



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
GEOLÓGICA**

Curso 2023-2024

Reactivación de grandes deslizamientos por terremotos:
El deslizamiento co-sísmico de Güevéjar (Granada,
España)

*Reactivation of large earthquake-induced landslides:
The co-seismic landslide of Güevejar (Granada, Spain)*

JEAN POOL PAZ HUAMÁN

TUTOR/ES DEL TRABAJO: MARTÍN JESÚS RODRÍGUEZ PECES

JULIO GARZÓN ROCA



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
GEOLÓGICA**

Curso 2023-2024

Reactivación de grandes deslizamientos por terremotos:
El deslizamiento co-sísmico de Güevéjar (Granada,
España)

*Reactivation of large earthquake-induced landslides:
The co-seismic landslide of Güevejar (Granada, Spain)*

JEAN POOL PAZ HUAMÁN

TUTOR/ES DEL TRABAJO:

MARTÍN JESÚS RODRÍGUEZ PECES

JULIO GARZÓN ROCA

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Jean Pool Paz Huamán con DNI 02782304V, estudiante de Máster Ingeniería Geológica en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023-2024 , como autor/a del trabajo de fin de máster titulado Reactivación de grandes deslizamientos por terremotos: El deslizamiento co-sísmico de Güevéjar (Granada, España) y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Martín Jesús Rodríguez Peces y Julio Garzón Roca.

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Asimismo, declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 30 de Julio de 2024

Fdo.:

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento hacia mis padres Hortencia Huamán García y Lee Marvin Paz Collazos, por su amor incondicional, apoyo constante y grandes sacrificios a lo largo de este proceso. Su apoyo y confianza en mí han sido una fuente de inspiración y fortaleza a lo largo de mi vida académica y profesional. Gracias por estar siempre a mi lado, y por creer siempre en mi y mis hermanos.

De la misma manera, quisiera agradecer a mis tutores de tesis, el Dr. Martín Jesús Rodríguez Peces y Julio Garzón Roca, por su orientación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos profundos y dedicación han sido fundamentales para el avance y éxito de este proyecto. Estoy profundamente agradecido por compartir sus experiencias y sabidurías.

Asimismo, deseo expresar mi gratitud a mis compañeros del máster 2023/2024, por su compañerismo y colaboración a lo largo de este viaje académico. Sus ideas, debates y momentos filosóficos han apoyado y enriquecido mi experiencia siendo una parte importante de este proceso. Aprecio mucho las horas compartidas, las convivencias, el trabajo de equipo y sobre todo la amistad que hemos cultivado. Gracias por hacer de este camino algo más llevadero y memorable.

Finalmente, mi más sincero agradecimiento a mi compañera de vida Diana Stephany Zamora Diaz, por su amor incondicional y su apoyo constante. Su comprensión, paciencia y aliento han sido esenciales para superar los desafíos de este proyecto. Gracias por estar siempre a mi lado, brindándome la motivación para culminar este Máster, sobre todo en los momentos más intensos y cargados.

A todos ustedes, muchas gracias.

INDICE

1.	INTRODUCCION.....	1
2.	OBJETIVOS	4
3.	ANTECEDENTES	5
4.	EL DESLIZAMIENTO DE GÜEVÉJAR.....	10
	4.1. Ubicación.....	10
	4.2. Geología	11
	4.3. Hidrogeología	12
	4.4. Sismicidad	13
5.	METODOLOGIA.....	14
	5.1. Modelo Geológico	14
	5.2. Modelo Geotécnico	16
	5.3. Reconstrucción topográfica, geológica e hidrogeológica.....	18
	5.4. Análisis de estabilidad retrospectivo.....	18
	5.5. Previsión futura de una posible reactivación	20
6.	RESULTADOS.....	21
	6.1. Modelo Geológico	21
	6.2. Modelo Geotécnico	22
	6.3. Reconstrucción topográfica, geológica e hidrogeológica.....	23
	6.4. Análisis de estabilidad retrospectivo.....	24
	6.5. Previsión futura de una posible reactivación	29
7.	DISCUSIÓN.....	32
8.	CONCLUSIONES.....	35
9.	BIBLIOGRAFIA.....	37

RESUMEN

El estudio de inestabilidades de ladera provocadas por terremotos es una metodología que se encuentra actualmente en desarrollo. Con ella podemos comprender las condiciones sísmicas que generaron la inestabilidad, estimar la magnitud sísmica y la distancia epicentral de un nuevo sismo que genere una reactivación.

En este trabajo se ha estudiado el deslizamiento de Güevéjar provocado por el terremoto 1884, el cual tuvo como consecuencia la destrucción del antiguo pueblo de Güevéjar. De esta manera, poder predecir una posible reactivación de acuerdo con un nuevo evento sísmico cercano a la zona.

La metodología seguida para el estudio de este deslizamiento ha sido la recopilación de información geológica, hidrogeológica, sísmica y datos de estudios previos como ensayos de laboratorio y geofísica en la zona del deslizamiento. A partir de estos datos, se realizó un modelo geológico con el software Leapfrog, que nos sirvió de base para la migración al modelo geotécnico en el software Slide3. Se ha reconstruido la topografía a la correspondiente antes del terremoto, con la finalidad de calibrar el modelo geotécnico mediante un análisis de estabilidad retrospectivo. Posteriormente a la calibración del modelo geotécnico, se ha podido evaluar en las condiciones actuales, la aceleración mínima necesaria para desencadenar una reactivación del deslizamiento considerando la orientación de la fuente, y a partir de esta información poder calcular la magnitud momento del terremoto y su distancia epicentral mediante una ecuación de movimiento del terreno (GMPE).

Actualmente el deslizamiento se encuentra en condiciones estables, pero la ocurrencia de un sismo con $M_w > 2.8$ cuyo epicentro sea alrededor de (1km) respecto al deslizamiento, puede originar su reactivación. De acuerdo con las distancias epicentrales desde 10km a 60km, tenemos una magnitud $M_w = 3.7 - 6.8$ en los cuales es posible la reactivación del deslizamiento. En este rango de distancias se encuentran localizadas las fallas cuaternarias activas asociadas El Fargue-Jun, Atarfe, Santa Fe, Granada, Padul-Nigüelas y Albuñelas. Asimismo, los resultados indican que los sismos que se originen con una orientación de 60° a 210° respecto al deslizamiento, no provocarán una reactivación ya que se encuentran en sentido opuesto al deslizamiento.

1. INTRODUCCION

Los deslizamientos de grandes laderas representan uno de los fenómenos geológicos más complejos y destructivos que afectan a diversas regiones del mundo. Estos eventos involucran el desplazamiento de grandes masas de tierra, rocas y escombros debido a procesos gravitacionales, pudiendo causar significativas pérdidas económicas, daños a infraestructuras, afectar a comunidades, alterar el paisaje natural y en algunos casos grandes pérdidas de vidas humanas (Figura 1). Entre algunos de los principales deslizamientos más grandes y devastadores de la historia se encuentran (Torrijo et al., 2022):

- Deslizamiento de Nevados Huascarán (Perú) en mayo de 1970, vidas perdidas aproximadamente 20 000 personas, un terremoto de magnitud 7.9 provocó el colapso de un glaciar del Huascarán, sepultando la ciudad de Yungay.
- Deslizamiento de Vargas (Venezuela) en diciembre de 1999, vidas perdidas aproximadamente entre 10 000 y 30 000, intensas lluvias provocaron deslizamientos en el estado de Vargas.
- Deslizamiento de Armero (Colombia) en noviembre de 1985, vidas perdidas aproximadamente 23 000 personas, la erupción del volcán Nevado del Ruiz provocó lahares que sepultaron la ciudad de Armero.
- Deslizamiento de Haiyuan (China) en diciembre de 1920, vidas perdidas aproximadamente 73 000, un terremoto de magnitud 7.3 provocaron deslizamientos.
- Deslizamiento de Diexi (China) en agosto de 1933, vidas perdidas aproximadamente 3000 personas.
- Deslizamiento de Khait (Tayikistan) en julio de 1949, vidas perdidas aproximadamente entre 12 000 y 28 000 personas, un terremoto de magnitud 7.5 provocó deslizamientos que destruyeron varias aldeas.



Figura 1: Deslizamiento de Vargas en Venezuela en 1999. El número de cifras de fallecidos alcanzan hasta las 30 000 muertes (El Universal, 2023).

En ese sentido, los estudios de deslizamientos son cruciales en el campo de la ingeniería geológica y la geotécnica, debido a su impacto significativo en la protección de vidas humanas, conservación de infraestructuras y del medio ambiente. Los grandes movimientos a escala geológica son imposibles de controlar, y en estos casos las únicas medidas posibles son la prevención y las restricciones de su uso del territorio (González de Vallejo et. al, 2002).

Los grandes deslizamientos son causados por una variedad de factores que actúan solos o de forma simultánea, los cuales incluyen la geología del terreno, las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas, los eventos sísmicos y en algunos casos la intervención humana. Algunos de los principales deslizamientos catastrófico, como los ya mencionados, fueron desencadenados principalmente por la combinación de eventos sísmicos y la acumulación de lluvias torrenciales.

Estos grandes deslizamientos tienen la posibilidad de volverse activar y desplazarse nuevamente, generalmente bajo condiciones cambiantes del entorno. Estas reactivaciones pueden ser igual de peligrosas, o inclusive más, que los deslizamientos iniciales debido a la pérdida de la resistencia del terreno, modificación del sistema de drenaje, actividad sísmica posterior, y una falsa percepción de seguridad por parte de las comunidades aledañas. Un ejemplo de reactivación de deslizamiento producido por un sismo es el caso de Veracruz, El Salvador en 2001 (Garzón-Roca et al., 2024).

En el caso de España, una de las grandes reactivaciones es el deslizamiento de Güevéjar ocurrido durante el terremoto de Andalucía en diciembre de 1884. En este evento se experimentó grandes pérdidas y daños que acabaron con el antiguo pueblo de Güevéjar. Nuestra zona de estudio se encuentra en la provincia de Granada, en la cordillera Bética. Este lugar es determinado por una serie de condiciones geológicas y geotécnicas, entre las cuales cabe resaltar, la abundancia de zonas inestables y litologías susceptibles. Es una zona activa tectónicamente con sismicidad moderada producto de la colisión entre las placas Euroasiática y Africana. (Chacón et al., 2007).

Este trabajo se centra en el estudio de la inestabilidad de Güevéjar, con énfasis en predecir una posible reactivación asociado a un evento sísmico posterior. Para ello, se ha recopilado información geológica, sísmica e hidrogeológica con la finalidad de reproducir el ambiente en el cual transcurrió la inestabilidad mediante la metodología del “análisis retrospectivo”. Esta metodología consiste en modelizar el deslizamiento conociendo las características y mecanismos de inestabilidad (geometría, tipos de materiales, presiones hidrostáticas, sismos, etc.), y de esta manera obtener los parámetros resistentes correspondientes a la rotura (González de Vallejo et. al, 2002).

Con los parámetros de resistencia calibrados (cohesión y ángulo de fricción), se ha obtenido con la ayuda del software Slide3, las aceleraciones críticas que pueden provocar una reactivación en el deslizamiento. Las magnitudes y las distancias epicentrales de los sismos fueron calculado mediante una ecuación de movimiento del terreno: *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE) propuestas por Akkar et al. (2014).

La importancia de este estudio es brindar una nueva metodología de estudio de grandes deslizamientos históricos a través de modelos 3D, en el cual no ha habido herramientas instrumentales y se necesite reconstruir el pasado a base de interpretación. Con la finalidad de estudiar su posible reactivación y de esta manera proporcionar herramientas que permitan una mejor gestión de riesgos y planificación urbana. Adicionalmente, se pretende dar una base para la ampliación de estos estudios mediante otros programas de cálculos como elementos finitos y estudiar su comportamiento de tensiones y deformaciones.

A través de este análisis, se pretende ampliar una comprensión más profunda de los procesos que ocurrieron en Güevéjar y su posible reactivación a futuro. Actualmente, en el área del deslizamiento se puede observar la expansión del pueblo de Güevéjar, el cual compromete a nuevas infraestructuras, carreteras, y probablemente vidas humanas en el caso de una futura reactivación.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la posible reactivación del deslizamiento co-sísmico de Güevéjar (Granada, España) y establecer un marco metodológico para el estudio de otros grandes deslizamientos inducidos por terremotos.

Con la finalidad de poder realizar el objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una recopilación de los antecedentes bibliográficos sobre el deslizamiento de Güevéjar, así como del contexto geológico, geomorfológico, hidrogeológico y sísmico.
- Elaborar un modelo geológico usando el software Leapfrog del deslizamiento de Güevéjar, usando la información de ensayos geofísicos y el cartografiado de la zona.
- Elaborar un modelo geotécnico usando el software Slide3, utilizando los valores de los parámetros geotécnicos proporcionados por ensayos.
- Realizar una reconstrucción topográfica, geológica e hidrogeológica de la zona de Güevéjar previo al terremoto de 1884.
- Calibración del modelo geotécnico mediante un análisis retrospectivo de estabilidad del deslizamiento en las condiciones del terremoto de 1884, e identificación de los factores que han controlado el deslizamiento.
- Análisis de la previsión futura del deslizamiento, caracterizando los posibles sismos potencialmente desestabilizadores con sus respectivas orientaciones y distancias epicentrales respecto al deslizamiento.

3. ANTECEDENTES

El deslizamiento de Güevéjar tuvo su origen en el terremoto de Lisboa en 1755, el cual tuvo una magnitud momento (Mw) de 8.5 y afectó a la provincia de Granada. Posteriormente, el deslizamiento fue nuevamente activado por el terremoto de Arenas del Rey de 1884, cuyo Mw fue de 6.5, involucrando la destrucción del antiguo pueblo de Güevéjar. (Rodríguez-Peces et al., 2011).

La zona del deslizamiento de Güevéjar se encuentra con diversos estudios de cartografiado geológico. Inicialmente podemos observar los estudios procedentes de la cartografía geológica oficial realizada por el Instituto Geológico y Minero de España IGME(1988). Tal como se muestra en la Figura 2, el deslizamiento de Güevéjar está con la denominación de “Depósito de laderas y derrubios generales” (código 56). Entre los materiales más antiguos encontramos una formación de arcillas grises, limos y arenas (código 43), posteriormente una capa de yesos masivos laminados con lutitas y carbonatos (código 44), y finalmente una formación de margas con niveles de lignito (código 45), pertenecientes a la edad Turolense.

En la edad Plioceno – Pleistoceno encontramos una formación de arcillas, limos rojos y conglomerados (código 48) extendiéndose hacia el norte, y una formación de margas y calizas oncolíticas (condigo 50) del Pleistoceno.

La interpretación de los materiales afectados producto del deslizamiento, fueron estudiados por Sanz (1992). Este autor elaboró una cartografía geológica simplificada del entorno del deslizamiento, así como un corte interpretativo (Figura 3) basado en sus observaciones superficiales. De acuerdo con su interpretación, en la base del deslizamiento se encuentran las margas grises del Turolense y sobre ellas se encuentran los limos rojos del Plioceno – Pleistoceno. Por lo tanto, el deslizamiento afecta principalmente a los limos rojos y se desplaza sobre las margas subyacentes.

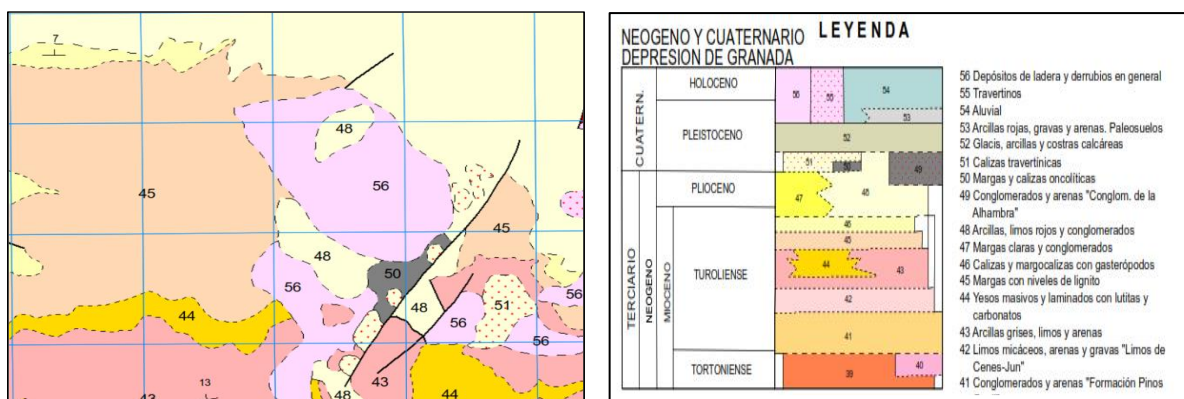


Figura 2: Extracto del Mapa Geológico de España. Imagen recuperada del IGME hoja 1009-Granada. (IGME, 1988)

Jiménez Pintor y Azor (2006) realizaron una nueva cartografía geológica de la zona, similar a la elaborada por el IGME(1988), pero con mayor detalle (Figura 4). También han propuesto un nuevo modelo para el deslizamiento, también basado en observaciones superficiales. De acuerdo con estos autores, los materiales afectados serían las margas grises y limos de edad Tortoniense, y los limos rojos de edad Turolense – Pleistoceno.

