

El deslizamiento de Bàlitx (Mallorca) y su posible origen sísmico. Procesos activos desde el Pleistoceno superior

R. M. Mateos⁽¹⁾, M. J. Rodríguez-Peces⁽²⁾, J. M. Azañón⁽³⁾, J. Rodríguez-Fernández⁽³⁾, F. J. Roldán⁽⁴⁾,
I. García-Moreno⁽¹⁾, B., Gelabert⁽⁵⁾ y J. García-Mayordomo⁽⁶⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Unidad de Baleares. Avda. Ciudad Querétaro s/n. 07007 Palma de Mallorca
rm.mateos@igme.es; inmaculada.garcia@igme.es

(2) Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid
martinjr@geo.ucm.es

(3) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (UGR-CSIC). Campus de Fuentenueva s/n. 18071 Granada
jazanon@ugr.es; jrodrig@ugr.es

(4) Instituto Geológico y Minero de España. Unidad de Granada. Urbanización Alcázar del Genil, 4. Edificio Zulema, bajos. 18006 Granada
fj.roldan@igme.es

(5) Universitat de les Illes Balears. Departament de Ciències de la Terra. Crta Valldemossa km. 7,5. 07071 Palma de Mallorca
bernadi.gelabert@uib.es

(6) Instituto Geológico y Minero de España. C/ La Calera, 1. 28760. Tres Cantos (Madrid)
julian.garcia@igme.es

RESUMEN

El deslizamiento de Bàlitx, situado en el escarpado litoral de la Serra de Tramuntana de Mallorca es un gran deslizamiento rocoso traslacional, cuya superficie de rotura aprovecha un plano de falla normal preexistente. La datación de estrías de calcita sobre el plano de falla con U/Th pone de manifiesto que el último movimiento de la falla está fuera del rango de datación de este método (> 400 ka). El volumen de material movilizado por el deslizamiento se estima en unos 700 millones de metros cúbicos, con un desplazamiento de unos 300 m hacia el NO. Se han identificado procesos activos de apertura de grietas de tracción, con desplazamientos y desplomes de grandes bloques de roca procedentes del escarpe principal del deslizamiento, proceso cuyo inicio coincide con un máximo transgresivo hace 83 ka (Pleistoceno superior), correspondiente al estadio isotópico 5a (OIS 5a), constatado como más cálido y húmedo que el actual. En los materiales deslizados se han identificado grietas con longitudes decamétricas y aperturas de hasta 50 m, cuya generación y apertura continua en la actualidad, y que parecen poner de manifiesto la ruptura del bloque deslizado en varias unidades que se desplazan a distintas velocidades. Se ha realizado un análisis retrospectivo de la estabilidad, considerando varios escenarios posibles relacionados con posiciones críticas del nivel del mar. Los resultados ponen de manifiesto condiciones de estabilidad en todos los casos, con factores de seguridad >1.3, lo que avala la hipótesis de un posible origen sísmico del deslizamiento. El estudio en condiciones dinámicas pone de manifiesto que el deslizamiento de Bàlitx pudo ser provocado por un posible terremoto de magnitud moderada a alta ($M_w \geq 6.0$), localizado en las inmediaciones del deslizamiento (10-30 km), probablemente en relación con alguna de las fallas activas de Mallorca, como la de Palma.

Palabras clave: deslizamientos, expansión lateral, Mallorca, Pleistoceno, sismicidad

The Bàlitx landslide (Mallorca, Spain) and its possible seismic origin: active spreading since the Late Pleistocene

ABSTRACT

The Bàlitx landslide, located on the steep coastal side of the Tramuntana range on the island of Mallorca, is a large translational rock landslide in which the failure surface coincides with the reactivation of an earlier normal fault. The dating of calcite striae on the fault plane with U/Th techniques reveals that the last movement was over 400 kyr ago, which falls outside of the range of this method. The volume of the landslide is estimated to be over 700 million cubic metres, with a north-westward displacement of 300 m. Active extensional cracks as well as block spreads have been identified along the main scarp, together with displacement and toppling of blocks, the beginning of which coincides with oxygen isotope stage OIS 5a (Late Pleistocene = 83 kyr), a wetter and warmer period than the present. Currently active decametre-long cracks up to 50 m

wide can be seen to affect the displaced materials. They reveal the rupture of the displaced block into several units at different speeds. A retrospective analysis of slope stability has been carried out, taking into account different scenarios according to three critical sea stands. All the scenarios are stable, with a safety factor of over 1.35. These results support the thesis that the Bàltx landslide could have been triggered by seismicity. A study of the Bàltx landslide under dynamic conditions reveals that the landslide could have been triggered by a moderate-to-high-magnitude earthquake ($M_w \geq 6.0$) located close to the landslide (10-30 km) and probably related to some of the active faults identified in Mallorca, such as the Palma Fault.

Key words: block-spread, landslide, Mallorca, Pleistocene, seismicity

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

The northern coast of the Tramuntana mountain range on the Island of Mallorca (Spain) is characterized by large-scale landslides. These slope movements are related to the relationship between the accommodation space and the sedimentation rate in the adjacent marine basin. In the case of the Tramuntana range, the sedimentation rate has not been sufficient to fill the accommodation space (Gelabert et al., 2003), causing an unstable slope gradient. Sea-level fluctuations as well as considerable weather changes during the Quaternary in the western Mediterranean (Vesica et al., 2000) have also contributed to intense slope dynamics in this region.

The Bàltx landslide is located on the coastal fringe of the Tramuntana range and represents a large translational landslide, estimated at over 700 million cubic metres in volume and with a north-westward displacement of 300 m (Fig. 1). Block-spread processes have been identified in the main scarp of the landslide as well as in the displaced materials, the beginning of which coincides with late Pleistocene (83 kyr).

The important role played by old faults in the landslide (dated at more than 400 kyr), leads us to hypothesize a possible seismic origin. This is also supported by previous palaeoseismic studies on the island (Silva et al., 2001), which have identified greater seismic activity during the Neogene and Quaternary than at present. This work analyses all the geological, geomorphological and hydrogeological factors involved in the landslide, in order to establish its characteristics, failure mechanism and subsequent active processes, as well as their evolution during the last 100 kyr. Seismicity has been assessed to calculate the possible earthquake which might have triggered the landslide.

The Bàltx landslide

The Tramuntana range is the main mountainous alignment of Mallorca. The geological structure of this Alpine chain leads to a southern slope that is gentler than the coastal one, which is much more rugged and abrupt, with a prevalence of very high cliffs overlooking the sea. The mountains correspond to reliefs caused by Miocene structuring linked to the Alpine folding, made up of a series of NW-overlapping thrusts (Gelabert et al., 1992; Gelabert, 1998). The stratigraphy of the Tramuntana range begins with deposits of siliceous sandstone from the Lower Triassic and proceeds to more recent colluvial Quaternary sediments. Carbonate lithologies clearly predominate, especially Jurassic limestone and dolostone, which constitute the framework of the mountains. The coastal fringe, where the Bàltx landslide is located, is delimited by post-Miocene normal faults (Figs 2 and 3).

At Bàltx two thrust sheets composed of around 350 m of hard, Lower Jurassic, dolostone breccias overlie softer rocks belonging to the Keuper (Upper Triassic) (Fig. 4). A normal fault with a NW displacement of 300 m interrupts this structure. The landslide surface reactivates the fault and tends at depth toward the horizontal, using the Keuper soft materials, at the base of the detaching thrusts (Fig. 4). Dating of the calcite striae on the fault plane using U/Th techniques reveals an age of over 400 kyr, which falls outside of the range of this method.

The type of movement is a translational slide, moving along a rupture surface that reuses a previous fault. The head of the displaced material moves almost vertically downward, whereas the upper surface of the displaced material tilts backward toward the scarp (Fig. 5).

Active processes: block spreading and tensional cracks

After the landslide, during which the main scarp was formed, block spreading began. The thick layer of Liasic dolostone breccias constituting the scarp overlies softer Keuper clays with gypsum. The firm upper layer may have fractured into distension cracks and separated into strips moving along the slope (Figs 6 and 7). The rate of this movement must have been extremely slow (Cruden and Varnes, 1996) and ended up with the

collapse of the block, which is fragmented and accumulated at the foot of the scarp, giving rise to a chaotic deposit of karstified breccias (Fig. 8). The breccias in an outcrop at the base of the deposit have been dated to 82.5 ± 5.6 kyr, which corresponds to oxygen isotope stage OIS 5a of the Late Pleistocene. The initiation of the process was probably related to a higher degree of karstification during a wetter, warmer period than the present (Leroy *et al.*, 1996; Ginés, 2000; Macklin *et al.*, 2002). Large decametric cracks up to 50 m wide have been identified in the displaced mass (Figs 9 and 10). The opening of these cracks is a currently active process which affects the soil as well as the traditional terrace walls, and corresponds to several units moving at different speeds within the displaced mass.

Slope-stability back-analysis

Different stability scenarios have been taken into account, considering both the possibility of basal failure surfaces (Fig. 11) as well as three critical sea stands (Pomar *et al.*, 1987; Bardají *et al.*, 2009; Dorale *et al.*, 2010): (1) 35 m above current sea level, related to a high stand corresponding to the Mindel/Riss interglacial (300 kyr ago); (2) 20 m below current sea level, related to a low-stand during the Riss/Würm glaciation (~85 kyr ago); and (3) 3m above the present-day level, related to oxygen isotope stage OIS 5a during the Riss/Würm interglacial (~83 kyr ago). The application of Slide 5.0 (Rocscience Inc., 2003) and a limit equilibrium analysis (Morgenstern and Price, 1965) show that all three scenarios are stable, with a safety factor of over 1.35 and go to support the thesis that the Bàlitz landslide was triggered by seismicity, whilst the presence of water in the failure surfaces (controlled by sea-level changes) had no influence.

Slope-stability analysis under dynamic conditions

For our study we accepted peak ground acceleration (PGA) to be a representative parameter of the ground motion related to an earthquake. The worst scenario for stability was taken to correspond to a sea stand of 35 m above present-day levels. The most likely magnitude-distance pairs of potential earthquakes that might have triggered the Bàlitz landslide, the PGA of which could overcome the estimated critical acceleration of 0.148g, have been estimated (Fig. 12). The mean value of PGA was obtained via a selection of ground-motion prediction equations for the Mediterranean area (Skarlatoudis *et al.*, 2003; Ambraseys *et al.*, 2005; Akkar and Bommer, 2007; Bindi *et al.*, 2010). This analysis suggests that the Bàlitz landslide could have been triggered by a moderate-to-high-magnitude earthquake ($M_w \geq 6.0$) located at a distance of some 10-30 km to the landslide, probably related to one of the active faults on the Island of Majorca, such as the Palma Fault (Fig. 2).

Conclusions

The Bàlitz landslide is a large translational landslide located on the northern, coastal side of the Tramuntana range on Mallorca. The landslide surface coincides with a post-Miocene normal fault, the last reactivation of which occurred more than 400 kyr ago. The basal failure surfaces tend at depth towards the horizontal, using the soft materials from the Keuper. A back-analysis supports a seismic origin for the landslide, where stable conditions are obtained even for the worst-case scenario of saturated conditions for the estimated landslide surfaces. A study of the Bàlitz landslide under dynamic conditions reveals that the landslide could have been triggered by a moderate-to-high-magnitude earthquake ($M_w \geq 6.0$) located some 10-30 km from the landslide, probably related to one of the active faults identified on Mallorca, such as the Palma Fault.

With regard to the currently active block spreading affecting the main scarp, our dating shows that this process started 83 kyr ago (Late Pleistocene), which coincides with oxygen isotopic stage OIS 5a, a wetter, warmer period than the present. The earlier formation of the main scarp provides sufficient evidence to show that the Bàlitz landslide occurred before this time.

Introducción

La costa norte de la Serra de Tramuntana de Mallorca se caracteriza por la impronta que han dejado en el relieve grandes deslizamientos (Mateos, 2006). Este hecho viene avalado por la constatación de que la tasa de acomodación es superior a la tasa de sedimentación en la plataforma marina (Gelabert *et al.*, 2003), generándose un gradiente inestable que da lugar a la ocurrencia de grandes movimientos de ladera.

Las fluctuaciones del nivel marino y los importantes cambios climáticos que han afectado al Mediterráneo occidental durante los últimos 100.000 años (Vesica *et al.*, 2000; Tuccimei *et al.*, 2006) han colaborado también, sin duda alguna, a la inestabilidad de las laderas costeras de esta región.

