



Universidad
Zaragoza

Trabajo de Fin de Grado

Cartografía de deslizamientos en el entorno de las minas de sal de Remolinos, Valle del Ebro, Zaragoza

Autor:

Fernando Navarro Elorri

Director:

Francisco Gutiérrez Santolalla

Co-director:

Jorge Sevil Agualeles

Facultad de Ciencias, Geología

2021

Índice

1. Planteamiento	1
2. Objetivos	2
3. Metodología	3
4. Contexto geológico (estratigrafía y estructura)	4
4.1 Estratigrafía y estructura.....	6
4.2 Contexto geomorfológico.....	8
5. Resultados	9
5.1 Descripción de la cartografía geomorfológica.....	9
5.2 Descripción de los deslizamientos.....	12
5.2.1 Estudio e interpretación del inventario de deslizamientos.....	13
7. Discussion	17
8. Conclusion	18
9. Agradecimientos	18
10. Bibliografía	19

ANEXOS

Anexo 1. Cartografía general

Anexo 2. Cartografía de detalle

Anexo 3. Inventario fotográfico de los tramos estratigráficos

Abstract

The study of geological hazards are very important in order to prevent and reduce damage to people and their property. The study area is located in the outskirts of the village of Remolinos, on the left margin of the Ebro river, where the lateral migration of the fluvial system has given rise to an escarpment from Remolinos to Osera de Ebro.

The lithology that makes up the escarpment is formed by evaporitic and clay materials belonging to the Zaragoza Formation. The dissolution processes and the different mechanical behavior of the materials condition the topography which, together with the presence of a halite package, have causes local deformations in the materials in the area. As a consequence of the rapid retreat of the escarpment and the base level drop related to the entrenchment and lateral migration of the fluvial system, the marginal drainages have deeply incised into the bedrock generating favoring the appearance of rotational landslides.

Through field work and the use of a geographic information system, the rotational landslides developed in the study area have been mapped and characterized has been concluded that there is a clear relationship between the materials and the conditions of formation of the landslides.

For this reason, this work has consisted in the realization of a landslide mapping and a stratigraphic column, as well as, the elaboration of a landslide inventory that includes a spatial analysis of the same to complete the study of the area.

Key words: landslide mapping, gypsum, halite dissolution, clay, rotational landslide.

1. Planteamiento

Los movimientos de ladera son procesos geológicos potencialmente peligrosos que pueden causar daños materiales y víctimas mortales. A pesar del avance que ha experimentado el conocimiento relativo a la dinámica de estos procesos y las medidas de mitigación, el riesgo por deslizamiento ha aumentado significativamente en el transcurso de las últimas décadas. Esta tendencia al alza puede ser atribuida a múltiples factores: (1) aumento de la exposición (población y bienes); (2) actividades humanas que contribuyen a favorecer los fenómenos de inestabilidad (deforestación, excavaciones, embalses); (3) expansión de grandes urbes sin una planificación que tenga en cuenta la peligrosidad por movimientos de ladera (Gutiérrez et al., 2010). Según la base de datos creada por el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres, los deslizamientos de tierra y los procesos relacionados causaron la muerte de aproximadamente 61.000 personas en el mundo durante el período 1900-2009 (EM-DAT, 2010).

En España, el principal riesgo geológico en términos de víctimas humanas son las inundaciones, mientras que los procesos que provocan los daños económicos más cuantiosos son la erosión de suelos (Bonachea et al., 2014). Según el anuario estadístico del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA 2013) , entre los años 1995-2011 los movimientos de ladera causaron 36 víctimas mortales en España. Corominas (2006) señaló que gran parte de los daños están relacionados con movimientos inducidos por algún tipo de influencia humana, como cambios de uso del suelo, excavaciones, acumulaciones, alteración de drenaje de los taludes, etc. En términos económicos, según (Ayala et al., 2004), entre los años 1990 y 2000 se estimaron pérdidas económicas por deslizamientos de 42 millones de euros por año.

Recientemente, los nuevos datos y herramientas disponibles a nuestro alcance (LIDAR, modelos de visualización del relieve, drones) permiten realizar cartografías de mejor calidad mejorado sustancialmente la relación

beneficio/esfuerzo. No obstante para la elaboración de cartografías de calidad sigue siendo indispensable realizar, trabajos de campo detallados y tener buen conocimiento del contexto geológico-geomorfológico. Los inventarios cartográficos de deslizamientos son la herramienta más importante para la evaluación de la peligrosidad asociada a este tipo de procesos y la mitigación del riesgo, especialmente mediante una planificación preventiva (evitar zonas inestables).

El presente trabajo consiste en la realización de una cartografía general de deslizamientos y levantamiento de una columna estratigráfica con la finalidad de conocer que procesos actúan en el área de estudio, así como, que factores controlan el mecanismo de los movimientos de ladera.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es la elaboración de un inventario cartográfico de movimientos de ladera y la caracterización de los mismos. En dicha cartografía se establecen diferenciaciones en función del tipo de movimiento y del grado de actividad. Un aspecto relevante de cara a la caracterización de los movimientos ha sido la identificación de las unidades litoestratigráficas afectadas, incluyendo la unidad que alberga el nivel de sal que se explota en las minas de Remolinos. Para abordar este aspecto se ha levantado una columna estratigráfica, diferenciando tramos con distinto comportamiento mecánico, e indicando la posición del tramo salino observable en las minas abandonadas. A partir de la cartografía de los movimientos de ladera y su caracterización se han podido analizar los siguientes aspectos: (1) distribución espacial de los deslizamientos y factores de control; (2) morfometría y peligrosidad asociada a cada movimiento; (3) posible influencia de las actividades humanas en el desarrollo de deslizamientos inducidos; (4) identificación de situaciones de riesgo.

3. Metodología

Para la elaboración de este trabajo, con el objetivo de cartografiar y caracterizar los deslizamientos, se ha seguido la siguiente metodología.

Tras la revisión bibliográfica, se descargaron todos los archivos LAZ del LIDAR 2ª Cobertura (2015-Actualidad), se transformaron en archivos LAS para poder trabajar en ellos. El proceso de transformación de los archivos LAZ en LAS se realizó con las herramientas LAStools → laszip donde el programa descomprime los archivos y los genera en formato LAS. Tras descomprimir los archivos se creó en el proyecto de ArcMap un LAS Dataset en el que se añadieron los archivos LAS. Con estos archivos se creó un nuevo modelo digital del terreno MDT con una resolución espacial de 2 metros.

Posteriormente a través del centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica, se descargaron las ortofotos PNOA de máxima actualidad de la zona y modelos digitales del terreno con resolución espacial de 5 y 2 metros. También se dispuso de un MDE con una resolución de 8.95 cm/px de una zona concreta generado mediante la técnica fotogramétrica Structure from Motion con imágenes tomadas con dron. Con los modelos digitales del terreno se generaron modelos sombreados empleando un sistema de información geográfica (ArcGIS 10.7.1). Se realizó una cartografía preliminar, previa a la cartografía en campo, empleando las ortoimágenes y los modelos sombreados.

En campo se levantó una columna estratigráfica con la ayuda del GPS diferencial (Zeno 5+ GG03+ Softw) para medir los espesores a partir de la cota del techo y muro de los tramos, con una precisión vertical de 2cm y horizontal de 1 cm, utilizando como software de lectura la app de móvil Zeno Conect. También se examinó el tramo de halita principal en una de las minas abandonadas y se realizó la revisión y refinamiento de la cartografía preliminar, empleando ortoimágenes y modelos sombreados impresos a una escala de 1:3600.

Se llevaron a cabo 4 salidas de campo, una salida con el director Francisco Gutiérrez y el co-director Jorge Sevil y tres salidas individuales. La columna estratigráfica previa delineación de la misma en papel milimetrado, se representó mediante el software Adobe Ilustrador.