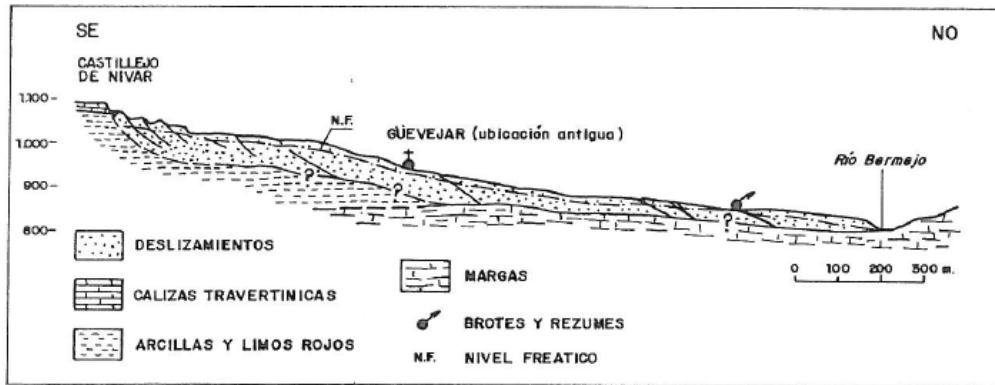


Figura 3 : Sección geológica interpretativa del deslizamiento de Güevéjar recuperado de Sanz(1992).

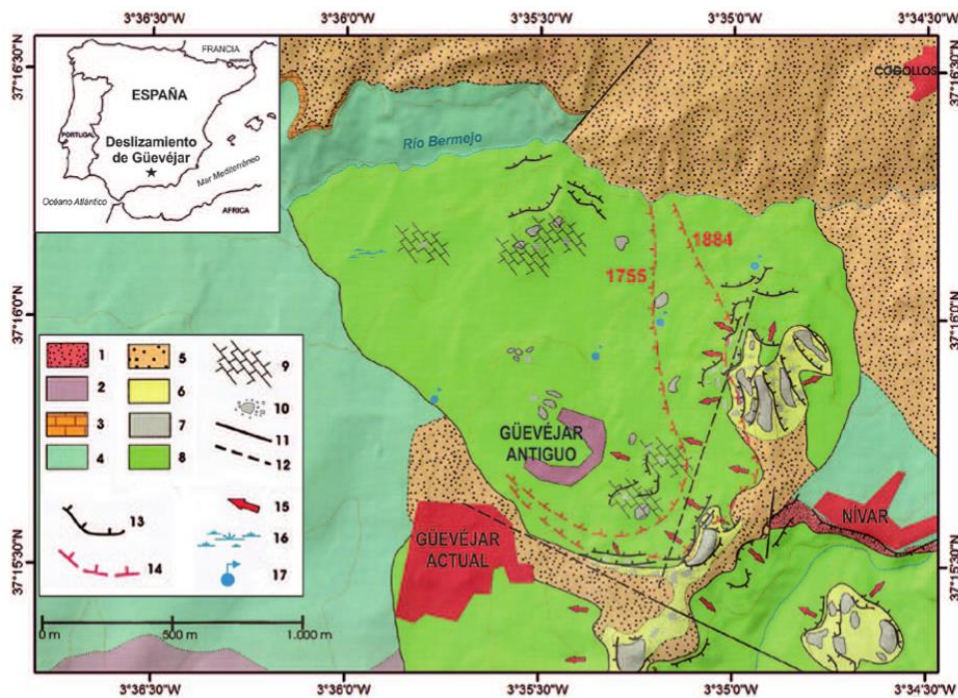


Figura 4: Cartografía geológica realizada por Jiménez Pintor y Azor (2006). (1) Arcillas grises, limos y arenas. (2) Yesos masivos y laminados con lutitas y carbonatos. (3) Margas con niveles de lignito. (4) Calizas y margocalizas con gasterópodos. (5) Arcillas, limos rojos y conglomerados. (6) Margas y calizas oncolíticas. (7) Calizas travertínicas. (8) Materiales deslizados indiferenciados. (9) Material deslizado con predominio de margas y calizas oncolíticas. (10) Bloques de calizas oncolíticas deslizados y/o desprendidos. (11) Falla. (12) Falla supuesta. (13) Escarpes. (14) Escarpes de cabecera durante los deslizamientos. (15) Contacto de masas deslizadas. (16) Zona endorreica. (17) Manantial.

Se ha realizado una cartografía geológica más actualizada del lugar por parte de la Universidad de Granada y Jaén (López Casado, s.f.). Para ello se ha utilizado fotografías aéreas y la escala de trabajo ha sido 1:5 000 (Figura 5). Han considerado que la base del entorno del deslizamiento se encuentra la formación de margas y limos grises del Mioceno Superior (Tortonense), aflorando alrededor del actual pueblo de Güevéjar y al E del cerro Castillejo.

Cercano al cerro Castillejo, se observaron afloramientos de la formación limos rojos del Mioceno Superior, el cual es un cambio lateral de las facies de margas y limos grises. Sobre estos materiales, afloran las calizas lacustres y conglomerados del Mioceno Superior. Hacia en NW del cerro Castillejo han cartografiado las arcillas rojas, arenas y conglomerados de edad Plioceno – Pleistoceno.

En setiembre de 2014 se desarrolló una exploración geotécnica para tener una primera aproximación de las características del suelo. Específicamente, fueron realizados dos sondeos de 60 m y 70 m aproximadamente por la empresa Geytex SL., a lo largo de la dirección principal del deslizamiento, donde antiguamente se encontraba el pueblo de Güevéjar.

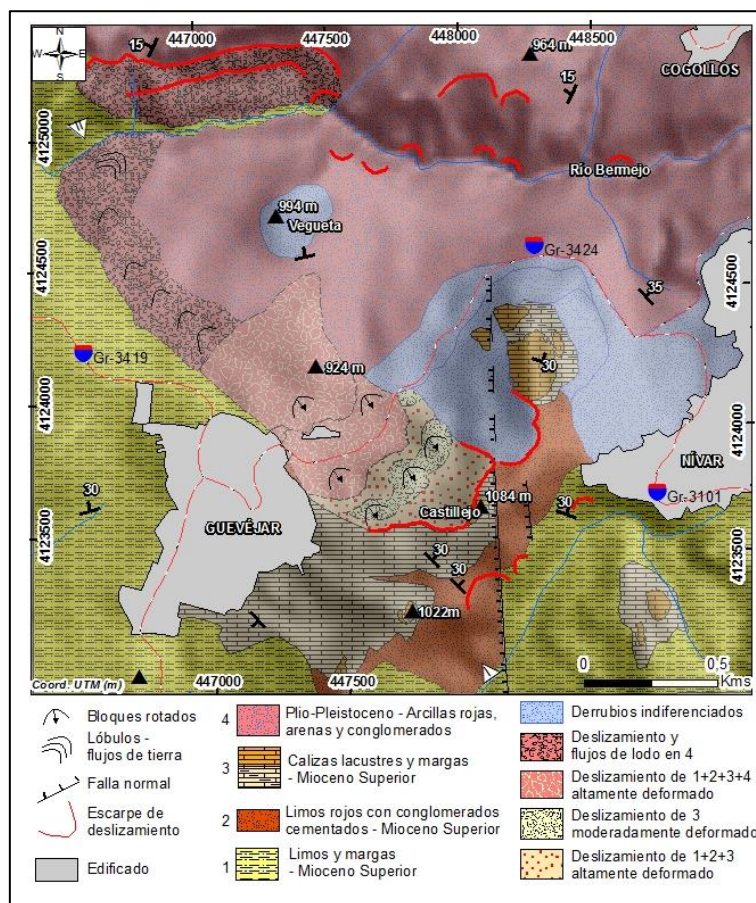


Figura 5: Cartografía geológica del deslizamiento de Güevéjar a escala 1:5000.

En la exploración geotécnica se realizaron ensayos para caracterizar el suelo centrándose en el material limoso del Mioceno Superior, ya que constituye la principal masa del deslizamiento. En los resultados obtenidos indican que el ángulo de fricción residual del material deslizado tiene un rango de 9° a 16 y que la cohesión residual es casi nula variando desde 8.6kPa a 26kPa (López Casado, s.f.).

También existe información de resultados de ensayos de laboratorio y ensayos in situ el cual caracteriza las propiedades geotécnicas del material (Rodríguez-Peces et al., 2011). Según estos autores, la formación margas con lignito presentan una cohesión de 43.3 kPa con ángulo de fricción de 15°, la formación de arcilla limos y conglomerados presenta una cohesión de 51.7kPa y ángulo de fricción de 22°, la formación de margas y calizas oncolíticas presentan una cohesión de 0 y ángulo de fricción de 41°, el material de los depósitos deslizados presenta una cohesión de 27.4kPa y ángulo de fricción de 25.

En marzo del 2019 se realizó una campaña geofísica de ondas superficiales con la finalidad de delimitar geoméricamente el área de deslizamiento. De esta manera, se tomaron 26 mediciones de ruido sísmico para delimitar la geometría del deslizamiento y su profundidad, generándose un perfil longitudinal (Figura 6) y dos perfiles transversales (Figura 7) que describen la superficie de deslizamiento (Delgado et al., 2021).

Respecto al terremoto de 1884, se sabe que fue uno de los últimos terremotos más importantes en la Península Ibérica y el más influyente en el deslizamiento de Güevéjar, presentando una intensidad de X (Muñoz y Udías, 1981). El epicentro del terremoto se localiza en el SW de la Cuenca de Granada, entre 41 y 55 km del deslizamiento, cerca del pueblo Arenas del Rey. La magnitud estimada para este evento oscila entre 6.5 y 6.8.(Muñoz y Udías, 1981; Martines Solares y Mezcuca, 2002).

El epicentro se estima tiene coordenadas de longitud -3.98° y latitud 36.95°, tuvo una intensidad epicentral de X, una magnitud momento (M_w) de 6.5 ± 0.3 y una intensidad local en Güevéjar de VII de acuerdo con los mapas de intensidad sísmica realizadas por Vidal(1986) .Aunque estudios recientes establecen que el terremoto de 1884 se relaciona con la rotura de la Falla de Ventas de Zafarraya (Reicherter et al.,2003).

La aceleración máxima (PGA) horizontal fue calculada mediante la correlación de Margottini et al. (1992) dando un valor medio es 0.149g, y el valor de la PGA en roca se calculó mediante las ecuaciones de predicción del movimiento (GMPE) obteniéndose un valor 0.043g (Rodríguez-Peces et al., 2011).

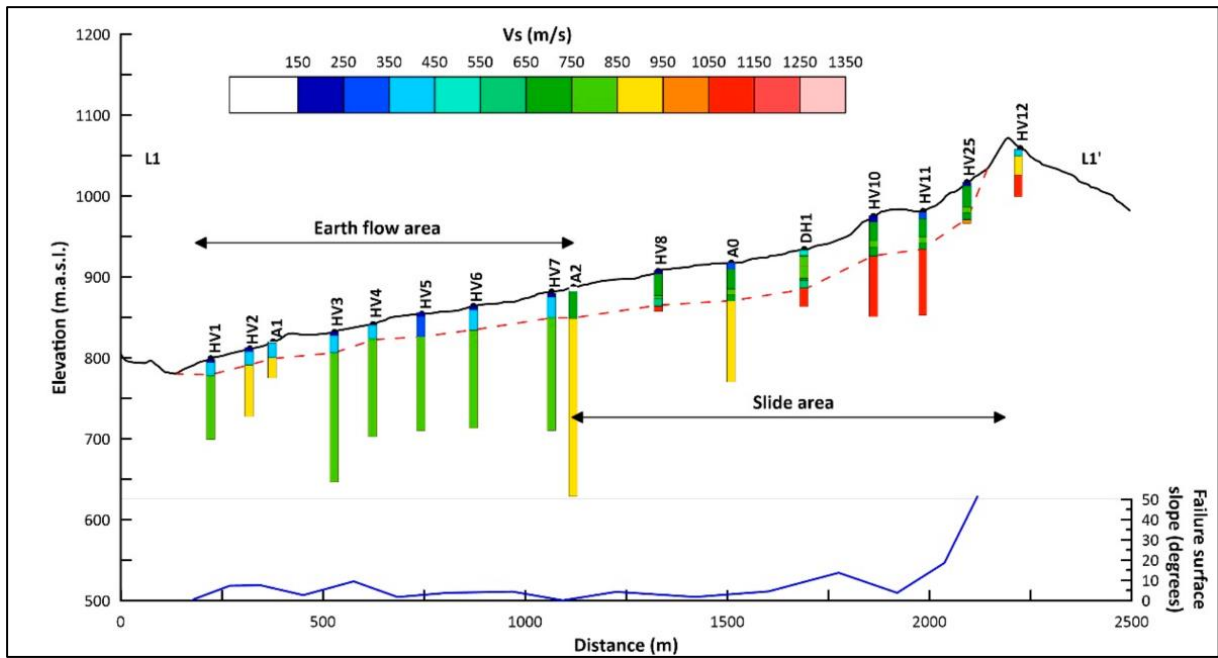


Figura 6: Sección longitudinal del deslizamiento, la línea roja indica la localización de la superficie de ruptura. Imagen recuperada de Delgado et al., 2021.

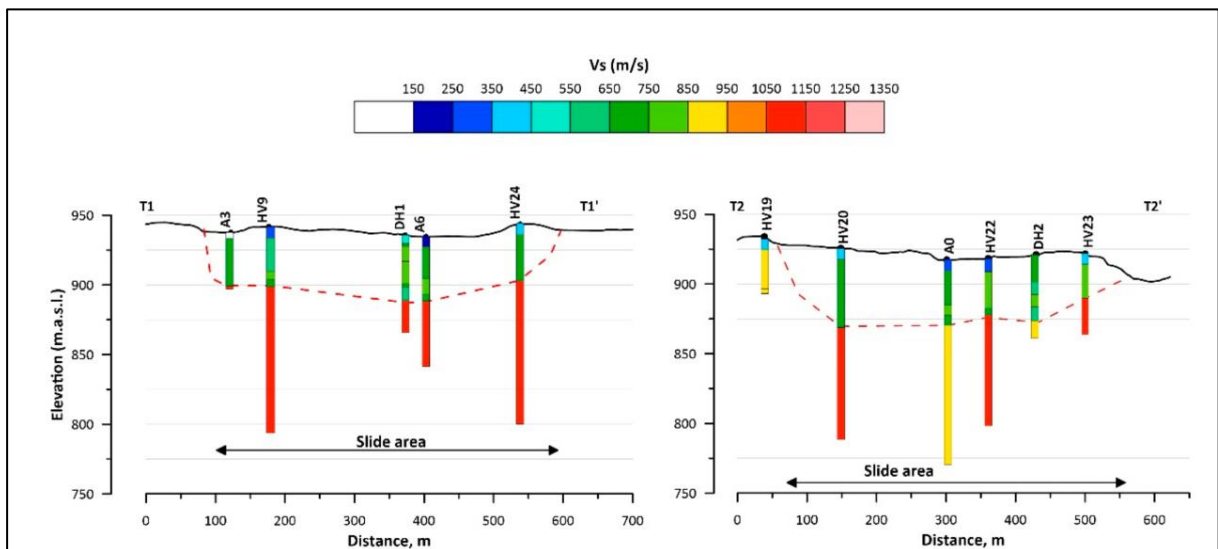


Figura 7: Secciones transversales del deslizamiento, la línea roja indica la localización de la superficie de ruptura. Imagen recuperada de Delgado et al., 2021.

4. EL DESLIZAMIENTO DE GÜEVÉJAR

4.1. Ubicación

El deslizamiento de Güevéjar se encuentra al sureste de España, en el municipio de Güevéjar a unos 10km al norte de la ciudad de Granada, perteneciente a la comunidad autónoma de Andalucía. La zona afectada se encuentra ubicada específicamente en las coordenadas geográficas aproximadas de latitud 37.25° N y longitud 3.62° O, situado en el borde oriental de la Cuenca de Granada y ubicada en el sector central de la Cordillera Bética, lo cual compone su compleja geología. La masa deslizada se compone principalmente de suelo y roca blanda, siendo desplazada sobre el antiguo pueblo de Güevéjar.

La cabecera del deslizamiento de Güevéjar se sitúa al W de la cumbre del cerro Castillejo de Nívar, a unos 1075 m.s.n.m. . El deslizamiento tiene una longitud aproximada de 2000 m, un desnivel de unos 250 m, el pie del deslizamiento coincide con el río Bermejo tal como se muestra en la Figura 8.

