

Análisis morfométrico de los deslizamientos submarinos en el sector central del margen de la Gran Barrera de Arrecifes, noreste de Australia

Morphometric analysis of the submarine landslides in the central Great Barrier Reef margin, north-eastern Australia

Francisco J. López-Cabrera¹, Ángel Puga-Bernabéu^{1,2}, Jody M. Webster² y Robin J. Beaman³

¹ Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva, 18002 Granada, España. nordic@correo.ugr.es, angelpb@ugr.es

² Geocoastal Group, School of Geosciences, The University of Sydney, NSW 2006, Australia. jody.webster@sydney.edu.au

³ College of Science, Technology and Engineering, James Cook University, PO Box 6811, Cairns QLD 4870, Australia. robin.beaman@jcu.edu.au

ABSTRACT

The morphometric characterization of the submarine landslides on a mixed siliciclastic-carbonate margin, the Great Barrier Reef (NE Australia), is presented in this study. The landslides cover about the 27% of the slope in the study region, removing in some examples up to 33 km³ of sediment. Spearman rank correlation coefficients show meaningful correlations among landslide size parameters. However, there is no relationship between the unfailed slope in the source area and the size of the landslide. The mobility of the landslides is within the normal range observed in other submarine landslides worldwide. The results of this study represent a preliminary step to understand the sedimentary processes, preconditioning factors and triggering mechanisms for submarine landslide generation in mixed margins.

Key-words: *Submarine landslides, seafloor mapping, morphometric analysis, mixed siliciclastic-carbonate margin.*

RESUMEN

Se presentan los resultados de la caracterización morfométrica de los deslizamientos submarinos en un margen continental mixto siliciclástico-carbonatado, el margen de la Gran Barrera de Arrecifes (NE Australia). Los deslizamientos abarcan aproximadamente el 27% de la superficie del talud en la zona de estudio, removilizando en algunos casos volúmenes de sedimento de hasta 33 km³. El análisis de correlación de Spearman indica que existe buena correlación entre los parámetros relacionados con las dimensiones del deslizamiento. Sin embargo, no se observa relación directa entre la pendiente del talud y las dimensiones de los deslizamientos. La movilidad de los deslizamientos se encuentra dentro del rango observado en otros deslizamientos submarinos. Los resultados de este trabajo constituyen un primer paso para entender los procesos sedimentarios y mecanismos de generación de deslizamientos en los márgenes de tipo mixto.

Palabras clave: *depósitos de transporte en masa, geomorfología submarina, análisis morfométrico, margen continental mixto siliciclástico-carbonatado.*

Geogaceta, 60 (2016), 43-46
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 10 de febrero de 2016
Revisión: 20 de abril de 2016
Aceptación: 20 de Mayo de 2016

Introducción

Los deslizamientos submarinos son fundamentales en el modelado de los márgenes continentales, ya que remueven y transfieren enormes cantidades de sedimento hacia zonas más profundas del fondo oceánico (Vanneste *et al.*, 2006; Joanne *et al.*, 2010). Algunos deslizamientos submarinos recientes han generado tsunamis que ocasionaron importantes daños materiales y pérdidas de vidas humanas, como el tsunami de Papúa Nueva Guinea en 1998 (Synolakis *et al.*, 2002). Infraestructuras como cables submarinos o plataformas petrolíferas también pueden verse afectadas por estos eventos. Debido a los grandes impactos socioeconómicos que pueden llegar a tener, se

realiza en la actualidad una gran inversión económica y científica destinada al estudio de estos procesos. El entendimiento de la génesis, desarrollo y factores de control de los deslizamientos debe incluir una cartografía detallada de los márgenes continentales y un análisis morfométrico de los mismos.