Para el análisis de los deslizamientos rotacionales de la zona de estudio, se realizó el análisis morfométrico de los mismos y se elaboraron 3 perfiles topográficos con la finalidad de tener una mejor estimación a partir de la media de los diferentes valores medidos. Cada perfil topográfico se exportó a Excel, para ajustar su escala, trazando el plano de rotura del deslizamiento considerando una geometría elipsoidal, este proceso tiene un amplio margen de error, por ello se realizaron varias medidas en los 3 perfiles topográficos del deslizamiento y se calculó la media de dichas medidas con la finalidad de tener una mejor estimación en los resultados.

Posteriormente se midieron los parámetros recogidos en el apartado 5 de resultados, mediante la aplicación ImageJ que permite escalar imágenes y calcular áreas y distancias gráficamente. Las mediciones de anchura, longitud y superficie de los movimientos de masa se realizaron con la herramienta “medir” de ARcGis. Los cálculos de la longitud de la masa deslizada, volumen de la masa deslizada, coeficiente de fricción y *travel angle*, se calcularon utilizando diversas fórmulas explicadas en el apartado de resultados.

Para finalizar se realizó una cartografía de detalle de la zona en la que se localizan los deslizamientos de mayores dimensiones, en las proximidades de la entrada a la mina abandonada de Mina Real. Esta cartografía se delineó mediante el software Adobe Illustrator

4.Contexto Geológico

La zona de estudio se localiza en la localidad de Remolinos, situada en la margen izquierda del Rio Ebro, a unos 35 km al NO de la ciudad de Zaragoza. La zona estudiada posee un área de 6,84 km², y alcanza un desnivel máximo, entre la llanura de inundación y el punto más alto de 285 m.

Desde el punto de vista geológico se localiza en el sector central de la Cuenca cenozoica del Ebro, la cual, corresponde a los últimos estadios de la cuenca de antepaís meridional del orógeno pirenaico (Riba et al., 1983).

Durante la etapa sedimentaria inicial Paleoceno-Eoceno, la cuenca estuvo abierta a transgresiones marinas con sedimentación continental y marina que tuvo lugar en condiciones exorreicas. En una segunda etapa de evolución sedimentaria durante el Eoceno superior, se produce aparece un estadio de regresión durante el que, se depositaron materiales evaporíticos en los ambientes marinos someros de las subcuencas de Navarra y Cataluña.

Después de este periodo, la Cuenca del Ebro dejó de estar ocupada por el mar y se convirtió en una cuenca endorreica. La erosión de las áreas circundantes afectadas por levantamiento tectónico proporcionaron aporte de detritos a la cuenca depositados como abanicos aluviales.

Estos abanicos aluviales daban paso distalmente a ambientes lacustres poco profundos con sedimentación evaporítica (playa-lakes) y carbonatada. La distribución paleogeografía de los sistemas lacustres fue controlada por la ubicación variable de los depocentros (Gutiérrez-Elorza y Gutiérrez-Santolalla, 1998).

Es a partir del Mioceno medio-superior, tras la captura de la cuenca por una primitivo Río Ebro y su paso al exorreísmo, cuando los materiales del relleno de la Cuenca del Ebro se van erosionando como consecuencia de la erosión fluvial. Es en esta etapa en la que se produce el desarrollo de la red de drenaje actual. En el área de estudio (círculo rojo marcado en la Figura 1), aflora la Formación Yesos de Zaragoza definida por Quirantes (1969), la cual se ubica en la parte central de la cuenca y se extiende de NO a SE, en una zona de unos 150 km de largo y 70 km de ancho. Esta formación presenta facies de yeso secundario nodular y laminado (derivado de la hidratación de anhidrita), intercalado con lutitas, alcanzando un espesor de varios cientos de metros (Salvany et al., 2007).

La zona de estudio se sitúa en la unidad tectosedimentaria 5 definida por (Pardo et al., 2004) (Figura 1).

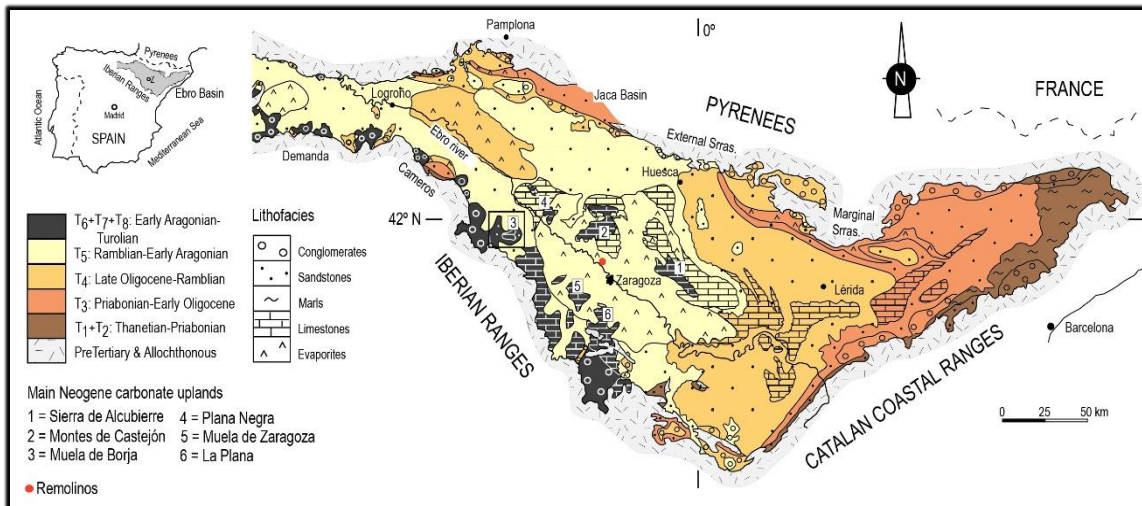


Figura 1. Mapa paleogeográfico de la Cuenca del Ebro, donde se muestra la distribución de ambientes clásticos, lacustres y unidades litoestratigráficas. En círculo rojo se localiza el área de estudio, aledaña a la localidad de Remolinos, modificado de Pardo et al. (2004).

4.1 Estratigrafía y estructura

En la zona de estudio alternan: (1) tramos evaporíticos depositados en sistemas de playa-lake en los que se depositan yesos, glauberita y halita; y (2) tramos lutíticos y margosos depositados en zonas distales de abanico aluvial y los márgenes del lago. La edad de estos sedimentos se sitúa en el periodo Aquitaniense-Vindoboniense (MAGNA, hoja 322), y presentan una disposición horizontal o con escaso buzamiento.

Para la realización del estudio de los deslizamientos se levantó una columna estratigráfica (Figura 2), definiendo 7 unidades litoestratigráficas con el objeto de relacionar los deslizamientos con las unidades litoestratigráficas. Las coordenadas expresadas como puntos en donde se tomaron los datos, aparecen en la cartografía general Anexo 1, así como un inventario de fotografías tomadas de cada tramo Anexo 3. Dichas unidades litoestratigráficas son:

-Unidad 1(U1, 8m): Tramo formado por estratos decimétricos de yesos nodulares. Base no aflorante

-Unidad 2(U2, 11.5m): Tramo formado por lutitas rojizas y margas con intercalaciones de yeso nodular. Se observan cristales tolvá de yeso reemplazando a la halita precursora.

-Unidad 3(U3, 25.3m): Tramo de yesos nodulares masivos. Hacia techo se observa en el interior de las minas un paquete de halita de al menos 6 metros de espesor.

-Unidad 4 (U4, 26.3m): Tramo de arcillas rojizas con un estrato de 4 metros de yeso nodular empleado como nivel guía. Presencia de eflorescencias como consecuencia de la disolución de sales, las cuales percolan a través de las capas de arcilla hacia la superficie.

