



Departamento de
Ciencias de la Tierra
Universidad Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

INESTABILIDAD DE LADERAS EN EL ESCARPE DEL EBRO AGUAS ABAJO DE ZARAGOZA

Septiembre, 2022

AUTORA: MARTA MELÉNDEZ FERRER

DIRECTORES: ANTONIO M. CASAS SAINZ

LUIS E. ARLEGUI CRESPO



ÍNDICE

1. Planteamiento del trabajo.....	1
2. Objetivos.....	2
3. Metodología.....	2
4. Contexto geológico.....	2
5. Contexto geomorfológico.....	4
6. Descripción de los movimientos.....	4
6.1. Desprendimientos.....	5
6.2. Vuelcos.....	6
6.3. Deslizamientos rotacionales.....	7
7. Descripción de la cartografía.....	8
8. Interpretación y discusión.....	13
9. Mapas de susceptibilidad.....	15
10. Conclusiones.....	17
11. Bibliografía.....	18



ABSTRACT

The study area is located on the left margin of the Ebro River downstream from Zaragoza, in the municipality of Nuez de Ebro. It is a gypsum escarp affected by slope movements, specifically in our study area, rock falls, toppling and rotational slides. The lithology of this escarpment corresponds to the Yesos de Zaragoza Formation and from the town of Nuez de Ebro a clayey formation known as the Sariñena Formation outcrops at its base. This fact is precisely one of the factors that most influences the formation of rotational landslides, since these occur when the river erodes the lower layers of the Zaragoza gypsum formation, which causes fracture planes in the basal clay, due to its plastic rheology, that favor landslides. Another factor influencing the movement is the existence of a family of NW-SE joints that facilitates the infiltration of water into the basal units and therefore contributes to the instability of the escarpment. This work consists of mapping and characterizing the current slope movements, identifying the most dangerous areas.

Keywords: landslide, escarpment, river, gypsum and clay.

1. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

La zona de estudio objeto de este trabajo es la parte del conocido como “escarpe de Alfajarín” comprendida entre la localidad de Nuez de Ebro y la rotonda de la ARA I. El escarpe de Alfajarín constituye el margen septentrional del Valle del Ebro aguas abajo de Zaragoza. Tiene una dirección N145E y una longitud de aproximadamente 16 km llegando hasta el término municipal de Osera de Ebro (Fig. 1)

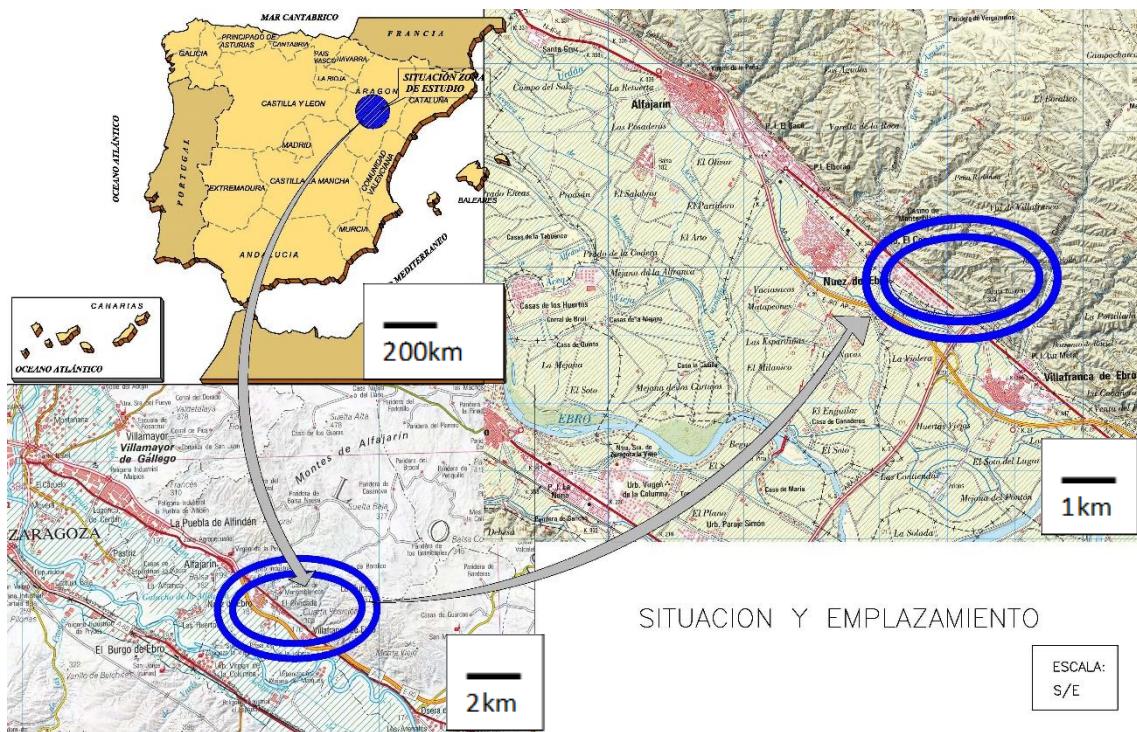


Fig.1. Situación geográfica del Escarpe de Alfajarín y de la zona de estudio.

Es un escarpe yesífero desarrollado sobre la formación yesos de Zaragoza y su génesis está relacionada con la migración lateral del río Ebro y la consiguiente disolución del yeso en contacto con el agua. Este desgaste por disolución en la base del escarpe ha generado laderas altamente inestables sobre las que se producen diferentes movimientos de masas. Los tipos de movimientos de ladera más habituales en el escarpe son, según la clasificación de Cruden y Varnes (1996), los deslizamientos rotacionales (rotational slides), los desprendimientos (rock falls) y los vuelcos (toppling). El conocimiento de la situación y la evolución de las laderas inestables y sus consiguientes movimientos es de vital importancia ya que los deslizamientos son el tercer riesgo natural por número de víctimas a nivel mundial después de los terremotos y las inundaciones (Ayala-Carcedo et al., 2002)



2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es detectar los movimientos de ladera y las estructuras asociadas a los mismos.

También son objetivos la interpretación de la génesis de los distintos tipos de movimientos de masas presentes, así como de sus factores desencadenantes para establecer el nivel de peligrosidad de los taludes.

3. METODOLOGÍA

-Revisión bibliográfica tanto de los trabajos que conciernen a la Cuenca del Ebro como de aquellos que tratan la formación y evolución de escarpes yesíferos. Las publicaciones con contenidos relevantes para la elaboración de este trabajo figuran en el apartado de bibliografía.

-Descarga y visualización de todas las ortofotos PNOA y de los MDT 02disponibles en la página de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica. Se compararon las ortofotos de todos los años disponibles para detectar movimientos de ladera recientes apreciables a esa escala. De la página web de la CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro) se obtuvo la foto aérea de 1927. Se ha usado el sistema de información geográfica Google Earth para visualizar las imágenes de satélite y para realizar alguna medición.