El clima de la región es mediterráneo, con veranos calurosos y secos e inviernos con temperaturas frías y heladas, donde la diferencia entre la temperatura mínima y máxima puede alcanzar los 20°. La precipitación anual varía, las lluvias se concentran principalmente en invierno y es suficiente para influir en la saturación del suelo, un factor clave en la estabilidad de las laderas.

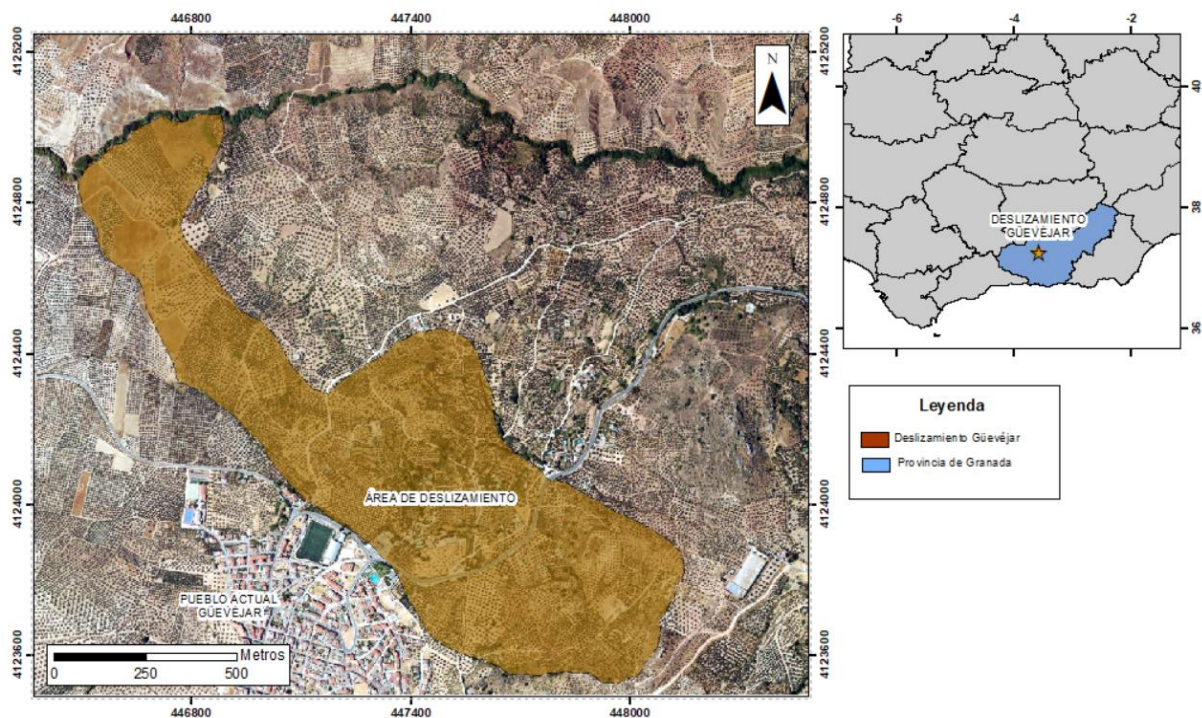


Figura 8: Mapa de ubicación local y regional del deslizamiento de Güevéjar.

4.2. Geología

El deslizamiento afecta materiales del relleno sedimentario de la cuenca Neógena de Granada. La geología local se describe de manera estratigráfica de muro a techo (Figura 9). Tenemos inicialmente, depositado en un ambiente sedimentario marino, una formación de margas y limos grises del Mioceno Superior (unidad MU). Esta formación tiene más de 100m de espesor y muestra una transición entre los limos y las margas grises, siendo esta última la más frecuente en la zona oeste del área del deslizamiento (Delgado et al., 2021).

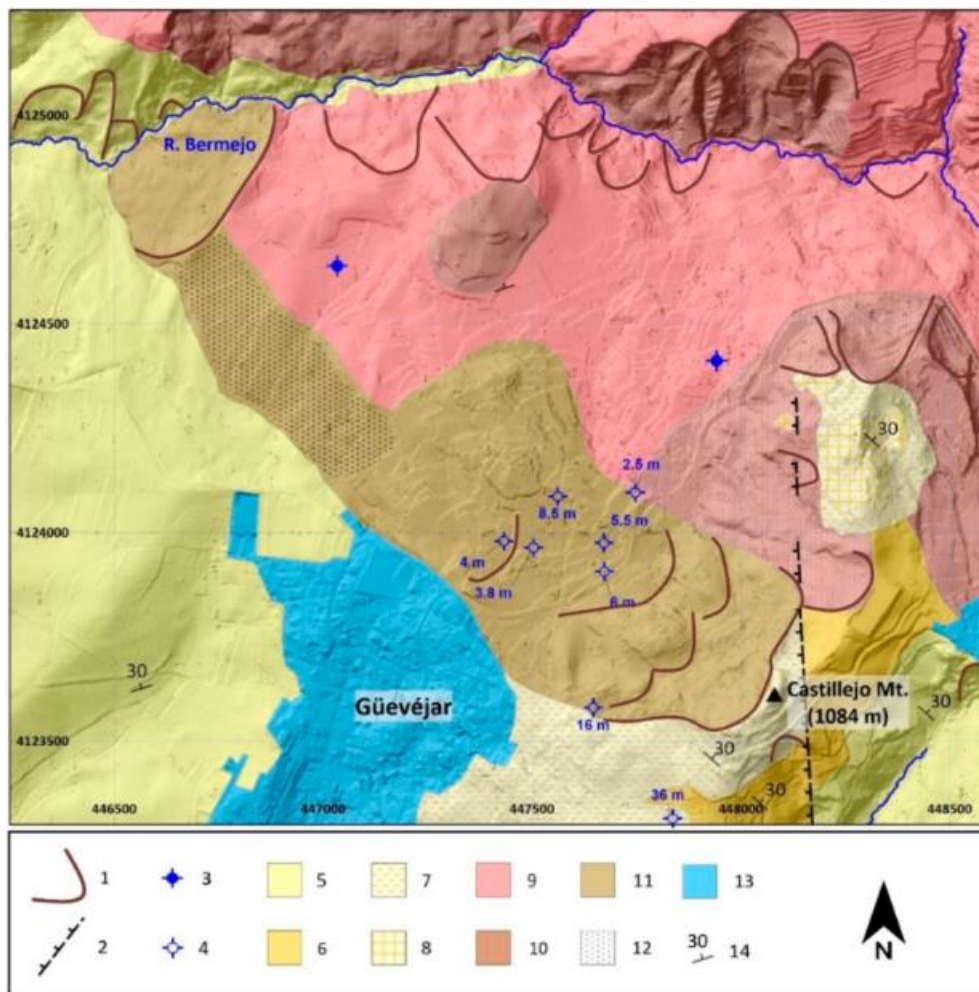


Figura 9 : Mapa geológico del área del deslizamiento recuperado de Delgado et al., 2021. (1) Escarpe , (2) Fallas, (3) Surgencia de agua, (4) Puntos de sondajes y medidas de nivel freático, (5) Unidad MU, (6) Unidad RSU, (7) Unidad MLU – margas, (8) Unidad MLU -Calizas, (9) Unidad RRD, (10) Otros deslizamientos, (11) Deslizamiento Güevéjar, (12) Flujo de tierra en el deslizamiento Güevéjar, (13) Zonas urbanas, (14) Buzamiento y dirección de estratificación.

En este mismo ambiente sedimentario, se depositó una segunda formación constituida de limos rojos intercaladas con algunas capas de arcillas, arenas y conglomerados cementados pertenecientes al Mioceno Superior (unidad RSU).

Sobre estas formaciones se depositan, en un ambiente continental, una formación de margas (margocalizas) y calizas lacustrinas también del Mioceno Superior (unidad MLU), las calizas se encuentran principalmente en la cima del cerro Castillejo, y bloques caídos de gran tamaño de calizas sobre la unidad RSU se pueden encontrar en la mitad superior del deslizamiento. Finalmente, una formación de arcillas rojas, arenas y conglomerados se encuentran en la parte nororiental del deslizamiento de la edad Plioceno-Pleistoceno (unidad RRD). La zona también es caracterizada por la presencia de otros deslizamientos ocurridos en los límites laterales (Delgado et al., 2021).

4.3. Hidrogeología

La comprensión de la dinámica del agua subterránea es muy importante para la evaluación de los deslizamientos. De acuerdo con el IGME, la zona del deslizamiento de Güevéjar se clasifica como IIA, donde presentan formaciones detríticas y cuaternarias de permeabilidad alta (Figura 10). El nivel freático se encuentra a poca profundidad lo que llevar a la saturación del suelo y aumento de presión de poros en las capas más profundas.

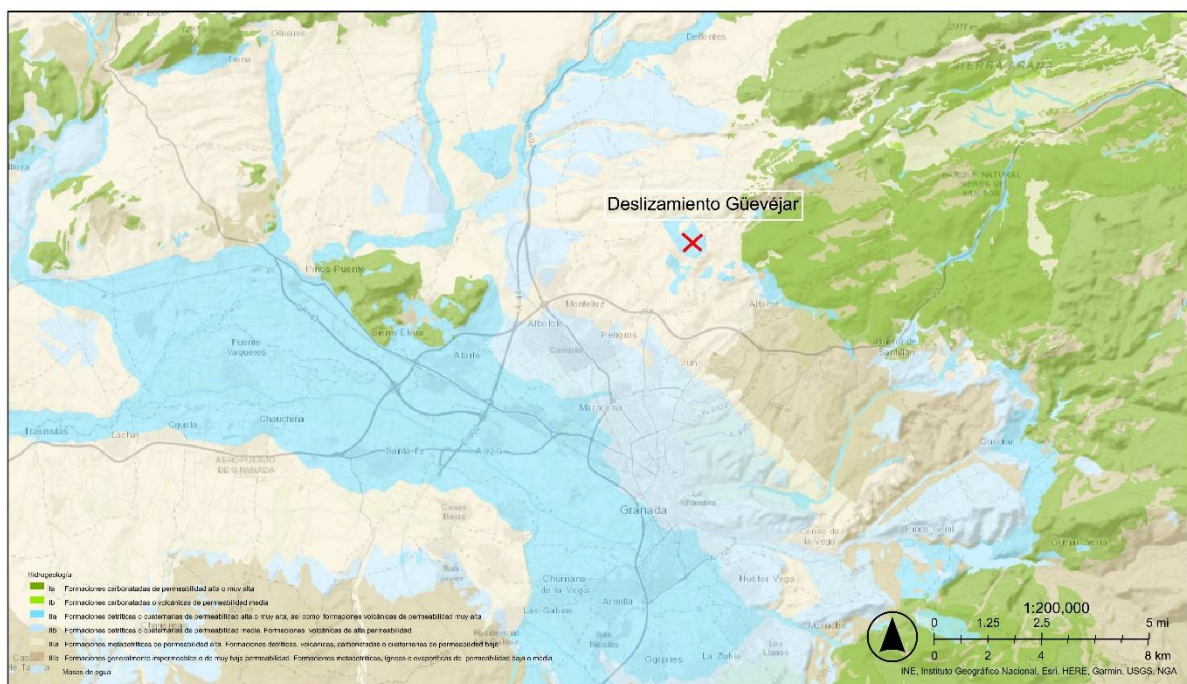


Figura 10: Mapa hidrogeológico del lugar a escala 1:200,000. Mapa recuperado del IGME.

De acuerdo con las interpretaciones brindadas por Sanz (1992), el nivel freático se encuentra próximo a la superficie entre 3 y 5 metros. En la cartografía realizada por Jiménez Pintor y Azor (2006), podemos observar zonas de manantiales en la parte central del deslizamiento, lo cual nos indicaría el afloramiento del agua y la cercanía del nivel freático a la superficie.

En la Figura 9, según la cartografía de Delgado et al.,(2021), se puede apreciar que en la parte central del deslizamiento el nivel freático ronda entre los 2 – 8 metros, y la profundidad aumenta en dirección SE hacia la cumbre del deslizamiento.

4.4. Sismicidad

Tectónicamente la región de Güevéjar se encuentra en la cuenca de Granada, perteneciente a la cordillera Bética central. Esta orogénesis es producto de la convergencia oblicua NO - SE de las placas africana y euroasiática. Predomina un régimen extensivo en dirección ENE – OSO lo cual ha generado fallas normales de alto ángulo con orientación NO – SE, y en algunos casos con orientación E-O (IGN,2024).

La cuenca de Güevéjar se encuentra limitada al norte y este por una serie de fallas normales, cuya actividad se refleja en la sismicidad de la zona. Las fallas que se ubican en los límites norte y sur tienen orientaciones aproximadas E-O y presentan movimientos normales, mientras que las fallas de la zona centro y del límite este se orientan en dirección NO – SE y presentan fundamentalmente movimiento normal tal como se observa en la Figura 11.

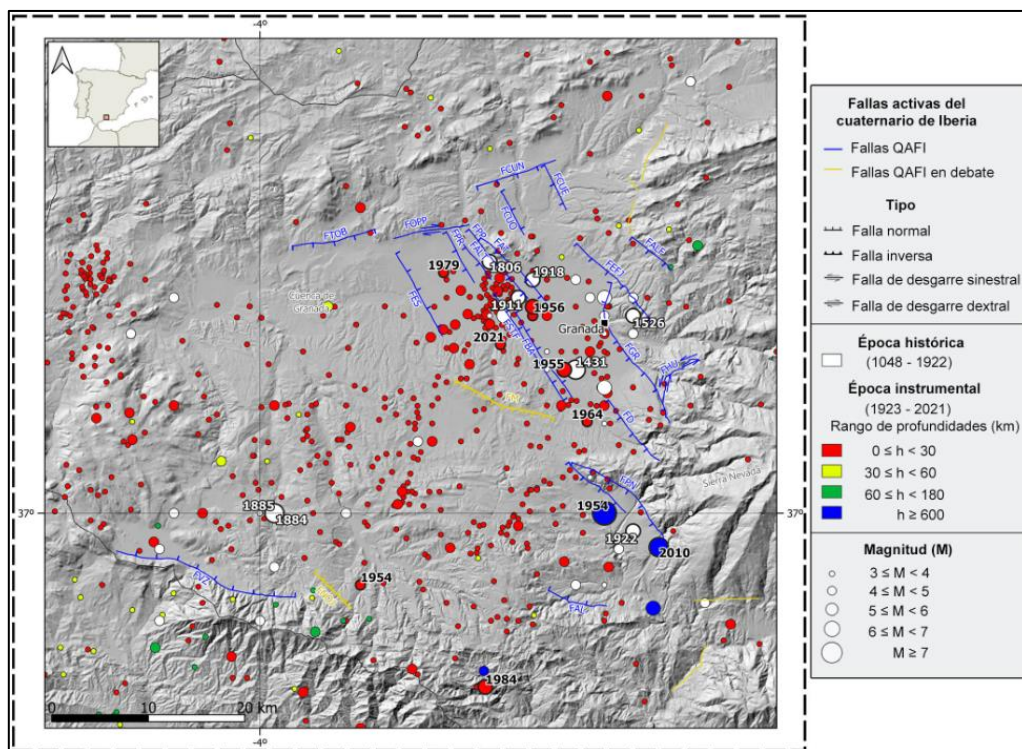


Figura 11: Sismicidad de la cuenca de Granada reciente (IGN, 2024). La información presenta los sismos y las fallas activas del cuaternario.

5. METODOLOGIA

5.1. Modelo Geológico

Para la elaboración del modelo geológico se ha utilizado los softwares ArcGISv.10.8 y Leapfrogv.5.0. El programa ArcGIS es un programa de información geográfica (SIG), el cual nos ha permitido el procesamiento de los datos de la geología del área del deslizamiento, la localización de escarpes, fallas y la posición de los sondeos y ensayos geofísicos realizados (Delgado et al., 2021).

Los contactos geológicos y el área de deslizamiento (Figura 12) fueron georreferenciados y corroborados con fotografías satelitales que fueron obtenidas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Asimismo, se ha podido descargar de la página del IGN, la información del modelo de elevación digital actual de la zona, lo cual nos ha permitido extraer las curvas topográficas con una resolución de 5m.

Posteriormente, para la elaboración del modelo tridimensional se ha utilizado el software Leapfrog, el cual es un programa utilizado principalmente para la modelización geológica de acuerdo con el orden estratigráfico de las litologías que lo componen.