El deslizamiento de Bàlitz constituye un ejemplo de lo mencionado anteriormente. Localizado en el sector central de la franja costera de la Serra de Tramuntana de Mallorca, representa un gran desli-

zamiento rocoso de tipo traslacional. El volumen del deslizamiento se estima en unos 700 millones de metros cúbicos, con un desplazamiento de unos 300 m hacia el NO, y del que únicamente es visible una parte emergida (Fig. 1). El importante papel que juega la reactivación de antiguas estructuras geológicas en el deslizamiento, y la envergadura del movimiento, facilitan argumentos para buscar un posible origen sísmico al mismo.

En el escarpe principal del deslizamiento se han identificado procesos de apertura de grietas de tracción, con el desplazamiento y colapso de grandes bloques de roca a lo largo de la ladera, que pueden identificarse localmente con un proceso de expansión lateral. La datación con U/Th de los depósitos más antiguos generados por estos procesos otorga una edad a los mismos de ~ 83 ka, que coincide con la última pulsación transgresiva del interglacial Riss-Würm, co-



Figura 1. Vista aérea y desde el mar del deslizamiento de Bàltx, en el escarpado litoral de la Serra de Tramuntana de Mallorca.

Figure 1. Views of the Bàltx landslide from the air and sea on the steep coastal side of the Tramuntana mountain range on the Island of Mallorca, Spain.

responsable al estadio isotópico 5a (OIS 5a). El comienzo de la expansión lateral pudo iniciarse por una intensificación de los procesos kársticos durante este periodo, constatado como más cálido y húmedo que el actual.

A pesar de que el registro instrumental e histórico de terremotos en Mallorca revela una actividad sísmica baja, estudios paleosísmicos (Silva *et. al.*, 2001) ponen de manifiesto una mayor actividad sísmica neógena y cuaternaria, con la identificación de fallas activas en el entorno de Bàltx que pudieron haber desencadenado el deslizamiento.

Objetivos y metodología

El presente trabajo presenta un estudio detallado del deslizamiento de Bàltx (Sóller, Mallorca), que analiza todos los elementos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos que permitan conocer las características del movimiento, el modelo de rotura, los procesos activos derivados y su ocurrencia a lo largo del tiempo. Como posible motor desencadenante se analiza la sismicidad y paleosismicidad de la región, dejando patente que se trata de una hipótesis de trabajo, asumiendo numerosas incertidumbres al respecto. Por ello, uno de los principales objetivos que se propone en el presente trabajo es la estimación del posible terremoto que pudo desencadenar el deslizamiento y discutir el papel de las fallas activas más cercanas al mismo.

Para conseguir los objetivos planteados se han llevado a cabo los siguientes trabajos:

- Caracterización geológica, geotécnica e hidrogeológica del deslizamiento de Bàltx. Se ha realizado una cartografía geológica de la zona a escala 1:10.000, así como varios cortes geológicos paralelos y perpendiculares al movimiento. Debido a la dificultad de acceso a la zona, parte de la caracterización se ha llevado a cabo desde el mar, mediante observaciones realizadas desde un barco. La cartografía geológica y su interpretación han sido avaladas por los datos de los sondeos de investigación realizados por el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA, 1995) en el entorno de la zona de Bàltx. También se han recopilado los principales parámetros geotécnicos de los materiales implicados en el deslizamiento (Mateos *et. al.*, 2002, 2008), a partir de muestras de testigos de sondeos realizados en la Sierra de Tramuntana. Los puntos visibles de surgencia de agua han sido inventariados.
- Caracterización de los procesos activos que afectan al deslizamiento. Además de las observacio-

nes en campo, se ha realizado una cartografía de grietas en la zona, así como la identificación de todos aquellos elementos geomorfológicos que indican estos procesos. La información ha sido representada en un mapa geomorfológico a escala 1:10.000.

- Conocimiento de la edad del deslizamiento y de los procesos activos. Se han llevado a cabo dataciones de muestras de calcita pura con U/Th en el Laboratorio Radioquímico de la Universidad italiana "Roma Tre", tanto en la superficie del plano de falla como en los materiales implicados en los procesos activos. El difícil acceso a la zona ha dificultado la obtención de un mayor número de muestras con tales fines.
- Relación de las dataciones obtenidas con posibles eventos climáticos y/o eustáticos pleistocenos en la cuenca mediterránea. Se ha realizado una exhaustiva recopilación bibliográfica al respecto.
- Análisis retrospectivo de la estabilidad del deslizamiento por el método de equilibrio límite, en condiciones estáticas y dinámicas. Se han seleccionado las superficies de rotura más probables teniendo en cuenta los planos preferentes de debilidad observados. Se han considerado diferentes posiciones del nivel del mar registradas durante el Cuaternario, en el periodo que tenemos constancia de ocurrencia del deslizamiento, con objeto de verificar si el agua fue el factor desencadenante. A partir de la situación más desfavorable se ha estimado el valor de aceleración sísmica mínima requerida (aceleración crítica) para provocar el deslizamiento.
- Estimación de la magnitud del terremoto que pudo desencadenar el deslizamiento y discusión del papel de las fallas activas más cercanas al movimiento. Se han estimado los valores de magnitud-distancia epicentral para terremotos cuya PGA (Peak Ground Acceleration) podría superar la aceleración crítica desencadenante. Estos posibles terremotos se han relacionado con alguna de las fallas activas presentes en Mallorca.

Contexto geológico

La isla de Mallorca, localizada en el Mediterráneo occidental, presenta diferentes dominios geomorfológicos, destacando la Sierra de Tramuntana en el sector noroccidental de la isla. La estructura geológica de la sierra condiciona una vertiente septentrional y costera muy abrupta, con el predominio de acantilados de gran altura sobre el mar. La línea de cumbres de esta cordillera alpina supera los 700 m de altitud, con numerosos

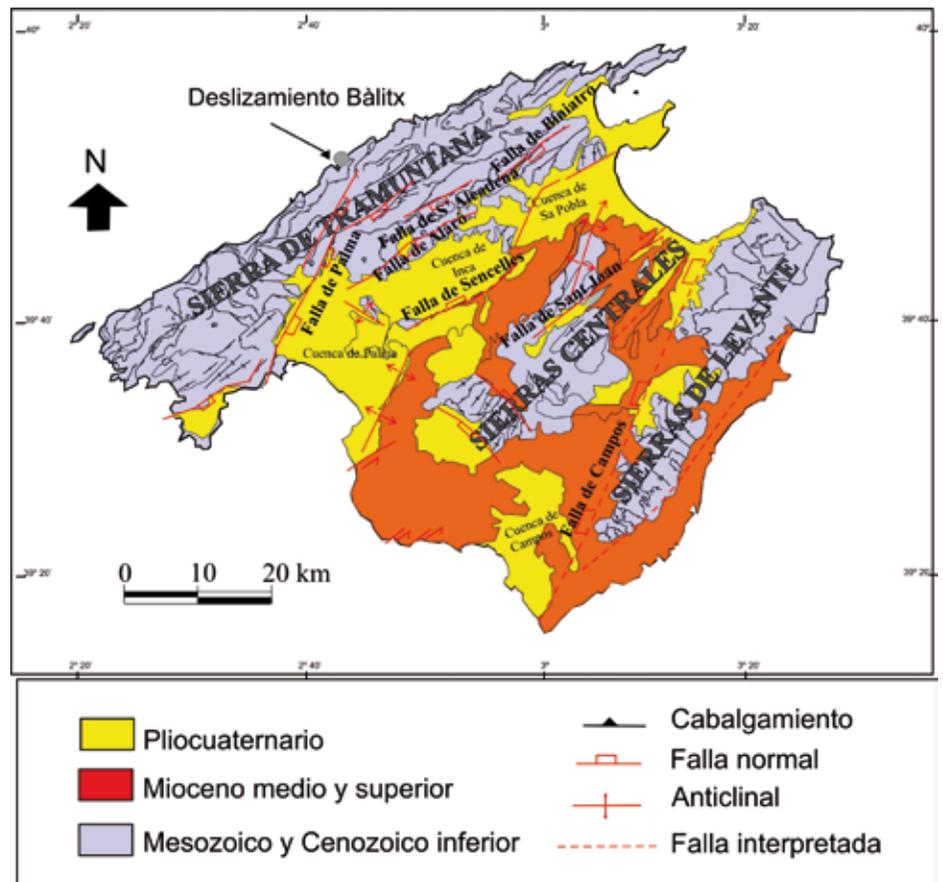
picos con cotas superiores a los 1.000 m, siendo el sector central el más elevado, destacando el Puig Major (1.445 m) como la montaña más alta de Baleares.

Desde el punto de vista geológico, Mallorca representa un segmento emergido del denominado Promontorio Balear, que constituye la prolongación hacia el Mediterráneo de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas (Fontboté *et al.*, 1990). Este promontorio está constituido por materiales desde el Paleozoico hasta el Mioceno medio, deformados por la orogenia alpina desde finales del Oligoceno hasta el Serravalliense (Gelabert *et al.*, 1992). A finales del Mioceno comenzó un nuevo periodo extensivo, que determinó la actual configuración de la isla (Fig. 2) en sierras (horsts) y cubetas (grabens), con una dirección predominante de las estructuras NE-SO (Álvaro, 1987, Benedicto *et al.*, 1993). Destacan las cubetas o cuencas de Palma, Inca y Sa Pobra (Fig. 2), delimitadas de la Tramuntana por fallas normales de largo recorrido, como las fallas de Palma o Alaró; y cuyo movimiento a lo largo de los últimos 10 millones de años ha generado el desarrollo de las cubetas de sedimentación, con espesores de sedimentos post-orogénicos que superan los 500 m (Sàbat *et al.*, 2011).

La Sierra de Tramuntana es por lo tanto una cadena alpina formada por un sistema imbricado de cabalgamientos vergentes hacia el NO y cuyo nivel regional de despegue lo constituyen los materiales de naturaleza arcilloso-evaporítica del Triásico superior (Gelabert, 1998). El esqueleto principal de la sierra está constituido por las calizas y dolomías del Jurásico inferior (Lías), rocas duras que determinan el relieve tan abrupto de la sierra y el claro predominio de las morfologías propias del karst. No obstante, la mitad nororiental de la sierra es de naturaleza más dura que la mitad suroccidental, predominando en la primera calizas masivas, dolomías y brechas carbonatadas, de edades comprendidas entre el Jurásico inferior y el Mioceno medio; mientras que en la mitad suroccidental afloran los materiales más antiguos de la sierra, así como rocas paleógenas, de naturaleza principalmente margosa. Estas diferencias litológicas determinan las tipologías de rotura de las laderas. Así, en la franja nororiental, los movimientos de ladera predominantes son los desprendimientos rocosos y los deslizamientos en roca; mientras que en la suroccidental destacan los deslizamientos de tierras y flujos.

Figura 2. Mapa geológico simplificado de la isla de Mallorca. Se observan las tres sierras principales: Tramuntana, Centrales y Levante, que constituyen estructuras alpinas neógenas. Las cuencas (Palma, Inca, Sa Pobra, Campos), constituyen semi-grabens desarrollados a lo largo de fallas normales post-miocenas, que determinan grandes cubetas de relleno post-orogénicas. La estructura principal de la Sierra de Tramuntana es una secuencia de cabalgamientos vergentes hacia el NO, cuyo margen meridional está delimitado por una serie de fallas normales activas (Palma, s'Alcadena, Biniatró y Alaró). Modificado de Sàbat *et al.*, 2011.

Figure 2. Simplified geological map of the island of Mallorca. The three main mountain chains (Tramuntana, Central and Llevant), all of which are Neogene Alpine structures, are shown. The post-orogenic basins (Palma, Inca, Sa Pobra and Campos), which are semi-grabens developed along post-Miocene normal faults at the foot of the mountains, are also indicated. The Tramuntana range consists of a series of NW-overlapping thrusts, the southern fringe being delimited by active normal faults (Palma, s'Alcadena, Biniatró and Alaró). Modified from Sàbat *et al.*, 2011.