-La digitalización de la cartografía se ha hecho con el programa QGIS 3.2.2. La topografía de los cortes se ha realizado con la herramienta de QGIS. El contenido de los cortes y las figuras esquemáticas se han realizado con el programa de diseño gráfico COREL DRAW. Los datos de direcciones y buzamientos se han representado en proyección estereográfica usando el programa Estereonet.

-Durante las jornadas de trabajo de campo, se tomaron las coordenadas de algunos puntos de interés con el GPS dual del móvil que tiene una precisión de 1m. Se tomaron fotografías georreferenciadas con la aplicación de móvil Note Cam.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de estudio está localizada en el sector central de la Cuenca Cenozoica del Ebro sobre sus depósitos evaporíticos del Neógeno pertenecientes principalmente a dos formaciones; la Formación Zaragoza alcanza más de 850m de espesor, compuesta principalmente por halita, anhidrita y glauberita y yesos secundarios en superficie. Esta

unidad pasa lateralmente a la formación Sariñena, 20km al sureste de la ciudad de Zaragoza, en la localidad de Nuez de Ebro. La formación Sariñena se compone mayoritariamente de una secuencia de arcillas rojas con laminación horizontal aflorando en la base del escarpe (Lizaga et al., 2016). Las formaciones evaporíticas superiores de disponen en cambio lateral de facies con las calizas de la formación Alcubierre que dan lugar a plataformas estructurales situadas entre 400m y 600m por encima del fondo del valle. Aunque, dicha formación no aparece en la zona de estudio, la mayor parte de los barrancos laterales de la margen izquierda del río Ebro tienen su cabecera en dichas plataformas. Como consecuencia, los abanicos aluviales que se desarrollan en su confluencia con el nivel de terraza T2 del río Ebro están constituidos por numerosos fragmentos subredondeados de calizas procedentes de la Formación Alcubierre.

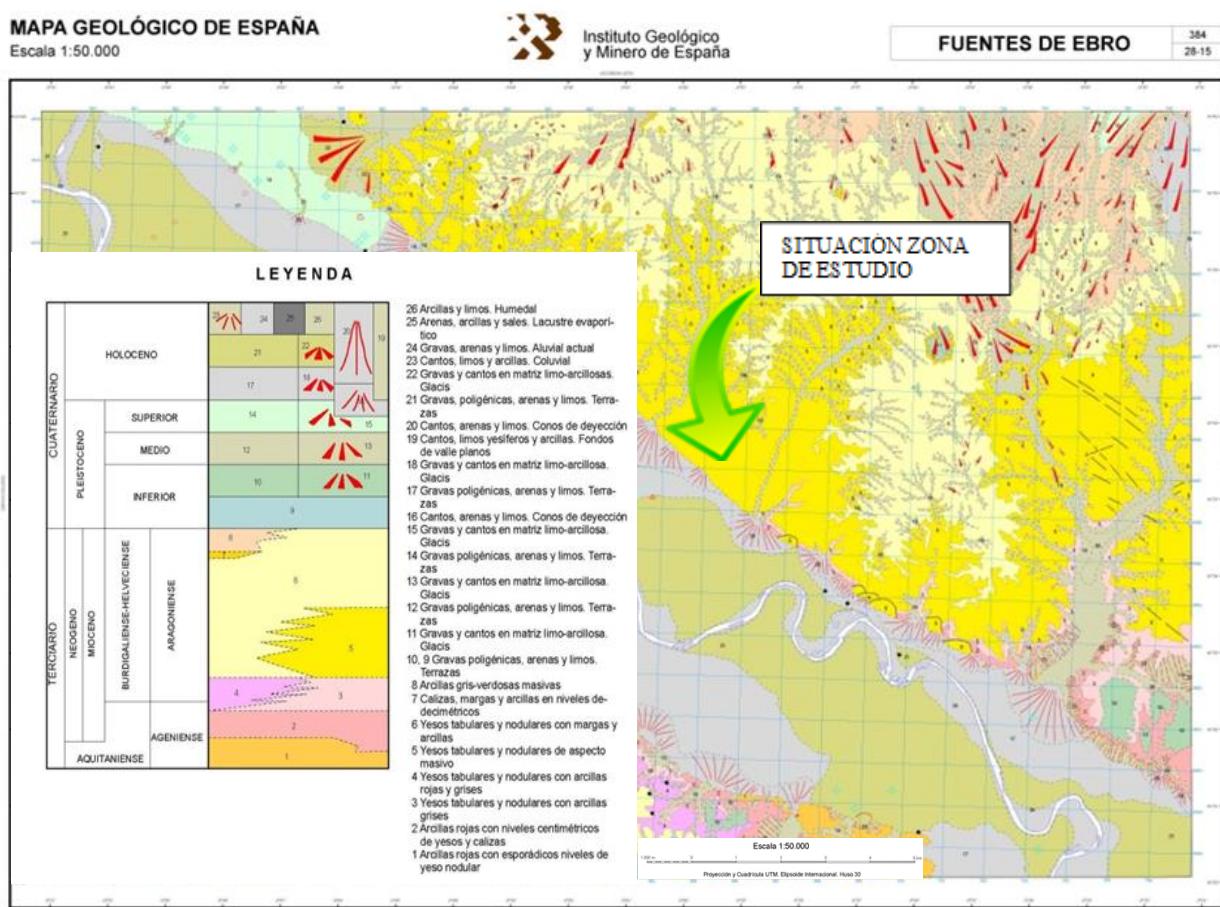


Fig.2 Mapa geológico de la zona. (extraído de mapa Geológico de España, hoja 384 28-15, Marques Calvo et al.,1991)

Como se puede apreciar en el mapa geológico de la zona (figura 2), los depósitos aflorantes en la zona, son fundamentalmente yesos tabulares y nodulares de aspecto masivo y glacis constituidos fundamentalmente por cantos de yeso en una matriz limo

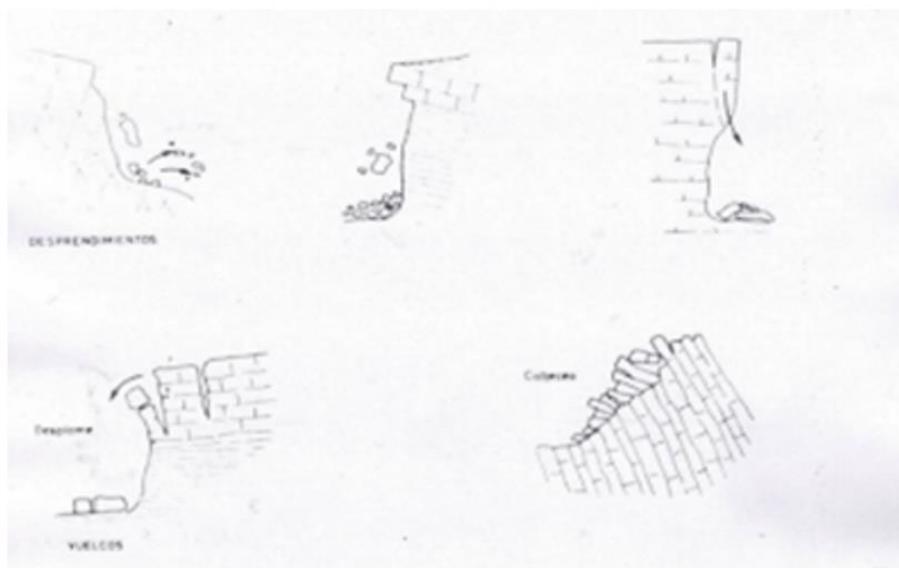
arcillosa de color ocre-amarillento. A continuación de la zona de estudio, hacia el cauce del río, se encuentran depósitos masivos de gravas con intercalaciones de areniscas de grano grueso a fino que corresponden a la terraza T2.

5. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

La geomorfología de la zona de estudio viene claramente marcada por la asimetría del valle del río Ebro. La migración lateral del río Ebro hacia el Noreste ha dado lugar a un margen sur que muestra una secuencia escalonada de terrazas, mientras que el lado norte está delimitado por un escarpe de yeso lineal de 60 km de largo (Guerrero et al., 2013). El continuo desgaste en la base del escarpe, provocada por la erosión lateral del río y la escasa resistencia de las evaporitas y arcillas de las formaciones Zaragoza y Sariñena respectivamente, ha generado laderas altamente inestables y verticalizadas sobre las que se producen caídas de bloques, vuelcos y deslizamientos rotacionales que reposan al pie del escarpe junto a abanicos aluviales. Todo esto ocasiona riesgo para cualquier infraestructura situada en el radio de afección de estos procesos. (Lizaga et al., 2016). Las zonas deslizadas de la ladera se encuentran cubriendo los depósitos de la terraza T2 del río Ebro que está representada por una banda estrecha, unos 10 m por encima del cauce actual. Ésta está constituida por unos 4 a 8 m de niveles masivos de gravas con intercalaciones de areniscas de grano grueso a fino. No muestra indicios de subsidencia debido a que se encuentra encajada en los depósitos detríticos de la Formación Sariñena (Guerrero et al., 2013).

6. DESCRIPCION DE LOS MOVIMIENTOS

Atendiendo a la clasificación de Corominas, (1989) (Fig.3.) se han cartografiado los siguientes movimientos de ladera en la zona de estudio:



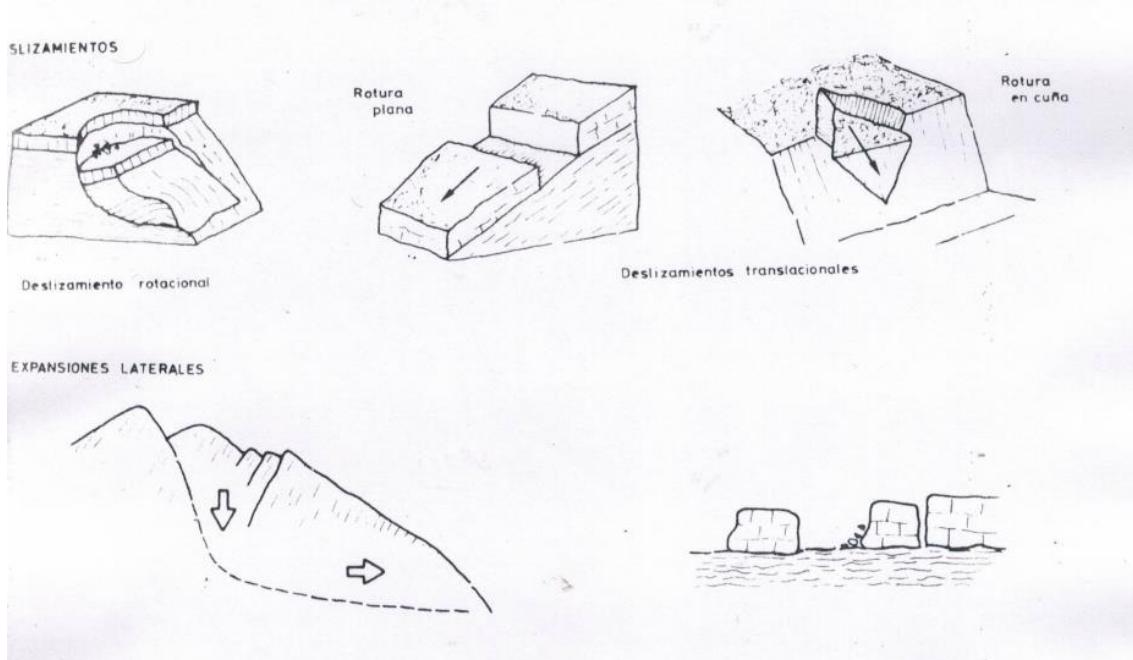


Fig.3: Clasificación de los movimientos de ladera de Corominas, 1989

6.1-DESPRENDIMIENTOS

Se entiende por desprendimiento aquel movimiento de una porción de suelo o roca en forma de bloques aislados o masivamente que, en una gran parte de su trayectoria desciende por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producirán saltos, rebotes y rodaduras. El movimiento es extremadamente rápido. Este tipo de movimiento requiere unas condiciones de relieve muy específicas como son la presencia de cantiles o taludes empinados que permitan dicha caída libre. A causa del impacto, la masa se fragmenta intensamente y se desparrama al pie del talud.

NE

SW

Fig. 4 Esquema general en corte de un desprendimiento

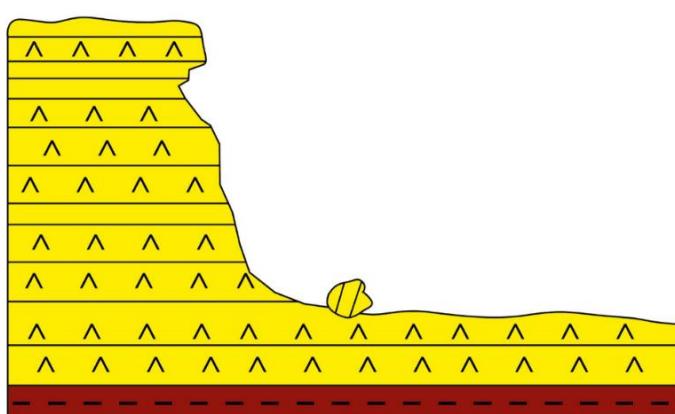




Fig. 5 Cicatrices producidas por caída de bloques.

6.2-VUELCOS



Se definen los vuelcos como un movimiento de rotación hacia el exterior de una unidad o de un conjunto de bloques alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida. Dos mecanismos regulan el proceso de vuelco; el cabeceo y el desplome. En esta zona, el mecanismo que se observa es el de desplome que consiste en la apertura de grietas en taludes verticales seguida por una caída en desplome.

