

Movimientos en masa en ambientes tectónicos activos: origen climático vs. sísmico. Cordillera Central, Isla de La Española (República Dominicana).

Mass movements in active tectonic settings: climatic vs seismic origin. Central Mountain Range, Hispaniola Island (Dominican Republic).

A. Suárez Rodríguez¹, A. Rodríguez García², S. Mink³, L. González Menéndez⁴ y J. Escuder-Viruete⁵

1 IGME. Instituto Geológico y Minero de España, Avda. Real 1, 24006, León. a.suarez@igme.es

2 Dpto. de Geografía y Geología. Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de León, 24071, León. augusto.rodriguezgarcia@gmail.com

3 IGME. Instituto Geológico y Minero de España, C/ La Calera 1, 28760, Tres Cantos, Madrid. s.mink@igme.es

4 IGME. Instituto Geológico y Minero de España, Avda. Real 1, 24006, León. l.gonzalez@igme.es

5 IGME. Instituto Geológico y Minero de España, C/ La Calera 1, 28760, Tres Cantos, Madrid. j.escuder@igme.es

Resumen: El presente trabajo estudia el papel del clima y la sismicidad como factores desencadenantes de movimientos en masa en una zona de la República Dominicana, tectónicamente activa y afectada por tormentas tropicales; para ello se ha realizado un análisis cartográfico de 935 movimientos en masa. La Isla de La Española (margen septentrional de la Placa del Caribe) está limitada al norte por la zona de colisión con la Placa Norteamericana, y al sur por la zona de subducción de la Fosa de los Muertos. El área de estudio se localiza en la Cordillera Central de la Isla de La Española. El marco tectónico genera en el área de estudio una sismicidad elevada, relacionada con sistemas de fallas de dirección NO-SE y O-E. El sustrato rocoso está constituido por rocas volcánicas, plutónicas y sedimentos del Cenozoico. La mayoría de las litologías están recubiertas por un potente regolito. Tanto el sustrato como el regolito están afectados por movimientos en masa, localizados principalmente en los tramos inferiores de las laderas. Aunque el área presenta una importante actividad tectónica, los resultados obtenidos indican que los factores climáticos son los principales desencadenantes de los movimientos en masa. Sin embargo, los movimientos en masa de origen climático parecen reactivar a movimientos previos de origen sísmico.

Palabras clave: cartografía geomorfológica, movimientos en masa, tormentas, terremotos, Republica Dominicana.

Abstract: The role of climatic vs seismic triggers of mass movements is studied in an area of the Dominican Republic. This is an active tectonic setting with a tropical climate periodically affected by important tropical weather disturbances. The mapping and further analysis of 935 mass movements allowed us to make inferences about their possible triggers (climatic vs seismic). The Hispaniola Island (northern margin of the Caribbean Plate) is currently flanked by the collision/strike-slip zone with the Northamerican Plate, in the north, and the subduction zone of Muertos Trench, in the south. In our study area, located in the Central Mountain Range of the Hispaniola Island, this active tectonic setting generates high seismicity related to NW-SE and W-E fault sets. Bedrock is formed by volcanic and plutonic rocks and cenozoic sediments. A thick regolith is developed over most of these lithologies. Both bedrock and regolith are involved in mass movements, which are mostly located towards the lowermost parts of the hillslopes. Even though this is a well established seismic setting, our results seem to indicate a preferential climatic control for the development of mass movements. However, climatic triggers seem to have re-shaped a previous seismic-induced mass movement distribution.

Key words: geomorphological mapping, mass movements, storm-induced, earthquake-induced, Dominican Republic.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta la cartografía de los movimientos en masa del Mapa Geomorfológico de la Hoja N° 6073 (La Vega) a escala 1:100.000 (Suárez Rodríguez, 2011), situada en la Cordillera Central de la Isla de La Española (República Dominicana). Este mapa forma parte de la Cartografía Geomorfológica y de Procesos Activos que ha sido elaborada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en el marco del Proyecto Europeo SYSMIN II (Cartografía Geotemática de la República Dominicana), diseñado

para dotar, a países en vías de desarrollo, de una infraestructura científica básica con aplicación en recursos y riesgos naturales.