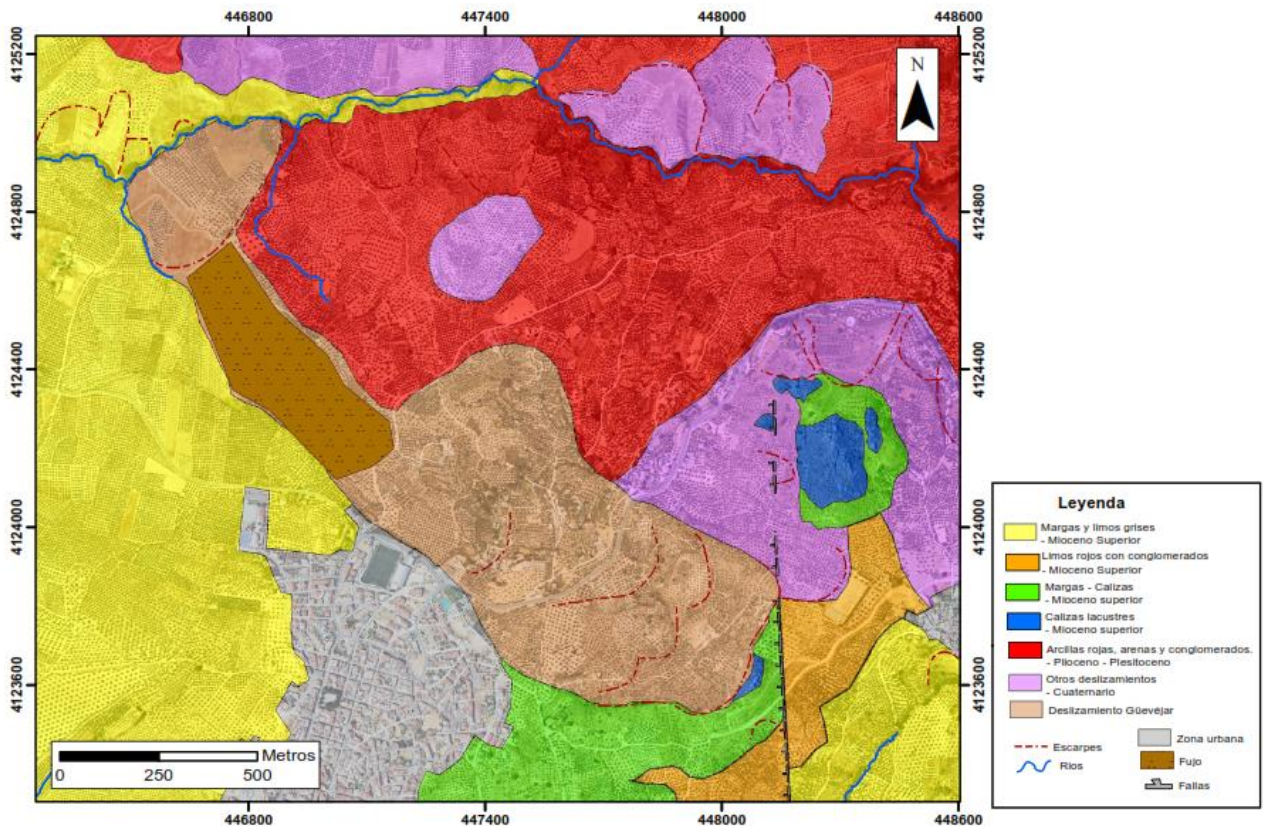


Figura 12: Mapa geológico local del entorno del deslizamiento. Modificado de Delgado et al., 2021.

De esta manera, se han empleado los datos de la topografía actual descargada del IGN, la geología en superficie realizado en ArcGIS y los datos de los perfiles geofísicos que nos muestran la superficie del deslizamiento (Figura 13).

Finalmente, se realizó el modelado de la geología de la zona utilizando los datos de superficie y algunos perfiles interpretativos hasta una profundidad de 750 m , tal como se muestra en la Figura 14. Esto se consideró adecuado dado que la superficie de deslizamiento tiene una profundidad máxima de 772 m y profundizar más no afectaría en el desarrollo del cálculo de estabilidad.

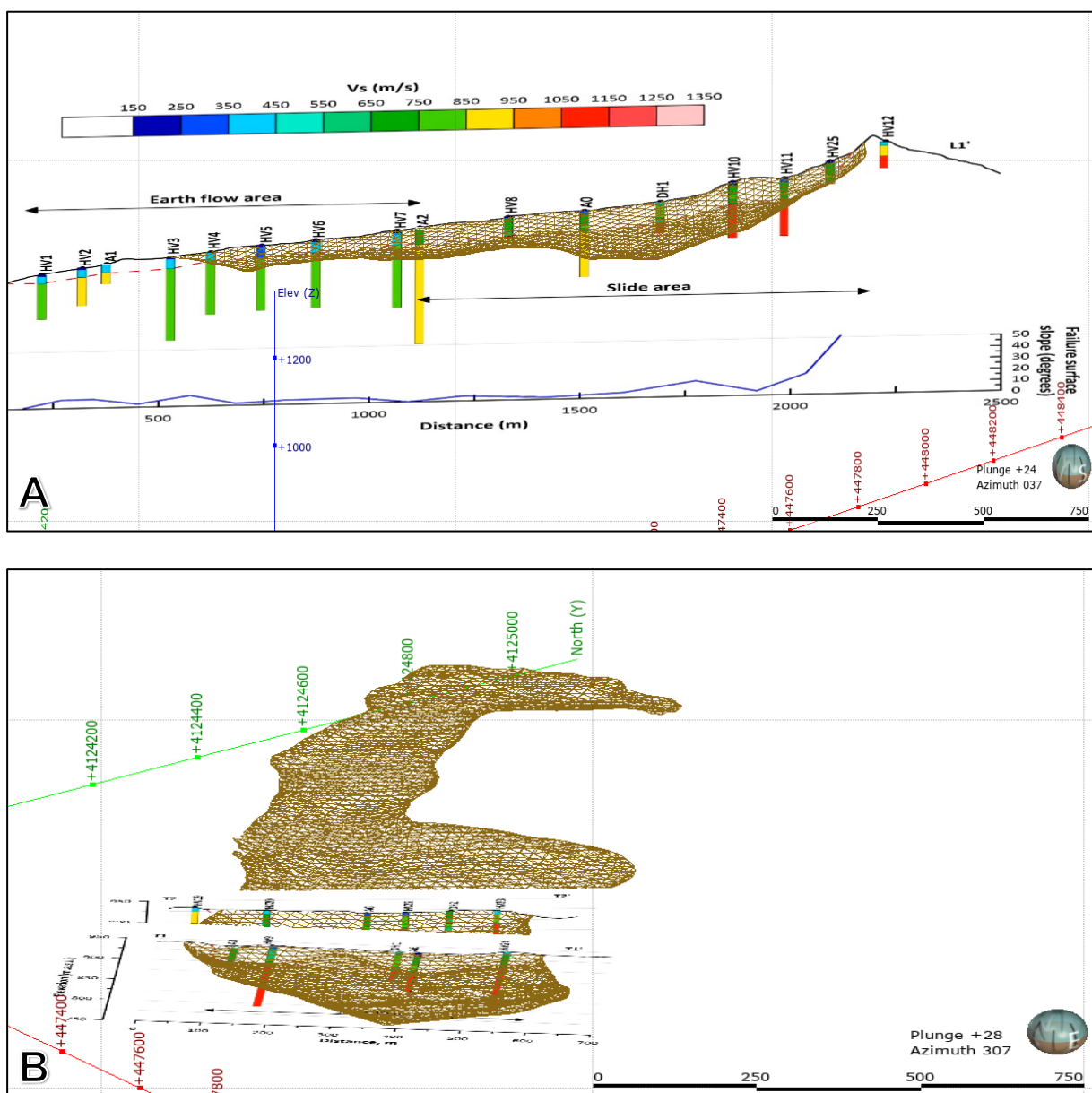


Figura 13: Modelado del deslizamiento de Güevéjar mediante el software Leapfrog. (A) Vista longitudinal del deslizamiento. (B) Vista transversal del deslizamiento.

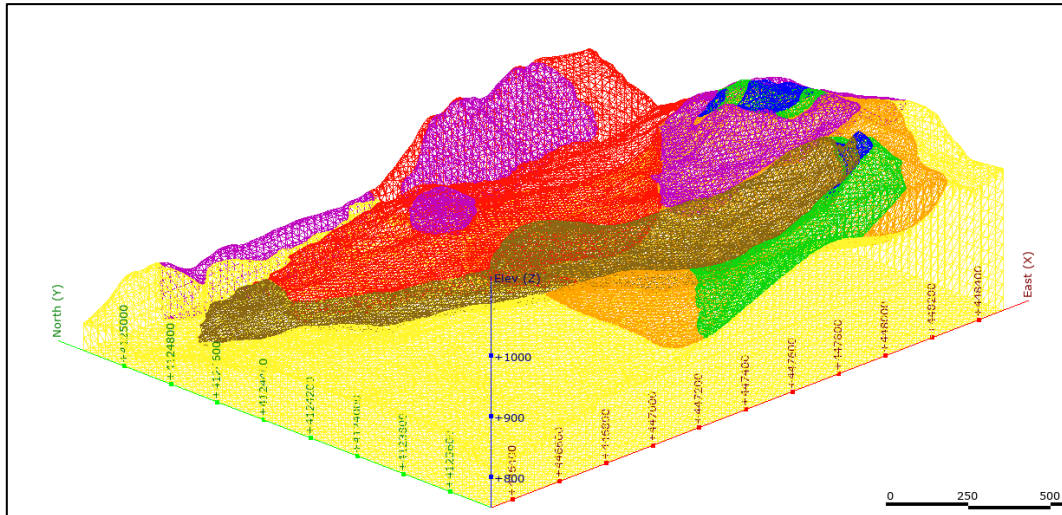


Figura 14: Modelo geológico del área del deslizamiento en Leapfrog.

5.2. Modelo Geotécnico

Después de crear el modelo geológico en Leapfrog, se procedió a desarrollar el modelo geotécnico en el software Slide3. Este programa de Rocscience permite evaluar la estabilidad de pendientes y laderas mediante modelos 3D. En este sentido, del modelo geológico se han exportado cada unidad geológica en archivos compatibles con el software Slide3 (.dxf), los archivos .dxf son archivos de datos de dibujos de CAD que por lo general se utilizan en la mayoría de los programas de diseño.

Una vez cargado el modelo geológico en el software Slide3, se han agrupado algunas unidades geotécnicas de acuerdo con sus parámetros de cohesión y ángulo de fricción. Para ello, los datos de ensayos de laboratorio y bibliográficos (Rodríguez-Peces et al., 2011; López Casado, s.f.) fueron utilizados como información de partida tal como se muestra en la Tabla 1. Definida nuestras unidades geotécnicas, se asignaron las propiedades geotécnicas a los materiales.

Tabla 1: Datos de partida de las propiedades geomecánicas de los materiales de la zona del deslizamiento (Rodríguez-Peces et al., 2011; López Casado, s.f.).

COLOR	UNIDAD	MATERIAL	Litología	Y(kN/m ³)	Ysat (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (φ)
AMARILLO	MU	Suelo	Margas y limos grises	20.70	20.89	40.8	25°
NARANJA	RSU	Suelo	Limos rojos	16.40	19.85	0	12.9° - 15.2°
VERDE	MLU	Roca	Margas calizas	25.30	25.30	0	35°-41°
AZUL		Roca	Calizas Lacustrinas	27.26	27.26	0	35-41°
ROJO	RRD	Suelo	Arcillas rojas, limos y conglomerados	18.75	21.14	51.69	21°
PURPURA	OL	Suelo	Otherlandslides	19.80	21.31	0	9° - 16°
MARRON	GL	Suelo	Guevarjar Landslide	19.80	21.31	8.3 - 26	9° - 16°

Para representar la superficie del nivel freático se utilizó la opción del programa “añadir superficie de agua por puntos de localización”. Se ingresaron los datos de 10 puntos de agua cuyas coordenadas se conocen los cuales incluyen sondajes, ríos y manantiales.

El cálculo de la estabilidad del programa Slide3 se realiza mediante el Método de Equilibrio Límite, los cuales consisten en dividir el suelo en rebanadas o dovelas y cumplir las leyes de la estática. Es el método más usado para el análisis de estabilidad en suelos y es aplicable a suelos heterogéneos, con geometrías circulares y no circulares, con elementos de estabilización, influencia del nivel freático y sismos. Este método busca obtener el factor de seguridad (FS), el cual es definido como la relación que existe entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento y las fuerzas motrices que provocan el deslizamiento de una masa inestable; por lo tanto, un $FS < 1$ se considera una masa inestable, $FS = 1$ se encuentra en estado crítico y un $FS > 1$ indica que la masa se encuentra estable (Torrijo et al., 2022).

Entre los métodos brindados por el programa tenemos :

- a) Bishop simplificado: Este método asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales, no tiene en cuenta las fuerzas cortantes. Es uno de los métodos más utilizados para el cálculo de FS en taludes, sin embargo, el método solo satisface el equilibrio de momentos y no cumple el equilibrio de fuerzas horizontales. La principal restricción del método de Bishop simplificado es que solamente considera las superficies circulares.
- b) Janbu simplificado: El método simplificado de Janbu se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas cortantes. Janbu considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección. El método de Janbu solamente satisface el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales, y no satisface el equilibrio de momentos.
- c) GLE/Morgenstern – Price: Es un método muy preciso y riguroso, asume que existe una función que relaciona las fuerzas cortantes y las fuerzas normales entre dovelas. El método de Morgenstern y Price es aplicable a todas las geometrías y perfiles del suelo. Cumple con todas las condiciones de equilibrio, las de momento y las de fuerzas.

Para nuestro estudio, el programa ha realizado los cálculos mediante los tres métodos para ver su comportamiento, sin embargo, se ha optado por usar principalmente el valor de GLE/Morgenstern - Price ya que es un método con mayor precisión y se ha utilizado mucho en los estudios de estabildades de ladera.

5.3. Reconstrucción topográfica, geológica e hidrogeológica

Para el análisis del deslizamiento de Güevéjar, se requiere del conocimiento de la topografía anterior al terremoto de 1884. Esta es una dificultad característica de este deslizamiento y de la mayoría de los deslizamientos históricos, ya que en 1884 y antes se carecía de mapas topográficos y fotografías aéreas de estas zonas.

Para la reconstrucción de la topografía previa al deslizamiento, se ha seguido una metodología similar a la usada por Sanz de Ojeda (2021), los pasos realizados fueron los siguientes:

- a) Apoyándonos en las fotografías aéreas, el mapa topográfico actual y Google Earth, se ha podido observar que, en la parte alta del deslizamiento, cerca de la cumbre, las laderas bastantes regularizadas y conservadas las cuales nos sirvieron como referencia.
- b) Las curvas de nivel se extrapolaron desde las laderas de ambos lados del escarpe de cabecera del deslizamiento, suavizando las curvas en la parte central del deslizamiento. Para esta extrapolación, también se ha considerado los alrededores del cerro Castillejo, tratando de mantener cierta similitud con la topografía existente.

En cuanto a la reconstrucción geológica, se ha mantenido la continuidad de la geología superficial por encima del área del deslizamiento. En el ámbito hidrogeológico, se han considerado los valores obtenidos bibliográficamente (Sanz, 1992; Jiménez Pintor y Azor, 2006) ya que condicionan un terreno prácticamente saturado.

5.4. Análisis de estabilidad retrospectivo

Con la topografía previa al terremoto de 1884 y los parámetros geomecánicos como base de partida, se procedió a calibrar nuestro modelo geotécnico empleando un análisis de estabilidad retrospectivo con la finalidad de conseguir los parámetros geotécnicos que puedan replicar la condición de inestabilidad ocurrida producto del terremoto.

De acuerdo con el programa Slide3, al ser un software de trabajo en 3D, además del valor de la aceleración sísmica máxima del terreno (PGA, *Peak Ground Acceleration*), existen tres opciones para introducir la orientación del sismo :

- a) En la dirección de rotura más desfavorable del deslizamiento.
- b) Según sus datos de Orientación (*Trend*) e Inclinación (*Plunge*).
- c) De forma vectorial (X Y Z).

En ese sentido, se ha utilizado la opción de considerar el sismo de acuerdo con sus datos de orientación e inclinación. La orientación (*Trend*) considerada ha sido 50° , que es el valor medio entre el rango ($41^\circ - 59^\circ$) de sus posibles direcciones epicentrales tal como se muestra en la Figura 15. La inclinación (*Plunge*) se ha considerado 0° , ya que la información del valor de la PGA es en dirección horizontal. Finalmente, el valor de la PGA considerada es $0.149g$ (Rodríguez-Peces et al., 2011).

Con las condiciones de sismo introducidas, se han ido modificando las propiedades geomecánicas de los materiales de tal manera que cumpla con la estabilidad crítica, ósea un factor de seguridad igual o alrededor de la unidad ($FS \approx 1$).