Fig. 6 Grieta subvertical susceptible de producir un vuelco por desplome.

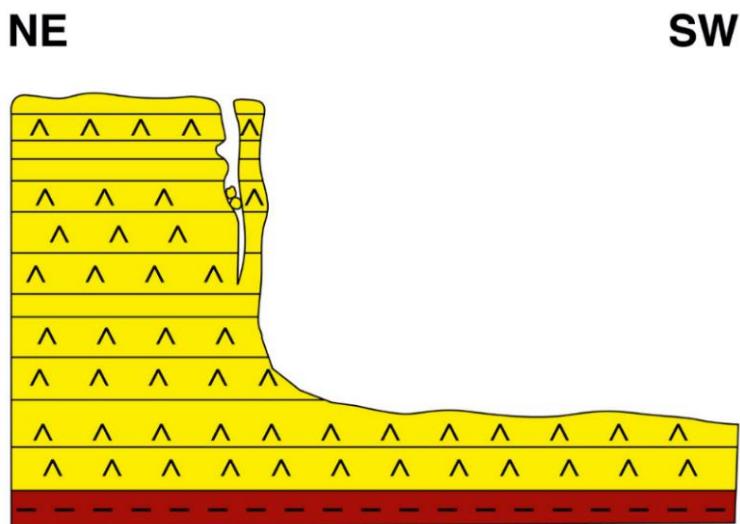


Fig. 7 Esquema general en corte de un vuelco en la cabecera del escarpe.

6.3-DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES

Se trata de movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o que pueden ser inferidas. La masa desplazada lo hace rígidamente. La superficie de rotura es curva, con la concavidad hacia arriba. Se produce un giro de la masa inestable alrededor de un eje imaginario situado por encima del centro de gravedad. La rotación implica a menudo la inclinación a contrapendiente de la cabecera del movimiento acompañada de un hundimiento y del correspondiente abombamiento del pie. La depresión de cabecera en los deslizamientos de la zona de estudio se encuentra parcialmente rellena por limos yesíferos e incididas por la red de drenaje. Esto es un indicativo de inactividad. Sobre los limos yesíferos hay un nivel de glacis en contacto discordante. El deslizamiento presente en la zona de estudio es en realidad

un sistema de tres deslizamientos cuyos planos de rotura son subparalelos y enraízan en el nivel arcilloso basal.

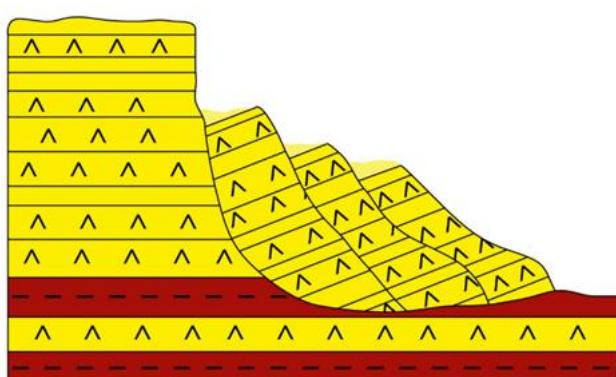


Fig.8 Esquema general en corte de un ejemplo de deslizamiento rotacional.



Fig.9 Masa deslizada con buzamiento contrapendiente

7. DESCRIPCION DE LA CARTOGRAFÍA

El área de estudio tiene una longitud de 2000m en la dirección del escarpe por unos 250m de ancho. Prácticamente, toda el área de estudio se ve afectada por deslizamientos y caídas de bloques. En la cartografía realizada (ver figura 9), se puede ver que las cicatrices de los deslizamientos presentan dirección NW-SE al igual que el escarpe principal y el diaclasado (Arlegui, 1996).

En la zona 1, se observan claramente bloques caídos en toda el área marcada, si bien es posible que alguno de los bloques haya caído por vuelco ya que se ven formas precursoras de este tipo de movimiento. La base del escarpe, hasta unos 10m de distancia, está formada por un cono de sedimentos limosos y bloques de tamaños muy dispares procedentes de la degradación del escarpe. Este cono hace de rampa que favorece que los bloques caídos rueden y alcancen una mayor distancia, en algunos casos de hasta 80m.