El área cartografiada se sitúa en una región montañosa afectada por numerosos movimientos en masa. Estos procesos constituyen uno de los riesgos naturales más destructivos (Schuster y Highland, 2001), siendo su descripción y análisis de gran utilidad en los protocolos de emergencia por riesgos relacionados con procesos de ladera. En este estudio se describen los movimientos en masa y se analizan sus

factores desencadenantes así como la idoneidad de la escala cartográfica utilizada.

ÁREA DE ESTUDIO

La Isla de La Española se sitúa en el margen septentrional de la Placa del Caribe, en la zona de colisión entre la Plataforma de las Bahamas (Placa Norteamericana), al norte, y la zona de subducción intraplaca de la Fosa de los Muertos, al sur. Entre estos dos frentes de deformación existe una importante actividad sísmica, con terremotos de gran magnitud como el ocurrido en Haití en enero de 2010 ($M_s = 7$). En el área estudiada se han registrado 19 epicentros de magnitud entre $3 < M_s < 8$; en este registro destaca la alineación de algunos de estos terremotos a lo largo de las fallas de La Española y de Bonao-La Guácara (Fig. 1).

Desde el punto de vista geológico, en la Hoja de La Vega se diferencian seis unidades litológicas constituidas por tonalitas, gabros y dioritas (TGD), ocupando más del 50% del área de la Hoja, metavulcanitas básicas (MVb), metavulcanitas intermedias y ácidas (MVa), basaltos (B), peridotitas serpentinizadas (P) y sedimentos detríticos y biogénicos del Terciario y Cuaternario (TQ) (Fig. 1).

La mayoría de estas unidades presentan un extenso y potente regolito. Las principales estructuras son la falla de desgarre de La Española de dirección NO-SE (al norte), la falla inversa de Bonao-La Guácara de dirección E-O (al sur), dos familias de fracturas de dirección NE-SO (senestras) y NO-SE (dexas) y un sistema de fracturas conjugadas de direcciones ONO-ESE y O-E.

La Hoja se sitúa en la región más elevada del archipiélago de Las Antillas, presentando un rango de elevaciones que oscila entre los 70 m, en el curso del río Licey (al noroeste) y los 3175 m del Pico Duarte (al suroeste). El rango de pendientes de las laderas oscila entre 0° y 64° , situándose la media en los 12° (calculadas a partir de un MDT con resolución de 20 m). La red de drenaje está formada por importantes cursos fluviales de carácter permanente y que provocan una fuerte incisión. El clima es subtropical con una temperatura media anual que oscila entre los 17° - 27°C , una precipitación media anual de 1.400-2.000 mm, con áreas donde se superan los 4.000 mm y una densa cobertura vegetal. La época de lluvias, tormentas tropicales y huracanes se extiende de mayo a noviembre.

