo que podría representar uno de los primeros niveles no deformados, de igual forma que las unidades Bc y B2.

En la trinchera se ha observado deformación con componente inversa en distintas unidades, generando escarpes a contrapendiente (elevándose el bloque al sur de la falla). Sin embargo, resulta importante destacar la existencia del afloramiento 5 (Fig. 7), en el margen oeste del abanico de El Saltador. Dicho afloramiento muestra un escarpe posiblemente relacionado con la actividad de la falla N2a-AMF, pero en el cual, el bloque elevado parece ser el situado al norte de la falla (al contrario de lo observado en la trinchera). Esta situación aparentemente contradictoria podría explicarse por medio de desplazamiento lateral a lo largo de la falla, ya que el movimiento lateral entre los bloques puede desplazar la topografía o puede poner de manifiesto las diferencias de potencia dentro de una misma unidad. Debido a ello, se recomienda la realización de estudios paleosismológicos mediante la excavación de trincheras 3D con el objetivo de demostrar o descartar la componente direccional en la falla N2a-AMF.

#### 6.4. Parámetros sísmicos

Basándonos en la estimación del rango de edades para el conjunto de materiales de la trinchera (explicado anteriormente), podemos establecer que la falla N2a-AMF ha experimentado un mínimo de 3 eventos sísmicos en los últimos 82,4ka. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos seísmos únicamente se habrían podido producir en el periodo de tiempo entre 82,4 ka y 39,2 ka, ya que las unidades superiores estudiadas en la trinchera no muestran evidencias de deformación (por lo cual, estos terremotos serían anteriores a dichos 39,2 ka). Por lo tanto, el intervalo de tiempo máximo durante el que se podrían haber producido estos eventos sería de 43,2 ka. Debido a ello, puede establecerse que la recurrencia mínima de los eventos identificados en esta falla es de 14,4 ka para el periodo comprendido entre 82,4 ka y 39,2 ka.

Cabe destacar la carencia de deformación en las unidades superiores analizadas. Este hecho sugiere la ausencia de eventos morfogénicos (seísmos con capacidad de generar escarpes en superficie) en, como mínimo, los últimos 39,2 ka. En base a ello, podría suponerse también la ausencia de grandes terremotos (superiores a Mw 6,5) ocurridos en la falla N2a-AMF en los últimos 39,2 ka.

La actividad sísmica de la falla durante el Cuaternario reciente ha dado lugar a una deformación vertical total (mínima) de  $87\pm 4$  cm, en la unidad D1. En base a estos datos (y a la espera de las dataciones previstas), la tasa de desplazamiento vertical mínima de la falla N2a-AMF para los últimos 82,4 ka sería de entre 0,010 y 0,011 mm/año.

Este valor se sitúa en el mismo orden de magnitud que el obtenido por Gómez-Novell (2021) en la falla N2b-AMF para los últimos 35 ka. En ese caso se estimó una tasa de desplazamiento de  $0,07\pm 0,01$  mm/año.

Resulta interesante destacar que las fallas N2a-AMF y N2b-AMF guardan una estrecha relación, tal y como ha podido observarse mediante el estudio geomorfológico, ya que entre ambas definen una estructura de *push-up*. La falla N2a sería una falla antitética respecto de la AMF, mientras que la N2b, sería sintética. Esta estrecha relación permite suponer una unión entre ambas en profundidad, por lo que resulta plausible que la tasa de desplazamiento de ambas fallas pueda situarse en el mismo orden de magnitud. Tanto su relación estructural como su tasa de desplazamiento similar podrían llegar a sugerir la posibilidad de una actividad conjunta entre ambas fallas. Sin embargo, se requerirían estudios comparativos detallados para poder confirmar dicha suposición.