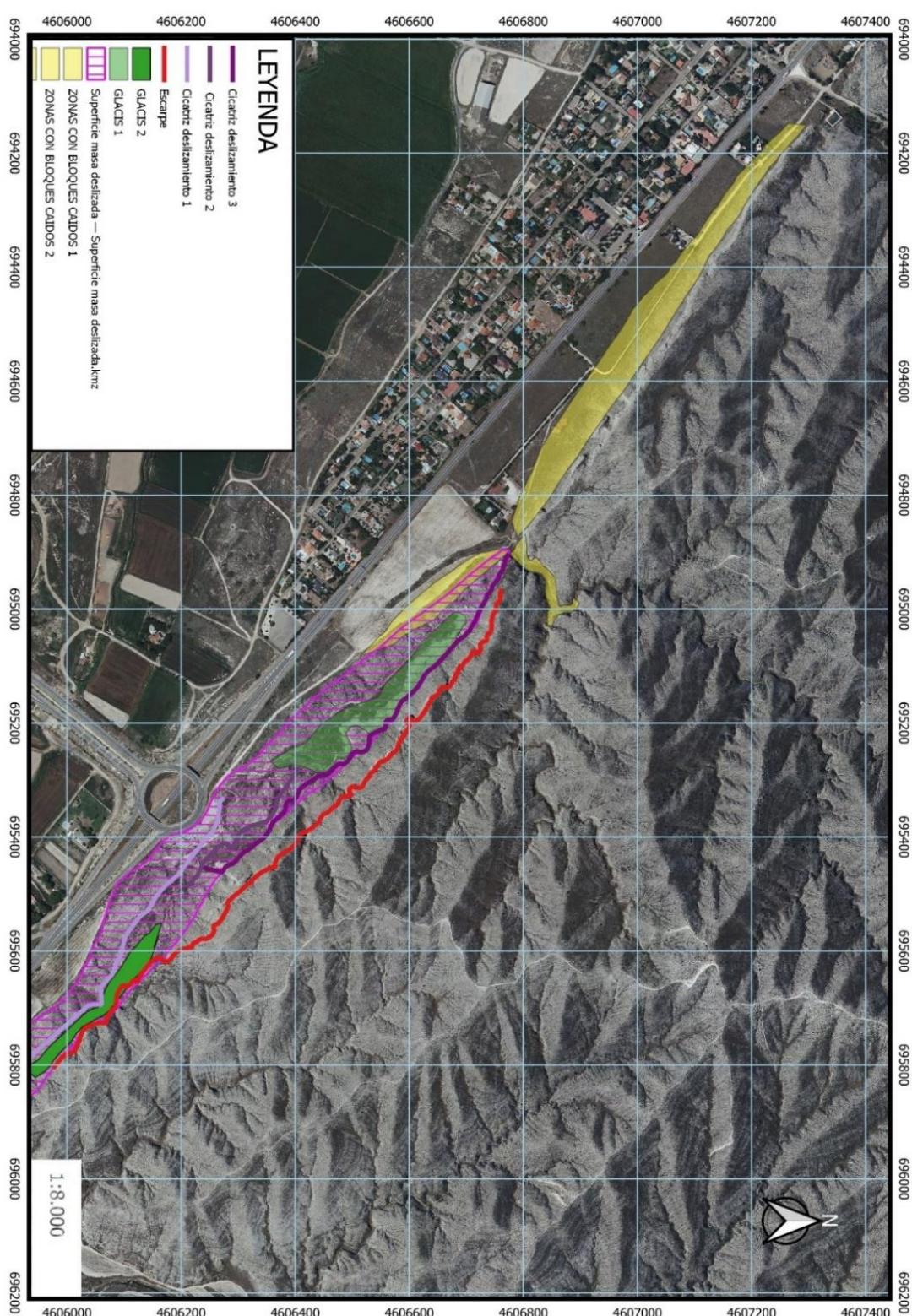


Fig.10 Cartografía de los movimientos de ladera.



Fig. 11 Bloques caídos procedentes del escarpe (yesos de la Formación Zaragoza), en la Zona 1

En la zona 2 se observan muchos bloques caídos. En esta zona y dado lo estrecho del barranco los bloques no ruedan tras la caída, únicamente son transportados y dispersados por la acción del agua.



Fig.12 Bloques caídos en la Zona 2

Litológicamente, en ambas zonas, el escarpe está formado por una alternancia de capas métricas de yeso y capas decimétricas de margas. Solo en la zona 3, aflora el nivel arcilloso basal. Así en la zona 3, la presencia de caída de bloques es mucho menos importante ya que casi toda la zona se ha visto afectada por deslizamientos rotacionales quedando así reducida la caída de bloques a la cicatriz principal del deslizamiento.

La masa deslizada por el sistema de deslizamientos, tiene una longitud máxima de

1530m y una superficie total de 145500m² aproximadamente. Las depresiones de cabecera se encuentran llenas por varios metros de limos yesíferos masivos sobre los que se apoyan, de forma discordante los depósitos de glacis. Estos depósitos presentan una potencia variable que en algunos casos llega a ser de más de 5m. Sobre ellos se han encontrado depósitos de tobas calcáreas formadas en condiciones de encarcamiento superficial.



Fig. 13 Masa deslizada por el deslizamiento 1 y depósitos de glacis.

Está formado por la cicatriz principal y dos cicatrices secundarias de menor tamaño, paralelas a la principal.

Se han tomado direcciones y buzamientos de los planos de las estructuras existentes en la zona de estudio y todas se encuentran entre N130-146E y buzamientos entre 75 y 84º hacia el sur oeste. Estos planos aparecen representados en una estereográfica en la figura 14.

N = 0

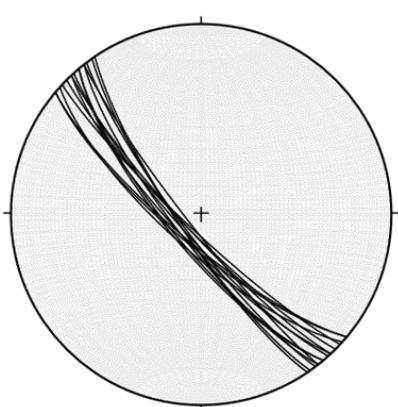


Fig.14: Representación de los planos principales de las estructuras encontradas en la zona de estudio

El buzamiento de las capas de yeso afectadas por el deslizamiento 1 es de 45º hacia el norte, mientras que en las masas deslizadas afectadas por el deslizamiento 2 y 3 son de 41º y 37º hacia el norte respectivamente.