El deslizamiento de Bàltx

El deslizamiento de Bàltx se localiza en la franja costera del sector central de la Tramuntana, en el tramo comprendido entre el Puerto de Sóller y Cala Tuent (Fig. 3). Desde el punto de vista estructural, se observan con nitidez en la zona los frentes de cabalgamiento vergentes hacia el NO, con direcciones preferenciales NE-SO, así como un sistema de fallas normales con direcciones paralelas a la costa, resultado de la fase distensiva que comenzó a finales del Mioceno (Gelabert, 1998). Estas fallas normales, visibles a escala regional (Fig. 3), juegan un papel fundamental en la dinámica de las laderas y determinan los rasgos geomorfológicos predominantes en el paisaje, al definir los grandes escarpes de roca e incisiones en este tramo de la costa. Hacia el NE del deslizamiento de Bàltx (Fig. 3) se observa otra morfología muy similar; se trata del deslizamiento de Sa Costera, a cuyo pie surge una de las fuentes más caudalosas de la isla, el manantial kárstico de Sa Costera, que drena los relieves carbonatados de Montcaire.

La zona de Bàltx comprende un área triangular de 1,7 km² situada a 1,5 km al NE del Puerto de Só-

ller (Fig. 3). Constituye un deslizamiento rocoso de tipo traslacional, a favor de una falla normal de alto ángulo que probablemente haya sufrido diferentes reactivaciones a lo largo del tiempo. El escarpe del deslizamiento, prácticamente vertical (Fig.1), presenta una morfología semicircular, con una altura de hasta 260 m. El material movilizado por el deslizamiento se estima en unos 700 millones de metros cúbicos de roca, la mayor parte sumergidos, con un desplazamiento hacia el NO de unos 300 m.

El relieve de Bàltx es muy abrupto, en apenas 720 m de distancia, se pasa de una cota de 579 m (Puig de Bàltx) al nivel del mar. No obstante, el techo del bloque deslizado presenta un relieve más suave, donde se localizan algunas casas rurales. El resto de la zona emergida del deslizamiento es prácticamente inaccesible, con una elevada pendiente hacia el mar (Fig. 1 superior), donde predominan numerosos movimientos de ladera activos (deslizamientos, flujos de derrubios y desprendimientos). Al pie del deslizamiento existe una pequeña isla denominada *S'Illeta* (67 m s.n.m.), con forma triangular y unos 30.000 m² de superficie.

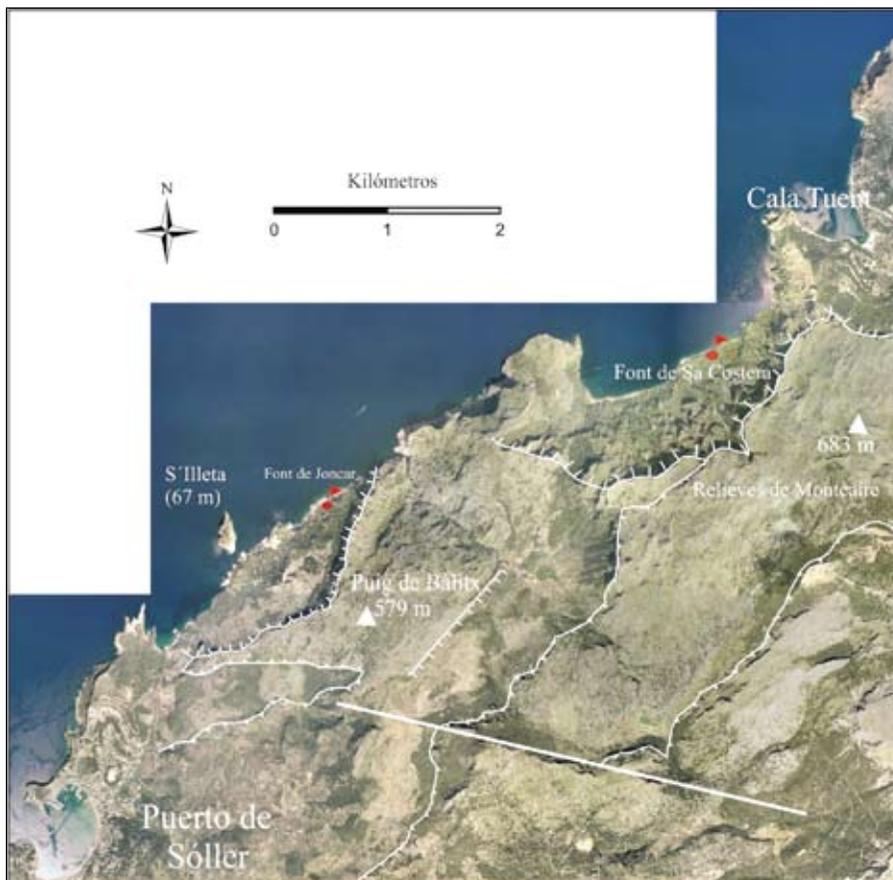


Figura 3. Foto aérea de la zona costera comprendida entre el Puerto de Sóller y Cala Tuent, en el sector central de la Sierra de Tramuntana. Se representan las principales estructuras geológicas que determinan el relieve de la zona: los mantos de cabalgamientos vergentes hacia el NO y las fallas normales postorogénicas paralelas a la costa, que juegan un papel fundamental en la dinámica de vertientes de este tramo litoral.

Figure 3. Aerial view of the coastal zone between Sóller Port and Cala Tuent in the central area of the Tramuntana range. The main geological features determining the morphology of the area are represented: NW-overlapping thrusts as well as post-Alpine normal faults parallel to the coast, which play an important role in the slope dynamics of this coastline.

Modelo geológico del deslizamiento

La cartografía geológica a escala 1:10.000 realizada en la zona ha permitido establecer el modelo geológico del deslizamiento de Bàltx (Fig. 4). En el área de Bàltx se observa la superposición de dos láminas de cabalgamiento vergentes hacia el mar, constituidas por un potente nivel de dolomías brechoides del Lías (hasta 350 m) superpuesto a los materiales blandos del Keuper, constituidos por arcillas con yesos y rocas volcánicas. El espesor de los materiales liásicos no solo es visible en el escarpe de Bàltx (supuestamente erosionado en parte), sino que está constatado a través de las columnas de sondeos realizados en la zona por el MOPTMA (1995). El sondeo B-1, situado al sur de Bàltx (Fig. 4), y correspondiente a la escama superior, pone de manifiesto la existencia de 365 m de brechas dolomíticas liásicas hasta llegar al contacto

del Keuper, constituidos por arcillas con yesos y rocas volcánicas. El espesor de los materiales liásicos no solo es visible en el escarpe de Bàltx (supuestamente erosionado en parte), sino que está constatado a través de las columnas de sondeos realizados en la zona por el MOPTMA (1995). El sondeo B-1, situado al sur de Bàltx (Fig. 4), y correspondiente a la escama superior, pone de manifiesto la existencia de 365 m de brechas dolomíticas liásicas hasta llegar al contacto

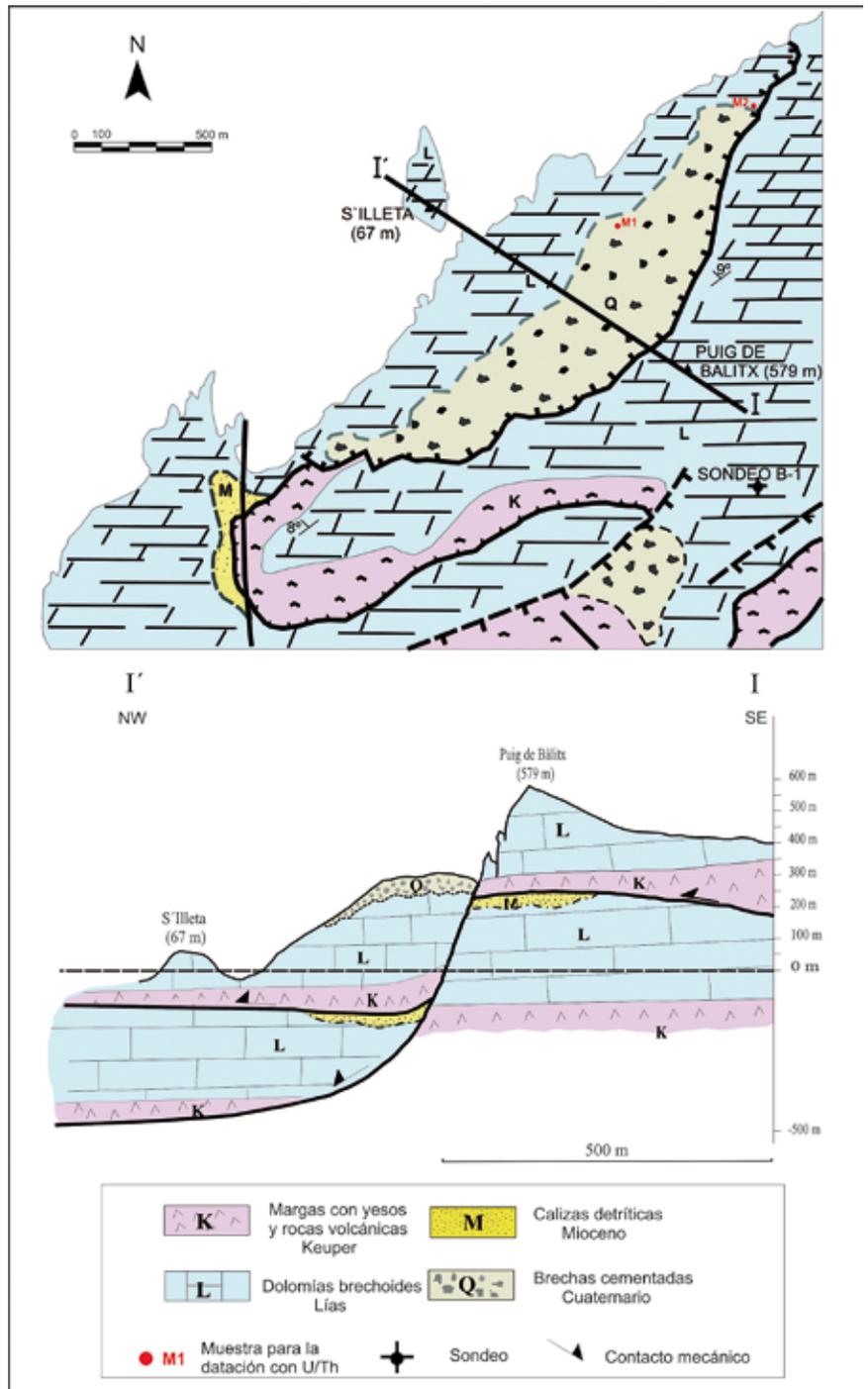


Figura 4. Cartografía geológica del área de Bàltx y corte geológico realizado desde el Puig de Bàltx hasta S'Illeta. Se observa la superposición de dos escamas de cabalgamiento vergentes hacia el NO, y constituidas por potentes niveles de brechas dolomíticas del Lías (rocas duras) sobre los materiales blandos del Keuper. La falla normal rompe esta estructura, con un salto de casi 300 m hacia el NO. La superficie del deslizamiento reactiva la falla y tiende a horizontalizarse en profundidad, aprovechando los niveles blandos del Keuper de la escama inferior.

Figure 4. Geological map and cross section of the Bàltx area from Puig de Bàltx to S'Illeta. The superposition of two thrust sheets composed of thick levels of hard dolostone breccias overlying soft Keuper material and overlapping towards the NW can be seen. A normal fault with a NW displacement of 300 m interrupts this structure. The landslide surface reactivates the fault and tends at depth to the horizontal, using the soft Keuper materials from the lower sheet.

con los materiales del Keuper. Asimismo, los sondeos realizados en la lámina inferior (zona de Sóller) reflejan un espesor similar de los materiales liásicos. Esta información, unida al análisis detallado de los afloramientos de la costa, ha permitido la realización del modelo geológico del deslizamiento, representado en el corte de la Fig. 4.

El deslizamiento de Bàltx se interpreta como un movimiento traslacional a favor de un plano de falla normal preexistente de alto ángulo (73°). Se desconoce el salto original de la falla. No obstante, si sumamos este al desplazamiento originado por el deslizamiento, obtenemos un movimiento con una componente en la vertical de casi 300 m. Este dato viene avalado, no solo por el escarpe visible de la falla (260 m), sino por los afloramientos al pie del bloque emergido y en S'Illeta, donde se constata la presencia de los niveles correspondientes al Lías inferior (Pliensbachiense), datados por Colom (1970) mediante ammonites, belemnites y braquiópodos. El cabalgamiento cartografiado en tierra, estaría por lo tanto sumergido bajo el mar (a unos 100 m de profundidad), así como los materiales del Keuper visibles en la base del escarpe.