Este contexto *push-up* con fallas de alto ángulo, sugiere, además, que la componente vertical observada en estas ramas se debe seguramente al movimiento lateral del conjunto. Además, se han identificado indicadores geomorfológicos que sugerirían la existencia de componente lateral en el movimiento de la falla N2a-AMF. De esta forma, el estudio de la componente lateral de esta falla mediante trincheras 3D sería importante para acotar el desplazamiento neto de la falla en un futuro, ya que los resultados paleosísmicos obtenidos en el presente estudio podrían resultar infraestimados en ausencia de datos respecto a la componente lateral.

A partir de su expresión geomorfológica, hemos interpretado que la N2a-AMF se muestra generalmente más activa en el sector NE del abanico de El Saltador, mientras que la N2b-AMF estaría más activa en la zona SO (donde su expresión geomorfológica es mayor). Además, en el afloramiento 3 se observa que la rama N2b-AMF se encuentra fosilizada en la zona NE del abanico, por lo que esta falla podría haber tenido actividad en este sector en el pasado, pero no durante el Cuaternario reciente.

## 7. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido analizar mediante geomorfología y paleosismología una rama de la Falla de Alhama de Murcia no estudiada previamente. Hemos podido demostrar su actividad neotectónica y calcular algunos de sus parámetros sísmicos.

Esperamos que nuestros resultados puedan ayudar a completar el transecto paleosísmico realizado por Gómez-Novell (2021) en el sector El Saltador-La Hoya de la FAM (perteneciente al segmento Lorca-Totana de la FAM), a fin de refinar los modelos de peligrosidad sísmica en la región.

Concretamente, el presente estudio ha permitido establecer los siguientes puntos:

- La falla N2a-AMF es una falla activa y sismogénica, con evidencias de deformación tectónica durante el Cuaternario reciente.
- Hemos analizado materiales con edades estimadas entre 82,4 ka y 39,2 ka, determinadas a partir de correlación regional. En ellos, dicha falla habría producido un mínimo de 3 eventos sísmicos potencialmente destructivos, con la capacidad de generar escarpes en superficie. Sin embargo, no habrían ocurrido eventos morfogénicos en, como mínimo, los últimos 39,2 ka.
- La deformación total (mínima) generada por la falla en los últimos 82,4 ka sería de  $87 \pm 4$  cm.
- La N2a-AMF habría tenido una recurrencia sísmica (mínima) de 14,4 ka para el periodo comprendido entre 82,4 ka y 39,2 ka.
- A partir del análisis del salto vertical, la falla N2a-AMF tendría una tasa de desplazamiento vertical mínima de entre 0,010 y 0,011 mm/año para los últimos 82,4 ka.
- Esta falla guarda una importante relación estructural con la falla N2b-AMF con tasas de deslizamiento similares que sugieren actividad conjunta.
- En base al comportamiento de la falla y a su expresión geomorfológica, esta falla podría presentar cierto componente lateral. Por ello sería interesante realizar estudios paleosísmicos para confirmar o descartar dicha posibilidad.

## 8. Agradecimientos

En primer lugar, querría agradecer toda la ayuda, acompañamiento y soporte de mis tutores, Eulàlia Masana y Octavi Gómez, quienes han estado siempre disponibles a lo largo de todos estos meses.

También querría agradecer la ayuda de los compañeros de la oficina, Domitille Dufour, Júlia Molins y Sarmad Rameez. Todos han tenido siempre una gran actitud para ayudarme a solventar las dificultades surgidas a lo largo de la elaboración de este trabajo.

Por último, me gustaría destacar la colaboración de Héctor Perea, Raquel Martín, Juan Miguel Insúa, Paula Herrero y Stéphane Baize. Todos ellos colaboraron en la primera campaña de campo en las distintas tareas de excavación y limpieza de la trinchera. Además, querría agradecer de nuevo a Héctor Perea habernos permitido una segunda exploración de campo durante nuestra colaboración en la campaña de obtención de datos sísmicos del proyecto UNrIDDLE (2018-T1/AMB-11039), financiado por el programa "Atracción de Talento Investigador de la Comunidad de Madrid".