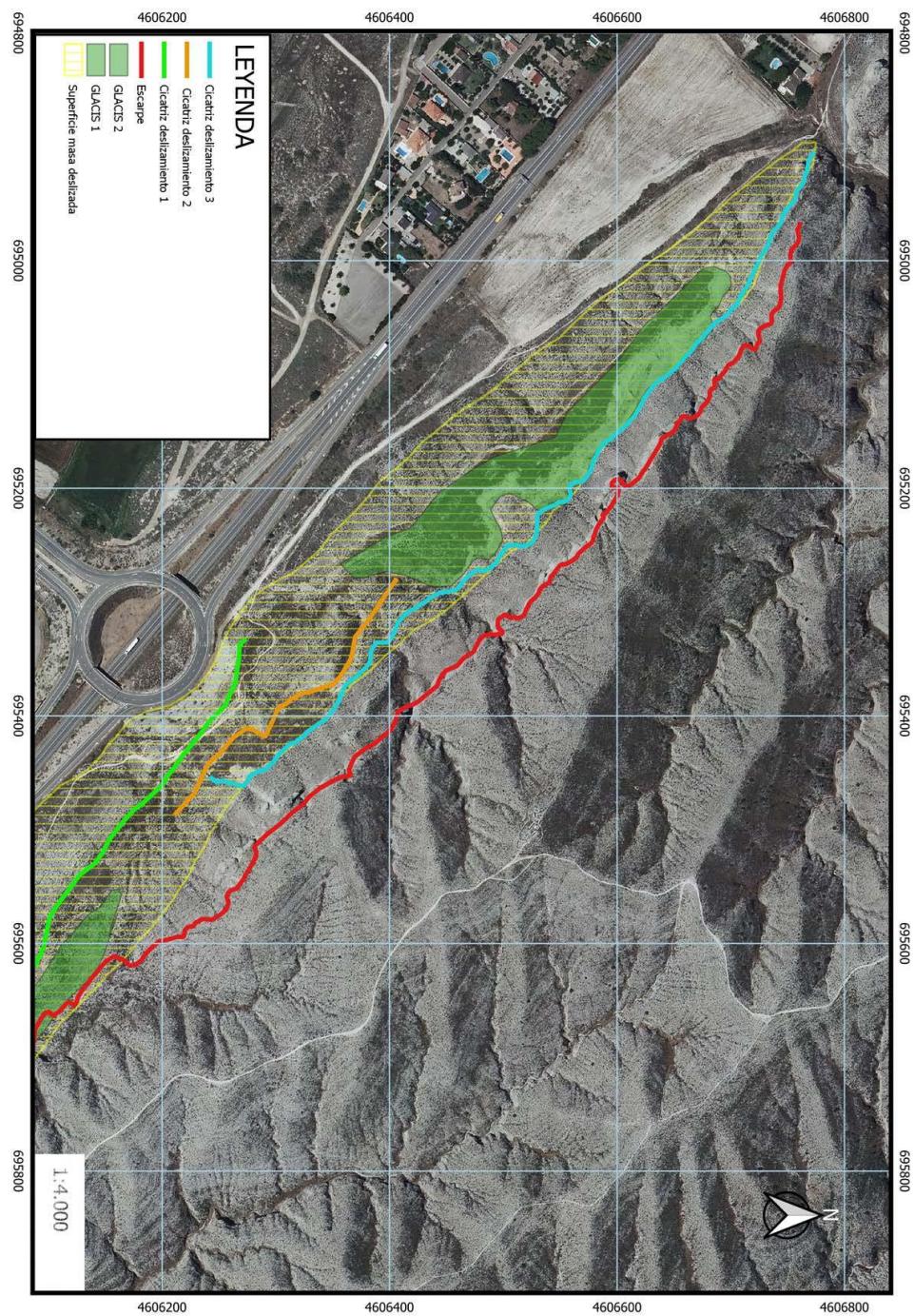


Fig.15. Cartografía de detalle de los deslizamientos y el escarpe sobre MDT02

8. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

-Relación entre la litología y los movimientos de masas: La litología es uno de los factores condicionantes de los movimientos de ladera. En el caso que nos ocupa, está formada por materiales evaporíticos de la Formación Zaragoza y por las arcillas de la Formación Sariñena. Estamos por tanto ante materiales con características físicas y comportamiento mecánico muy distintos: Los yesos de la Formación Zaragoza son materiales altamente solubles y con baja resistencia a la tracción. Debido a esta solubilidad se genera otro tipo de proceso geomorfológico, característico de rocas solubles, la karstificación. Este proceso juega un papel importante en la disminución de la resistencia mecánica del macizo rocoso como demuestra la presencia de dolinas de colapso asociadas a la karstificación interestratal de las evaporitas (Gutiérrez et al, 2008). Las arcillas de la Formación Sariñena favorecen la formación de planos potenciales de rotura controlando el desarrollo de deslizamientos rotacionales. Esto es debido a que estas arcillas tuvieron entre 600 y 700m de

serie neógena que se ha erosionado por lo que, aunque no se ha realizado ningún ensayo edométrico, es de esperar que estemos en estadios de índice de poros bajo o muy bajo. Esto hace que las arcillas adopten una microfábrica de tipo laminar que reduce el rozamiento y facilita la formación de planos de rotura.

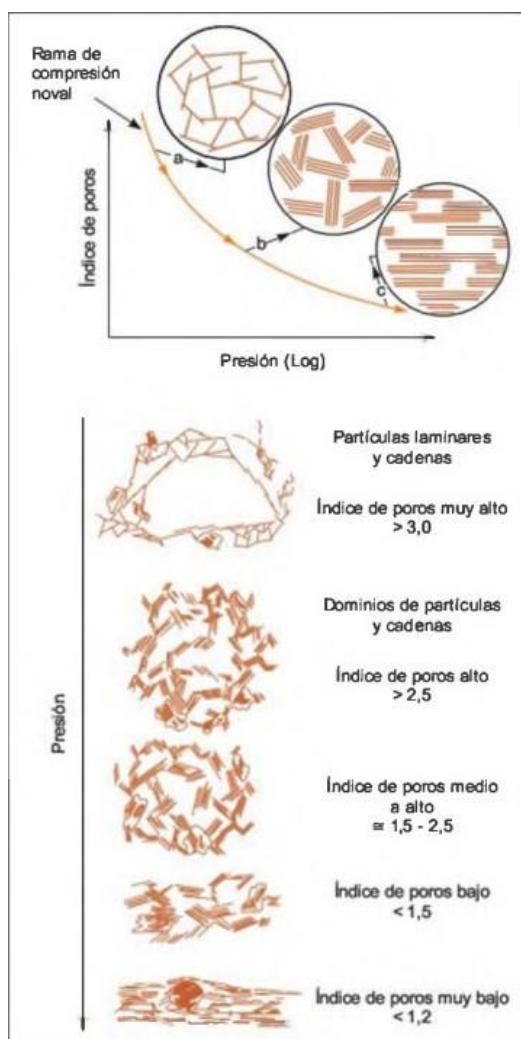


Fig.16 Reordenamiento de partículas e índice de poros en función de la presión de consolidación (Bennett y Hulbert, 1986).

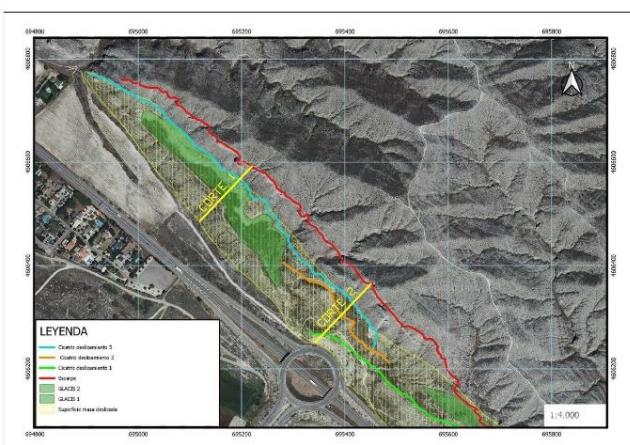
-Relación entre la topografía y los movimientos de masas: La topografía es otro de los factores condicionantes, ya que, a mayor pendiente de ladera, menor es el vector rozamiento y mayor el vector gravedad, lo que hace que aumenten las probabilidades de que se produzca un movimiento de ladera

-Relación entre el diaclasado y los movimientos de masas: El diaclasado favorece la infiltración de agua hasta el nivel de arcillas basales de la Formación Sariñena lo que puede generar que las arcillas alcancen su límite plástico. Además, la entrada de agua en un macizo evaporítico soluble hace que se produzca la karstificación, reduciendo su resistencia mecánica.

-Relación entre la erosión fluvial y los movimientos de masas: La erosión fluvial de pie del escarpe desencadena su descalce lo que favorece la formación de planos de rotura a favor de los cuales se producen los deslizamientos rotacionales. En las fotografías aéreas existentes desde el año 1927, no se han observado variaciones importantes en el trazado del cauce del río que en la actualidad se encuentra lejos de la zona de estudio y por tanto este factor en la actualidad no le afecta lo que disminuye la probabilidad de que se produzcan más deslizamientos en esta zona.