-Unidad 5 (U5, 44.7m): Tramo formado por yesos nodulares con dos niveles de potencia métrica de calizas amarillentas

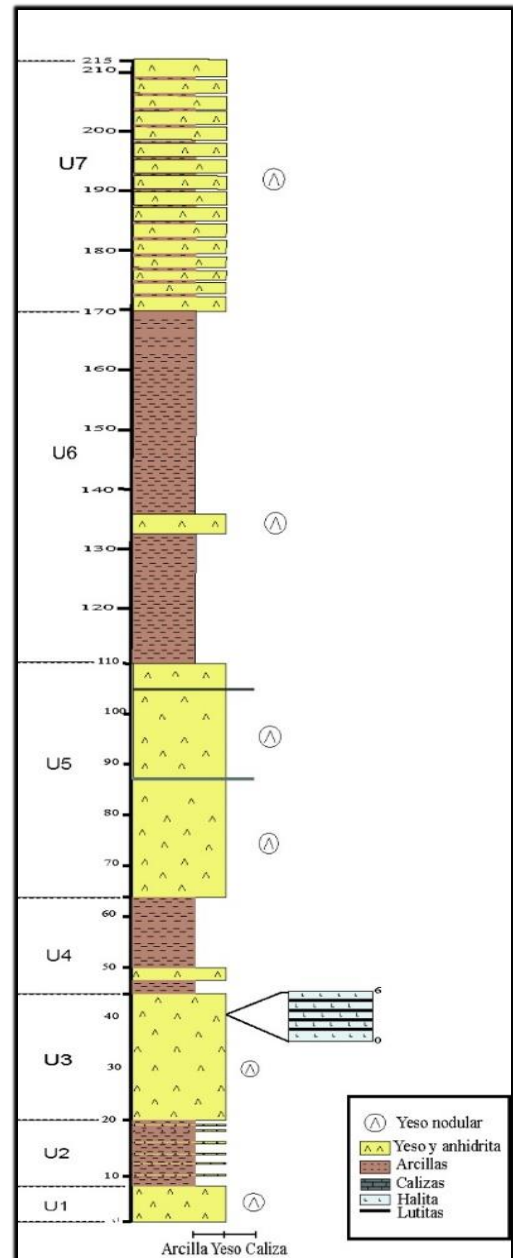


Figura 2. Columna estratigráfica levantada a pie de barranco, compuestas por 7 unidades litoestratigráficas.

-Unidad 6 (U6, 66m): Tramo formado por arcillas rojas y grisáceas con un estrato de 2 metros de yeso nodular, considerado como el segundo nivel guía.

-Unidad 7 (U7, 42.8m): Tramo compuesto por un alternancia de paquetes de yeso nodular y estratos de menor espesor de arcillas grises.

Referente a la estructura, la serie se dispone subhorizontal con ligeros buzamientos aparentes hacia el valle y hacia aguas abajo. Localmente aparecen estructuras de plegamiento disarmónicas con amplitudes métricas y longitudes decamétricas a hectométricas. Estas deformaciones, restringidas a las unidades situadas por encima del nivel salino, son atribuibles a la disolución diferencial de la sal y la subsidencia por flexión de los materiales suprayacentes.

4.2 Contexto Geomorfológico

Las características geomorfológicas de la zona son producto de la asimetría del valle del Río Ebro. Su migración lateral hacia el NE y su encajamiento ha dado lugar a un escarpe que se prolonga desde Remolinos hasta Osera de Ebro, a lo largo de unos 60 km. Este escarpe alcanza una altura de más de 100 metros y presenta una traza rectilínea con orientación NO-SE controlada por familias de diaclasas muy penetrativas (Lizaga et al., 2016). El margen derecho o sur del río Ebro muestra una secuencia escalonada de terrazas fluviales, mientras que el margen izquierdo o norte se sitúa el escarpe. Este escarpe sufre una acelerada erosión y rápido retroceso como consecuencia de la erosión lateral del Río Ebro y la escasa resistencia a la erosión mecánica y química de las evaporitas y arcillas de la Fm. Zaragoza. Este rápido retroceso está evidenciado por la presencia de facetas triangulares y valles colgados (Gutiérrez et al., 1994). Como consecuencia del encajamiento del valle y el rápido retroceso del escarpe, los barrancos laterales han experimentado una rápida incisión, generando sistemas de barrancos profundamente encajados con laderas muy abruptas. Por otra parte, el encajamiento eventualmente propicia la interacción del nivel de sal con el agua meteórica, produciéndose su disolución y la deformación de los materiales suprayacentes, según los datos aportados por (Gutiérrez y Gerrero.,2017).

5.Resultados

5.1 Descripción de la cartografía geomorfológica.

Las características geomorfológicas del área de estudio, como se ha denominado en el apartado de contexto geomorfológico 4.2 ,a lo largo de su evolución, el río Ebro, como consecuencia de su migración lateral, ha generado un escarpe, con rápido retroceso (Gutiérrez et al.,1994). Como resultado, se ha desarrollado una red de barrancos muy encajados, entre los que se encuentran el barranco de las Salinas y el barranco de Mina Real (Figura 3), siendo los que presentan una mayor cuenca de drenaje y mayor grado de encajamiento de la zona de estudio.

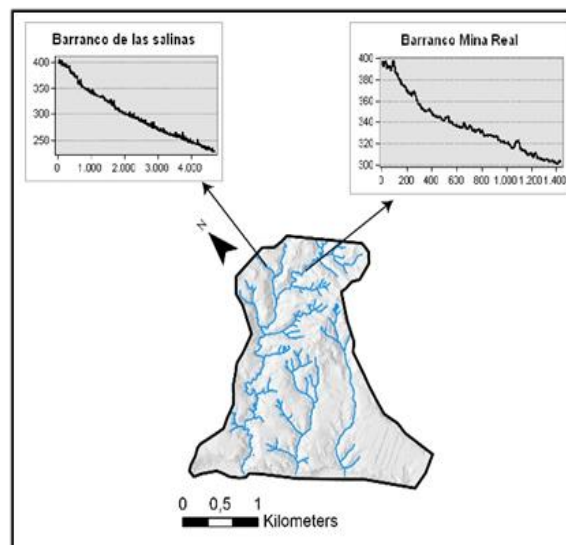


Figura 3. Perfiles longitudinales del barranco de las Salinas y barranco Mina Real

Esta gran incisión de la red de drenaje en forma de profundos barrancos, ha propiciado que el 85 % de los deslizamientos rotacionales se localicen en los márgenes de los barrancos de la Salinas y Mina Real.

Este mecanismo de erosión de los barrancos, es consecuente con las características litológicas, ya que, a partir del levantamiento de la columna estratigráfica (Figura 2), los tramos yesíferos forman taludes subverticales mientras que los segmentos de las laderas en tramos arcillosos muestran pendientes más tendidas, es decir, son laderas compuestas.

Los niveles de yeso más resistentes controlan el desarrollo de superficies estructurales por erosión diferencial. Las unidades situadas por encima del tramo de halita, localmente, presenta flexiones muy patentes atribuibles a la disolución diferencial de la sal y a la subsidencia dúctil de los materiales suprayacentes (Figura 4).



Figura 3. En trazo discontinuo rojo, nivel guía de la U4 ,como consecuencia de la disolución diferencial de la halita infrayacente.

Los tipos de movimientos de ladera que aparecen en la zona de estudio son:

-Vuelcos: Los vuelcos que aparecen en la zona se sitúan en la parte S del mapa, asociados al escarpe principal, donde los bloques de materiales yesíferos individualizados por fracturas sufren un cabeceo hacia el exterior de la ladera (Figura 4).



Figura 5. Vuelco asociado al escarpe principal yesífero, al pie del barranco principal en el pueblo de Remolinos.

-Desprendimientos: Afectan a las unidades yesíferas y están motivados principalmente por procesos de descalce relacionados con la erosión de los materiales lutíticos y margosos infrayacentes mas lábiles. En la mayoría de los casos estos desprendimientos se localizan en el propio cauce del barranco, entorpeciendo el curso fluvial (Figura 5). También se producen desprendimientos en las cicatrices abruptas de los grandes deslizamientos.