Los deslizamientos submarinos están presentes en todo tipo márgenes continentales, tanto pasivos como activos, incluyendo taludes con influencia glacial, fluvial, volcánicos y carbonatados (Masson *et al.*, 2006). También se han descrito en márgenes mixtos siliciclásticos-carbonatados. Los estudios en estos contextos son, sin embargo, relativamente escasos (Webster *et al.*, 2016). En este estudio se presentan los resultados preliminares del análisis

morfométrico de los deslizamientos submarinos identificados en el sector central del margen de la Gran Barrera de Arrecifes (GBA), NE de Australia. El objetivo es entender los procesos sedimentarios ligados a los deslizamientos y establecer criterios preliminares para entender los posibles mecanismos desencadenantes en los márgenes de tipo mixto. Además, se han comparado los resultados con datos procedentes del Atlántico Norte, donde existe una excepcional base de datos de deslizamientos submarinos.

Contexto geológico

El margen continental de la GBA es un margen pasivo que constituye la mayor área

existente de depósito de sedimentos mixtos siliciclásticos-carbonatados (Davies *et al.*, 1991). Los sedimentos recientes sobre la plataforma comprenden sedimentos terrígenos siliciclásticos y carbonatos bioclásticos cuyo contenido aumenta progresivamente hacia el borde de la plataforma. Los sedimentos sobre el talud y cuenca tienen una composición similar a los existentes en la plataforma, aunque su proporción y distribución espacial es variable a lo largo del margen (Francis *et al.*, 2007).

La región estudiada se encuentra en el sector central del margen, entre los 16°S y los 17,3°S de latitud (Fig. 1). La plataforma continental en la región de estudio es amplia (60 a 65 km de ancho) y de baja pendiente. El borde de plataforma (situado a 105 m) conecta con un talud continental de sección sigmoidal y pendiente media de 4° a 7° (Puga-Bernabéu *et al.*, 2013a). El talud está excavado por un sistema de cañones submarinos, algunos de los cuales erosionan el borde de plataforma (Puga-Bernabéu *et al.*, 2013b), y modelado además, por los deslizamientos submarinos objeto de estudio en esta contribución.

Datos y metodología

Los datos batimétricos se obtuvieron mediante una sonda multi-haz (30 kHz) Simrad EM300 durante las expediciones del RV Southern Surveyor en 2007 y 2008. Estos datos fueron integrados con la batimetría disponible del margen para producir una malla batimétrica con una resolución de 100 m (Beaman, 2010). Los datos batimétricos fueron importados a *IVS Fledermaus v.7.4* para generar un Modelo Digital

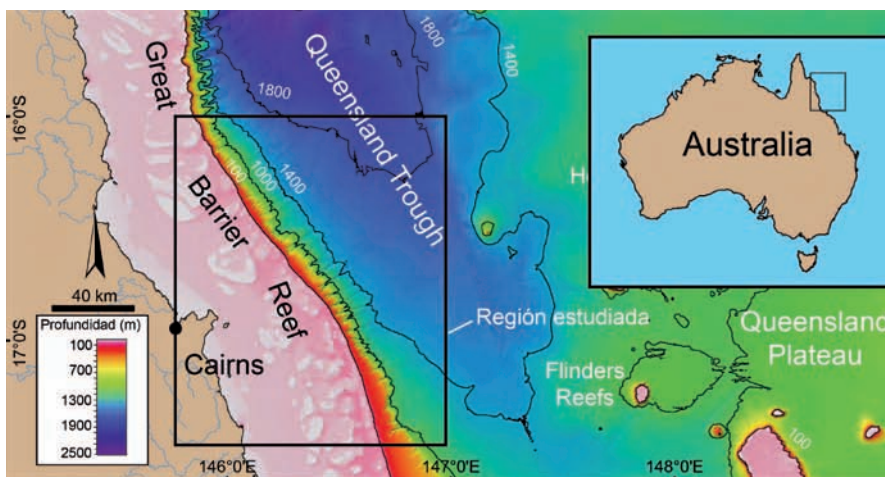


Fig. 1.- Mapa batimétrico (100 m de resolución) del noreste de Australia mostrando la localización de la región estudiada (recuadro negro). Ver figura en color en la Web.

Fig. 1.- Bathymetry map (100-m-resolution) of the north-east Australia showing the location of the study region (black inset). See colour figure on the Web.

de Elevación y a *ESRI ArcGis v.10.3* para realizar el análisis morfométrico de los deslizamientos submarinos mediante la extensión *Spatial Analyst*.