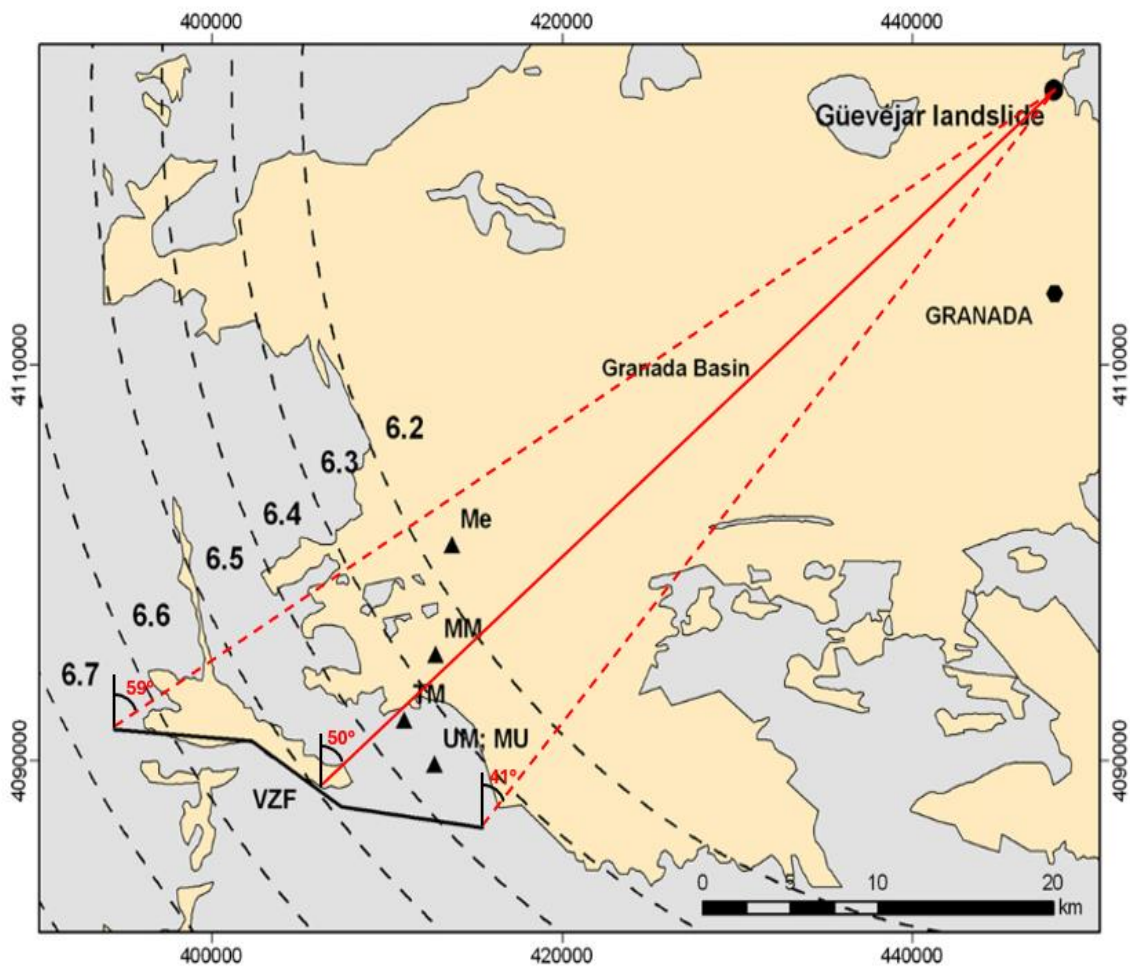


Figura 15: Posibles ubicaciones de la fuente epicentral para el terremoto de 1884 Arenas del Rey. Imagen modificada de (Rodríguez-Peces et al., 2011).

5.5. Previsión futura de una posible reactivación

Una vez calibrado los parámetros geotécnicos con el análisis retrospectivo, se han actualizado estos valores obtenidos en el modelo geotécnico actual para calcular el valor de aceleración crítica que pueda causar inestabilidad y reactivar el deslizamiento de Güevéjar.

La aceleración crítica se define como el valor de la PGA correspondiente a un $FS = 1.0$, por lo que significa que es el valor de PGA a partir del cual se produce la inestabilidad. Para ello, mediante el programa Slide3 se ha buscado la aceleración crítica siguiendo una orientación (*Trend*) de propagación, considerando todas las direcciones $0^\circ - 360^\circ$ y tomando agrupaciones cada 10° .

Para obtener los sismos que potencialmente reactivarían el deslizamiento, se han empleado los valores de PGA desencadenantes para la estimación del valor M_w mediante la ecuación de predicción del movimiento del terreno (GMPE) (Akkar et al., 2014) para unas distancias epicentrales de 0 – 60 km, tomados en intervalos de 10 km.

A continuación, los pares de valores M_w - distancia obtenidos se han comparado con la localización de las fallas activas (García-Mayordomo, 2012) para determinar si alguna de ellas podría ser foco potencial para la reactivación del deslizamiento.

6. RESULTADOS

6.1. Modelo Geológico

La Figura 16 muestra el modelo geológico desarrollado en el software Leapfrog. El deslizamiento de Güevéjar abarca 2000 m de largo, con un ancho máximo de 615 m en la parte central y un espesor máximo aproximado de 55 m de profundidad. Presenta un volumen aproximado de 23.13 hm³ y cubre un área de 1.68 hm².

Posee un desnivel aproximado de 280 m desde la cabecera hasta el pie del flujo que lo compone. Presenta una pendiente media de 20° a 25° en la zona superior de la cumbre hasta los primeros 100 m, posteriormente la pendiente baja de 6° a 10° hasta el pie.

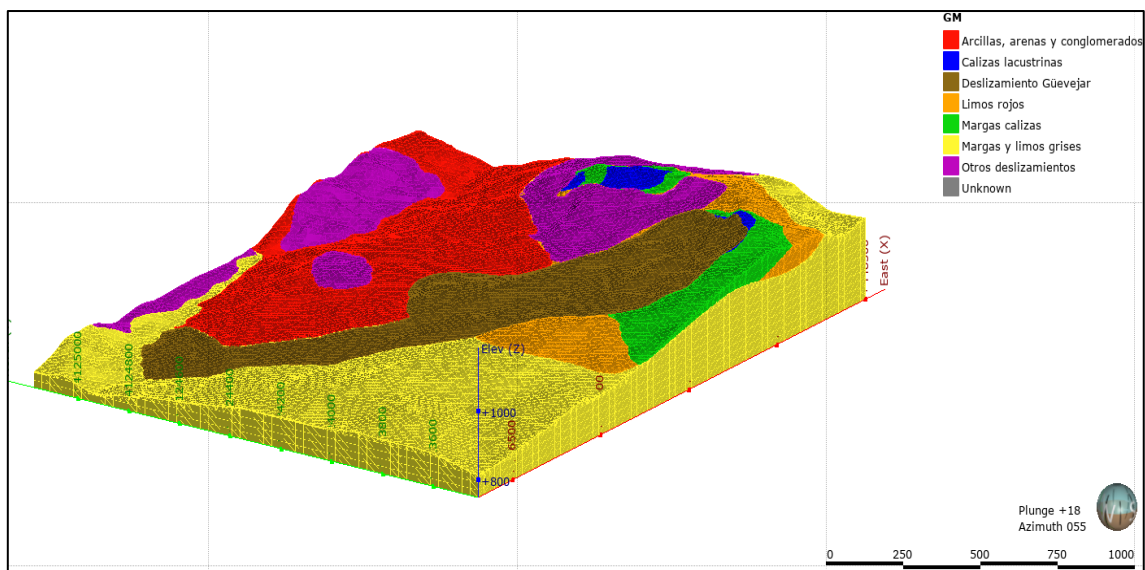


Figura 16: Modelo Geológico en Leapfrog de la zona actual del deslizamiento de Güevéjar.

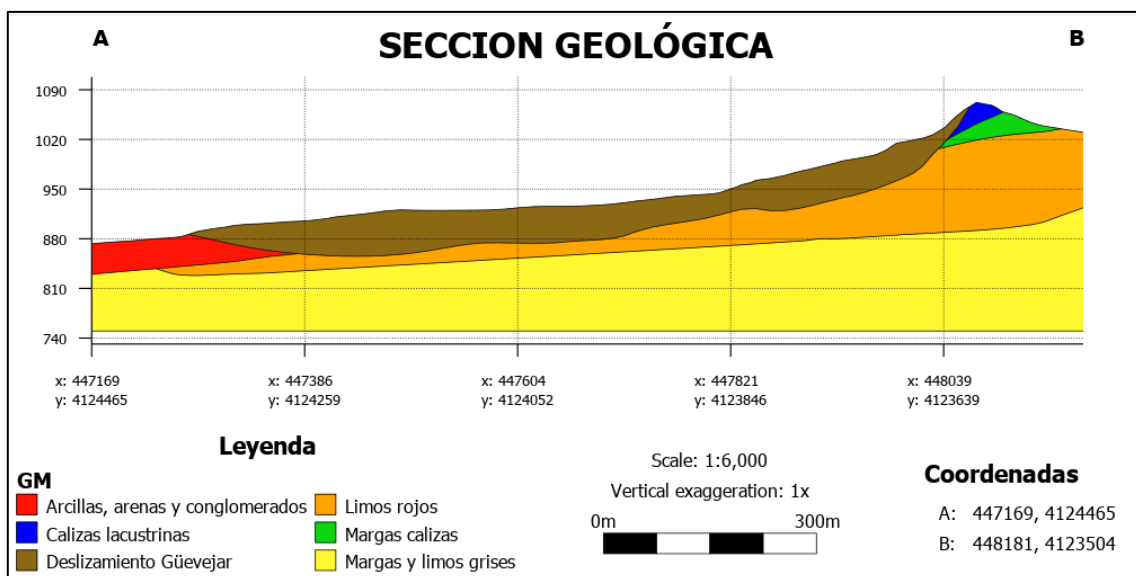


Figura 17 : Sección geológica longitudinal del deslizamiento de Güevéjar.

La Figura 17 nos muestra una sección longitudinal geológica resultado del modelo creado, donde podemos apreciar los espesores de las capas geológicas. En ese sentido nuestra capa base es la unidad MU- Margas y limos grises con un espesor aproximado de 200 m., le continua la unidad RSU-Limos rojos con un espesor máximo de 120 m. , la unidad MLU- Margas calizas y MLU-Calizas lacustrinas con espesores de 40 m. y 30 m. respectivamente , finalmente la unidad RRD-Arcillas rojas, arenas y conglomerados tienen un espesor de 45 m.

6.2. Modelo Geotécnico

La Figura 18 muestra el modelo geotécnico desarrollado en el software Slide3. Se han agrupado los materiales geológicos de MU-Margas y limos grises, con RRD-Arcillas rojas, limos y conglomerados ya que disponen de datos de cohesión y ángulo de fricción muy similares.

Con los valores hidrogeológicos cargados obtenemos un nivel freático muy cercano a la superficie en la zona del deslizamiento tal como se muestra en la Figura 19. En la parte más distal del deslizamiento el N.F se encuentra a una profundidad entre 5 m. – 8 m. , y en la parte central del deslizamiento es cercano a la superficie 0 – 3 m.

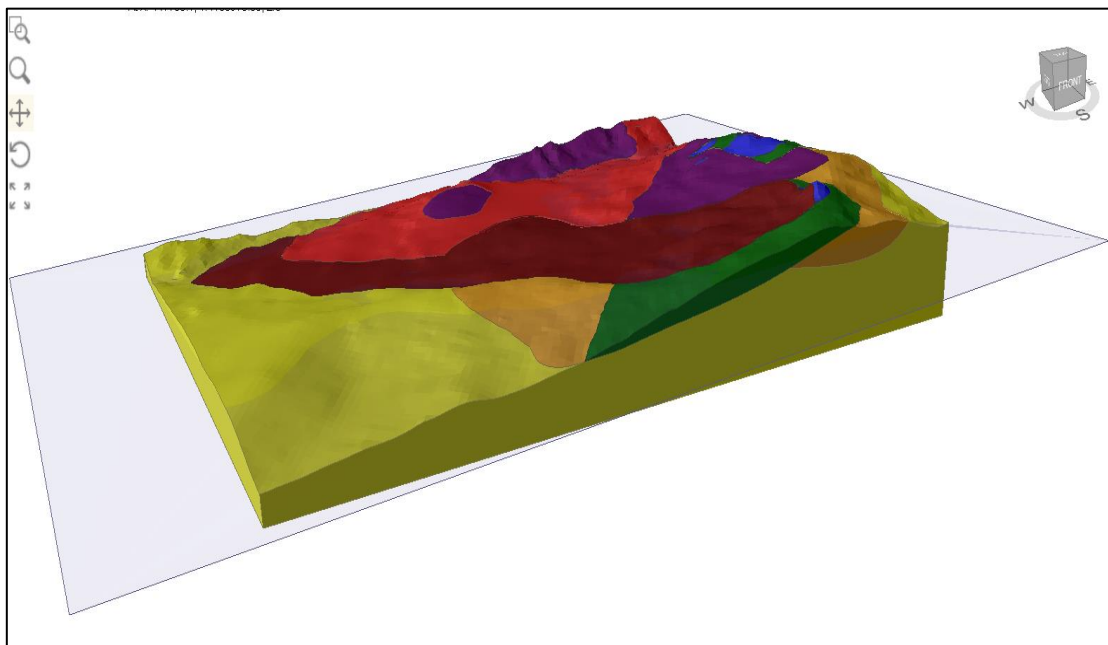


Figura 18: Modelo geotécnico de la zona de deslizamiento de Güevéjar en el software Slide3.

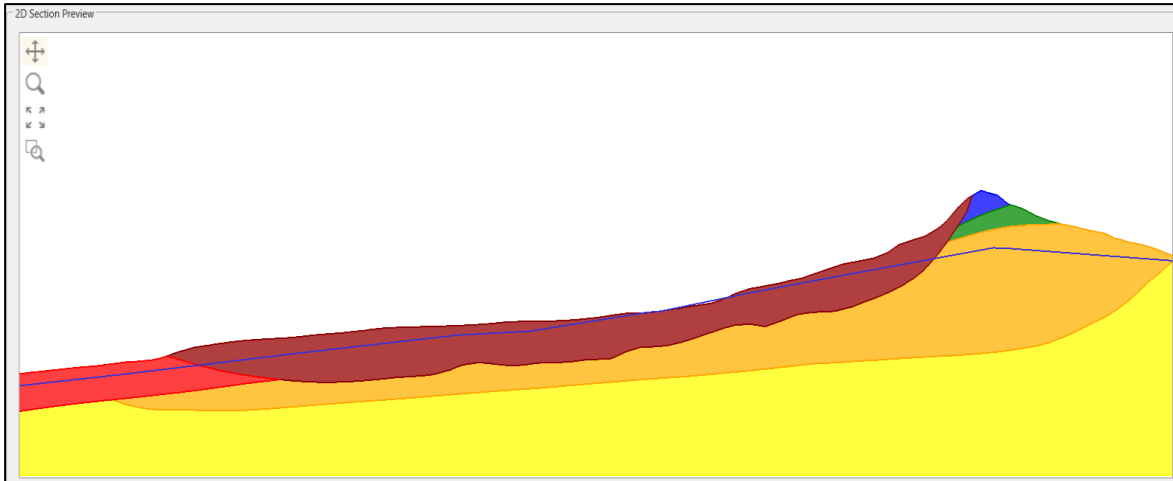


Figura 19: Sección de corte en el software Slide3, se puede apreciar el nivel freático (línea azul) según la extrapolación de los datos hidrogeológicos cargados al programa. La sección de corte se encuentra en la misma posición que la sección del Leapfrog.

6.3. Reconstrucción topográfica, geológica e hidrogeológica

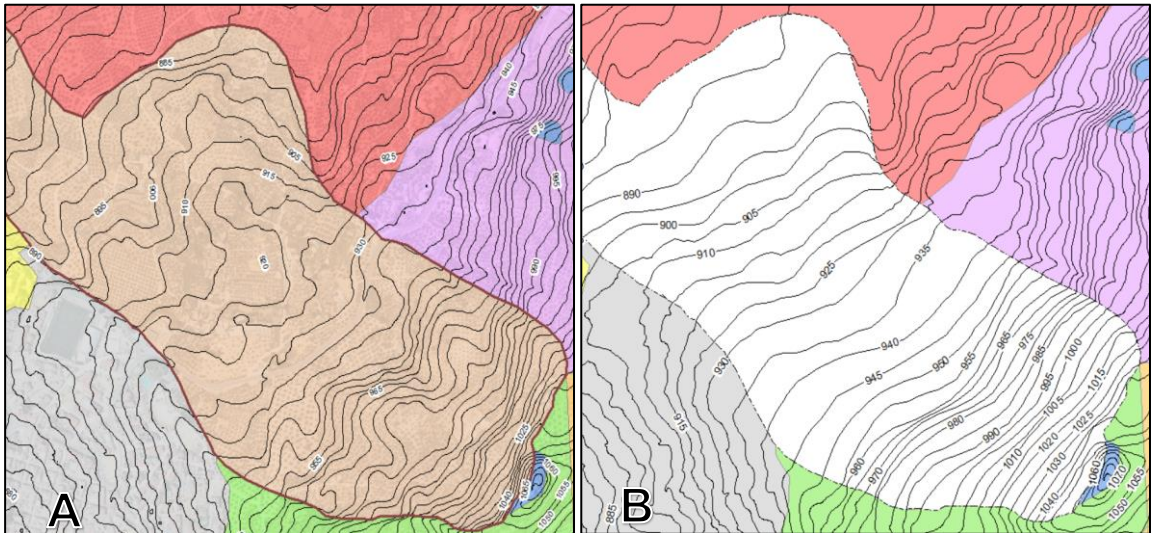


Figura 20: A. Topografía actual de la zona del deslizamiento. B. Reconstrucción topográfica anterior al terremoto de 1884.