Figura 5. Desprendimientos asociados al descalce de los márgenes del barranco.

-Deslizamientos: Los deslizamientos son el tipo de movimiento de ladera más abundante en el área de estudio, siendo todos ellos rotacionales. En estos movimientos la masa deslizada se desplaza a través de un plano de rotura curvo y cóncavo. Este plano de rotura se horizontaliza en la parte inferior controlada por niveles arcillosos, adquiriendo una geometría lístrica. La masa deslizada experimenta un giro hacia el interior de la ladera (Figura 6).

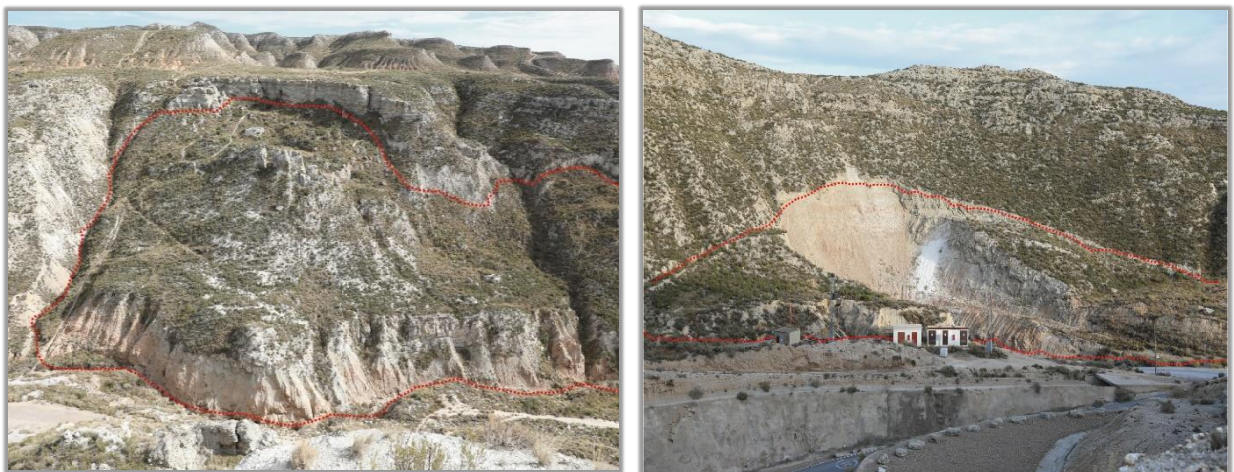


Figura 6. Deslizamientos rotacionales en la zona de estudio. De cara al estudio de los riesgos geológicos, los deslizamientos suponen, en el área de estudio, un riesgo para la actividad humana, en este caso, a la derecha, el deslizamiento en la entrada de la mina de María del Carmen.

El resto de la superficie del área de estudio se encuentra ocupada por grandes superficies estructurales con presencia de barrancos escasamente incididos.

5.2 Descripción general de los deslizamientos e inventario de deslizamientos

Las características litológicas del terreno, con la presencia de tramos arcillosos y el nivel de halita infrayacente altamente soluble han jugado un papel importante en el desarrollo de los deslizamientos rotacionales de la zona. Se elaboró una cartografía de detalles de los deslizamientos D12, D15, D16 y D17, recogida en Anexo 2 , donde se cartografiaron las características morfológicas de los deslizamientos rotacionales de la zona de estudio.

Estos deslizamientos rotacionales se caracterizan por tener roturas secundarias, que son planos de deslizamiento formados dentro de la masa deslizada. Como se ha denominado anteriormente, el plano de rotura se horizontaliza en profundidad, debido a roturas lítricas, las cuales, están controladas por los materiales blandos, arcillosos. Es posible que estas roturas secundarias estén relacionadas con la actividad de la red de drenaje, fundamentalmente en la zona del barranco principal, provoca la reactivación de los deslizamientos, apareciendo esta serie de roturas secundarias en el pie de los deslizamiento Este tipo de roturas se producen por la reactivación de las zonas del pie, debido a un efecto desestabilizador, posiblemente por procesos de socavación basal, es decir, descalces. También aparecen, aunque menos frecuentes, roturas colgadas.

En general, la morfología de los deslizamientos presenta una cicatriz en cabecera abrupta, donde al pie de esta es habitual la presencia de rellanos. Muy frecuentemente aparecen pequeños graben y grietas extensionales que en ocasiones se manifiestan en forma de grietas y fisuras o alineaciones de colapsos.

En la parte superior aparecen pequeños colapsos, a menudo alineados, relacionados con la erosión subsuperficial del suelo a favor de grietas extensionales infrayacentes. Referente al depósito, en ocasiones se aprecia como una masa coherente, con las capas buzando hacia el interior de la ladera,

aunque en gran parte de los casos se aprecia que la masa de los deslizamientos es una masa descompuesta, en forma de megabrecha. El perfil longitudinal de la masa deslizada tiende a ser convexo, sin embargo, en algunos casos, se presenta un perfil al pie de deslizamiento, cortado en bisel, debido a la erosión producida por el propio barranco.

En una perspectiva en planta, los deslizamientos suelen tener un límite distal convexo, poseen una forma en la mayoría de los casos ovalada y alargada en anchura. La distancia entre la cresta de la cicatriz y el límite proximal de la masa deslizada no suele presentar un amplio desplazamiento.

5.2.1 Estudio e interpretación del inventario de deslizamientos

Con el objeto de analizar cada uno de los deslizamientos rotacionales de la zona de estudio se elaboró un inventario de deslizamientos, el cual, recoge una serie de aspectos morfométricos para su análisis.

Se cartografiaron 20 deslizamientos rotacionales y, se calcularon los siguientes parámetros morfométricos como se muestran en la (Figura 7).

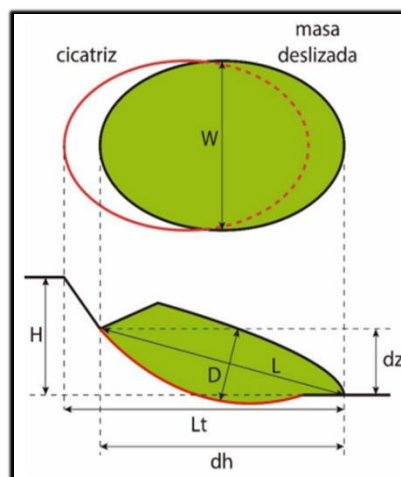


Figura 7. W:anchura de la masa deslizada; H:desnivel entre la cresta de la cicatriz de deslizamiento y el pie de la masa deslizada; dz: desnivel entre el límite superior de la masa deslizada y el pie de la masa deslizada; Lt: longitud horizontal entre la cicatriz principal del deslizamiento y el pie de la masa deslizada; dh: longitud horizontal entre los límites superior e inferior de la masa deslizada; L:longitud de la masa deslizada medida en 3 dimensiones; D: espesor de la masa deslizada, medido perpendicularmente a la longitud (L) de la masa deslizada. Tomado y modificado de Cruden y Varnes (1996).

Para el cálculo de la longitud de la masa deslizada (L), se aplicó la siguiente formula:

$$L = \sqrt{dh^2 + dz^2}$$

La estimación del volumen se realizó a partir del valor medio del área de los 3 perfiles topográficos de la masa deslizada, como se explica en el apartado de metodología. Así pues, se utilizó la formula:

$$V = Am \times W$$

Donde, V es el volumen estimado de la masa deslizada; Am: valor medio del área de la masa deslizada en los 3 perfiles topográficos; W: anchura de la masa deslizada.