Se han caracterizado 58 deslizamientos situados en el talud con una superficie > 1 km². Para cada deslizamiento se ha cuantificado la longitud, anchura, área, volumen (comparando la topografía preexistente modelizada y la topografía pos-deslizamiento; Völker, 2010), altura (desde el escarpe al pie del deslizamiento), altura e inclinación del escarpe, inclinación del talud no deslizado en la corona, pendiente al pie del deslizamiento así como las profundidades del escarpe y pie del deslizamiento (Tabla I). La relación existente entre los diferentes parámetros se realizó con el coeficiente de correlación de Spearman (ρ).

Resultados

Los deslizamientos submarinos estudiados ocupan el 27% de la superficie del talud (unos 860 km²) y se originan en su mayoría sobre el talud medio e inferior (Fig. 2A), con la excepción de un deslizamiento (Gloria Knolls Slide; GKL; Beaman y Webster, 2008) cuya cicatriz se encuentra actualmente en el talud superior a unos 270 m (Fig. 2B). Las dimensiones de los deslizamientos varían enormemente, especialmente el volumen (entre 0,002 km³ y los 33 km³ del GKL). La mediana de la longitud, anchura, área y volumen es de 3465 m, 1688 m, 5 km² y 0,04 km³, respectivamente.

La pendiente del talud donde se originan los deslizamientos es < 12°, salvo en un caso (20°), con un gradiente medio de 6°. La altura de los deslizamientos oscila entre 83 y 1110 m. Los escarpes tienen una pendiente media de 10°, siempre mayor que la pendiente adyacente sin deslizar.

El coeficiente de correlación de Spearman (ρ) muestra relaciones significativas entre algunos de los parámetros medidos (Tabla II). Muchas de estas relaciones son obvias y están relacionadas con las dimensiones del deslizamiento. Por ejemplo, volumen y área ($\rho = 0,9$) o anchura y longitud con el área y volumen ($\rho > 0,7$). La pendiente del talud sin deslizar se correlaciona positivamente con el ángulo final del escarpe ($\rho = 0,68$). Otros parámetros muestran una correlación moderada, como por ejemplo, la longitud y la pendiente existente al término del deslizamiento ($\rho = -0,59$). También existe una correlación muy baja entre algunos parámetros como por ejemplo, longitud, área y volumen con la pen-

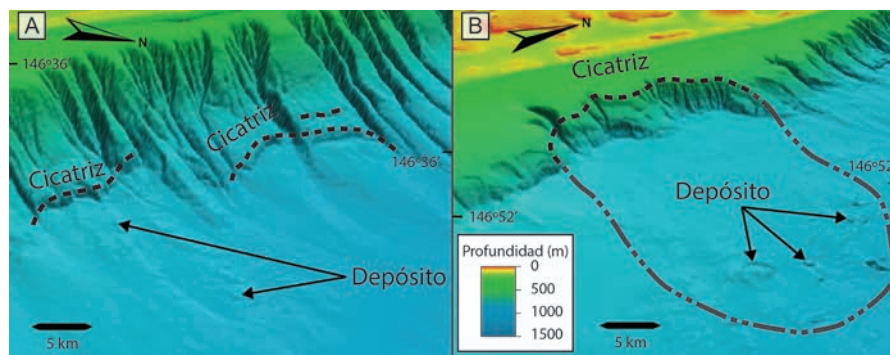


Fig. 2.- Ejemplos de deslizamientos submarinos en el área de estudio (cicatriz marcada con línea discontinua). Exageración vertical x6 (A) y x3 (B). A) Deslizamientos con cicatrices en el talud inferior. B) Gloria Knolls Landslide (GKL) originado en el talud superior. Ver figura en color en la Web.

Fig. 2.- Examples of submarine landslides in the study area (scar marked with dashed line). Vertical exaggeration x6 (A) and x3 (B). A) Landslides with scars on the lower slope. B) Gloria Knolls Landslide (GKL) generated on the upper slope. See colour figure on the Web.

diente donde se originan los deslizamientos ($P = -0,08-0,13$), o ángulo del escarpe con la longitud del deslizamiento ($P = 0,24$).