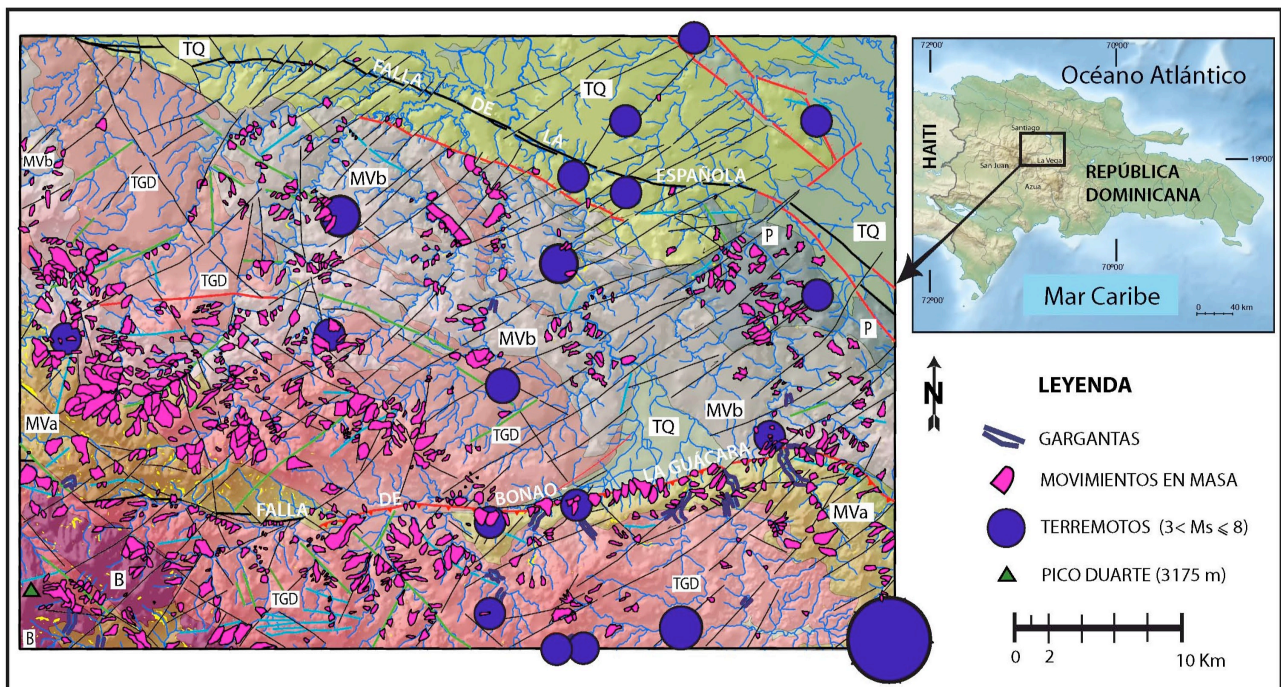


FIGURA 1. Situación de la Hoja de La Vega (República Dominicana). Cartografía de los movimientos en masa sobre un MDT, con la litología, la red de fracturación, la red de drenaje y las pendientes mayores de 40° (en amarillo).

MOVIMIENTOS EN MASA

En este trabajo se han estudiado 935 movimientos en masa cartografiados en la Hoja de La Vega (Tabla I). Para elaborar la cartografía se ha hecho un estudio fotogeológico basado en fotografía aérea a escalas

1:40.000 y 1:60.000 y en imágenes de Google Earth (2008), así como en observaciones de campo sobre topografía a escala 1:50.000. Además, se ha utilizado la cartografía geológica de las Hojas n° 6073-I, II, III y IV a escala 1:50.000 (Escuder-Viruet y Joubert, 2011).

Los movimientos en masa se han clasificado en i) deslizamientos complejos que afectan a rocas del sustrato y formaciones superficiales, ii) flujos o coladas de solifluxión que implican principalmente a formaciones superficiales, iii) deslizamientos de bloques (*block* o *rock slides*) que involucran principalmente a las rocas del sustrato y iv) movimientos en masa indiferenciados (Tabla I).

Movimientos en masa	Número	Rango de áreas (ha)	Área media (ha)	Área total (ha)	% de la Hoja
Complejos	653	1,67-142,57	17,54	11453,23	70
Flujos	144	2,90-67,1	15,01	2161,44	15
Rock Slides	72	8,46-165,26	34,40	2476,86	8
Indiferenciados	66	1,02-17,42	3,68	243,12	7
Total	935	1,02-165,26	17,47	16334,65	100

TABLA I. Estadística de las áreas (ha) de los diferentes tipos de movimientos en masa.

FACTORES DESENCADENANTES

Las características climáticas y la actividad neotectónica de la Isla de La Española apuntan a que los principales movimientos en masa de la región están desencadenados, en mayor medida, por eventos de tormenta y terremotos y, en menor medida, por la acción antrópica (corta de taludes artificiales o minería) y la incisión fluvial relacionada con el levantamiento tectónico regional. Numerosas investigaciones muestran que en climas tropicales, con potentes regolitos y alta pluviosidad como en esta región, las tormentas son un factor desencadenante principal de movimientos en masa (Iverson, 2000). Por su parte, los terremotos con magnitudes similares a los de esta región ($M > 4$) pueden generar decenas de miles de movimientos en masa a lo largo de áreas de centenares de miles de kilómetros cuadrados (Keefer, 1999).