Con la extrapolación de las curvas tal como muestra la Figura 20 , se ha obtenido la topografía reconstruida previa al terremoto de 1884. Con esta nueva topografía, la pendiente promedio en el área donde ocurrió el deslizamiento ronda entre los 17- 25° durante los primeros 500 m. desde la cumbre, posteriormente se suaviza de 6 – 10° en los posteriores metros.

La continuidad de la geología sobre donde se sitúa nuestro deslizamiento es interpretativa, de tal manera se ha obtenido el modelo tridimensional el cual se presenta en la Figura 21 .

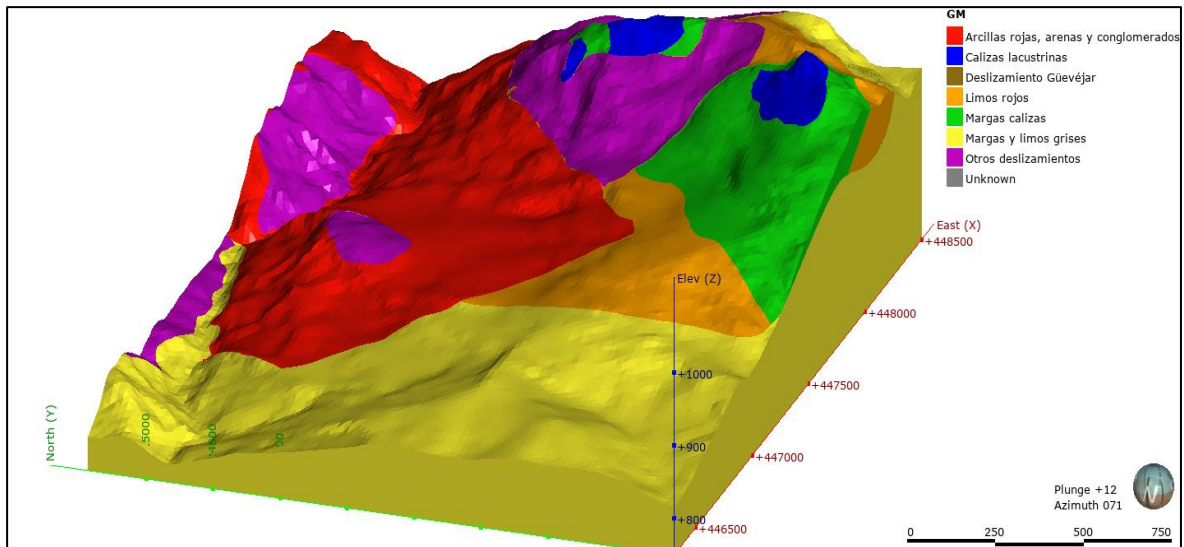


Figura 21: Modelo geológico conceptual previo al deslizamiento de 1884. La escala vertical se encuentra x2 para una mejor apreciación de la topografía.

En el caso de la hidrogeología, como se ha mencionado anteriormente, se ha considerado de acuerdo con los datos obtenidos bibliográficamente ya que condicionan un terreno saturado.

6.4. Análisis de estabilidad retrospectivo

Con el modelo geotécnico previo al terremoto de 1884, y los valores introducidos del sismo con un PGA de 0.149g y una dirección (*Trend*) de 50°, se han modificado los parámetros de los materiales geotécnicos con la finalidad de que cumplan la condición de inestabilidad ($FS \approx 1$) tal como se muestra en la Figura 22 donde podemos observar que se ha obtenido un factor de seguridad de GLE igual a 1.00, que nos indicaría que se encuentra en equilibrio límite.

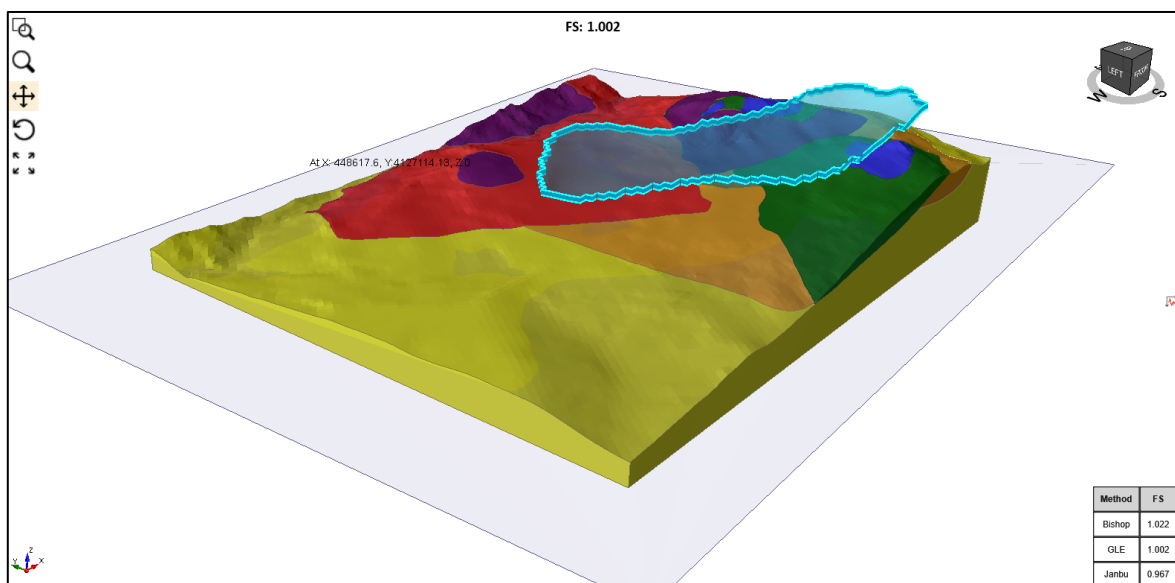


Figura 22: Calibración del modelo geotécnico con las condiciones del terremoto de 1884.

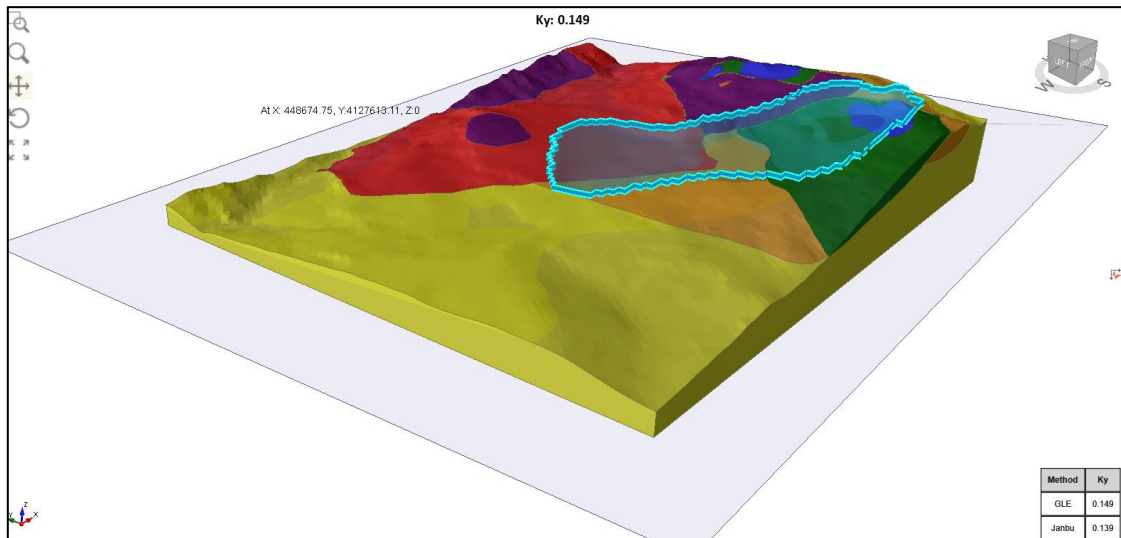


Figura 23: Aceleración crítica que genera un equilibrio límite en el modelo geotécnico de 1884 para una orientación de 50°.

De la misma forma para corroborar nuestros parámetros se ha realizado la búsqueda de una aceleración en la orientación de 50° que pueda generar inestabilidad en nuestro modelo geotécnico y nos ha dado un valor de aceleración de 0.149g tal como se muestra en la Figura 23, confirmando la correcta calibración de nuestro modelo.

En lo que respecta a la modificación de los parámetros geomecánicos de los materiales, la mayoría de ellos se ha visto reducida tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos de los parámetros geomecánicos de los materiales después de la calibración con la metodología de análisis retrospectivo.

COLOR	UNIDAD	MATERIAL	Litología	Y(kN/m ³)	Ysat (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (φ)
Yellow	MU	Suelo	Margas y limos grises	20.70	20.89	5	21°
Orange	RSU	Suelo	Limos rojos	16.40	19.85	0	12°
Green	MLU	Roca	Margas calizas	25.30	25.30	0	37°
Blue		Roca	Calizas Lacustrinas	27.26	27.26	0	40°
Red	RRD	Suelo	Arcillas rojas, limos y conglomerados	18.75	21.14	5	21°
Purple	OL	Suelo	Otherlandslides	19.80	21.31	0	13°
Brown	GL	Suelo	Guevajar Landslide	19.80	21.310	0	13°

La unidad MU y la unidad RRD se pueden considerar una sola unidad en lo que respecta a sus propiedades de cohesión y ángulo de fricción dando un valor de 5kPa y 21° respectivamente. La unidad RSU se ha considerado en 12° su ángulo de fricción, esta es la principal unidad por donde ocurre la superficie del deslizamiento y por lo tanto sus variaciones influyen enormemente en los cálculos del modelo. Las margas calizas y las calizas lacustrinas su ángulo de fricción es 37° y 40° respectivamente, la variación de estas unidades influye ligeramente en el modelo geotécnico. Y en los valores de resistencia de los materiales de deslizamiento se ha optado por considerar una cohesión de nula y un ángulo de fricción medio de 13°.

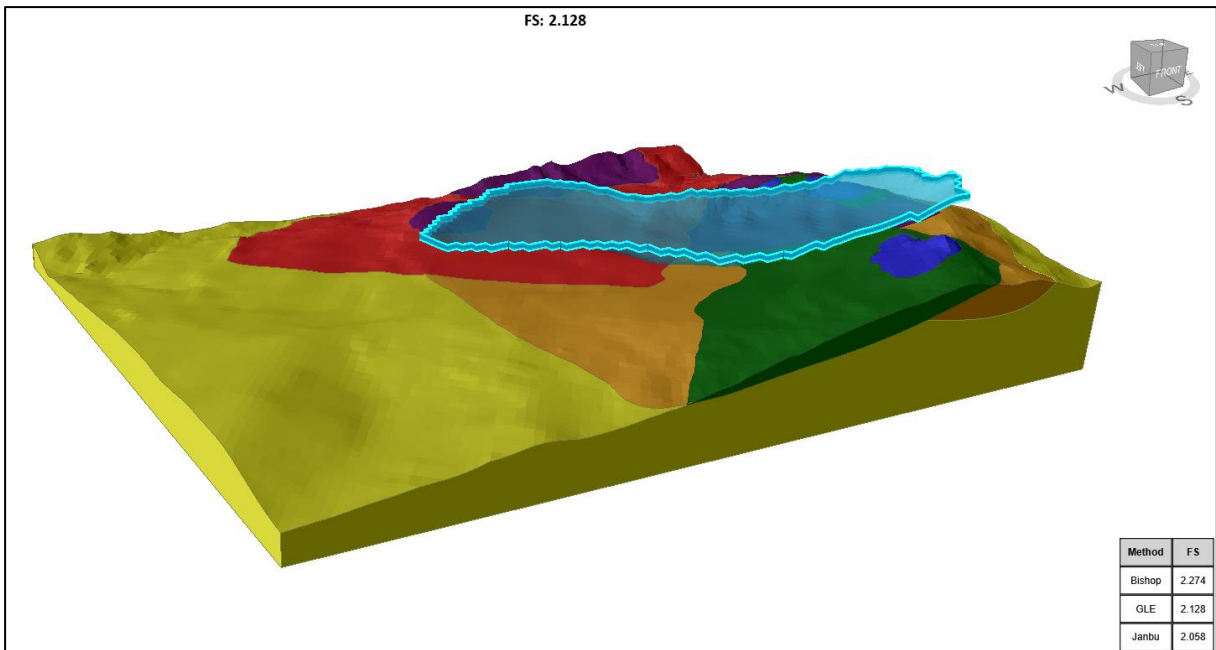


Figura 24 : Condiciones de estabilidad la zona de Güevéjar en condiciones secas, previo al terremoto de 1884.

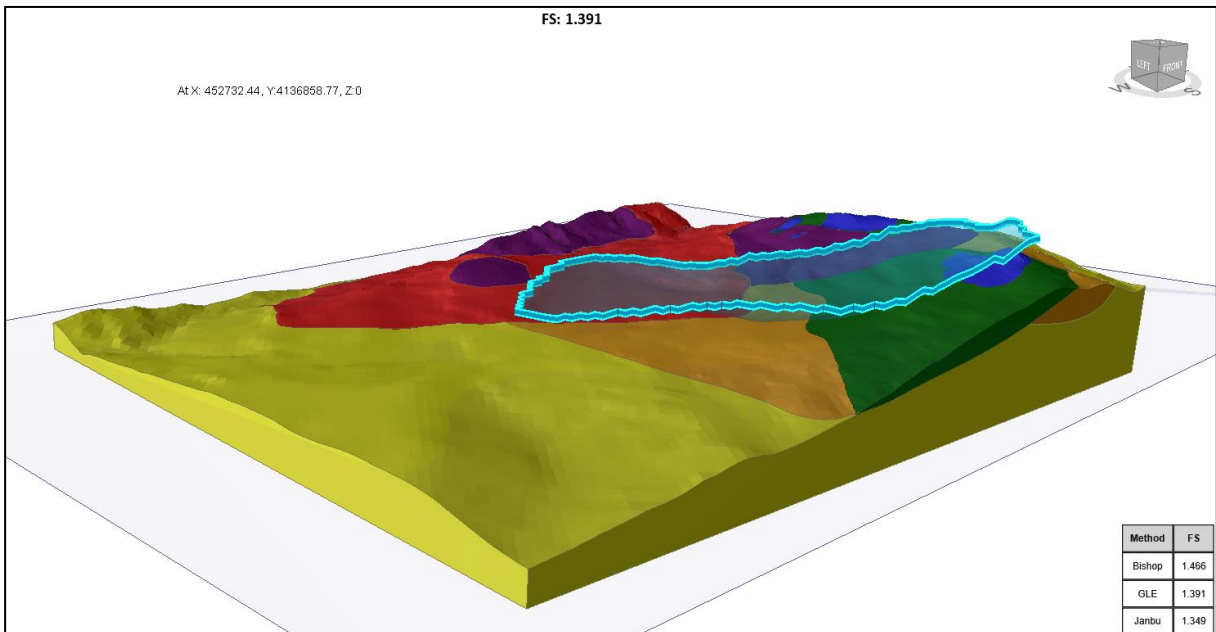


Figura 25 : Condiciones de estabilidad de la zona de Güevéjar en condiciones saturadas, previo al terremoto de 1884.