Comportamiento de los deslizamientos

La distancia horizontal recorrida por la masa de sedimento deslizado (*runout*) equivale a la distancia desde el escarpe hasta el término del depósito deslizado. Esta distancia depende de la viscosidad y límite elástico del material. La relación altura/longitud (H/L) y el volumen se puede utilizar como una aproximación de la movilidad de un deslizamiento (Canals *et al.*, 2004; Fig. 3). Según esta relación los deslizamientos en el margen de la GBA, presentan valores de movilidad comunes dentro de los deslizamientos submarinos de tipo flujo de derrubio (Fig. 3), aunque dentro de un rango bastante restringido que podría estar relacionado con la litología del margen. La moderada correlación negativa entre longitud y ángulo en el pie del deslizamiento (Tabla II) podría estar relacionada con el comportamiento reológico de los materiales deslizados. De forma generalizada los materiales más cohesivos recorrerían menos distancia y generarían mayores pendientes que los materiales más blandos que podrían tener una mayor movilidad durante el deslizamiento. Sin embargo, las transformaciones de flujo durante el transporte y procesos como el *hidroplaning* pueden modificar sustancialmente la reología del sedimento deslizado.

Comparación con el Atlántico Norte

Los deslizamientos submarinos en la región central del margen de la GBA tienen

unas dimensiones reducidas en comparación con los grandes deslizamientos identificados en el margen oriental del Atlántico Norte (Hühnerbach *et al.*, 2004), los cuales superan en al menos un orden de magnitud las medianas de los valores de longitud, anchura, área y volumen de los deslizamientos estudiados. Sin embargo, las medianas de estos parámetros dimensionales son similares a los que presentan los deslizamientos identificados a lo largo del margen occidental del Atlántico Norte (Hühnerbach *et al.*, 2004). El talud en el sector estudiado tiene pendientes medias superiores a las del Atlántico Norte ($3-5^\circ$; Hühnerbach *et al.*, 2004).

Mecanismos desencadenantes

Las cicatrices de los deslizamientos estudiados se distribuyen a profundidades variables a lo largo del talud. Esta distribución contrasta con los deslizamientos del Atlántico Norte, los cuales tienen sus cicatrices entre 1000 y 1300 m, y donde se ha sugerido el efecto de las olas internas y desestabilización de hidratos de gas como posibles factores de desestabilización (Hühnerbach *et al.*, 2004). Sin embargo, aunque el efecto de estos procesos no puede descartarse, no parece que sean factores ubicuos en la zona estudiada. La elevada pendiente tampoco parece un mecanismo desencadenante fundamental debido a la escasa correlación observada entre el tamaño de los deslizamientos y el ángulo del talud donde se generan (Fig. 4; Tabla II). Además, los deslizamientos estudiados con mayor volumen se originaron, con una ex-

Parámetro	Mediana
Longitud (m)	3465
Anchura (m)	1688
Área (km ²)	5
Volumen (km ³)	0,04
Altura (m)	232
Altura del escarpe (m)	75
Pendiente escarpe (°)	10
Pendiente talud (°)	5
Pendiente pie (°)	3
Profundidad cicatriz (m)	907
Profundidad pie (m)	1192

Tabla I.- Mediana de los parámetros morfométricos de los deslizamientos submarinos estudiados.

Table I.- Median of the morphometric parameters of study submarine landslides.

cepción, en las zonas de baja pendiente (Fig. 4). Las simulaciones de estabilidad de talud realizadas en la zona sugieren la acción de una carga sísmica para desencadenar los deslizamientos (Puga-Bernabéu *et al.*, 2013b) aunque la magnitud de los eventos es muy poco frecuente en este margen pasivo.