La observación de la topografía de la Hoja de La Vega asimismo apunta a estos dos factores desencadenantes. Esta observación muestra la existencia de: i) laderas con pendientes mayores de 40° en los tramos más próximos al cauce y ii) laderas con pendientes mayores de 40° distribuidas a lo largo de todo su perfil. Densmore y Hovius (2000) interpretan las primeras laderas como vertientes en las que predominan procesos de ladera controlados por tormentas y las segundas como vertientes controladas por terremotos. Adicionalmente, estos mismos autores defienden que la presencia de gargantas fluviales, como las que se observan en este sector de la Cordillera Central, también es un criterio que indica la existencia de movimientos en masa desencadenados por tormentas.

TORMENTAS VS TERREMOTOS

El análisis estadístico de la posición de los movimientos en masa en la ladera, respecto a los cauces principales y las crestas, también aporta

Los movimientos en masa cartografiados tienen un rango de áreas que oscila entre 1,02 ha y 165,26 ha con una media de 17,47 ha. De ellos los que presentan mayor área son los *rock slides* (área media: 34,40 ha) mientras que los de menor área son los flujos (área media: 15,01 ha) y los indiferenciados (área media: 3,68 ha).

información sobre sus factores desencadenantes. Las tormentas tienden a originar movimientos en los tramos inferiores de las laderas mientras que los terremotos lo hacen en los tramos superiores (Densmore y Hovius, 2000). La Figura 2 muestra la posición en la ladera de los movimientos en masa de esta Hoja, observándose que la mayor frecuencia de movimientos se sitúa en los tramos inferiores de las laderas. La comparación entre los gráficos de frecuencias de la zona estudiada y otras con características climáticas y sísmicas similares (Chang *et al.*, 2007) apunta a que la mayoría de los movimientos de esta zona de la República Dominicana han sido desencadenados por tormentas.

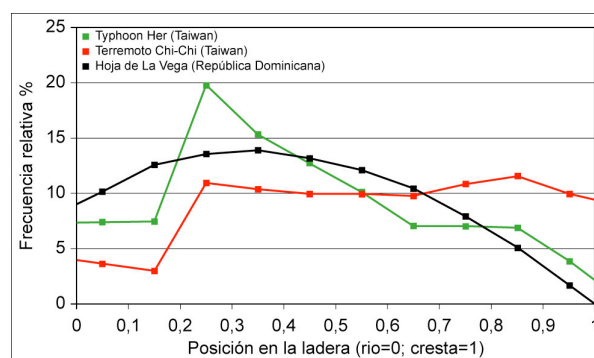


FIGURA 2. Frecuencia relativa de los movimientos en masa respecto a su posición en la ladera en la Hoja de La Vega (RD) (en negro) y de los movimientos desencadenados por tormentas (en verde) y terremotos (en rojo) en una región de Taiwán (Chang *et al.*, 2007). La frecuencia relativa en la Hoja de La Vega ha sido calculada para todas las celdas (resolución de 1 m) de los perfiles longitudinales de los movimientos mientras que en la región de Taiwán ha sido calculada para todas las celdas (resolución de 40 m) de los movimientos. Una celda tendrá un valor próximo a 0 si se sitúa en el tramo inferior de una ladera y próximo a 1 si se sitúa próximo a la cresta.

Chang *et al.* (2007) observan en una región tropical y tectónicamente activa que las áreas de los movimientos en masa desencadenados por tormentas oscilan en rangos de 0,1-5 ha y con áreas medias de 0,5 ha. En la Hoja de La Vega el área mínima y media de los movimientos cartografiados es de 1,02 ha y 17,47

ha respectivamente (Tabla I); este área mínima, relativamente elevada, parece indicar un porcentaje de movimientos en masa no representado en la cartografía. La comparación de los gráficos de frecuencias de los movimientos en masa cartografiados en la Hoja de La Vega y de los desencadenados por tormentas en una región similar (Chang *et al.*, 2007) apuntan en el mismo sentido (Fig. 2).

La Figura 3 muestra la posición en la ladera de las cabeceras de los movimientos en masa, observándose en este caso que la mayor frecuencia se sitúa en los tramos altos de la ladera. Esta distribución de frecuencias parece indicar que la mayoría de los movimientos han comenzado cerca de la cresta.