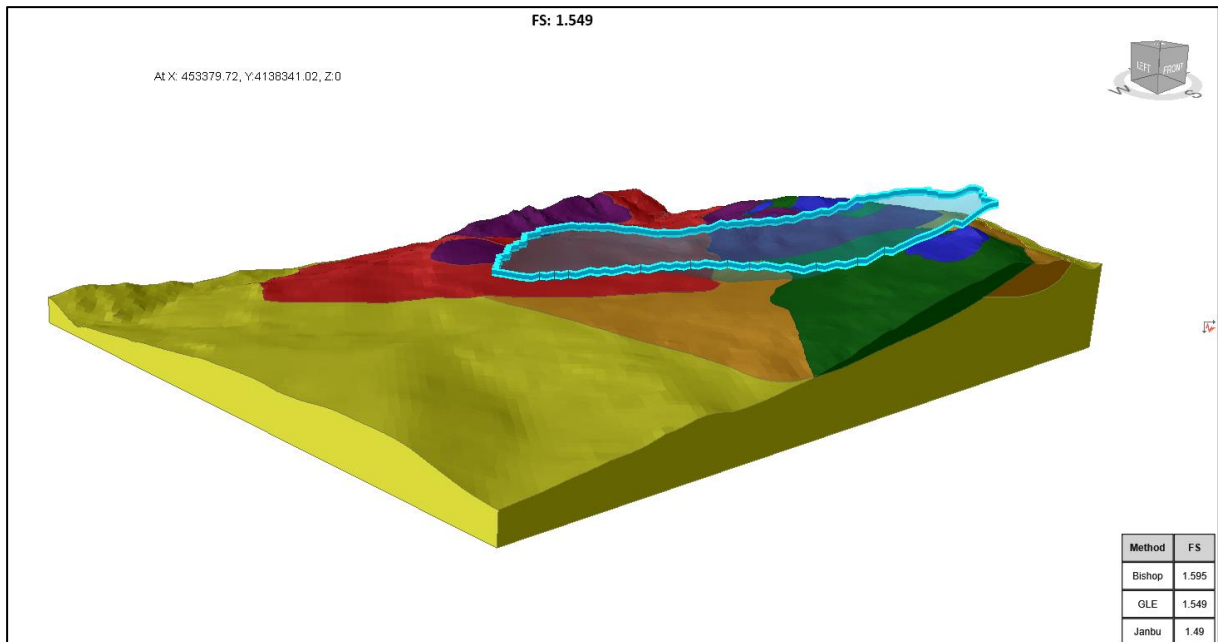


Figura 26: Condiciones de estabilidad de la zona de Güevéjar en condiciones secas y con la actuación del terremoto de 1884.

Según los resultados, previo al terremoto en condiciones secas la zona de Güevéjar tenía un $FS = 2.13$ lo cual es muy estable (Figura 24), mientras que previo al terremoto en condiciones saturadas el $FS = 1.39$ (Figura 25). Sin embargo, si consideramos que el terremoto hubiera ocurrido en condiciones secas (Figura 26) se obtiene un $FS = 1.55$, lo cual indicaría que es estable en esas condiciones.

Esto se puede interpretar que para el desencadenamiento del deslizamiento de Güevéjar en 1884, ha tenido un papel muy importante la influencia del agua y la saturación del terreno. En ese sentido, los factores que desencadenaron la inestabilidad es la acción simultánea de las condiciones hidrogeológicas y el evento sísmico.

Finalmente, definido calibrado los parámetros geotécnicos de nuestras unidades, se ha podido realizar los cálculos de estabilidad del deslizamiento en las condiciones actuales. De esta manera, sin la presencia de un sismo, obtenemos un $FS = 2.20$ en condiciones secas (Figura 27) y en condiciones saturadas $FS = 1.42$ (Figura 28). Esto es un indicativo que, en el presente, la zona del deslizamiento se encuentra en condiciones estables.

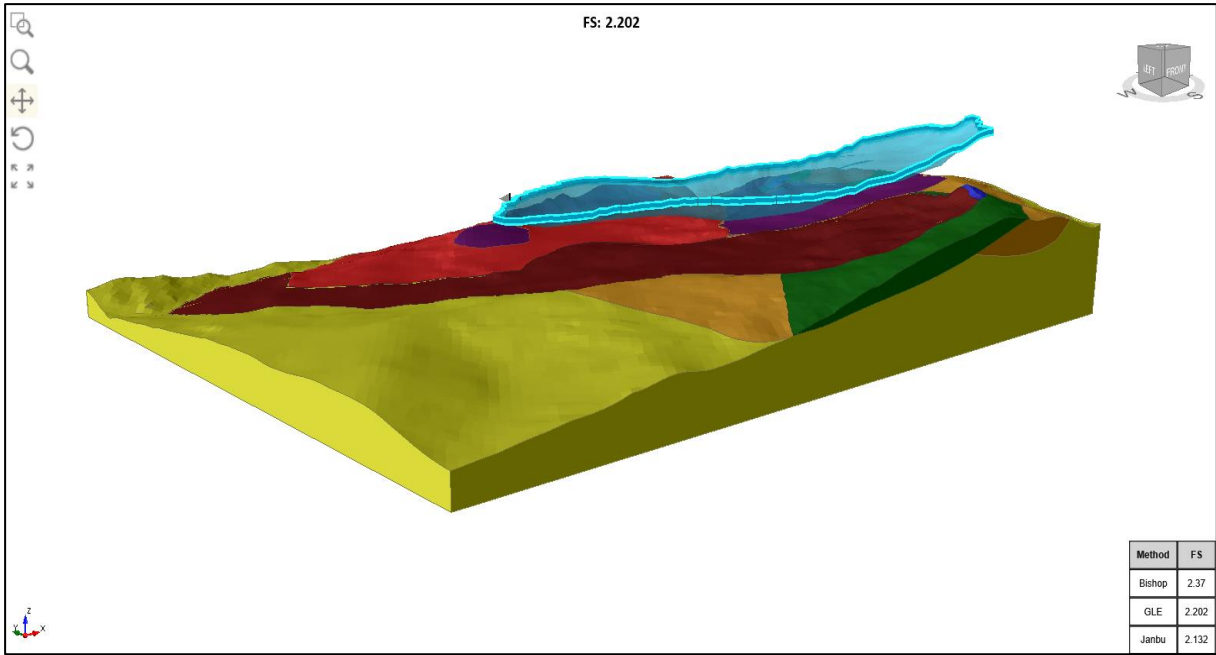


Figura 27: Análisis de equilibrio límite en el deslizamiento de Güevéjar actual en condiciones secas.

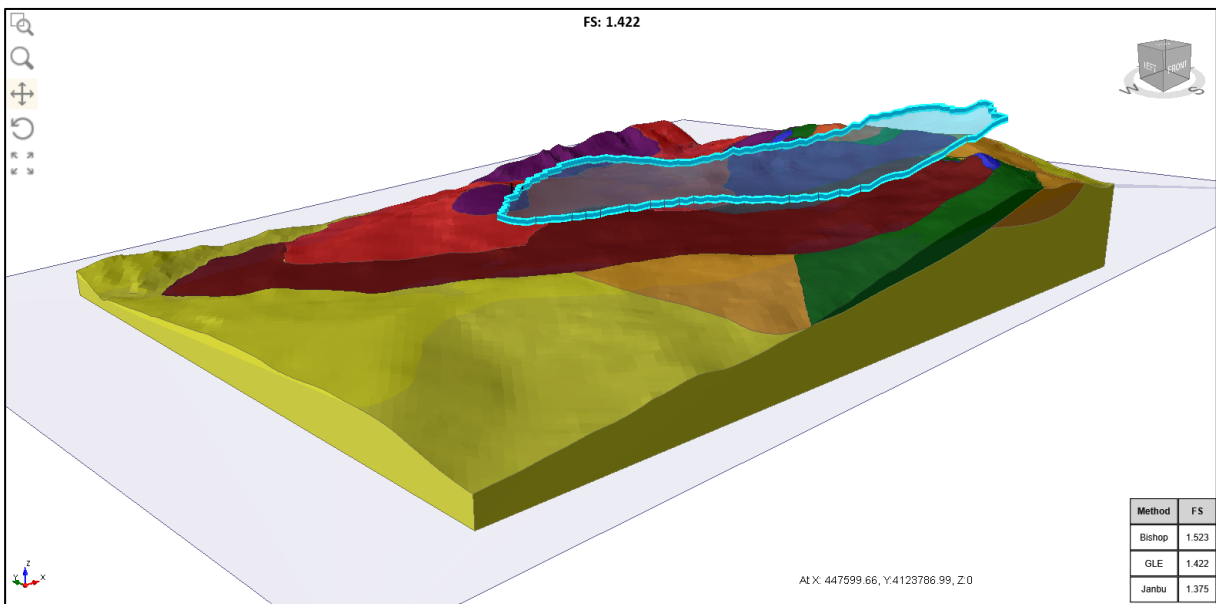


Figura 28: Análisis de equilibrio límite en el deslizamiento de Güevéjar actual en condiciones saturadas.

6.5. Previsión futura de una posible reactivación

De acuerdo con los cálculos realizados en el software Slide3, las nuevas PGA respecto a su orientación que pueden reactivar el deslizamiento de Güevéjar se representan en la Figura 29. Se puede apreciar que desde 0° a 60° de orientación, el valor de la aceleración crítica del sismo aumenta, empezando de 0.066g hasta llegar a 0.172g.

Del mismo modo, se puede observar que pasando los 60° hasta los 210° aproximadamente, el programa no ha sido capaz de calcular valores de aceleración que sean capaces de generar una reactivación del deslizamiento, lo cual concuerda con la orientación opuesta a la dirección natural del deslizamiento. En todo caso, se interpretó que el software no puede calcular una reactivación del deslizamiento para un sismo que viene de estas direcciones, ya que tendría un efecto de movimiento opuesto al sentido natural de la ladera, resultando imposible la inestabilidad.

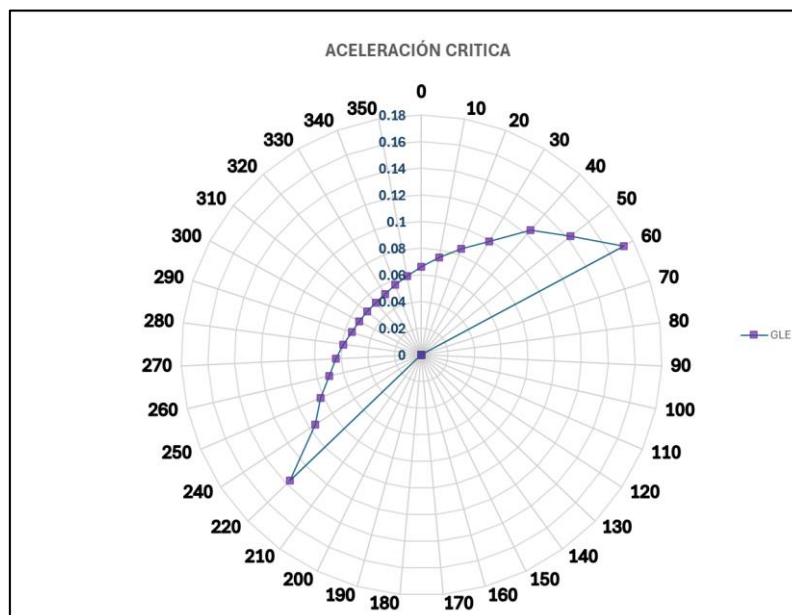


Figura 29: Aceleración crítica respecto a la orientación del sismo con el deslizamiento.

Asimismo, se observa que los valores de orientación de 220° hasta 260° requieren de una aceleración que va desde 0.136g hasta 0.071g. A partir de 260° hasta 330°, estos valores disminuyen progresivamente alcanzando su punto más bajo en 330° requiriendo un valor mínimo de aceleración de 0.053g, que corresponde justamente a la orientación natural del deslizamiento.

Con las aceleraciones obtenidas y mediante las ecuaciones de predicción del movimiento del terreno (GMPE) (Akkar et al.,2014), se han obtenido el valor de magnitud (Mw) tomando con distancias epicentrales radios de 10km, abarcando hasta un área de 60km. Los valores de los resultados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de Magnitud (Mw) que pueden reactivar el deslizamiento, estos cálculos se dan con respecto a la orientación y su distancia epicentral hacia el deslizamiento. N.C: No calculado.

Rango	Magnitud (Mw)						
	Re:1 Km	Re:10 Km	Re:20 Km	Re:30 Km	Re:40 Km	Re:50 Km	Re:60 Km
260° -10°	2.8	3.7	4.6	5.2	5.5	5.8	6.0
10° - 30°	3.2	4.1	5	5.5	5.9	6.1	6.3
30° - 40°	3.4	4.3	5.2	5.7	6.1	6.3	6.5
40° -60°	3.7	4.6	5.5	6	6.3	6.6	6.8
60° - 210°	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
210° - 230°	3.6	4.5	5.4	5.9	6.2	6.5	6.7
230° - 260°	3.1	4.1	5	5.5	5.8	6.1	6.3

De acuerdo con la Tabla 3, un sismo de magnitud Mw 2.8 – 3.7 cuyo epicentro se origine en el deslizamiento de Güevéjar, puede originar su inestabilidad y por consecuencia su reactivación. Gracias a la Tabla 3, pudimos agrupar los datos y obtener de manera visual un mapa con los valores de Mw y su orientación de propagación respecto al deslizamiento los cuales se muestran en la Figura 30.

De acuerdo con la Figura 30, podemos observar que los valores más bajos de Mw se dan en el rango de orientación de propagación 260° a 10°, esto debido a que la orientación de propagación está relativamente alrededor de la dirección del deslizamiento que es 330°. Entre este rango se encuentra las fallas cuaternarias activas Alfacár, El Fargue – Jun, Granada, Dílar, Padul -Nigüelas, Albuñuelas y Zona de falla Graena-Lugros (García-Mayordomo, 2012).

En el rango de 10° a 30° tenemos valores Mw que van desde 4.1 a 10 km hasta 6.3 a 60 km. Mientras que de 30° a 40°, tenemos los valores Mw que van desde 4.3 a 10 km hasta 6.7 a 60km. Entre estos rangos nos encontramos las fallas cuaternarias activas El Fargue – Jun y Santa Fé.

En el rango de 40° a 60° tenemos los valores Mw que van desde 4.6 a 10 km hasta 6.8 a 60 km. Entre este rango tenemos a las fallas cuaternarias activas Santa Fé, Atarfe y El Fargue – Jun. Mientras que en el rango de 60° a 210° tenemos a las fallas cuaternarias activas de Escóznar, Alitaje, Tocón – Obéilar, Atarfe y Norte de Cubillas; sin embargo, entre este rango el software no ha podido calcular la existencia de una aceleración potencial que reactive el deslizamiento.

Como se puede observar en la Figura 30, los mayores valores de Mw se dan entre los rangos 40°- 60° y 210° - 230°, necesitan un mayor valor de Mw para causar una reactivación en el deslizamiento.

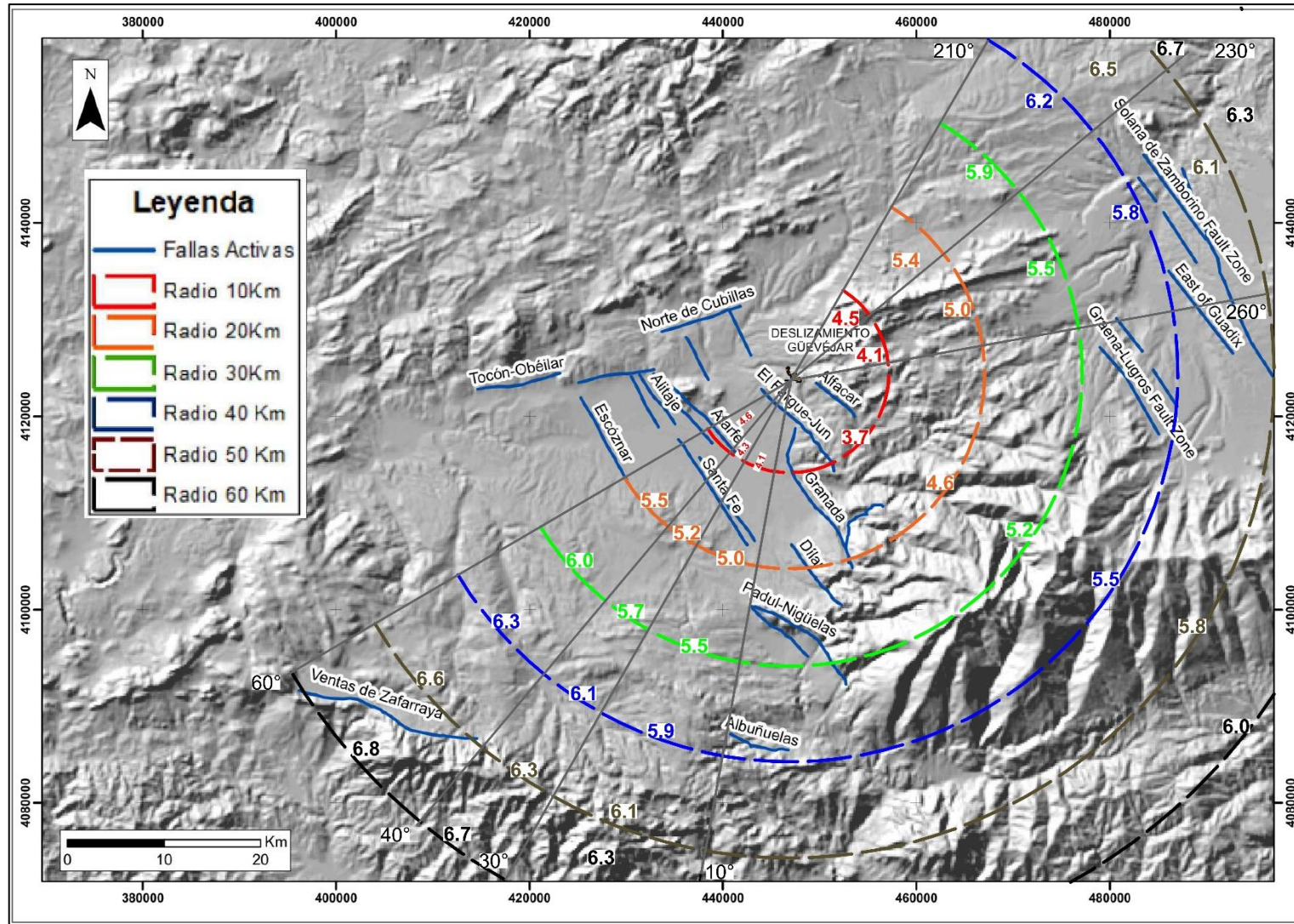


Figura 30: Mapa de valores Magnitud (M_w) con distancias epicentrales y orientación respecto al deslizamiento, localización fallas cuaternarias (García-Mayordomo, 2012) con potencial de reactivación del deslizamiento de Güevéjar a condiciones actuales.