Como se muestra en la Tabla 1 de inventario de deslizamientos, los datos arrojan que los deslizamientos poseen un rango de superficie que va desde los 0.02 ha a 3.68 ha (D17), con una media de 0.81 ha de superficie y una desviación estándar de 0.9. La anchura media de los deslizamientos es de 119 m con una desviación estándar de 89, siendo el deslizamiento D2 el de menor anchura con 27 m y el D17 con 422 m. Los deslizamientos alcanzan un desnivel H de 44,96 m como valor medio, variando desde los 7,26 m a los 70,15 m de desnivel entre la cabecera de deslizamiento y pie de la masa deslizada. Referente a la longitud en 3D de la masa deslizada, los cálculos arrojan que el deslizamiento con mayor longitud de la masa deslizada en 3D es el deslizamiento D15 con 145 m y el de menor longitud el D2 con 8 m. El cálculo del volumen estimado de la masa deslizada nos arroja un valor medio de 258.762 m³, con valores que van desde los 237 m³ como es el D2 y como valor máximo el D17 con 1.057.758 m³.

Se estimó el índice de movilidad de los deslizamientos a partir del coeficiente de fricción dado por la expresión:

$$\frac{H}{Lt}$$

Donde, H: desnivel entre la cresta de la cicatriz de deslizamiento y el pie de la masa deslizada ;Lt: longitud horizontal entre la cicatriz principal del deslizamiento y el pie de la masa deslizada

Y, el *travel angle*, el cual ,nos indica el grado de movilidad del movimiento en masa:

$$\arctg \frac{H}{Lt}$$

Los resultados obtenidos nos arrojan valores muy bajos, en torno a 0,60 como valor medio del coeficiente de fricción aparente y 30,17 ° de *travel angle*. Estos valores nos indican que los deslizamientos en la zona de estudio han sufrido muy poco desplazamiento. Todo ello, concuerda con la tipología de los deslizamientos y su contexto geomorfológico, desarrollados en barrancos con un fondo muy estrecho; los deslizamientos no tienen espacio para avanzar. El valor medio del *travel angle* es un valor alto de grados en relación a la movilidad de los deslizamientos del área de estudio, que indica poca movilidad del deslizamiento, esto concuerda con las características topográficas de la zona, con laderas muy escarpadas.

El criterio para la determinar la actividad de los deslizamientos, fueron las observaciones en campo la utilización del modelo sombreado, que nos permite determinar si una masa deslizada posee actividad o no. En función de la actividad de los deslizamientos el 85% se encuentran activos, esto es debido en mayor parte, a que las características litológicas del terreno y la rápida incisión de la red de drenaje, que junto con la fácil disolución de la halita infrayacente, provocan que los deslizamientos se encuentren activos o se reactiven con el paso del tiempo.

También, mediante la cartografía de las unidades litoestratigraficas (Anexo X) se observa que la mayoría de los deslizamientos afectan a las unidades 4 y 5, aunque en algunos casos, como es el D1 afecta a las unidades 2 y 3 y los deslizamientos D18 y D19, afectan a la unidad 6.

Por último, se observó que en general los deslizamientos no afectan a estructuras, aunque una bocamina de María del Carmen esté situada en un deslizamiento antiguo (D20), que se reactivó, como consecuencia de la excavación de dicha bocamina (Figura 6).

En relación con el cauce se encuentran deslizamientos que si están relacionados con la dinámica fluvial del barranco principal, en forma de descalces del pie de deslizamiento (Tabla 2).

Des	S (ha)	P (km)	W (m)	dh (m)	dz (m)	L (m)	D (m)	At (m ²)	H (m)	Lt (m)	V (m ³)	Cf	Ta (°)	U.A	Actividad	A.E	R.C
1	0,12	0,15	55,2	19,5	26,7	33,1	14,4	410,6	32,5	23,9	22671,1	1,4	53,7	2 y 3	Poca Actividad	No	Si
2	0,02	0,07	26,7	7,9	3,6	8,7	2,2	8,9	7,3	11,0	236,9	0,7	33,4	4 y 5	Activo	No	No
3	0,29	0,20	56,5	64,6	22,8	68,5	21,7	906,6	30,7	78,8	51258,0	0,4	21,3	4 y 5	Activo	No	No
4	0,38	0,25	86,0	49,0	34,7	60,0	27,2	1049,1	47,5	66,5	90241,0	0,7	35,5	4 y 5	Activo	No	Si
5	0,19	0,20	35,7	32,9	10,6	34,6	11,7	181,6	13,9	40,3	6480,9	0,3	19,1	4 y 5	Activo	No	No
6	0,39	0,24	78,8	60,9	22,4	64,9	23,1	691,4	33,6	77,7	54459,1	0,4	23,4	4 y 5	Poca Actividad	No	No
7	0,58	0,38	140,3	40,8	45,4	61,0	33,3	1971,7	49,0	77,7	276645,6	0,6	32,2	4 y 5	Poca Actividad	No	Si
8	1,41	0,53	168,1	110,4	59,0	125,2	53,3	3418,8	62,8	123,6	574589,3	0,5	26,9	4 y 5	Activo	No	Si
9	0,35	0,26	81,9	75,0	27,4	79,8	24,1	1132,7	29,3	84,2	92756,1	0,3	19,2	4 y 5	Activo	No	Si
10	0,95	0,35	147,2	76,4	37,6	85,2	30,8	1574,2	46,7	87,0	231678,4	0,5	28,2	4 y 5	Activo	No	No
11	0,58	0,35	124,4	73,1	39,5	83,1	24,5	1650,3	53,5	75,8	205348,3	0,7	35,2	4 y 5	Activo	No	Si
12	1,82	0,58	187,0	125,5	60,0	139,1	56,2	5113,8	77,1	153,4	956021,4	0,5	26,7	4 y 5	Activo	No	Si
13	0,87	0,38	111,8	93,0	60,1	110,7	44,0	2655,9	68,3	104,1	296952,8	0,7	33,3	4 y 5	Activo	No	Si
14	0,37	0,25	58,9	69,8	55,4	89,1	40,4	2485,7	64,2	78,2	146335,8	0,8	39,4	4 y 5	Activo	No	No
15	2,43	0,68	230,8	129,5	66,9	145,8	53,1	3597,4	70,2	131,1	830139,0	0,5	28,2	4 y 5	Activo	No	Si
16	0,23	0,19	61,1	44,8	32,3	55,3	17,5	523,3	47,3	53,2	31969,4	0,9	41,6	4 y 5	Activo	No	No
17	3,68	0,98	421,7	98,2	56,3	113,2	49,7	2508,4	58,3	109,4	1057758,8	0,5	28,1	4 y 5	Activo	Si	No
18	0,32	0,23	87,6	40,8	25,9	48,3	23,9	734,9	38,9	52,1	64384,7	0,7	36,7	6	Activo	No	No
19	0,46	0,26	74,1	87,2	29,2	91,9	34,3	1651,0	34,1	92,3	122290,9	0,4	20,3	6	Activo	No	No
20	0,73	0,35	141,5	77,3	30,9	83,3	16,9	445,5	34,3	88,7	63026,8	0,4	21,1	4 y 5	Activo	Si	No
Media	0,81	0,344076	118,758	68,8255	37,3409	79,03484	30,1	1635,5824	44,9645	80,442	258762,2183	0,6034109	30,1712				
D.E	0,906	0,210345	88,9846	32,9665	17,6202	35,720862	15,2014	1328,1265	18,59671	34,6605	327825,2394	0,2397712	8,80422				

Tabla 1. Inventario de deslizamientos. Des: deslizamiento; S: superficie del deslizamiento; P: perímetro del deslizamiento; W: anchura de la masa deslizada; dh: longitud horizontal entre la cabecera y el pie de la masa deslizada; dz: desnivel entre la cabecera de la masa deslizada y el pie de la masa deslizada; L: longitud de la masa deslizada medida en 3D, desde el punto superior y el pie de la masa deslizada; D: Profundidad de la masa deslizada medida perpendicularmente a L; At: Área media de la sección transversal de la masa deslizada a partir de 3 perfiles topográficos; H: Desnivel entre la creta de la cicatriz y el pie; Lt: Distancia entre las creta de la cicatriz y el pie; V: volumen estimado de la masa deslizada; Cf: coeficiente de fricción; Ta: travel angle.