Este trabajo ha sido elaborado en el marco de una beca Máster+UB y ha sido financiado a través del proyecto de investigación NSOURCES (PID2020-119772RB-100) concedido por el "Ministerio de Ciencia e Innovación".



## 9. Referencias

- Aldaya, F., Álvarez, F., Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F., Jabaloy, A., Navarro-Vilá, A. 1991. The Maláguide-Alpujarride contact (Bétic Cordilleras, Spain): a brittle extensional detachment. *Comptes rendus de l'Academie des Sciences serie II*, v. 313, p. 1447-1453.
- Alonso-Henar, J., Rodríguez-Escudero, E., Herrero-Barbero, P., Tsige, M., Martínez-Díaz, J. J. 2021. Complete strain record of a highly asymmetric shear zone: From fault core gouges to surface rupture of historical earthquakes in the Alhama de Murcia Fault (SE Iberian Peninsula). *Lithosphere*, 23 pp. <https://doi.org/10.2113/2021/8876012>
- Baize, S. et al. 2019. A Worldwide and Unified Database of Surface Ruptures (SURE) for Fault Displacement Hazard Analyses. *Seismological Research Letters*, v. 91, p. 499-520. doi:10.1785/0220190144
- Bousquet, J. C. y Montenat, C. 1974. Presence de décrochements Nord Est - Sud Ouest plio-quaternaires dans les Cordillères bétiques orientales (Espagne): Extension et signification générale, *C. R. Acad. Sci.*, v. 278, p. 2617-2620.
- Bousquet, J. C., Montenat, C., Philip, H. 1978. La evolución tectónica reciente de las Cordilleras Béticas orientales, in Reunión Geodinámica de la Cordillera Bética y Mar de Alborán, 1976, *Secret. De Publ., Universidad de Granada, Granada, Spain*. p. 59-78
- De Larouzière, F. D., Bolze, J., Bordet, P., Hernandez, J., Montenat, C., Ott d'Estevou, P. 1988. The Betic segment of the lithospheric Trans-Alboran shear zone during the Late Miocene. *Tectonophysics*, v. 152, p. 41-52, doi:10.1016/0040-1951(88)90028-5
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., Stein, S. 1990. Current plate motions. *Geophysical Journal International*, v. 101, p. 425-478. doi:10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., Stein, S. 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimate of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, v. 21, p. 2191-2194. doi:10.1029/94GL02118
- DeMets, C., Iaffaldano, G., Merkuriev, S. 2015. High-resolution Neogene and Quaternary estimates of Nubia-Eurasia-North America Plate motion. *Geophysical Journal International*, v. 203, p. 416-427. doi:10.1093/gji/ggv277
- Echeverria, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Dávila, J. M., Suriñach, E., Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. *Tectonophysics*, v. 608, pp. 600-612.
- Ferrater, M., 2016. Velocitat de desplaçament de la falla d'Alhama de Murcia (Bètiques Orientals); implicacions en el seu potencial sísmic. PhD Thesis, *Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain*, 282 p.
- Ferrater, M., Ortuño, M., Masana, E., Pallàs, R., Perea, H., Baize, S., García-Meléndez, E., Martínez-Díaz, J. J., Echeverria, A., Rockwell, T. K., Sharp, W. D., Medialdea, A., Rhodes, E.J. 2016. Refining seismic parameters in low seismicity areas by 3D trenching: The Alhama de Murcia fault, SE Iberia. *Tectonophysics*, v. 680, p. 122-128. doi:10.1016/j.tecto.2016.05.020
- Gómez-Novell, O. 2021. Paleoseismic transect across the Alhama de Murcia Fault and implications of a fault-based seismic hazard assessment for the Eastern Betics. PhD Thesis, *Universitat de Barcelona*, 387 p.
- Kiratzí, A. y Papazachos, C. B. 1995. Active crustal deformation from the Azores triple junction to the Middle East. *Tectonophysics*, v. 243, p. 1-24. doi:10.1016/0040-1951(94)00188-F