En relación a la superficie del deslizamiento, se ha interpretado que el escarpe principal aprovecha una falla normal previa. En profundidad, el deslizamiento se enraíza en los niveles plásticos del Keuper, tendiendo por tanto a horizontalizarse (Fig. 4). Este modelo cinemático sería congruente con el salto observado de la falla, con el espesor de los materiales liásicos de

la escama inferior (constatado por sondeos) y con el comportamiento geotécnico de los materiales.

En la cabecera del deslizamiento se observa una rotación local de los materiales. Se trata de una franja situada en la zona central del deslizamiento, al pie del escarpe, de unos 10.000 m² y hundida unos 8 m respecto al entorno. En esta franja predomina una vegetación de helechos comunes, *Pteridium aquilinum*, poco frecuente en esta zona mediterránea, que indica mayor humedad y presencia de agua (Fig. 5). Existen numerosas descripciones de deslizamientos traslacionales en las que se observa también un escarpe principal con forma arqueada y la rotación local de los materiales en cabecera, con la finalidad de acomodarse a la superficie de rotura (Hutchinson *et al.*, 1980; Rodríguez Ortiz, 1988; Lomoschitz y Corominas, 1996; Corominas *et al.*, 2005).

La datación de un cristal de calcita estriado en el plano de falla (M2, Fig. 4 superior) mediante la técnica U/Th, indica que el último movimiento de la falla está fuera del rango de datación de este método (>400 ka; Noller *et al.*, 2000).

Hidrogeología

El único manantial existente en la zona de Bàltx es la Font de Joncar, a pocos metros de cota y situada en el extremo oriental del bloque deslizado (Fig. 3). Se trata de una fuente de escaso caudal (<0,5 l/s), que se agota durante el verano y que parece drenar los materia-



Figura 5. Cabecera del deslizamiento de Bàltx, donde se detecta un hundimiento y un giro contrapendiente. Constituye una zona de surgencia de agua, predominando una vegetación de helechos, *Pteridium aquilinum*, poco común en la sierra.

Figure 5. Head of the Bàltx landslide, where subsidence is detected as well as a backward tilt toward the scarp. It is an area of up-welling of water, with a predominant vegetation of ferns, *Pteridium aquilinum*, which are quite uncommon in this range.

les más permeables del Cuaternario y Lías del bloque hundido. Al pie del escarpe principal del deslizamiento no hay constancia de manantiales, hecho avalado por la existencia de cisternas de agua de lluvia en casi todas las casas rurales de la zona. La zona referida, hundida respecto al entorno y donde predominan los helechos (Fig. 5), es el único punto visible de presencia de agua, donde parece drenar los materiales dolomíticos del Lías en el contacto con los materiales de baja permeabilidad del Keuper.

Procesos activos en el escarpe principal: Expansión lateral de bloques

El escarpe de rotura del deslizamiento presenta unas paredes prácticamente verticales, de hasta 260 m de altura (Figs. 1, 3 y 4), y está constituido por las brechas dolomíticas del Jurásico inferior (Lías). A lo largo del escarpe, y principalmente en el sector suroccidental del mismo, se observan numerosos bloques paralelepípedicos de roca despegados del escarpe principal, que parecen haberse desplazado a lo largo de la ladera (Figs. 6 y 7), y que localmente reciben el nombre de "Penyal Bernat". Estos bloques pueden tener alturas de hasta 100 m y volúmenes superiores a 60.000 m³ y se han medido desplazamientos de los mismos de hasta 70 m. Numerosos autores (McGill y Stromquist, 1979; Baars, 1989; Hutchinson, 1991) describen morfologías similares asociadas a expansiones laterales de bloques, *block spreads*, que se producen cuando una formación competente descansa sobre un material blando, produciéndose una extensión lateral sin que se identifiquen superficies de cizalla o flujo plástico en la base (Cruden y Varnes, 1996). En el caso de Bàltix, la formación rocosa liásica descansa sobre los materiales blandos del Keuper, buzando la serie ligeramente hacia el mar y el escarpe principal se fractura a través de grietas de tracción que coinciden con discontinuidades preexistentes. Las arcillas con yesos del Keuper se introducen entre las grietas, generando esfuerzos que contribuyen a la apertura de estas. De esta forma, las dolomías liásicas del escarpe se van fracturando, configurándose grandes bloques de roca que se desplazan lentamente a través de los sedimentos del Keuper (Fig. 6), hasta su desplome en la ladera. A lo largo del escarpe se observan los diferentes estadios de individualización, despegue y desplazamiento de estos bloques de roca (Fig. 7). La acumulación de estos bloques, muy fragmentados, da lugar a un depósito caótico de brechas heterométricas. Estos depósitos cementados por calcita, y por lo tanto de gran dureza, pueden tener un espesor superior a los 65 m (Fig. 4) y los bloques que contienen, en ocasiones, sobrepasan los 1.500 m³ de volumen. Los afloramientos

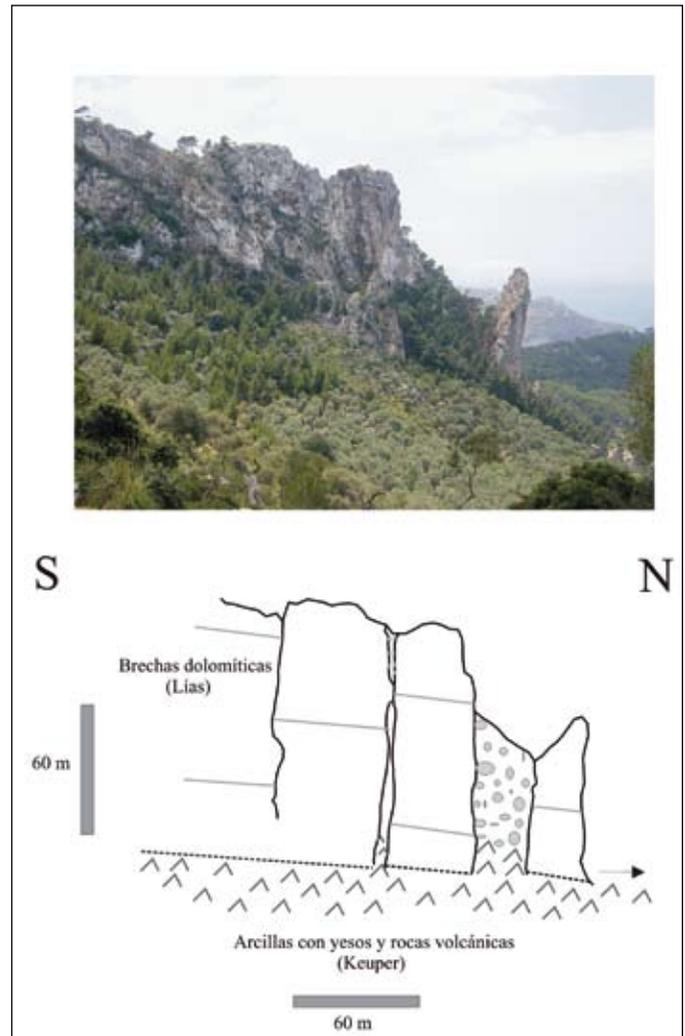


Figura 6. Apertura de grietas de tracción y expansión lateral de bloques "block spread". Las brechas dolomíticas del Jurásico inferior que constituyen el escarpe, se van fragmentando en bloques paralelepípedicos que se deslizan sobre los materiales blandos del Keuper situados en la base. Se trata de un movimiento extremadamente lento, que culmina con el desplome del bloque, que se fragmenta y acumula al pie del escarpe, dando lugar a un depósito caótico de brechas.

Figure 6. Opening of distension cracks and lateral block spreads. A thick layer of Liassic dolostone breccias overlies softer Keuper clays with gypsum; the firm upper layer may have fractured and separated into strips. The soft underlying material is squeezed into the cracks between the strips, which may also be filled with broken, displaced material. Typical rates of movement were extremely slow and ended up with the collapse of the block, which is fragmented and accumulated at the foot of the scarp, giving rise to a chaotic breccia deposit.

tos de estas brechas carbonatadas están a su vez muy karstificados, con una gran variedad de espeleotemas que presentan diferentes direcciones de crecimiento (Fig. 8). Este hecho viene a avalar su origen en los bloques "expandidos" y su vuelco caótico en diferentes posiciones a lo largo del tiempo.



Figura 7. Despegue de grandes bloques de roca del escarpe principal. Margen suroriental del escarpe.
Figure 7. Large blocks of rock are separated and displaced from the main scarp. South-eastern side of the scarp.



Figura 8. Detalle de los depósitos brechoides acumulados al pie del escarpe. Se observa un bloque de grandes dimensiones de las dolomías liásicas con numerosos espeleotemas (horizontales) que indican una posición anterior muy diferente del bloque.
Figure 8. Breccia deposit (detail). A large block of Liassic dolostone presents horizontal speleothems, revealing its former position.

Cruden y Varnes (1996) establecen la expansión lateral de bloques como movimientos extremadamente lentos (<16 mm/año). Recientes estudios así lo confirman. Delgado *et al.* (2011) han puesto de manifiesto procesos muy similares en la Sierra de Aitana (Cordillera Bética), en un contexto geológico similar a Bàltx, con tasas de movimiento muy bajas (entre 0-2 mm/año), estimadas con técnicas interferométricas.

Dataciones y relaciones paleoclimáticas

En uno de los afloramientos de la base de estos depósitos cuaternarios, se ha tomado una muestra del cemento de las brechas (M1, ubicado en Fig. 4), constituido por calcita pura, y se ha procedido a su datación con U/Th. Se ha obtenido una edad de 82,5 ka \pm 5,6 ka, que corresponde al Pleistoceno superior. Estudios de las fluctuaciones del nivel del mar durante el Cuaternario en el Mediterráneo occidental (Ginés, 2000), revelan un máximo transgresivo hace 83 ka, correspondiente al estadio isotópico 5a (OIS 5a), que constituye la última pulsación transgresiva del interglaciar Riss-Würm y cuya correspondencia con el Neotirreniense es ampliamente admitida (Zazo *et al.*, 1997). La asociación faunística analizada en diferentes playas fósiles de Mallorca correspondientes a esta edad (localizadas a alturas que no suelen sobrepasar los 2 m), se caracteriza por la presencia de especies características de aguas cálidas, tales como *Acar alicata* y *Brachyodontes senegalensis* (Cuerda, 1975). Adicionalmente, existe una amplia bibliografía en la franja mediterránea relacionada con estudios paleoclimáticos relativos al OIS 5a (Leroy *et al.*, 1996; Vesica *et al.*, 2000; Macklin *et al.*, 2002), que ponen de manifiesto una pulsación no solo cálida, sino también húmeda durante este periodo. La datación realizada y su correspondencia con el estadio isotópico 5a, constatado como más cálido y húmedo que el actual, parece poner de manifiesto que la expansión lateral de bloques comenzó en este periodo, donde los procesos de karstificación del macizo carbonatado de Bàltx debieron intensificarse, determinando la apertura de fracturas y saturando el nivel basal de Keuper.

La datación obtenida permite también afirmar que el deslizamiento de Bàltx es anterior a 83 ka, y por lo tanto al proceso de expansión lateral, ya que el escarpe del deslizamiento estaba conformado.

Apertura de grietas en el bloque deslizado

Los materiales del bloque hundido del deslizamiento están afectados por infinidad de grietas actuales, con longitudes decamétricas y, en numerosos casos, con

aperturas superiores a los 50 m (Fig. 9). Estas grietas son bien visibles en las brechas cementadas cuaternarias (Figs. 9, B y C), así como en los afloramientos *in situ* de las dolomías liásicas (Figs. 9, D y F). Muchas de estas grietas están en proceso de apertura y fragmentan el suelo y los muros de aterramiento tradicionales de la zona (Figs. 9, A, D y E). Las de mayor apertura, han sido utilizadas como zonas de cultivo o refugio de animales, presentando árboles de cierta edad en su interior (Figs. 9, C y H). La grieta de la Fig. 9- G presenta una profundidad visible superior a 20 m, y no se atisba su final.