7. Discussion

The detailed cartographic landslide inventory indicates that most of the rotational landslides are located in the NW zone of the study area, where they display a clear cluster. Rotational landslides account for 25% of the total surface of the study area. Rough volume estimates reveal that some movements reach around 1 million cubic meters, indicating that this process constitutes a significant potential hazard. The lithostratigraphic study, based on the construction of a stratigraphic section (Figure 2), has defined 7 units, in which competent gypsiferous units alternate with softer clayey packages. One of the gypsum units include a concealed halite unit over 6 m thick, which has been dissolved near the surface and is observable in several abandoned mines. These lithological characteristics are an intrinsic factor that conditions the development of rotational landslides. The presence of the halite level below the clayey materials plays a very important role, since its dissolution near the surface has favored the deformation and weakening of the overlying material.

As described in the geomorphological context, the high relief related to the deeply entrenched drainages are another very important factor for the development of slope movements, increasing the topography towards the area of salina's ravine, in the general cartography (Annex X). This increase of the topography in the western zone of the study area is directly related to the enclosure of the drainage network, in the form of very steep ravines, with very abrupt and steep slopes. The halite and its dissolution does not necessarily control the rupture plane of the landslides, although it does favor instability. In the areas close to the ravines, where there has been a very rapid incision, the halite has dissolved quickly, most of the rotational landslides in the study area are located, as well as landslides due to landslides in the ravine itself.

Therefore, it has been interpreted that the lithological and geomorphological characteristics and the presence of the halite level have been the most important conditioning factors for the development of the rotational landslides. These landslides show limited displacement due to the type of failure mechanism and the geometry of the valleys, with narrow floors. , The foot of some landslides are affected by fluvial erosion, locally inducing the development of secondary failures.

8. Conclusion

The rotational landslides in the study area are characterized by not very large landslides, with a lot of activity, with the presence in most cases of secondary breaks and with little displacement, due to the fact that the gully itself acts as a contingency for the sliding mass, eroding the foot of the landslides and causing landslides in some cases.

The geomorphological characteristics of the study area present very steep ravines, with very steep slopes in the westernmost area, together with the fact that the lithostratigraphic study presents very unstable lithologies to the triggering of slope movements, such as gypsiferous and clayey materials, with a level of main halite underlying these that causes great instability due to dissolution processes. Through the entrance to an abandoned mine, it was observed that the halite level was not right at the contact between unit 3 and 4, in the upper part of the gypsum-dominated unit 3. The general mapping shows that the landslides are grouped on the western margin in areas where the gully is highly incised and in areas where the topography increases. It was also observed that in most cases, 85% of the rotational landslides affected units 4 and 5:

(1) Large drainage network wedging, through the gully system, (2) Unit 4 of clayey and soft materials, and unit 5 of more resistant gypsiferous materials. (3) Halite level with high dissolution power. It is probably the lithology and the dissolution of the halite that condition the rotational landslides, causing or favoring the instability of the materials. From a geological risk point of view, it was observed that the entrances to the mine were located in unit 4 and that the landslides that occurred, as in the example of the Maria del Carmen mine, were affected by units 4 and 5.

9. Agradecimientos

Especial agradecimiento a Francisco Gutiérrez, director de este TFG, ya que sin él no hubiera sido posible llevar a cabo el desarrollo de este trabajo, al co-director, Jorge Sevil, por ayudarme en todo momentos con las herramientas GIS, a Concha Arenas, por proporcionarme ilustraciones para el contexto geológico y a Esra y Argin por acompañarme al campo junto a Francho y Jorge.

10. Bibliografía

Adobe Illustrator (versión 16.0.3.691) (Software) (2016). Recuperado de:

<https://www.adobe.com/es/products/illustrator/free-trial-download.html>

ArcGIS desktop (versión 10.7.1) (Software). Recuperado de:

<https://sicuz.unizar.es/soporte-equipamiento-puesto-de-trabajo/gestion-de-software-corporativo/arcgis>

ArcGIS pro (versión 10.7.1) (Software). Recuperado de:

<https://sicuz.unizar.es/soporte-equipamiento-puesto-de-trabajo/gestion-de-software-corporativo/arcgis>

ImageJ (versión 1.53) (Software). Recuperado de:

<https://imagej.nih.gov/ij/download.html>

Anadon, P., (1978): El Paleógeno continental anterior a la transgresión abiarritziensen (Eoceno medio) entre 10s rios Gail y Ripoll (Provincias de Tarragona y Barcelona).Estudios Geol., 34: 431-440.

Anadon, P., Cabrera, L., Coldeforns, B. y Saez, A., (1989): Los sistemas lacustres del Eoceno superior y Oligoceno del sector oriental de la Cuenca del Ebro. In: P. Anadón y L1. Cabrera, eds.: Sistemas lacustres cenozoicos de España. Acta Geol. Hispanica, 24: 205-230.

Anadon, P ., Cabrera, L ., Roca,E ., (1989): Contexto estructural y paleogeografico de los sistemas lacustres cenozoicos en España. Acta Geologica Hispanica, v.24,nº 3-4,. 167-184

Ayala, FJ. Olcina., Vilaploma, JM (2004). Impacto social de los riesgos naturales en España en el periodo 1990-200 (II).Gerencia de riesgos XXI: 17-29

Bonachea, J., Bruschi, V., Fernandez-Maroto, G., Renondo, J., Gonzalez-Diez, A., Diaz de Teran, JR., Cendredo,V (2014): Geomorphyc Hazards in Spain. En: Landscapes an Landforms in Spain (F.Gutierrez y Gutierrez.M, eds). Springer, University of Zaragoza, Zaragoza, 319-337

COLOMBO, F., 1986: Estratigrafia y sedimentologia del Paleógeno continental del borde meridional occidental de los Catalánides (Provincia de Tarragona, España). Cuad. Geol. Ibérica, 10: 55-115.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report.

Quirantes, J .(1969) . Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de Los Monegros. Tesis Doctoral. Univ. de Granada. Publicado en 1978 por: Institucion “Fernando El Catolico” (CSIC). Diputacion Provincial de Zaragoza, 200 p.

Gutiérrez, F., Soldati, M., Audemard, F., Balteanu, D. (2010). Recent advances in landslide investigation: issues and perspectives. Geomorphology, 124, 95-101

Guerrero, J., Gutiérrez, F. (2017). Gypsum scarps and asymmetric fluvial valleys in evaporitic terrains. The role of river migration, landslides, karstification and lithology (Ebro River, NE Spain). Geomorphology, 297, 137-152.

La base de datos internacional de desastres OFDA / CRED. Universidad católica de Louvain. Bruselas. Disponible en:

<http://www.emdat.be/>.

MAGRAMA (2013). Ministerio de Agricultura, Alimentacion y Medio Ambiente. Disponible en:

<http://www.mapa.gob.es/es/>

Instituto Geológico y Minero de España (2021). Mapa geológico de España [Mapa]. 1:50.000. Hoja 322 (27-13) Remolinos.

Ortí, F. (1997): Evaporitic sedimentation in the south Pyrenean foredeeps and the Ebro basin during the Tertiary: a general view. En: Busson, G., Schreiber, B.Ch. (Eds.). *Sedimentary Deposition in Rift and Foreland Basins in France and Spain*. Columbia University Press. New York, USA. 319–334.

RIBA, O., REGUANT, S. y VILLENA, J., 1983: Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la Cuenca terciaria del Ebro. Libro Jubilar J.M. Ríos. *Geología de España*, 11: 131-159.