Conclusiones

El análisis morfométrico de los deslizamientos submarinos identificados en la región central del margen de la GBA ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

1. Los escarpes de los deslizamientos tienen una distribución de profundidad muy variable sobre el talud (270-1280 m) y en

Parámetro	Longitud (m)	Anchura (m)	Área (km ²)	Volumen (km ³)	Altura (m)	Altura escarpe (m)	Pendiente escarpe (°)	Pendiente talud (°)	Pendiente pie (°)	Ratio altura/ longitud
Longitud (m)	1									
Anchura (m)	0,28	1								
Área (km ²)	0,74	0,76	1							
Volumen (km ³)	0,71	0,73	0,90	1						
Altura (m)	0,70	0,33	0,65	0,68	1					
Altura escarpe (m)	0,33	0,37	0,48	0,52	0,59	1				
Pendiente escarpe (°)	0,24	0,13	0,16	0,32	0,54	0,47	1			
Pendiente talud (°)	0,10	-0,08	0,04	0,13	0,54	0,40	0,68	1		
Pendiente pie (°)	-0,59	-0,23	-0,47	-0,43	-0,13	-0,23	0,03	0,35	1	
Ratio altura / longitud	-0,65	-0,11	-0,36	-0,31	0,01	0,10	0,21	0,47	0,74	1

Tabla II.- Tabla de correlación de Spearman (ρ) entre los parámetros cuantificados. Las relaciones más significativas están marcadas en negrita.

Table II.- Spearman rank correlation coefficients (ρ) among the quantified parameters. High correlation coefficients are highlighted in bold.

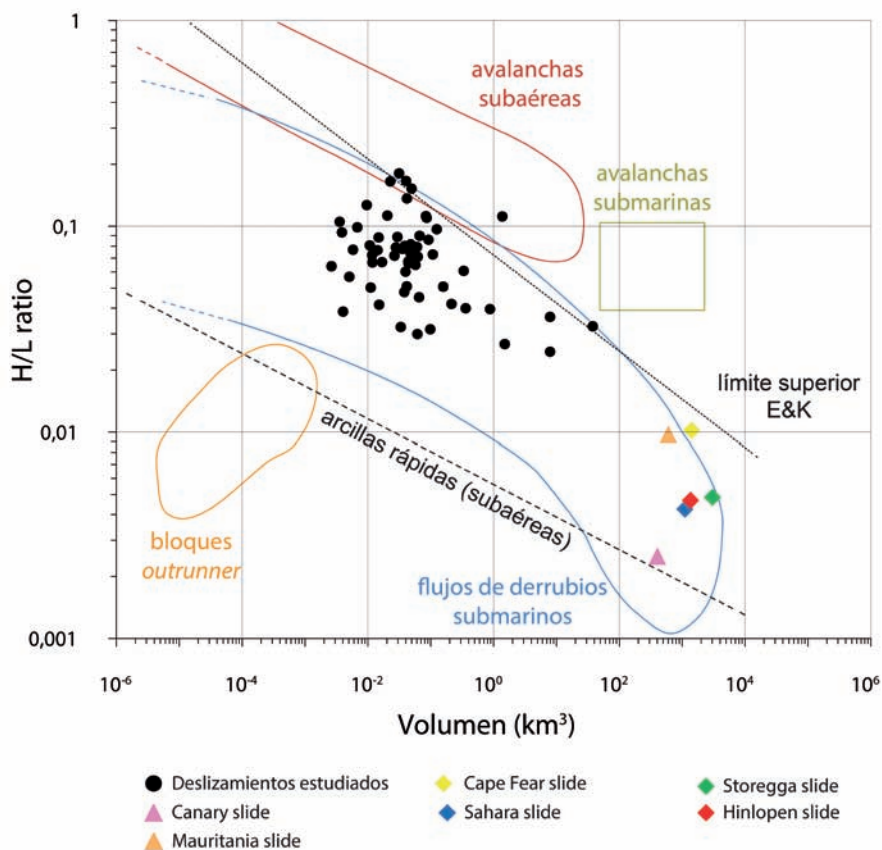


Fig. 3.- Volumen vs ratio altura/longitud (H/L). Obsérvese que la mayoría de los deslizamientos estudiados están dentro de los valores correspondientes a flujos de derrubios submarinos (modificada de Calvès et al., 2015). Ver imagen en color en la Web.

Fig. 3.- Volume vs height/length ratio (H/L). Observe that the majority of the study landslides are within the field corresponding to submarine debris flows (modified from Calvès et al., 2015). See colour figure on the Web.

todos los casos acentúan la pendiente original del talud.