La apertura de estas grietas es consistente con el hecho de la imposibilidad de mantener la rigidez de un deslizamiento de estas dimensiones, ya que tiende a romperse en varias unidades que se desplazan a distintas velocidades, generando zonas de tracción y depresiones (ejemplos similares descritos en Corominas *et al.*, 2005). Son movimientos locales, muy lentos, y actualmente activos. Indudablemente, el efecto de socavación del mar juega un importante papel en estos movimientos y su grado de actividad a lo largo del tiempo pueda estar relacionada con los cambios eustáticos del nivel del mar en el Mediterráneo occidental, con amplitudes de hasta 115 m en los últimos 100.000 años.

En la Fig. 10 se muestra el mapa geomorfológico realizado en la zona (modificado de Lausín, 2006), donde se representan los numerosos movimientos de ladera que afectan al bloque deslizado (deslizamientos superficiales y desprendimientos rocosos principalmente), así como un diagrama de rosas con las familias de grietas cartografiadas, muy penetrativas en los materiales rocosos. Se observa un rango amplio de direcciones, destacando aquellas paralelas al escarpe (N20°E) y a la línea de costa (N45°E). Muchas de estas grietas representan un elevado riesgo, ya que se acercan al trazado del camino de montaña, muy frecuentado por excursionistas, así como a las áreas habitadas de la zona.

El conjunto de estos procesos activos refleja una intensa dinámica de vertientes en esta franja costera de la Tramuntana mallorquina.

Análisis retrospectivo de estabilidad por el método de equilibrio límite

Para realizar un adecuado análisis retrospectivo de la estabilidad del deslizamiento, a partir del modelo geológico (Fig. 4), se ha realizado una reconstrucción de la topografía previa al deslizamiento. Debido a que se desconoce el salto de la falla normal, no es posible realizar una restitución del bloque hundido a su posi-

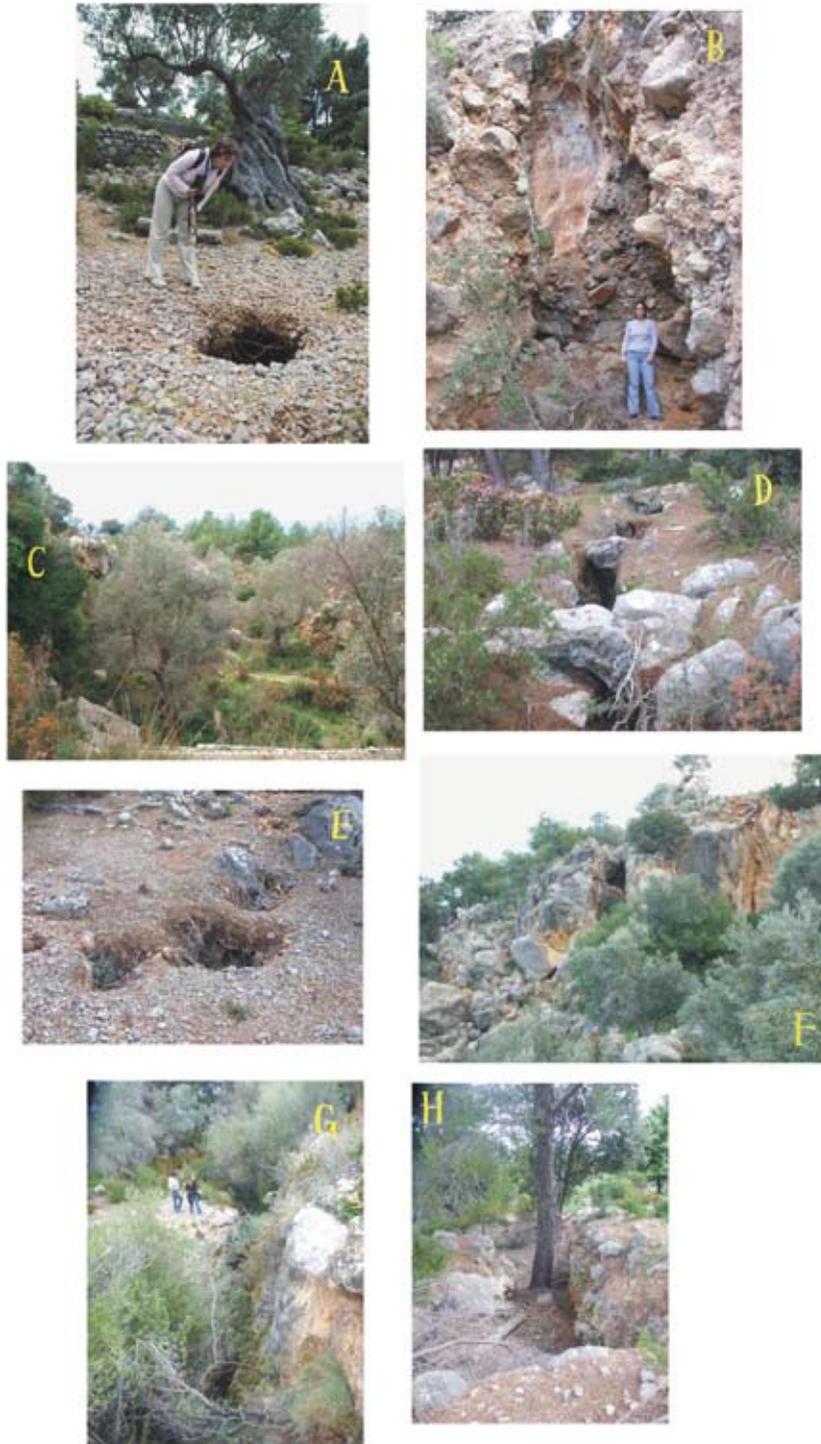


Figura 9. Apertura de grietas en los materiales del bloque deslizado. Presentan longitudes decamétricas, y algunas aperturas superiores a los 50 m (C). Se han cartografiado tanto en las brechas pleistocenas (B, C y H) como en las dolomías liásicas (D, F y G). La apertura de estas grietas son procesos activos que continúan en la actualidad, afectando al suelo y a los muros tradicionales de aterrazamiento (A, D, E).

Figure 9. Decametric cracks in the slipped mass with openings up to 50 m wide (C). The cracks have been mapped not only in the Pleistocene breccias (B, C, H) but also in the Liassic dolostone (D, F, G). These cracks continue to open, affecting both the soil and the traditional terrace walls (A, D, E).

ción original. Sin embargo, teniendo en cuenta que el salto de la falla normal tuvo que ser anterior al deslizamiento, se puede asumir que la topografía previa al deslizamiento no debió ser muy diferente a la actual. A pesar de ello, se ha restituido el volumen de material que forman las brechas cementadas depositadas por los procesos activos en la cabecera del deslizamiento,

incorporándolo al escarpe principal de la falla normal. Las superficies de rotura más probables se han seleccionado por medio de diferentes puntos de control, asumiendo que coinciden con los dos planos preferentes de debilidad preexistentes: la falla normal y los cabalgamientos basales. La combinación de estos dos planos definen dos posibles superficies de rotura di-

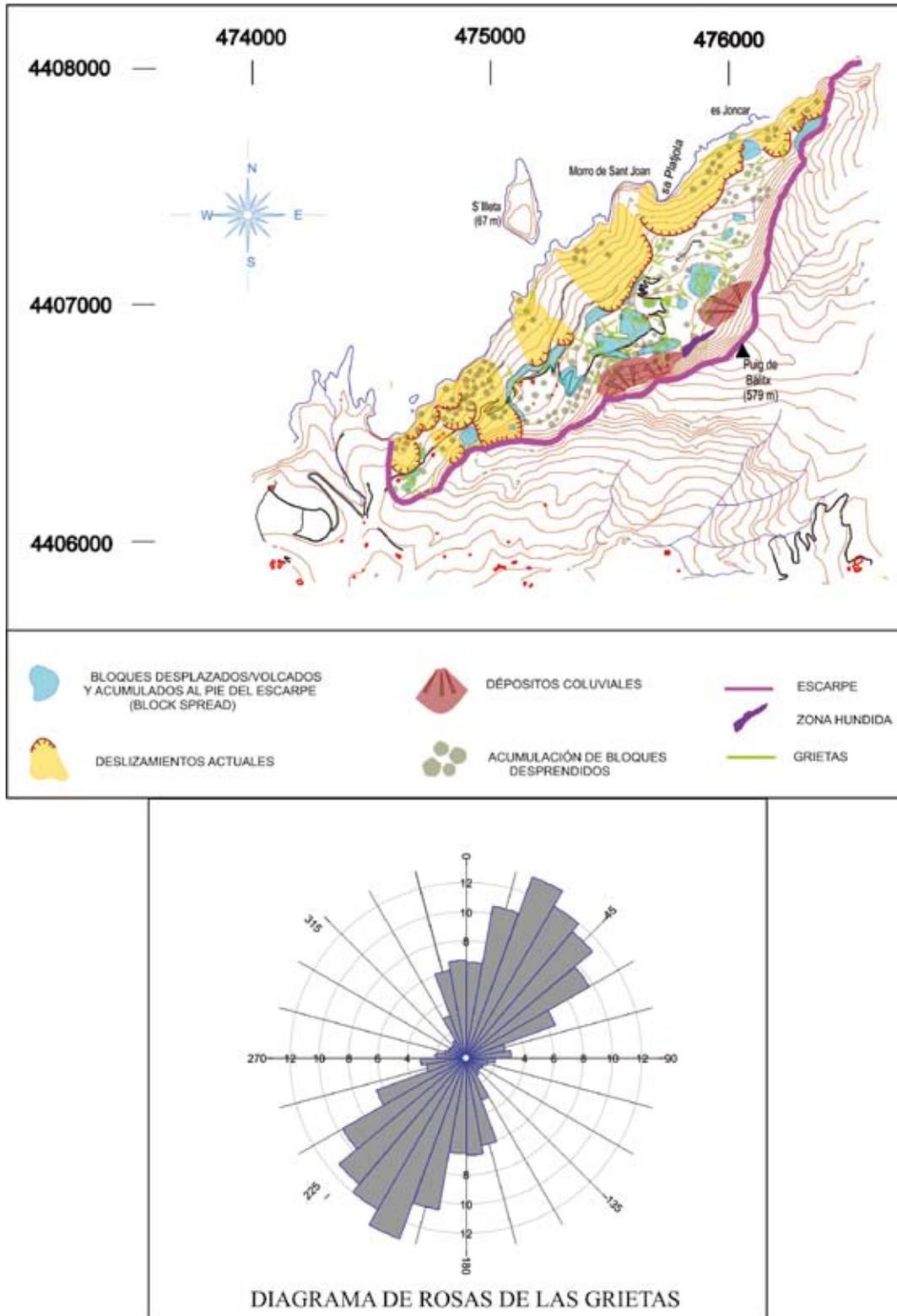


Figura 10. Mapa geomorfológico del bloque deslizado, donde se representan los elementos resultantes de los procesos activos analizados: apertura de grietas de tracción de movimientos locales y movimientos superficiales de ladera. En la figura inferior se representa el diagrama de rosas con los rangos de direcciones de las grietas medidas en campo. Modificado de Lausín, 2006.

Figure 10. Geomorphological map of the displaced mass, in which all the features relating to the active processes are represented: opening of cracks and shallow mass-movements. A rose diagram of the orientations of the cracks is represented in the lower figure. Modified from Lausín, 2006.

ferentes: una superficial y otra más profunda (Fig. 11). La estabilidad de estas superficies de rotura se ha evaluado mediante el programa Slide 5.0 (Rocscience Inc., 2003) y el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price (Morgenstern y Price, 1965), que precisa de una caracterización geotécnica de los materiales involucrados en el deslizamiento. Los criterios de rotura empleados han sido el de Mohr-Coulomb, para los materiales de tipo suelo; y el de Hoek-Brown generalizado (Hoek *et al.*, 2002), para el caso de los materiales rocosos.