Salvany, J.M., Garcia-Veigas, J., Ortí, F., 2007. Glauberite-Halite association of the Zaragoza Gypsum Formation (lower Miocene, Ebro Basin, NE Spain). *Sedimentology* 54, 443-467

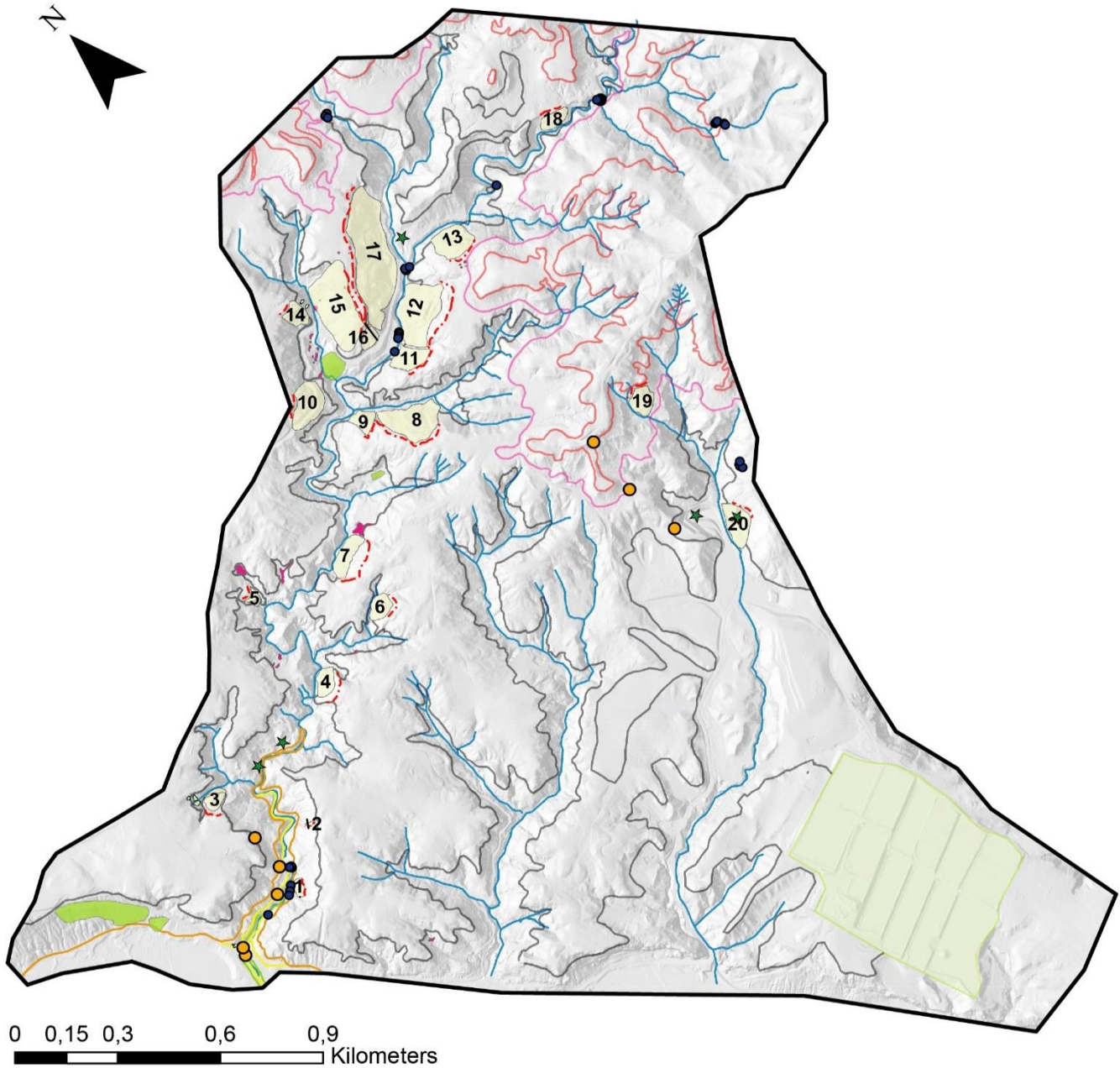
Anexos

Anexo 1: Cartografía General

Anexo 2: Cartografía de detalle de los deslizamientos D12, D15, D16, D17

Anexo 3: Inventario fotográfico de los tramos de la columna estratigráfica

Cartografía de deslizamientos y otros movimientos de ladera en el entorno de las minas de sal de Remolinos



Leyenda

Movimientos de ladera

	Deslizamientos y número de deslizamiento
	Rock falls o caída de bloques
	Colapsos
	Vuelcos
	Cresta de deslizamiento

Estratigrafía

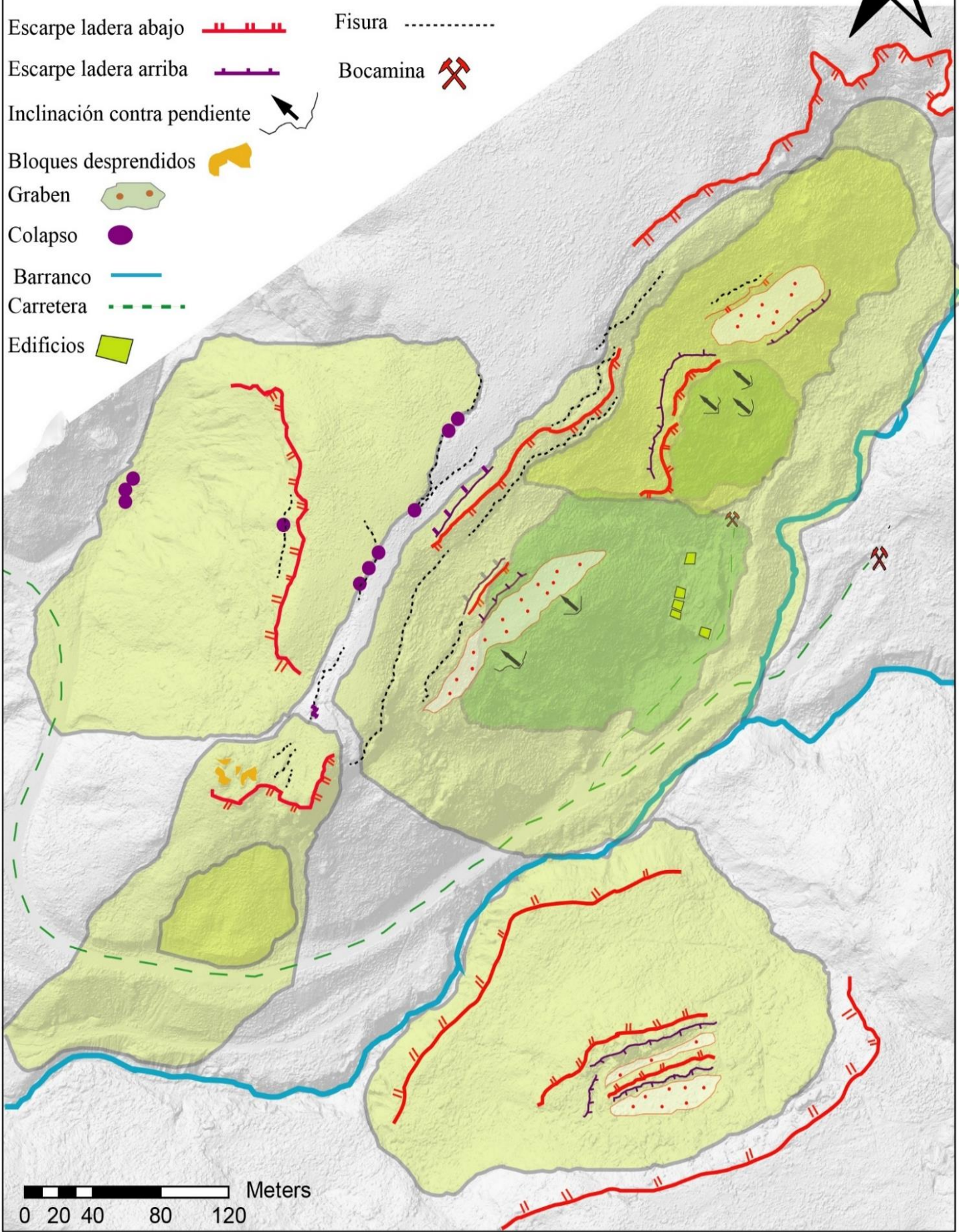
	Toma de datos gps diferencial en cada tramo
	Contacto entre techo de U1 y base de U2
	Contacto entre techo de U2 y base de U3
	Contacto entre techo de U3 y base de U4
	Contacto entre techo de U4 y base de U5
	Contacto entre techo de U5 y base de U6
	Contacto entre techo de U6 y base de U7