- Marín-Lechado, C., Roldán-García, F. J., Pineda-Velasco, A., Martínez-Zubieta, P., Rodero-Pérez, J., Díaz-Pinto, G. 2011. Mapa Geológico Digital Continuo de España 1:50000, Zonas Internas de las Cordilleras Béticas (Zona-2100), GEODE. [https://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia\\_Geologica/IGME\\_MAGNA\\_50/MapServer/WMS/Server](https://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Geologica/IGME_MAGNA_50/MapServer/WMS/Server) (acceso abril 2021).
- Martínez-Díaz, J. J., Masana, E., Ortuño, M., 2012. Active tectonics of the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain. *Journal of Iberian Geology*, vol. 38, p. 269-286. doi:10.5209/rev\_JIGE.2012.v38.n1.39218
- Martínez-Díaz, J. J.; Rodríguez-Pascua, M. A.; Pérez López, R.; García Mayordomo, J.; Giner Robles, J. L., Martín-González, F.; Rodríguez Peces, M.; Álvarez Gómez, J. A.; Insua Arévalo, J. M. 2011. Informe geológico preliminar del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011, 5.1 Mw. Madrid: *IGME*. 47 pp.
- Masana, E., Martínez-Díaz, J. J., Hernández-Enrile, J. L., Santanach, P. 2004. The Alhama de Murcia fault (SE Spain), a seismogenic fault in a diffuse plate boundary: Seismotectonic implications for the Ibero-Magrebien region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 109, p. 1-17. doi:10.1029/2002jb002359
- McCalpin, J. P. 2009. Paleoseismology: *Academic Press*, v. 588. doi:10.1016/S0074-6142(09)95003-3.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., Tealeb, A. 2003. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophysical Journal International*, v. 155, p. 126-138. doi:10.1046/j.1365-246X.2003.02023.x
- Medialdea, A. 2012. Towards the reconstruction of flood histories: luminescence dating of palaeoflood deposits. PhD Thesis. *Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain*, 194 p.
- Pondrelli, A. 1999. Patterns of seismic deformation in the Western Mediterranean. *Annali di Geofisica*, v. 42, p. 57-70.
- Reitman, N. G., Bennett, S. E. K., Gold, R. D., Briggs, R. W., DuRoss, C. B. 2015. High-resolution trench photomosaics from image-based modeling: Workflow and error analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 105, p. 2354-2366, doi:10.1785/0120150041.
- Rockwell, T. K., Ragona, D. E., Meigs, A. J., Owen, L. A., Costa, C. H., Ahumada, E. A. 2014. Inferring a thrust-related earthquake history from secondary faulting: A long rupture record of La Laja fault, San Juan, Argentina. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 104, p. 269-284. doi:10.1785/0120110080.
- Silva, P. G. 2014. The Guadalentín Tectonic Depression, Betic Cordillera, Murcia. *World Geomorphological Landscapes*. Springer, p. 25-35. doi:10.1007/978-94-017-8628-7\_2
- Silva, P. G., Harvey, A. M., Zazo, C., Goy, J. L. 1992b. Geomorphology, depositional style and morphometric relationships of Quaternary alluvial fans in the Guadalentín Depression (Murcia, southeast Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 36, p. 325-341, doi:10.1127/zfg/36/1992/325.
- Suppe, J. y Medwedeff, D. 1990. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, v. 83, p. 409-454.

# ----- ANEXOS -----

**Anexo 1.** Fotomosaicos obtenidos a partir de la metodología definida por Reitman et al. (2015)



A) Fotomosaico de la pared NE. Orientación NO-SE.



B) Fotomosaico de la pared SO. Arriba: Tramo SE de la pared. Abajo: Tramo NO de la pared. Orientación SE-NO.