Caracterización geotécnica

Desde el punto de vista geomecánico, los materiales involucrados en el deslizamiento de Bàltx (Fig. 4) se pueden agrupar en las siguientes unidades litológicas (de más antigua a más moderna): (1) Margas con yesos y rocas volcánicas del Keuper, (2) Dolomías brechoides del Lías, y (3) Calizas detríticas del Mioceno. En la Tabla 1 se recogen los valores de los principales parámetros resistentes correspondientes a cada unidad. Los datos han sido obtenidos a través de los informes de numerosos sondeos realizados en la Sierra de Tramuntana, y recopilados por Mateos *et al.* (2002) y Mateos (2006), y mediante la estimación del GSI o *Geological Strength Index* (Marinos *et al.*, 2005; Cai *et al.*, 2007) a partir de las características geológicas de cada unidad litológica observadas en las campañas de campo. Para el análisis de estabilidad se han seleccionado los valores residuales de estos parámetros, asumiendo que la superficie de deslizamiento coincide con superficies de rotura preexistentes (falla normal y cabalgamientos basales), que ya han sido movilizadas antes de la generación del deslizamiento y, por tanto, deben presentar condiciones residuales.

mías brechoides del Lías, y (3) Calizas detríticas del Mioceno. En la Tabla 1 se recogen los valores de los principales parámetros resistentes correspondientes a cada unidad. Los datos han sido obtenidos a través de los informes de numerosos sondeos realizados en la Sierra de Tramuntana, y recopilados por Mateos *et al.* (2002) y Mateos (2006), y mediante la estimación del GSI o *Geological Strength Index* (Marinos *et al.*, 2005; Cai *et al.*, 2007) a partir de las características geológicas de cada unidad litológica observadas en las campañas de campo. Para el análisis de estabilidad se han seleccionado los valores residuales de estos parámetros, asumiendo que la superficie de deslizamiento coincide con superficies de rotura preexistentes (falla normal y cabalgamientos basales), que ya han sido movilizadas antes de la generación del deslizamiento y, por tanto, deben presentar condiciones residuales.

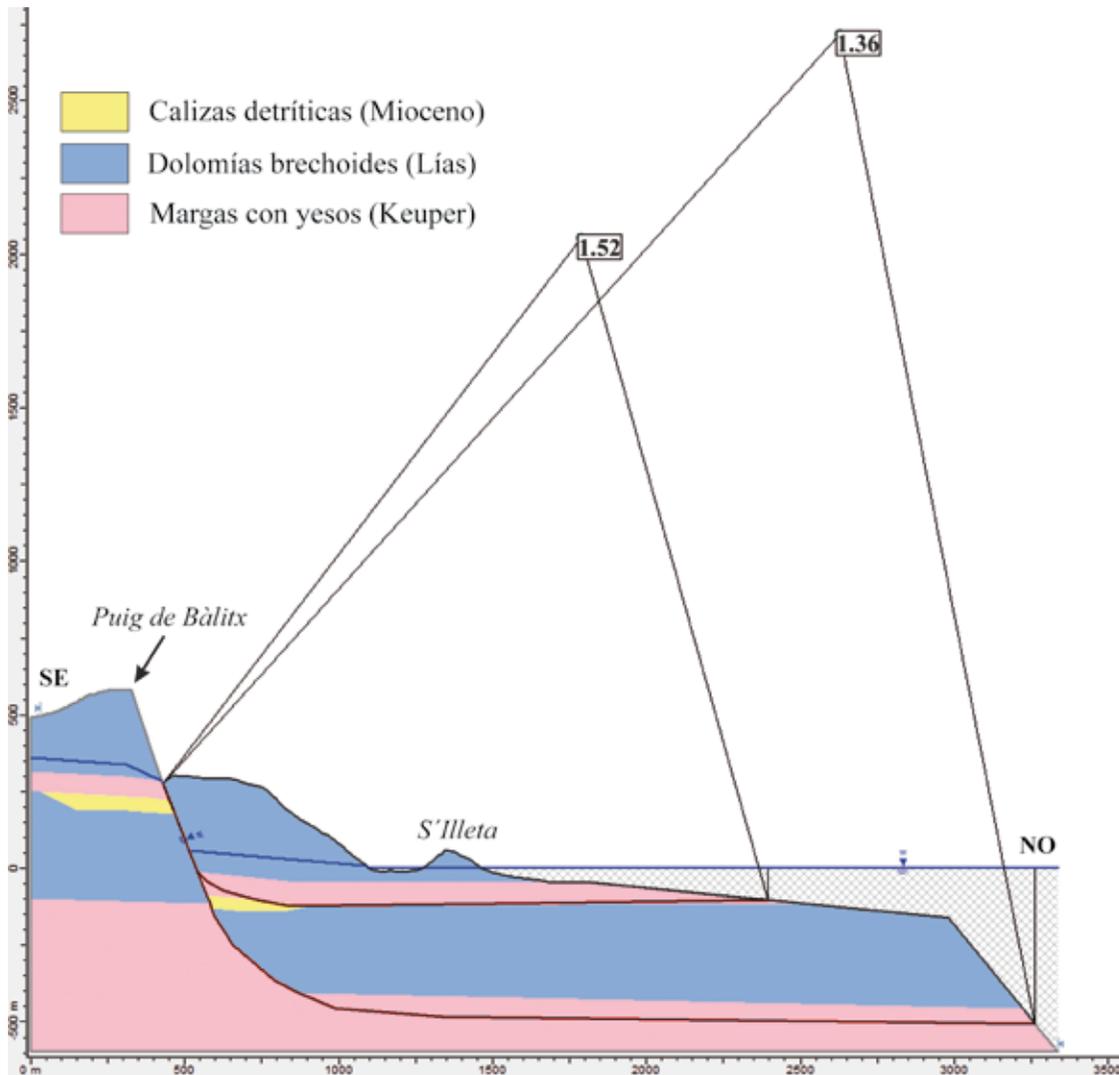


Figura 11. Perfil geológico-geotécnico longitudinal del deslizamiento de Bàltx considerado la posición actual del nivel del mar. Las superficies basales de rotura (superficial y profunda) se muestran mediante líneas rojas y en ambos casos se obtiene un Factor de seguridad > 1.3.

Figure 11. Geological-geotechnical cross section of the Bàltx landslide, with the current position of the sea-level. The basal failure surfaces (shallow and deep) are depicted by red lines. In both cases the safety factor was > 1.3.

Unidad litológica	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c (MPa)	GSI	m_i
Calizas detríticas (Mioceno)	25.27 (±0.95)	26.90 (±0.95)	0.15 (±0.11)	28	45	20	8 (±3)
Dolomías brechoides (Lías)	26.29 (±0.14)	26.53 (±0.14)	0.12	49	40-85	30	9 (±3)
Margas con yesos (Keuper)	17.00 (±1.46)	19.61 (±1.46)	0.04 (±0.02)	23 (±6)	0.25-1.4	-	-

Tabla 1. Propiedades geotécnicas de los materiales involucrados en el deslizamiento de Bàltx. γ , Peso específico aparente; γ_{sat} , Peso específico saturado; c , Cohesión residual; ϕ , Ángulo de fricción residual; σ_c , Resistencia a compresión simple; GSI, *Geological Strength Index*; m_i , Constante para roca intacta.

Table 1. Geotechnical parameters of the materials involved in the Bàltx landslide. γ , Unit weight; γ_{sat} , Saturated unit weight; c , Residual cohesion; ϕ , Residual friction angle; σ_c , Uniaxial compressive strength; GSI, *Geological Strength Index*; m_i , Material constant for intact rock.

Evaluación del posible origen sísmico del deslizamiento de Bàltx

Sismicidad

Desde un punto de vista sismotectónico, la isla de Mallorca presenta una actividad sísmica baja. El registro instrumental muestra que la sismicidad actual es superficial (<10 km de profundidad) y de baja magnitud ($m_{BLG} < 3.5$), concentrándose preferentemente en el sector central de la isla y en la cuenca de Palma (Silva *et al.*, 2001). En la Sierra de Tramuntana no hay sismicidad histórica ni instrumental. Esto puede deberse a la ausencia de información por el despoblamiento histórico de esta región. En contraste con el periodo instrumental, el registro histórico presenta eventos fuertes, como el terremoto de Palma de 1851 ($I_{MSK}=VIII$), el de mayores consecuencias en la isla (Silva *et al.*, 2001). Este evento sísmico causó importantes daños en edificios de la Bahía de Palma y pueblos del entorno, así como algunas inestabilidades de ladera en la Sierra de Tramuntana, donde las intensidades fueron de $I_{MSK}=IV-V$ (Silva *et al.*, 2001). A partir de diferentes relaciones entre intensidad epicentral (I_0) y magnitud momento (M_w) (Karnik, 1971; Rueda y Mezcua, 2001; Benito *et al.*, 2010) se ha estimado una magnitud de M_w 5.5 (5.2-5.7) para este evento. El terremoto de 1851 pudo estar asociado a la rotura de la Falla de Sencelles (Fig. 2), que delimita la cuenca de Inca en su extremo suroriental, y presenta una dirección predominante NE-SO, con una longitud de aproximadamente 14 km. Estudios paleosísmicos han establecido que esta falla activa pudo haber generado terremotos con $M_w > 5.5$ durante el Cuaternario (Silva *et al.*, 2001). Según Giménez y Gelabert (2002) el terremoto de 1851 pudo estar también relacionado con la Falla de Palma (Fig.

2), que delimita el borde meridional de la Tramuntana, siendo una de las fallas más activas y de mayor longitud de la isla (40 km). Al movimiento de esta falla se atribuyen algunos terremotos recientes de magnitud $M < 4.0$, como el del 30 enero 2010, de magnitud $M3.2$. Adicionalmente, se han referenciado anomalías geotérmicas en pozos localizados en la falla de Palma, con temperaturas cercanas a los 30°C (IGME, 1984; López y Mateos, 2006). La sismicidad de la isla también se relaciona con otras fallas de dirección NE-SO, como las fallas de Sant Joan y de Campos (Sàbat *et al.*, 2011), localizadas respectivamente en la zona central y meridional de la isla, y más alejadas del dominio de la Tramuntana.

Análisis de estabilidad en condiciones estáticas

Desde un punto de vista hidrogeológico, el posible efecto del agua en la estabilidad del deslizamiento - en condiciones estáticas- se ha estudiado mediante la definición de un nivel freático profundo, asumiendo un drenaje muy eficiente del macizo dolomítico, tal como se observa en la actualidad. Según estas observaciones, este nivel freático estaría próximo a la superficie del terreno, en la zona húmeda y deprimida de la cabecera del deslizamiento, continuaría a lo largo del plano de falla, y tendería a posicionarse- prácticamente al nivel del mar- en el bloque deslizado (Fig. 11). Por otra parte, las dos posibles superficies basales de rotura se localizan actualmente bajo el mar. No obstante, estudios paleoestáticos del Mediterráneo occidental (Pomar *et al.*, 1987; Bardají *et al.*, 2009; Dorale *et al.*, 2010) nos permite establecer diferentes escenarios de estabilidad, variando la posición del nivel del mar y su relación con los cabalgamientos basales. Para ello, se han seleccionado tres escenarios críticos

posibles, en el periodo comprendido entre 400 ka y 83 ka (Pleistoceno): (1) nivel del mar a 35 metros por encima del nivel actual, relacionado con el máximo transgresivo de hace 300 ka (Pleistoceno medio), durante el interglaciar Mindel-Riss; (2) nivel del mar a 20 metros por debajo del nivel actual, relacionado con el periodo glacial Riss-Würm hace ~85 ka; y (3) nivel del mar entre 0 y +3 m, similar al nivel del mar actual, relacionado con el máximo transgresivo de hace 83 ka (estadio isotópico OIS 5a) durante el interglaciar Riss-Würm.

El análisis retrospectivo de estabilidad realizado indica que el deslizamiento de Bàltx presenta un factor de seguridad estable en condiciones estáticas en todos los casos de nivel del mar considerados. Teniendo en cuenta la posición del nivel del mar similar a la actual se obtuvo un FS=1.61 para la superficie de rotura más superficial y un FS=1.43 para la más profunda (Fig. 11). En el caso de nivel del mar a 35 metros por encima del nivel actual, se han estimado factores de seguridad de 1.52 y 1.36 para las superficies de rotura superficial y profunda, respectivamente. Al considerar las condiciones con el nivel del mar a 20 metros por debajo del actual, se obtienen factores de seguridad del mismo orden de magnitud, aunque ligeramente más altos: FS=1.68 para la rotura superficial y FS=1.46 para la profunda. Los resultados obtenidos parecen poner de manifiesto que el deslizamiento de Bàltx no fue provocado por la presencia de agua y, por lo tanto, avalan la hipótesis de su posible origen sísmico.