2. Las dimensiones de los deslizamientos son muy variables, aunque con valores similares a los observados en otros márgenes pasivos.

3. No existe relación entre la pendiente del talud donde se originan los deslizamientos y sus dimensiones.

4. La movilidad de los deslizamientos están dentro del rango normal de los flujos de derrubios submarinos, aunque dentro de un intervalo restringido.

Agradecimientos

Trabajo financiado por la AMNE, Sydney University, Grupo RNM-190 (Junta de Andalucía) y Queensland Government Smart Futures Fellowship a RJB. Agradecemos los comentarios de dos revisores anónimos.

Referencias

Beaman, R.J. (2010). *3DGBR. A High-resolution Depth Model for the Great Barrier Reef and Coral Sea*. MTSRF Project 2.5i.1a Final Report.

Beaman, R.J. y Webster, J.M. (2008). En: *4th International Symposium on Deep-Sea Corals*, pp. 248.

Calvès, G., Huuse, M., Clift, P.D. y Brusset, S. (2015). *Earth and Planetary Science Letters* 432, 265-272.

Canals, M., Lastras, G., Urgeles, R., Casamor, J.L., Mienert, J., Cattaneo, A., De Batist, M., Haflidason, H., Imbo, Y., Laberg, J.D., Locat, J., Long, D., Longva, O., Masson, D.G., Sultan, N., Trincardi, F. y Bryn, P. (2004). *Marine Geology* 213, 9-72.

Davies, P.J., McKenzie, J.A., Palmer-Julson, A. y Shipboard Scientists (1991). *Proceedings*

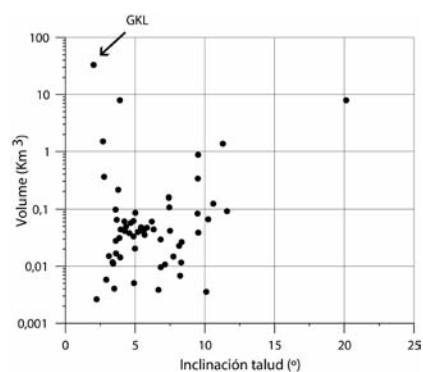


Fig. 4.- Pendiente del talud (°) vs volumen (km³). Nótese que, en general, los deslizamientos de mayor volumen no necesitan pendientes elevadas para generarse.

Fig. 4.- Slope angle (°) vs volume (km³). Note that larger landslides do not generate necessarily in steep slopes.

of the Ocean Drilling Program Initial Reports 133.

Francis, J.M., Dunbar, G.B., Dickens, G.R., Sutherland, I.A. y Droxler, A.W. (2007). *Journal of Sedimentary Research* 77, 572-586.

Hühnerbach, V., Masson, D.G. y socios del Proyecto COSTA (2004). *Marine Geology* 213, 343-362.

Joanne, C., Collot, J.-Y., Lamarche, G. y Migeon, S. (2010). *Marine Geology* 268, 67-84.

Masson, D.G., Harbitz, C.B., Wynn, R.B., Pedersen, G. y Løholt, F. (2006). *Philosophical Transactions of the Royal Society* 364, 2009-2039

Puga-Bernabéu, Á., Webster, J.M., Beaman, R.J. y Guillbaud, V. (2013a). *Geomorphology* 191, 35-50.

Puga-Bernabéu, Á., Webster, J.M. y Beaman, R.J. (2013b). *Natural Hazards* 66, 557-575.

Synolakis, C.E., Bardet, J.-P., Borrero, J.C., Davies, H.L., Okal, E.A., Silver, E.A., Sweet, S. y Tappin, D.R. (2002). *Proceedings of the Royal Society, London* 458, 763-789.

Vanneste, M., Mienert, J. y Büinz, S. (2006). *Earth and Planetary Science Letters* 245, 373-388.

Völker, D.J. (2010). *Geo-Marine Letters* 30, 541-547.

Webster, J.M., George, N.P.J., Beaman, R.J., Hill, J., Puga-Bernabéu, Á., Hinestrosa, G., Abbey, E.A. y Daniell, J.J. (2016). *Marine Geology* 371, 120-129.