La coincidencia de todos estos factores, condicionantes y desencadenantes, actuando a la vez dan como resultado el ciclo por el que se forman los sucesivos deslizamientos que comienza con la migración del cauce fluvial activo en dirección al escarpe. El cauce activo comienza a erosionar y eliminar el material del pie del escarpe en un proceso continuo que va generando la inestabilidad de la pared escarpada por pérdida del punto de apoyo (Lizaga et al., 2016). Las diaclasas verticales paralelas al escarpe son abiertas debido a la descarga sufrida por los materiales que forman el escarpe (Gutiérrez et al., 1994). Se produce la entrada de agua por las diaclasas agrandándolas y produciendo la karstificación de las capas de yeso reduciéndose la resistencia mecánica del macizo evaporítico. El agua que discurre por el cauce y el agua que se infiltra por las diaclasas hasta el nivel de arcillas hacen que éstas alcancen su límite plástico. Todos estos procesos culminan con la formación de un deslizamiento rotacional. Con el deslizamiento de los bloques, las arcillas son arrastradas generando abombamientos en el frente del deslizamiento (ver figuras 17.18 y 19). A partir de aquí se repite el proceso de forma retrogresiva, dando lugar a los deslizamientos 2 y 3

Fig.17: Mapa de situación de los cortes realizados



NE **SW**

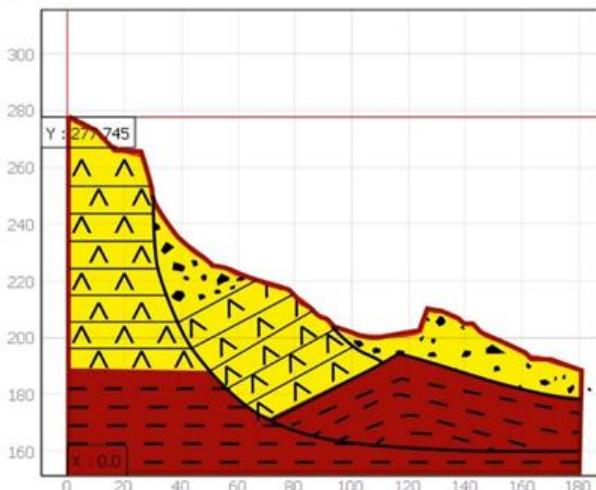


Fig.18: Representación del corte 1

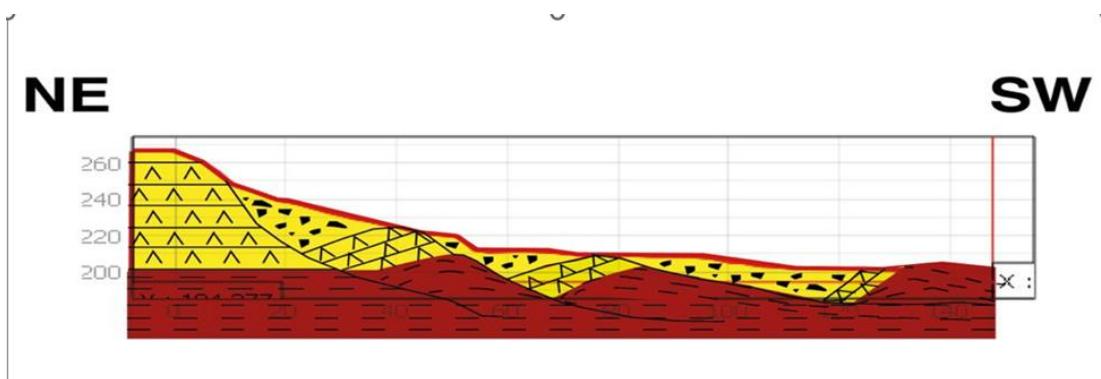


Fig.19: Representación del corte 2

9. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Un mapa de susceptibilidad nos indica la propensión o tendencia de una zona a verse afectada por un proceso peligroso en términos relativos (alta/media/baja). Se ha preferido hacer un mapa de susceptibilidad que uno de riesgos porque en esta zona no existen construcciones, ni campos de labor ni zonas de tránsito de viandantes y/o vehículos por lo que la caída de bloques o el deslizamiento que pudiera producirse difícilmente causaría daños personales o económicos.

Tanto la caída de bloques como los vuelcos son procesos activos ya que en el caso de la caída de bloques hay algunos que cayeron durante la realización de este trabajo. En el barranco, el agua que discurre va socavando la base del escarpe dejando bloques salientes que, dada la poca resistencia de las capas de yesos, terminan por desprenderse. En el caso de los vuelcos, hay diaclasas bastante profundas que con la acción erosiva terminarán por dejar los bloques totalmente sueltos.

A la zona afectada por deslizamientos se le asigna probabilidad media de caída de bloques porque, aunque en la parte más alta del escarpe podría desprenderse algún bloque, no se ven fracturas ni diaclasas profundas por las que el agua pueda penetrar, erosionar y soltar los bloques. Además, tras los deslizamientos, se produjo el relleno de las depresiones de cabecera disminuyendo la pendiente de ladera lo que dificulta los movimientos de masas. La zona marcada en verde está ya lo suficientemente alejada del escarpe, por lo que, aunque se produjera caída de bloques difícilmente alcanzarían esa zona.

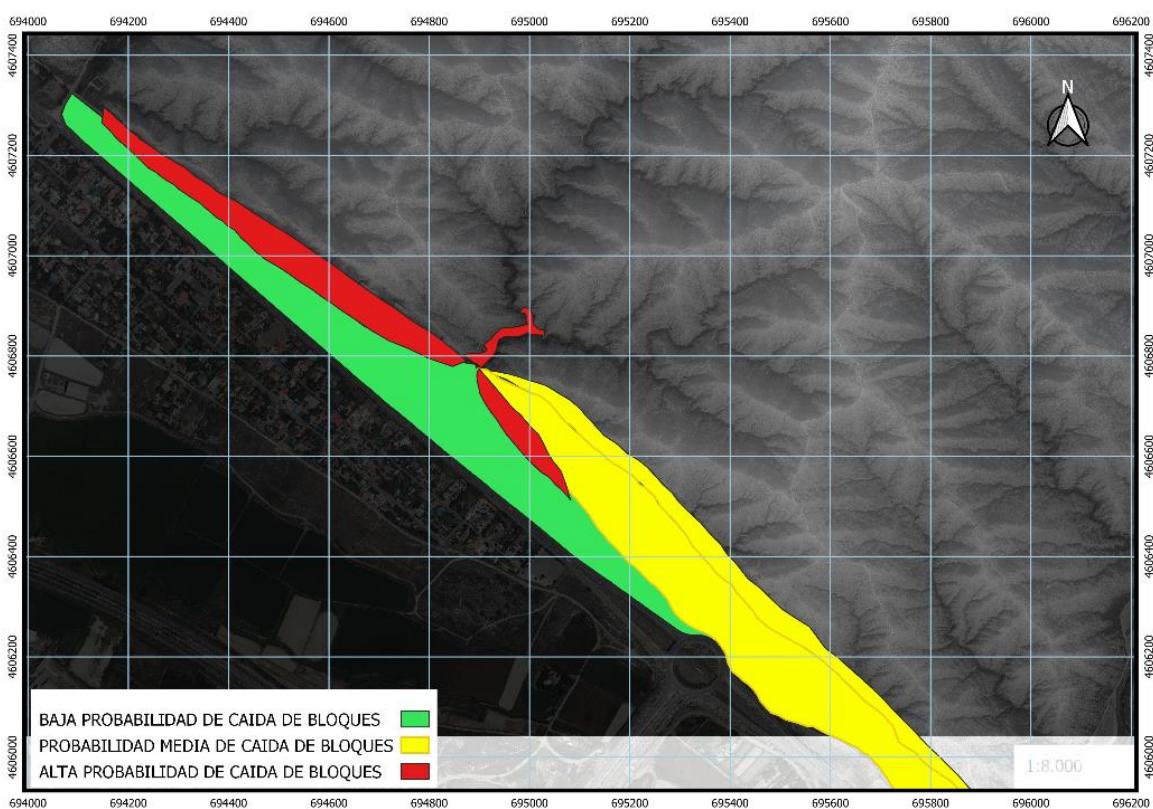


Fig. 20: Mapa de susceptibilidad a la caída de bloques.