Análisis de estabilidad en condiciones dinámicas

Para el estudio de estabilidad de la ladera en condiciones dinámicas, se ha considerado el valor máximo de aceleración sísmica (*Peak Ground Acceleration*, PGA) como parámetro representativo del movimiento del terreno relacionado con la ocurrencia de un terremoto. En primer lugar, con objeto de obtener un valor orientativo de PGA, se ha considerado un escenario sísmico determinista para un terremoto similar al mayor sentido en Mallorca en tiempos históricos, es decir, el terremoto de Palma de 1851 ($I_0=VIII$). La PGA se ha estimado a partir de los valores de intensidad que, en el caso de los sismos históricos, es el único parámetro sísmico disponible. El valor de intensidad en el emplazamiento del deslizamiento de Bàltx ($I=V$) se ha obtenido del mapa de isosistas de este terremoto (Silva *et al.*, 2001). En este trabajo se ha considerado la relación Intensidad-PGA propuesta por Margottini *et al.* (1992) para la estimación de los valores de PGA:

$$\log \text{PGA} = - 2.634 + 0.258 * I$$

donde la PGA está en unidades de aceleración de la gravedad ($1g=9.81 \text{ m/s}^2$) y la intensidad macrosísmica (I) está referida a la escala EMS-98. Esta ecuación fue desarrollada combinando los registros de acelerogramas e intensidades de las bases de datos italianas (periodo 1980-1990). El coeficiente de correlación de esta ecuación es $R=70\%$ y la desviación estándar de $\sigma=0.21$. Esta relación incorpora cierto grado de incertidumbre en la estimación de los valores de PGA pero representa un método razonable para ello, ya que Italia y España comparten el mismo contexto sismotectónico (el límite de placas entre África y Europa) y la tipología de las edificaciones son similares. A partir de esta relación, se ha estimado una PGA media de 0.045g (0.028-0.073g) considerando el valor de intensidad ($I=V$) para el terremoto de Palma de 1851 en el emplazamiento del deslizamiento de Bàltx. Este valor de PGA representa un umbral de aceleración de referencia, ya que se sabe que este terremoto no provocó la reactivación del deslizamiento. Por tanto, el valor de PGA que pudo desencadenar el deslizamiento debió de ser superior a este umbral.

El valor mínimo de aceleración sísmica o aceleración crítica, requerido para provocar el deslizamiento, se ha estimado introduciendo por iteración valores de aceleración sísmica en el análisis de estabilidad dinámico, hasta que los factores de seguridad se redujeran por debajo de 1 y, por tanto, se cumpliera la condición de inestabilidad. En este análisis de estabilidad pseudoestático se ha considerado que la fuerza de la aceleración ejercida sobre el terreno equivale a la mitad de la PGA (coeficiente sísmico $k=0.5$), según los resultados obtenidos por Marcuson (1981) y Hynes-Griffin y Franklin (1984). De manera adicional, se ha estimado la aceleración crítica siguiendo el método propuesto por Newmark (1965) para el caso de roturas circulares:

$$a_c = (FS - 1) g \text{ sen } \alpha$$

Donde a_c es la aceleración crítica (en unidades de gravedad, $1g=9.81 \text{ m/s}^2$), g es la aceleración de la gravedad, FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo entre la vertical y una línea que une el centro de gravedad del deslizamiento y el centro del círculo de rotura.

Asumiendo la situación más desfavorable para la estabilidad, la de nivel del mar a 35 metros por encima del actual, la aceleración crítica obtenida mediante el método pseudoestático para la superficie de rotura más profunda es de 0.148g, mientras que la correspondiente a la superficie más superficial es de 0.320g. Mediante la aproximación circular de Newmark (1965), se ha estimado aceleraciones críticas de 0.153g ($\alpha=25^\circ$) y 0.257g ($\alpha=30^\circ$) para las superficies de

rotura profunda y superficial, respectivamente, muy similares a las obtenidas anteriormente.

Considerando la situación más favorable a la estabilidad correspondiente al nivel del mar a 20 metros por debajo del actual, mediante la aplicación del método pseudoestático se obtiene aceleraciones críticas de 0.190g y 0.328g para las superficies de rotura profunda y superficial, respectivamente. La aceleración crítica estimada mediante la expresión de Newmark (1965) para la superficie de rotura más profunda es de 0.195g ($\alpha=25^\circ$), mientras que la correspondiente a la superficie más superficial es de 0.341g ($\alpha=30^\circ$). Ambos resultados son del mismo orden de magnitud que los obtenidos previamente.

A pesar de la relativa sencillez del método pseudoestático para la estimación de la aceleración crítica, existen varios estudios recientes de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos en España (Rodríguez-Peces *et al.*, 2011), en los cuales se han obtenido resultados más satisfactorios empleando esta metodología que con la simplificación propuesta por Newmark (1965). Teniendo en cuenta este hecho, a partir de los resultados, se ha establecido el valor más bajo de aceleración crítica (0.148g), correspondiente a la superficie de rotura más profunda con el nivel del mar a 35 metros por encima del actual, como representativo para la estimación de los parámetros del posible terremoto que pudo desencadenar el deslizamiento.

Estimación de los parámetros del terremoto

Se han estimado varios valores de magnitud-distancia epicentral desde el deslizamiento de Bàltx de posibles terremotos cuya PGA podría haber sido capaz de

superar el valor de aceleración crítica y, por tanto, provocar el deslizamiento. Para obtener el valor medio de PGA horizontal se ha empleado una selección de diferentes ecuaciones de predicción del movimiento del terreno (*Ground Motion Prediction Equations, GMPE*) correspondientes al área mediterránea (Skarlatoudis *et al.*, 2003; Ambraseys *et al.*, 2005; Akkar y Bommer, 2007; Bindi *et al.*, 2010). Los valores de PGA estimados de este modo son para condiciones de sustrato rocoso, por lo que no tienen en cuenta los efectos de amplificación sísmica. Puesto que el deslizamiento se desarrolla principalmente en materiales rocosos con una potencia considerable, esta amplificación no se ha tenido en cuenta en los cálculos.

Los valores más probables de magnitud-distancia desde el deslizamiento de Bàltx, de los potenciales terremotos que han podido ser capaces de superar la aceleración crítica estimada (0.148g), se han obtenido considerando el rango de magnitudes más razonables teniendo en cuenta la longitud de las fallas activas presentes en el área (Fig. 12). Las magnitudes obtenidas deben ser consideradas como magnitudes mínimas puesto que un terremoto que presente una magnitud superior a la estimada, para cada par de valores de magnitud-distancia, también podría provocar el deslizamiento. Por otra parte, las distancias epicentrales obtenidas representan las distancias máximas a las que se deben de localizar los terremotos para llegar a influir en el deslizamiento.

Este análisis indica que el deslizamiento de Bàltx pudo ser provocado por un terremoto de magnitud momento mínima entre 4.8 y 7.0, a condición de que estuviese localizado en los primeros 22 kilómetros en torno al deslizamiento (Fig. 12). Teniendo en cuenta

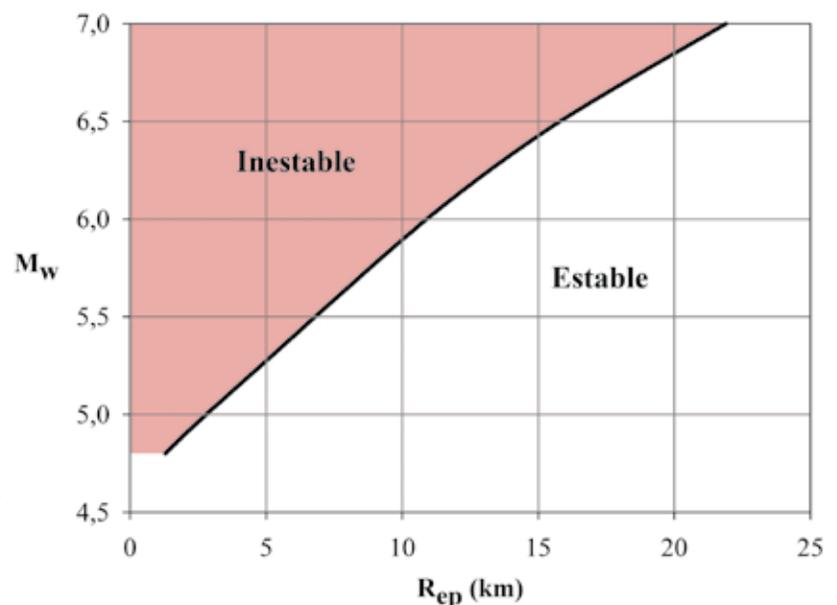


Figure 12. Valores de magnitud y distancia más probables correspondientes a los terremotos que pudieron haber provocado el deslizamiento de Bàltx, al superar la aceleración crítica estimada. M_w : magnitud momento; R_{ep} : distancia epicentral desde el deslizamiento de Bàltx (km).

Figure 12. Most likely magnitude-distance pairs of potential earthquakes which might have triggered the Bàltx slide, overcoming the estimated critical acceleration. M_w : moment magnitude; R_{ep} : epicentral distance to the Bàltx slide (km).

esta limitación espacial, alguno de estos terremotos se puede relacionar con la rotura de alguna de las fallas activas de Mallorca, como la Falla de Palma (Fig. 2). El hecho de que el terremoto de Palma de 1851, posiblemente relacionado con la Falla de Palma (Giménez y Gelabert, 2002), no ocasionó el movimiento del deslizamiento, y que produjo una PGA de 0.045g (0.028-0.073g) por debajo de la aceleración crítica obtenida (0.148g), indica que el terremoto que produjo el deslizamiento pudo tener una magnitud superior a la estimada para el terremoto de Palma ($M_w \sim 5.5$). Teniendo en cuenta esta observación, se puede concluir que el desencadenante de la inestabilidad pudo ser un terremoto de $M_w \geq 6.0$ relacionado con la Falla de Palma, localizado en un perímetro en torno a 10-30 km del deslizamiento. El presente estudio permite además descartar los posibles terremotos generados por las fallas localizadas a más de 22 km del deslizamiento (Ej. fallas de Sencelles, de Sant Joan y de Campos).

Discusión y resultados

Existe una amplia bibliografía sobre grandes deslizamientos desencadenados por terremotos durante el Cuaternario, en aquellos lugares del planeta de elevada peligrosidad sísmica (Bacon *et al.*, 1999; Aylsworth *et al.*, 2000; Gringeri *et al.*, 2002; Norini *et al.*, 2010). No es el caso de Baleares, que presenta una sismicidad baja, y donde el registro instrumental pone de manifiesto terremotos de baja magnitud ($m_b < 3.5$). No obstante, estudios paleosísmicos en la cuenca de Palma (Silva *et al.*, 2001; Giménez y Gelabert, 2002), parecen poner de manifiesto una mayor actividad sísmica durante el Cuaternario, lo que unido al análisis de los registros históricos, que indican la ocurrencia de terremotos de I (MSK) VII o VIII, pueden hacernos pensar que la peligrosidad sísmica de Baleares esté infravalorada.

El deslizamiento de Bàltx es un gran deslizamiento rocoso traslacional ubicado en la costa norte de Mallorca. La superficie de deslizamiento reutiliza una falla normal postmiocena, cuya última reactivación es anterior a 400 ka. Las posibles superficies basales del deslizamiento se enraízan en los materiales blandos del Keuper, concretamente en antiguas superficie de cabalgamiento. El estudio de estabilidad realizado ha permitido considerar un posible origen sísmico para el deslizamiento, ya que se obtienen parámetros de estabilidad, aún cuando se considera el peor escenario posible, en condiciones saturadas del nivel crítico de las margas con yesos del Keuper. Los cálculos realizados parecen poner de manifiesto que el desliza-

miento de Bàltx pudo ser provocado por un terremoto de magnitud moderada a alta ($M_w \geq 6.0$), localizado en las inmediaciones del deslizamiento (10-30 km), probablemente en relación con alguna de las fallas activas de Mallorca, como la de Palma.

En relación a los procesos activos de apertura de grietas de tracción, con la consecuente expansión lateral de bloques, parece que existe una relación estrecha del inicio de estos procesos con eventos climáticos más húmedos y cálidos durante el Pleistoceno. La datación obtenida de $82.5 \text{ ka} \pm 5.6 \text{ ka}$ en las brechas carbonatadas, coincide con un máximo transgresivo que corresponde al estado isotópico OIS-5a, que representa la última pulsación transgresiva del interglaciar Riss-Würm. Según estudios paleoclimáticos (Leroy *et al.*, 1996; Vesica *et al.*, 2000; Macklin *et al.*, 2002), este periodo coincide con un ambiente climático cálido/húmedo, ideal para un mayor desarrollo del karst y para iniciar el despegue de grandes bloques de roca del escarpe principal del deslizamiento. Este proceso sigue activo en la actualidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto CG2011-29920, TOPOBÉTICA, del VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011. A Soledad Lausín, que pasó varias semanas en Mallorca cartografiando en la zona de Bàltx. Nuestro enorme agradecimiento a los doctores Jordi Corominas y José Delgado por el interés mostrado en el presente manuscrito, y cuyos comentarios y revisiones han contribuido notablemente a mejorarlo. A los Drs. Jerónimo López-Martínez y Andrés Díez, por su excelente labor editorial.