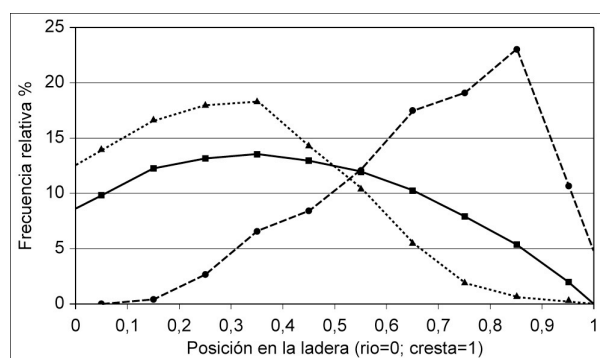


FIGURA 3. Frecuencia relativa de los movimientos en masa respecto a su posición en la ladera en la Hoja de La Vega, calculada para las cabeceras de los movimientos (línea discontinua) y para todas las celdas de los perfiles longitudinales de los movimientos en masa no reactivados (línea continua) y reactivados (línea punteada).

En la Figura 3 también se ha representado la posición en la ladera de los movimientos reactivados, observándose que la frecuencia de movimientos en los tramos inferiores de las laderas aumenta. Esta distribución de frecuencias apunta a que la mayoría de estos movimientos han sido desencadenados por tormentas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La cartografía geomorfológica elaborada en el marco del Proyecto Europeo SYSMIN II pone en evidencia el riesgo relacionado con procesos de laderas existente en la Hoja de La Vega. Este riesgo incluye principalmente deslizamientos complejos, deslizamientos de bloques (*block* o *rock slides*) y flujos, afectando tanto a formaciones superficiales como a las rocas del sustrato.

Las características climáticas, la actividad neotectónica de la Isla de La Española, así como la posición en la ladera de los movimientos en masa de la Hoja de La Vega, en zonas próximas a cursos fluviales y divisorias hidrográficas, indican que los factores desencadenantes de los principales procesos de ladera en esta zona montañosa de la Isla de La Española han sido los eventos de tormenta y los terremotos.

La diferente posición en la ladera de las máximas frecuencias calculadas para las cabeceras de los movimientos en masa y para las celdas situadas a lo largo de sus perfiles longitudinales de los movimientos reactivados y no reactivados (Fig. 3), parece indicar que la mayoría de los movimientos han sido desencadenados por terremotos cerca de las crestas, siendo posteriormente reactivados en los tramos inferiores de las laderas por eventos de tormenta.

La cartografía a escala 1:100.000 de los movimientos en masa de la Hoja de La Vega permite representar movimientos en masa con áreas de hasta 1 ha. Atendiendo al área media (0,5 ha) de los movimientos desencadenados por eventos de tormenta en regiones tropicales similares, el análisis detallado de los movimientos desencadenados por eventos de tormenta requerirá una escala 1:50.000 o mayor. Al mismo tiempo, esta escala permitirá el análisis de los movimientos desencadenados por la acción antrópica y la incisión fluvial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado a partir de los datos recogidos en el Proyecto Europeo SYSMIN II del IGME y en el Proyecto ARCO-2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación (MINECO).

REFERENCIAS

- Chang, K., Chiang, S. y Hsu, M. (2007): Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression. *Geomorphology*, 89: 335-347.
- Densmore, A. L. y Hovius, N. (2000): Topographic fingerprints of bedrock landslides. *Geology*, 28: 371-374.
- Escuder-Viruete, J. y Joubert, M. (2011): *Mapa Geológico de la República Dominicana a escala 1:100.000. Hoja N° 6073 (La Vega)*. (EuropeAid/122430/D/SER/DO). IGME. Proyecto SYSMIN II.
- Iverson, R. (2000): Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36 (7): 1897-1910.
- Keefer, D.K. (1999): Earthquake-induced landslides and their effects on alluvial fans. *Journal of Sedimentary Research*, 69 (1): 84-104.
- Schuster, R.L. y Highland, L.M. (2001): Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the western hemisphere. *Open File Report 01-0276*. USGS.
- Suárez-Rodríguez, A. (2011): *Mapa Geomorfológico y de Procesos Activos susceptibles de constituir riesgo geológico de la República Dominicana a escala 1:100.000. Hoja N° 6073 (La Vega)*. (EuropeAid/122430/D/SER/DO). IGME. Proyecto SYSMIN II.