7. DISCUSIÓN

Se ha desarrollado una nueva metodología para calcular la magnitud (M_w) y la localización del epicentro de terremotos históricos que han provocado deslizamiento, usando modelos tridimensionales en el software Slide3.

La aplicación del análisis de estabilidad retrospectivo en el deslizamiento de Güevéjar ha sido de mucha utilidad. Esta metodología permitió calibrar los parámetros geotécnicos de nuestro modelo histórico, de esta manera reproducir el evento de inestabilidad producto del terremoto de 1884. Además, esto permitió realizar un análisis posterior en condiciones actuales, de la posibilidad de reactivación relacionado a un nuevo evento sísmico.

El uso del software Slide3 como herramienta de estudio para deslizamientos grandes ofrece varias ventajas. Su facilidad para crear modelos geotécnicos a partir de modelos geológicos, su capacidad de integrarse con otros programas de modelación permite una representación más precisa de la geomorfología de la zona de estudio. Además, los beneficios de trabajar en un modelo 3D son las herramientas que las involucran y se ven limitadas en un modelo 2D. La capacidad de manejar la heterogeneidad en la continuidad lateral, las orientaciones de los sismos, la creación de un nivel freático en base a cotas conocidas, y la realización de cálculos matemáticos complejos de estabilidad, son algunos de estos beneficios.

Es muy importante mencionar que existieron una serie de limitaciones a la hora de elaborar el modelo geotécnico. Una de las principales limitaciones respecto a la elaboración del modelo geotécnico es la posición real del nivel freático, si bien se ha utilizado puntos conocidos como referencia de estudios (Sanz, 1992; Jiménez y Azor, 2006) y mediciones en sondeos, estas podrían no corresponder a la posición real del nivel freático durante el incidente de 1884, lo cual podría generar una ligera variación en los cálculos. Sin embargo, se ha considerado condiciones casi totalmente saturadas condicionando el peor escenario que favorece al deslizamiento.

Otra de las limitaciones es el uso de las ecuaciones de predicción del movimiento del terreno (GMPEs), ya que se ha utilizado una ecuación general construida en base a datos de Europa y Medio Oriente, estas estimaciones pueden ser mejoradas cuando sea desarrollada ecuaciones propias para España.

Sobre las limitaciones del cálculo del software, debido a la complejidad matemática al trabajar en modelos tridimensionales, existen rangos de orientación del sismo que el Slide3 no puede llegar a calcular con un método específico, sin embargo, si lo realizamos con otro método si es capaz de encontrar una solución (FS). Recordando que Bishop, Janbu y GLE/Morgenster-Price tiene su propia metodología matemática para realizar los cálculos, es importante trabajar

con todos ya que entre los valores obtenidos se ha llegado a tener una alta correlación entre ellos que nos han permitido rellenar espacios en donde el software no ha sido capaz de calcular mediante la metodología GLE, pero si con Janbu o Bishop.

Gracias a los cálculos realizados mediante el programa, se ha elaborado un mapa que combina los valores de magnitud (M_w) y distancias epicentrales, con la influencia de su orientación respecto al deslizamiento. Con los datos de la ubicación de las fallas cuaternarias activas y su posible implicancia en la reactivación del deslizamiento de Güevéjar. Entre las fallas con mayor influencia sobre el deslizamiento tenemos los datos obtenidos del IGME los cuales son: El Fargue-Jun con máxima magnitud $M_w = 6.3$, Atarfe con $M_w = 6.2$, Santa Fe con $M_w=6.3$, Granada con $M_w=6.5$, Dílar (no se encuentra datos), Padul-Nigüelas $M_w=6.0$ con y Albuñelas con $M_w = 6.2$. Esto indicaría que estas fallas, a excepción de la falla Dílar que no se encuentra registro de magnitud, podrían causar la reactivación del deslizamiento ya que presentan magnitudes registradas con mayor valor que las calculadas para causar la inestabilidad. Sin embargo, la probabilidad que ocurran los sismos máximos asociados a cada falla activa es baja debido a la rotura compleja de cada una de ellas.

En comparación con los resultados realizados por Rodríguez-Peces et al.(2011), podemos observar ciertas diferencias en cuanto a los resultados de realizar un análisis en 2D y 3D. Una de las grandes variaciones es el volumen del deslizamiento, los autores estimaron un volumen de 70hm^3 , mientras que en nuestro modelo geológico se ha calculado que el volumen es de 23.13hm^3 , lo cual es una gran diferencia considerando que en los cálculos de estabilidad se toma en cuenta el peso.

Con respecto a los cálculos del modelo geotécnico, Rodríguez-Peces et al.(2011) han realizado sus cálculos en el programa Slide v.5.0, el cual es un software de cálculos en 2D, obteniendo un $FS = 0.79$ para su modelo de 1884. En nuestro modelo geotécnico ha sido calibrado para un $FS = 1$ en esas condiciones y de acuerdo con la orientación de 50° del sismo. Considerando que en Slide v.5.0 no se puede poner una orientación para el sismo, para la comparativa se ha ubicado el sismo en dirección del deslizamiento (330°) de manera similar a la ejecución del Slide v.5.0, obteniéndose un $FS = 0.74$, lo cual es un valor muy similar y coherente a lo obtenido por los autores. Considerando sin la presencia de un sismo en las condiciones actuales en condiciones saturadas y secas, los autores obtuvieron un $FS = 2.66$ y $FS = 4.00$ respectivamente; mientras que nuestros valores obtenidos fueron $FS = 1.42$ y $FS = 2.2$ respectivamente. Como se puede apreciar en la metodología seguida por Rodríguez-Peces et al.(2011) los valores de FS son muy elevados, lo cual nos indican que los cálculos están realizados siguiendo el lado de la seguridad. En ambos casos muestran una zona que

actualmente se encuentra estable, sin embargo, un sismo o asociado alguna falla activa con cierta magnitud, pueden inducir a su reactivación.

Los resultados de una posible reactivación del deslizamiento de Güevéjar ocasionados por la actividad de alguna falla cuaternaria es coherente con los propuestos por Rodríguez-Peces et al. (2011) Atarfe , Santa Fe y Granada, sin embargo, se han ampliado algunas fallas más que podrían ocasionar esta inestabilidad como lo son las fallas de Padul-Nigüelas, Albuñelas y El Fargue-Jun.

8. CONCLUSIONES

El deslizamiento de Güevéjar geomorfológicamente tiene una longitud de 2000 m. de largo considerando hasta la extensión del flujo en el pie del deslizamiento, un ancho máximo de 615 m. en la parte central y un espesor máximo de 55 m. aproximadamente. Posee un desnivel aproximado de 280 m. con una pendiente media de 20° - 25° que abarca los primeros 100 m. y posteriormente la pendiente baja de 6° - 10° . Con el modelo geológico, se ha calculado que posee un volumen aproximado de 23.13 hm^3 y cubre un área de 1.68 hm^2 .

La superficie del deslizamiento de Güevéjar actúa principalmente sobre la unidad RSU – Limos rojos, los parámetros geotécnicos controla principalmente el proceso de rotura de la superficie. De manera ligera pero no despreciable, los materiales de la unidad MLU y la unidad RRD también condicionan en el proceso de inestabilidad.

En el modelo geotécnico actual, las unidades MU y RRD fueron agrupadas por su similitud en cohesión y ángulo de fricción, de esta manera poder simplificar los parámetros. Respecto a la hidrogeología del lugar, gracias a la inserción de los puntos de la profundidad del agua, se obtuvo un nivel freático próximo a la superficie que rondan entre 0 y 8m. Actualmente, en la zona del deslizamiento nos encontramos con un FS = 1.42 y 2.2 en condiciones saturadas y secas respectivamente sin la actuación de un sismo y con los parámetros geotécnicos calibrados, lo cual nos indican que la superficie de deslizamiento se encuentra en condiciones estables.

La extrapolación de las curvas de nivel desde la parte alta de las laderas del deslizamiento ha sido una gran herramienta de reconstrucción topográfica. Con esta nueva topografía, la pendiente media es de 17° - 25° , la cual se suaviza hasta 6° - 10° . La reconstrucción de la geológica es dando continuidad a la geología superficial y las condiciones hidrogeológicas se han considerado los datos bibliográficos ya que condicionan un terreno saturado, en tal sentido los cálculos estarían del lado de la seguridad.

Gracias a la metodología del análisis de estabilidad retrospectivo, se han calibrado los parámetros de nuestro modelo respecto a la información previa de laboratorio obtenida bibliográficamente. Fue necesario reducir los parámetros de resistencia para que ajustaran al proceso de inestabilidad de un sismo con una PGA de 0.149g y dirección de 50° . Además, se ha calculado la estabilidad en el modelo antiguo, en condiciones secas y con el terremoto de 1884 dando un FS = 1.55, y en condiciones saturadas sin el terremoto dando un FS = 1.39; en ambos casos, la condición es estable. Esto permite concluir que los factores que condicionaron el proceso de inestabilidad fueron el terremoto y la posición del nivel freático (hidrogeológico).

Respecto a la evaluación de la reactivación del deslizamiento de Güevéjar, se concluye que los sismos que tengan orientación de 60° a 210° respecto al deslizamiento no van a provocar una reactivación. Mientras que los sismos con una orientación de 260° a 10° , son los que menos magnitud necesitan para provocar la reactivación; esto se puede explicar por la posición del sismo respecto al sentido natural del deslizamiento (330°).

Actualmente el deslizamiento se encuentra en condiciones estables $FS = 1.42$. La reactivación del deslizamiento puede ocurrirse en caso de un evento sísmico con $M_w > 2.8$ cuyo epicentro sea cercano (1km) o en el deslizamiento. A medida que la distancia del epicentro aumenta, se requiere una mayor magnitud para causar su reactivación; se ha determinado que, para distancias epicentrales entre 10km a 60km tenemos $M_w = 3.7 - 6.8$ respectivamente. En este contexto, es muy probable que las fallas activas El Fargue-Jun, Atarfe, Santa Fe, Granada, Padul-Nigüelas y Albuñelas puedan generar este movimiento sísmico que genere la reactivación del deslizamiento. Sin embargo, la probabilidad de que ocurran los sismos máximos que se asocian a la rotura completa de cada una de ellas es baja.

Como trabajo posterior se puede complementar o ampliar más esta metodología de estudio con el empleo de modelos de elementos finitos. Para ello, se emplearía datos de módulos dinámicos de los materiales geotécnicos, la implementación de registros de acelerogramas en la zona, datos de inclinómetros, etc. Asimismo, se podría aprovechar la herramienta de migración del Slide3 a los programas RS2 – RS3. Estos programas trabajan mediante elementos finitos y pertenecen al mismo paquete de Software de Rocscience; esto es una gran ventaja por su compatibilidad a la hora de migrar los modelos 3D. Mediante los programas de elementos finitos se podría estudiar el comportamiento de las tensiones – deformaciones en el deslizamiento de Güevéjar.

Finalmente, esta metodología se puede utilizar en otros grandes deslizamientos que hayan ocurrido en otras partes del mundo, donde el ambiente geomorfológico y tectónico genere zonas de inestabilidades en laderas, y su posible prevención para la reubicación y/o reorganización de pueblos, carreteras y zonas de servicio, evitando pérdidas de económicas, de infraestructuras y vidas humanas.

9. BIBLIOGRAFIA

- Akkar, S., Sandikkaya, M.A. & Bommer, J.J. (2014). *Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East*. *Bull Earthquake Eng* **12**, pp. 359–387. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4>
- Chacón, J.; Irigaray, T.; Fernández, T. (2007). Los movimientos de ladera de la provincia de Granada. In Atlas Riesgos Naturales en la Provincia de Granada, 1st ed.; Ferrer, M., Ed.; Diputación de Granada-*Geological Survey of Spain (IGME)*: Valencia, Spain, 2007; pp. 45–82.
- Delgado, J.; Galiana-Merino, J.J.; García-Tortosa, F.J.; Garrido, J.; Lenti, L.; Martino, S.; Peláez, J.A.; Rodríguez-Peces, M.; de Galdeano, C.S.; Soler-Llorens, J.L.(2021). *Ambient Noise Measurements to Constrain the Geological Structure of the Güevéjar Landslide (S Spain)*. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 1454. <https://doi.org/10.3390/app11041454>.
- El Universal (2023). <https://www.eluniversal.com/venezuela/170985/tragedia-de-vargas-el-desastre-que-estremecio-a-venezuela-hace-24-anos>
- García-Mayordomo, J.; Insua-Arévalo, J.; Martínez-Díaz, J.; Jiménez-Díaz, A.; Martín-Banda, R.; Martín-Alfageme, S.; Álvarez-Gómez, J.; Rodríguez-Peces, M.; Pérez-López, R.; Rodríguez-Pascua, M.; Masana, E.; Perea, H.; Martín-González, F.; Giner-Robles, J.; Nemser, E.; Cabral, J.; the QAFI Compilers Working Group .(2012) The Quaternary Faults Database of Iberia (QAFI v.2.0), *Journal of Iberian Geology*, **38**(1): 285-302.
- IGME (1988). Mapa geológico y Memoria de la Hoja nº 1009 (Granada). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME. Depósito legal: M-30.451 – 1988
- IGN (2024). *Catálogo de terremotos*. Instituto Geográfico Nacional, doi: 10.7419/162.03.2022
- Jiménez Pintor, J., Azor, A. (2006). El Deslizamiento de Güevéjar (provincia de Granada): un caso de inestabilidad de laderas inducida por sismos. *Geogaceta* **40**, pp.287-290.
- Lopez Casado, C. (s.f.). Monitorización Sísmica de Deslizamientos: Criterios de Reactivación y alerta temprana. G-GI3002/IDIN. Universidad de Granada y Jaén. Capítulo II: Investigación geológica y geotécnica de las inestabilidades piloto.
- Margottini, C.; Molin, D.; Serva, L. (1992). *Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data*. *Engineering Geology* **33**, pp. 45-58.
- Martínez Solares, J.M.; Mezcuca, J.(2002). Catálogo sísmico de la península ibérica (880 a.c.1900). Monografía 18, IGN, Madrid, 253 pp.
- Muñoz, D.; Udías, A. (1981). Estudio de los parámetros y serie de réplicas del terremoto de Andalucía del 25 de Diciembre de 1884 y la sismicidad de la región de Granada-Málaga. En: el terremoto de Andalucía de 25 de Diciembre de 1884. IGN, Madrid, pp. 95-139.

- Reicherter, K.R.; Jabaloy, A.; Galindo-Zaldívar, J.; Ruano, P.; Becker-Heidmann, P.; Morales, J.; Reiss, S.; González-Lodeiro, F. (2003). *Repeated palaeoseismic activity of the Ventas de Zafarraya fault (S Spain) and its relation with the 1884 Andalusian earthquake. International journal of earth sciences*, 92, pp.912-922.
- Rodríguez-Peces, M.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.; Insua Arévalo, J.; Jiménez Pintor, J. (2011). *Constraining pre-instrumental earthquake parameters from slope stability back-analysis: Palaeoseismic reconstruction of the Güevéjar landslide during the 1st November 1755 Lisbon and 25th December 1884 Arenas del Rey earthquakes. Quaternary International, Volumen 242, Issue 1, 2011, pp. 76-89, ISSN 1040-6182, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.11.027>.*
- Sanz de Ojeda, P. (2021) . *Análisis Retrospectivo de Grandes Paleo-Deslizamientos de Ladera: Estudio de tres casos en España. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 68 pp.*
- Sanz Pérez, E. (1992). *El deslizamiento de ladera de Güevéjar (Granada) durante los terremotos de Lisboa (1755) y Andalucía (1884). Actas del III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, La Coruña (España), 195-203.*
- Torrijo, F.J.; Garzón, J.; Eguibar, M.A.; Trizio, F. (2022). *Stability Analysis of Soil and Rock Slopes*. Valencia: Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- Vidal, F.(1986). *Sismotectónica de la región Bética-Mar de Alborán. PhD Thesis, University of Granada, p. 450.*