En la figura 21 se puede ver que la zona que comprende la masa deslizada y el escarpe se ha considerado que tiene una probabilidad media de volver a verse afectados por deslizamientos. Esto se basa en que, en principio, este sistema de deslizamientos está inactivo ya que no se observan diaclasas o grietas en la parte alta del escarpe que permitan la entrada de agua necesaria para que se active el proceso y en la actualidad el cauce se halla muy alejado del escarpe, por lo que tampoco se ve afectado por las inundaciones periódicas que se considera que fueron un factor desencadenante de estos movimientos. Sin embargo, la litología altamente soluble de la Formación Yesos de Zaragoza en la que continúan produciéndose procesos de karstificación y el hecho

de que en el base se encuentre la Formación Sariñena de litología arcillosa hacen que no se pueda descartar. Estos factores son factores condicionantes que, si se produjera un factor desencadenante, darían como resultado otro deslizamiento

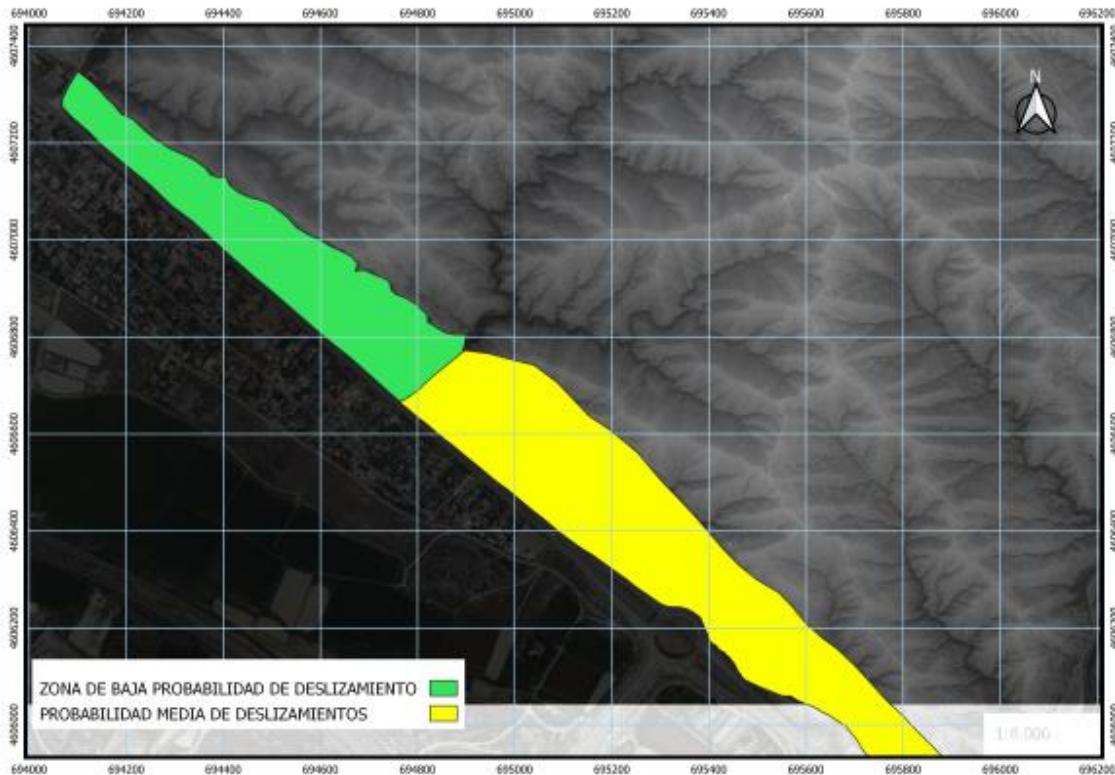


Fig. 21: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos rotacionales

10. CONCLUSIONES

Three types of slope movements have been detected in the study area: rock falls, toppling and rotational slides.

The conditioning factors for this type of movement to occur are; the topography, since this area has a steep slope, the lithology, since the gypsum that makes up the massif karstifies and greatly reduces its resistance to traction, and the basal clays favor the formation of fracture planes, and jointing that favors water infiltration. The triggering factor for rotational slides is the migration of the Ebro River towards the escarpment.

Currently, the Ebro River flows far away from the escarpment, so it is determined that this process is inactive while the rock falls and toppling are active processes.



10. BIBLIOGRAFIA

- Arlegui, L.E. (1996): *Dioclasis, fallas y campo de esfuerzos en el sector central de la cuenca del Ebro*, tesis doctoral Universidad de Zaragoza.
- Ayala-Carcedo, F.J. (2002): *Análisis de riesgos por movimientos de ladera*. En: Ayala- Carcedo, F.J. y Olcina, J. (eds.) Riesgos Naturales. Editorial Ariel. Barcelona, 379-407.
- Corominas, J. (1989): *Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera*. En: J. Corominas (Ed). Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales. Monografía nº3. Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza, 1-30.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996): *Landslide types and processes*. En: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy PressWashington DC, USA. 36–75.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F., Galve, J.P. (2013): Large depressions, thickened terraces and gravitational deformation in the Ebro River valley (Zaragoza area, NE Spain). Evidence of glauberite and halite interstratal karstification. *Geomorphology*, 196, 162-176
- Gutiérrez, F., Arauzo, T., Desir, G. (1994): Deslizamientos en el escarpe de Alfajarín (Zaragoza). *Cuaternario y Geomorfología* 8, 57–68.
- Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P. (2008): A genetic classification of sinkholes based on the analysis of evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environ. Geol.* 53, 993–1006.
- Lizaga, I., Guerrero, J., Navas, A.M. (2016): Los escarpes yesíferos del río Ebro en el entorno de Zaragoza. Riesgos geológicos, génesis y evolución. *Naturaleza aragonesa*, nº33 :22-27
- Marqués Calvo, L.A., Santos García, J.A., Esnaola Gómez, J.M., Gil Marín, C. (1991): *Mapa Geológico de España 1:50.000 hoja 384 (Fuentes de Ebro)* y memoria IGME, Madrid 42p.

CHE consulta de foto aérea de 1927, junio 2021

<http://iber.chebro.es/geoportal/>

IGN consulta de ortofotos y modelos digitales de terreno, junio 2021

<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>



Departamento de
Ciencias de la Tierra
Universidad Zaragoza