Referencias

- Akkar, S. and Bommer, J.J. 2007. Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 511-530.
- Alvaro, M. 1987. La tectónica de cabalgamientos de la Sierra Norte de Mallorca (Islas Baleares). *Boletín Geológico y Minero*, 98, 34-41.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. and Smit, P.M. 2005. Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 37, 1-53.
- Aylsworth, J.M., Lawrence, D.M. and Guertin, J. 2000. Did two massive earthquakes in the Holocene induce wide-

- spread landsliding and near-surface deformation in part of the Ottawa Valley, Canada.? *Geology*, 28, 903-906.
- Baars, D. 1989. *Canyonlands Country: Geology of Canyonlands and Arches National Parks*. Canon Publishers Ltd., Lawrence, Kans, 140 pp.
- Bardají, T., Goy, J.L., Zazo, C., Hillaire-Marcel, C., Dabrio, C.J., Cabero, A., Ghaleb, B., Silva, P.G. and Lario, J. 2009. Sea level and climate changes during OIS 5e in the Western Mediterranean. *Geomorphology*, 104, 22-37.
- Benedicto, A., Ramos, E., Casas, A., Sabat, F. and Barón, A. 1993., Evolución tectosedimentaria de la cubeta neógena de Inca (Mallorca). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6, 167-176.
- Benito B., Navarro, M., Vidal, F., Gaspar-Escribano, J.M., García, M.J. and Martínez-Solares, J.M. 2010. A New Seismic Hazard Assessment in the Region of Andalusia (Southern Spain). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 739-766.
- Bindi, D., Luzi, L., Massa, M. and Pacor, F. 2010. Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 1209-1230.
- Bacon, CR., Lanphere, MA and Champion, DE., 1999. Late Quaternary slip rate and seismic hazards of the West Klamath Lake fault zone near Crater Lake, Oregon Cascades. *Geology*, 27, 43-46.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y. and Minami, M. 2007. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 247-265.
- Colom, G. 1970. Estudio litológico y micropaleontológico del Lías de la Sierra Norte y porción central de la isla de Mallorca. *Memorias de la Real Academia de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Serie de Ciencias Naturales. Tomo XXIV, Memoria N.º2. 116 pp.
- Corominas, J., Moya, J., Ledesma, A., Lloret, A. and Gili, J.A. 2005. Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides*, 2: 83-96.
- Cruden, D.M. and Varnes, J. 1996. Landslide types and processes. En: Keith Turner and Robert Schuster (eds.). *Landslides Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board (US), 36-90.
- Cuerda, J. 1975. *Los Tiempos cuaternarios en Baleares*. Publicaciones del Instituto de Estudios Baleáricos. Diputación Provincial de Baleares, 304 pp.
- Delgado, J., Vicente, F., García-Tortosa, F., Alfaro, P., Estévez, A., López-Sánchez, J.M., Tomás, R. and Mallorquí, J.J. 2011. A deep seated compound rotational rock slide and rock spreads in SE Spain: Structural control and DInSAR monitoring. *Geomorphology*, 129, 252-262.
- Dorale, J.A., Onac, B.P., Fornós, J.J., Ginés, J., Ginés, A., Tuccimei, P. and Peate, D.W. 2010. Sea-Level Highstand 81,000 Years Ago in Mallorca. *Science*, 327, 860-863.
- Fontboté, J.M., Guimerá, J., Roca, E., Sabat, F., Santanach, P. and Fernández- Ortigosa, F. 1990. The Cenozoic evolution of Valencia Trough (Western Mediterranean). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3, 249- 259.
- Gelabert, B. 1998. La Estructura Geológica de la Mitad Occidental de la Isla de Mallorca. *Colección Memorias del ITGE*, 129 pp.
- Gelabert, B., Fornós, J.J and Gómez-Pujol, L. 2003. Geomorphological characteristics and slope processes associated with different basins: Majorca (Western Mediterranean). *Geomorphology*, 52 (3-4), 253-267.
- Gelabert, B., Sabat, F. and Rodríguez-Perea, A. 1992, A structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands). *Tectonophysics*, 203, 167-183.
- Giménez, J. and Gelabert, B. 2002. Análisis de la actividad tectónica reciente en la Isla de Mallorca. En: *Comunicaciones de la III Asamblea Hispanoportuguesa de Geodesia y Geofísica*, año 2002. 345-356.
- Ginés, J. 2000. El karst litoral en el Levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología. Tesis Doctoral. Universitat de Les Illes Balears, Palma de Mallorca (España), 595 pp.
- Gringeri, F, Nicoletti, P.G. and Parise, M. 2002. Historical and Geological evidence for seismic origin of newly recognized landslides in southeastern Sicily, and its significance in terms of hazard. *Environmental Management*, 29, 116-131.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. 2002. Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. En: Hammah, R., Bawden, W., Curran, J. and Telesnicki, M. (eds.), *Proceedings of NARMSTAC 2002*, Toronto, 267-273.
- Hutchinson, J.N. 1991. Periglacial and slope processes. *Engineering Geology*. Special Publication 7, Geological Society of London, 283-331.
- Hutchinson, J.N.; Bromhead, E.N. and Lupini, J.F. 1980. Additional observations on the Folkestone Warren landslides. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 13, 1-31.
- Hynes-Griffin, M.E. and Franklin, A.G. 1984. Rationalizing the seismic coefficient method. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. *Miscellaneous Paper GL-84-13*, 37 pp.
- IGME, 1984. *Proyecto de investigación geotérmica preliminar del Pirineo oriental, zona meridional del prelitoral catalán e Islas Baleares*. Vol.3. Estudio geotérmico preliminar de Baleares. Inédito. Centro de Documentación del IGME. Madrid. 182 pp.
- Karnik, V. 1971. *Seismicity of the European area*. Part I. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 372 pp.
- Lausín, S., 2006. *Dinámica de laderas en la vertiente costera de la Serra de Tramuntana de la isla de Mallorca*. Tesis del Master de Ingeniería Geológica de la Universidad Complutense de Madrid, año 2006. Inédito. Centro de Documentación del IGME en la Unidad de Palma de Mallorca. 81 pp.
- Leroy, S. A. G, Giralt, S., Francus, P. and Seret, G. 1996. The high sensitivity of the palynological record in the Vico maar lacustrine sequence (Latium, Italy) highlights the climatic gradient through Europe for the last 90 ka. *Quaternary Science Reviews*, 15, 189-201.
- Lomoschitz, A. and Corominas, J. 1996. Los depósitos de deslizamiento gravitacionales en el centro-sur de Gran Canaria. *Geogaceta*, 20(6), 1346-1348.
- López, J.M. and Mateos, R.M. 2006. Control estructural de las anomalías geotérmicas y la intrusión marina en la Plataforma de Lluçmajor y la Cubeta de Campos (Mallorca). En: *Las Aguas Subterráneas en los Países Mediterráneos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, Madrid, 17, 607-613.

- Macklin, M.G., Fuller, I.C., Lewin, J., Maas, G.S., Passmore, D.G., Rose, J., Woodward. Black, J.C.S., Hamlin, R.H.B. and Rowan, J.S. 2002. Correlation of fluvial sequences in the Mediterranean basin over the last 200 ka and their relationship to climate change. *Quaternary Science Reviews*, 21 (14-15), 1633-1641.
- McGill, G.E. and Stromquist, A.W. 1979. The Grabens of Canyonlands National Park, Utah: Geometry, Mechanics and Kinematics. *Journal of Geophysical Research*, 84, 4547-4563.
- Marcuson, W.F. 1981. Moderator's report for session on Earth Dams and Stability of Slopes under Dynamic Loads. *Proceedings International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, MO, 3, p. 1175.
- Margottini, C., Molin, D. and Serva, L. 1992. Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data. *Engineering Geology*, 33, 45-58.
- Marinos, V., Marinos, P. and Hoek, E. 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 64 (1), 55-65.
- Mateos, R.M., Ferrer, M. and González de Vallejo, L.I. 2002. Los materiales rocosos de la Sierra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y clasificación geotécnica. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (4), 415-427.
- Mateos, R.M. 2006. *Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y análisis de peligrosidad*. Tesis doctoral. Colección Digital de Tesis de la Universidad Complutense de Madrid. Servicio de Publicaciones del Vicerrectorado de Cultura, Deporte y Política Social. 299 pp.
- Mateos, R.M., Bermejo, M., Hijazo, T., Rodríguez-Franco, J.A., Ferrer, M., González de Vallejo, L.I. and García, I. 2008. Los deslizamientos de la ladera de la margen izquierda del torrente de Fornalutx (Mallorca). *Boletín Geológico y Minero*, 119(4), 443-458.
- MOPTMA, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995. Estudio 06/95, Túnel de Sa Costera. Geología y Sondeos. Inédito. Servicio de Documentación del IGME. Unidad de Palma de Mallorca. 145 pp.
- Morgenstern, N.R. and Price, V.E. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79-93.
- Newmark, N.M. 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15, 139-160.
- Noller, J.S., Sowers, J.M. and Lettis, W.R. 2000. *Quaternary Geochronology. Methods and Applications*. AGU. Reference Shelf 4, 582 pp.
- Norini, G., Capra, L., Borselli, L., Zuniga, R., Solari, L. and Sarocchi, D. 2010. Large scale landslides triggered by Quaternary tectonics in the Acambay graben, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1445-1455.
- Pomar, L., Rodríguez Perea, A., Fornós, J., Ginés, J., Font, A. and Mora, A. 1987. Late Quaternary sea-level changes in Spain. En: Zazo, C. (ed.), *Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid, 197-223.
- Rocscience Inc. 2003. *Slide 5.0 User's Guide*. Part I. 199 pp.
- Rodríguez Ortiz, J.M. 1988. El deslizamiento de Pont de Bar (Lérida). *II Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables*, Andorra la Vella, 693-703.
- Rodríguez-Peces, M.J., Pérez-García, J.L., García-Mayordomo, J., Azañón, J.M., Insua-Arévalo, J.M. and Delgado-García, J. 2011. Applicability of Newmark method at regional, sub-regional and site scales: seismically induced Bullas and La Paca rock-slide cases (Murcia, SE Spain). *Natural Hazards*, 59(2), 1109-1124.
- Rueda, J. and Mezcua, J. 2001. *Sismicidad, sismotectónica y peligrosidad sísmica en Galicia*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 64 pp.
- Sàbat, F., Gelabert, B., Rodríguez-Perea, A. and Giménez, J. 2011. Geological structure and evolution of Majorca: Implications for the origin of the Western Mediterranean. *Tectonophysics*, 510 (2011), 217-238.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, B.N., Margaris, N., Theodulidis, C., Papaioannou, I., Kalogeras, E.M., Scordilis, E.M. and Karakostas, V., 2003. Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2591-2603.
- Silva, P.G., González Hernández, F.M., Goy, J.L., Zazo, C. and Carrasco, P. 2001. Paleo and historical seismicity in Mallorca (Balears, Spain): a preliminary approach. *Acta Geológica Hispánica*, 36(3-4), 245-266.
- Tuccimei, P; Ginés, J., Delitala, M.C., Ginés, A., Gracia, A., Fornós, J.J. and Taddeucci, A. 2006. Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1), 1-21.
- Vesica, P.L., Tuccimei, P., Turi, B., Fornós, J.J., Ginés, A. and Ginés, J. 2000. Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews*, 19 (9), 865-879.
- Zazo C., Goy J.L., Hillaire-Marcel C., Hoyos M., Cuerda J., Ghaleb B., Bardají T., Dabrio C.J., Lario J., Silva P.G., González A., González F. and Soler V., 1997. El nivel del mar y los interglaciares cuaternarios. Su registro en las costas peninsulares e insulares españolas. En: Rodríguez, J. (ed.) *Cuaternario Ibérico*. Universidad de Huelva, 23-32.

Recibido: enero 2012
Revisado: abril 2012
Aceptado: junio 2012
Publicado: enero 2013