	Mina
	Piscinas de evaporación
	Relleno artificial
	Red de drenaje

LEYENDA



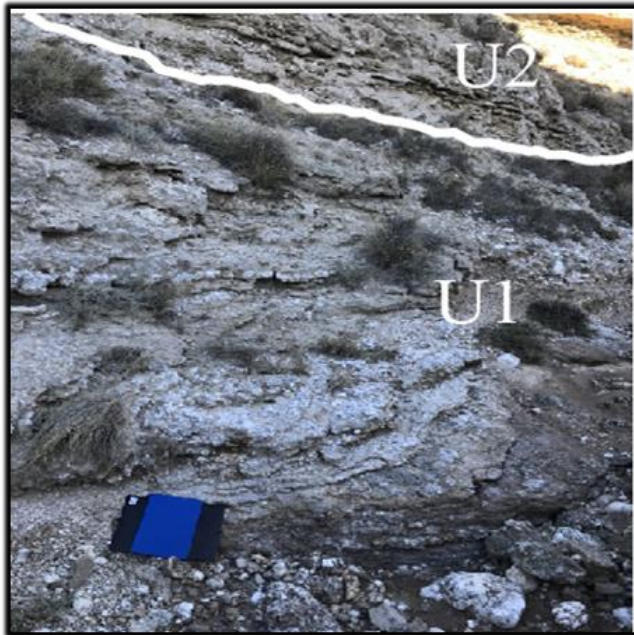
- Limite masa deslizada 
- Masa deslizada secundaria 
- Escarpe ladera abajo 
- Escarpe ladera arriba 
- Inclinación contra pendiente 
- Bloques desprendidos 
- Graben 
- Colapso 
- Barranco 
- Carretera 
- Edificios 
- Fisura 
- Bocamina 



0 20 40 80 120 Meters

Anexo 3. Inventario fotográfico de los tramos de la columna estratigráfica

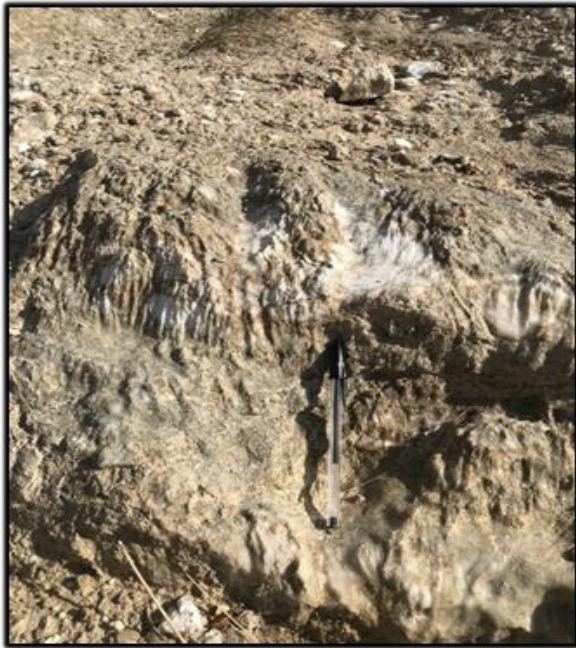
Tramo 1:



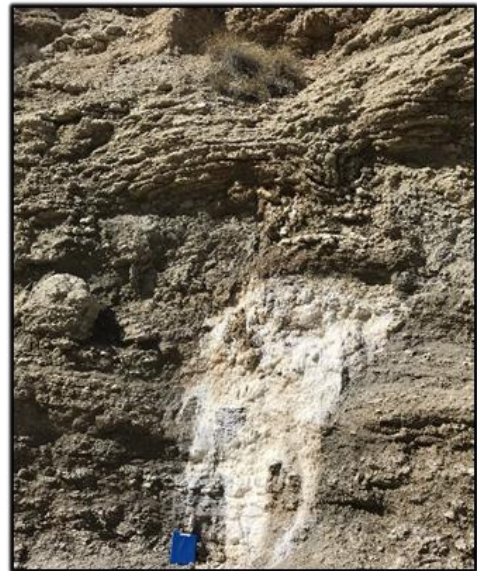
Tramos 2:



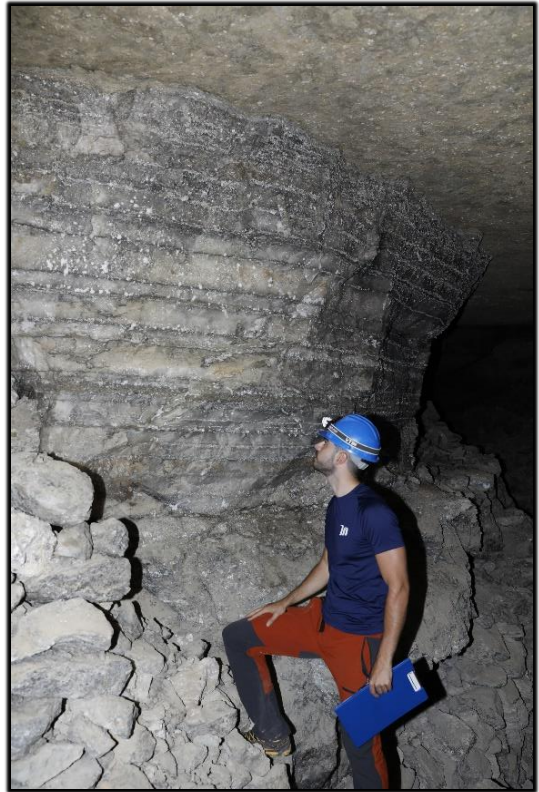
Tramo 3:



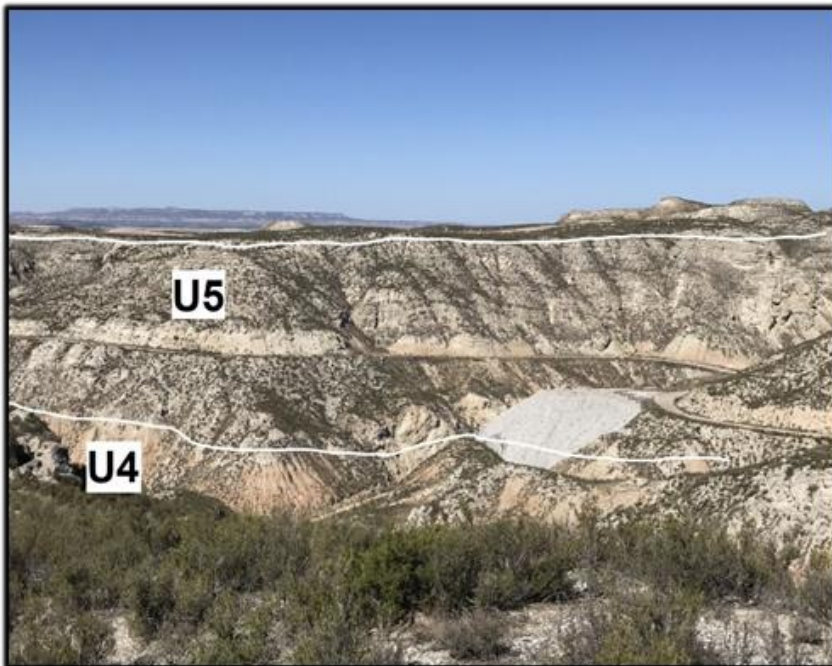
Tramo 4:



Nivel de Halita principal:



Tramo 5:



Tramo 6:



Tramo 7:

