

DEFORMACIONES GRAVITATORIAS PROFUNDAS EN LADERAS A LO LARGO DE LA FALLA ACTIVA DE BOCONÓ EN EL SECTOR CENTRAL DE LOS ANDES DE MÉRIDA, VENEZUELA OCCIDENTAL

FRANCK A. AUDEMARD M; CHRISTIAN BECK² Y EDUARDO CARRILLO P.³

¹Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas -FUNVISIS-. Departamento Ciencias de la Tierra, apartado Postal 76.880, Caracas, 1070-A, Venezuela. e-mail: faudemard@funvisis.gob.ve

²Université de Savoie, Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines -LGCA, 73376 Le Bourget du Lac Cedex, France. e-mail: beck@univ-savoie.fr

³Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra, Los Chaguaramos, Caracas, Venezuela. e-mail: eduardo.carrillo@ciens.ucv.ve

Resumen

Aquí se describen dos ejemplos de deformaciones gravitatorias profundas en laderas (DSGSD por sus siglas en inglés) de gran tamaño en la alta montaña de los Andes de Mérida, Venezuela: el Páramo de Mucubají y el Cerro La Camacha. Estos movimientos en masa han deslizado en tiempos posteriores al Último Máximo Glaciar (LGM por sus siglas en inglés). Igualmente, ambos deslizamientos están en estrecha asociación con la traza activa de la falla de Boconó. El deslizamiento del Cerro La Camacha está delimitado por el noroeste por la falla, mientras que el de Mucubají está hasta cortado por la traza activa de la falla. El deslizamiento de Mucubají, de casi 10 km de largo, despega morrenas del LGM al nivel de su contacto basal con el basamento. El deslizamiento de La Camacha es del tipo sackung, incorporando dos masas gigantes que afectan la ladera noroeste completa del Cerro la Camacha. Este sackung tiene al menos 20 km de largo, en la dirección de la traza activa de la falla de Boconó. Concluimos que la combinación de fuerzas ligadas al diferencial altitudinal (fuerza gravitatoria) y excitación sísmica asociada a una falla de sitio es el agente desestabilizante de las laderas o del relieve en ambos casos. Aunque la (re-)activación cosísmica del deslizamiento de La Camacha es altamente probable, no hemos conseguido evidencia de ello aún. Por el contrario, el DSGSD de Mucubají muestra evidencias geomorfológicas, geodésicas y sedimentarias de actividad episódica en tiempos recientes, que podría ser atribuida a un disparador sísmico. En el caso particular del sackung de La Camacha, la desestabilización de su vertiente noroeste podría verse adicionalmente favorecida por la combinación de la cinemática dextral de la falla de Boconó con un plano de falla buzante al sureste.

Palabras clave: Deslizamientos profundos, DSGSD, Sackung, Falla de Boconó, Mérida, Andes Venezolanos.

Abstract

Two very large deep-seated gravitational slope deformations (DSGSD) in the highlands of the Mérida Andes, Venezuela, are herein described: the Mucubají Pass and Cerro La Camacha. These slope movements have slid in post-Last Glacial Maximum (LGM) times. In addition, both landslides are in very close association with the active Boconó Fault trace. The Cerro La Camacha (Camacha Range) landslide is fault bounded along its northwest flank, whereas the Mucubají pass mass movement is even cut by the active fault trace. The almost 10 km long Mucubají slide mobilizes LGM moraine deposits along the unconformable basement contact. La Camacha slope movement is a sackung-type landslide, involving two huge masses that affect the entire northwestern slope of the La Camacha Range. This sackung is at least 20 km long, paralleling the active Boconó Fault trace. Combination of high relief energy (gravitational forces) and seismic shaking related to an on-site active fault could be responsible for the destabilization of the slopes or massif in both cases. Although the seismically-induced (re-) activation of the La Camacha landslide is very likely, there is no proof for that yet. Conversely, the Mucubají slide shows geomorphic, geodetic and sedimentary evidence of episodic activity in recent times, which could be ascribed to seismic triggering. In the particular case of the La Camacha sackung, the combination of dextral slip along the Boconó Fault and a SE-dipping fault plane could additionally favor the destabilization of the NW slope of the La Camacha Rangeon.

Keywords: *Deep-seated sliding, DSGSD, Sackung, Boconó Fault, Mérida, Venezuelan Andes.*

Introducción

Varias misiones de campo y la interpretación de vistas aéreas han permitido la identificación y cartografía de dos deformaciones gravitatorias profundas en laderas (Deep-Seated Gravitational Slope Deformations –DSGSD- por sus siglas

en inglés), según la definición propuesta por Dramis and Sorriso-Valvo (1994). Se presenta información geomorfológica y geológica para describir estos movimientos en masa. También se discute las posibles razones de la concentración geográfica de estas dos grandes inestabilidades a lo largo de la muy activa falla dextral de Boconó, y el rol de esta falla en la iniciación y evolución de estos movimientos. Se escogieron estos dos casos de estudio por su gran tamaño, los rasgos geomorfológicos conspicuos y la proximidad a la falla activa de Boconó. Además, ambos casos están en zonas de fuerte relieve que han sufrido los efectos del Último Máximo Glaciar (Last Glacial Maximum –LGM- por sus siglas en inglés; conocido localmente como Glaciación Mérida Tardía por Schubert, 1974) y de la subsecuente desglaciación. Esta última se hace efectiva alrededor de 18 ka. Aún más, ambos sitios están en el mismo valle de los ríos Santo Domingo-Aracay y particularmente en la misma vertiente noroeste de la Sierra de Santo Domingo y de su prolongación noreste en el Cerro La Camacha, que fue afectada por una carga y descarga por peso de hielo más importante que la otra vertiente del valle.

Deformaciones Gravitatorias Profundas en Laderas

Las inestabilidades profundas en laderas de grandes dimensiones han sido definidas de diferentes maneras a nivel mundial (Audemard *et al.*, 2010 y todas las referencias ahí incluidas). La mayoría de los casos reportados han sido atribuidos a formas diversas de hundimientos de la vertiente (“slope sagging”; Savage y Varnes, 1987; Hutchinson, 1988), un término derivado de la palabra alemana “Sackung” (Zischinsky, 1966). Esta definición presenta un significado similar al término relajamiento gravitatorio (“gravitational spreading”; Varnes *et al.*, 1989) y deformaciones gravitatorias profundas en laderas (“deep-seated gravitational slope deformation –DSGSD-”; e.g., Nemcok, 1972; Dramis and Sorriso-Valvo, 1994). Sin embargo, leves diferencias pueden persistir entre tales términos. Por ejemplo, un “sackung” difiere de un deslizamiento

grande clásico en la lentitud del proceso de deformación de la vertiente en el largo plazo, junto a la ausencia de bordes bien definidos y del abultamiento del pie del deslizamiento (McCalpin y Irvine, 1995). Los “sackungen” se ubican típicamente a lo largo de la cresta de filas en rocas masivas competentes, mimetizándose con las curvas de nivel, así como a lo largo del rumbo de discontinuidades mayores en las rocas (estratificación, foliación, fracturas y/o fallas).

Todos los DSGSD, en su definición más amplia, muestran rasgos morfo-estructurales distintivos, tales como: filas dobles o múltiples, escarpes y contra-escarpes, hundimiento del tope de la fila, depresiones transversales a la fila, trincheras, depresiones (con o sin laguna), fisuras de tensión abiertas o abultamiento en el pie, entre otras (ver referencias en Audemard *et al.*, 2010). Los DSGSD son lentos pero continuos sobre largos períodos de tiempo, ocurren en laderas de alta pendiente (con al menos 500 m de desnivel), con dimensiones comparables a toda la ladera (áreas > 0,25 km², volúmenes > 0,5 km³, espesor >100 m), y carecen de bordes y superficie basal bien definidos. Sus desplazamientos pueden ser relativamente pequeños en comparación con el tamaño de la vertiente, pero los movimientos acumulados pueden ser considerables. Pueden reactivarse luego de prolongados períodos de quiescencia o inactividad. Su velocidad a lo largo de la superficie de deslizamiento está típicamente entre pocos milímetros a algunos centímetros al año (en el orden de 0,4 a 5,0 mm/a, según Varnes *et al.*, 1989), y están frecuentemente en el límite de detección de los instrumentos de monitoreo (Bovis, 1990). Cuando son disparados o reactivados por sismos, su movimiento es a brincos, con la alternancia de períodos prolongados de quiescencia y momentos de reactivación cortos en ocasión de los sismos (ver referencias en Audemard *et al.*, 2010). En consecuencia, ameritan ser considerados como efectos superficiales sismo-gravitacionales potenciales que esencialmente resultan de la combinación de la vibración sísmica y fuerzas gravitacionales. Los principales agentes

detonantes de los movimientos en masa sísmicamente inducidos son: aceleraciones orientadas (carga dinámica); cambios en la mesa de agua inducidos por sismos; cambios cíclicos en la presión de poros y licuación; fallamiento y fracturamiento superficial sismotectónico (Radbruch-Hall y Varnes, 1976; Solonenko, 1977; Dramis and Blumetti, 2005).

Zona de estudio

Los Andes de Mérida constituyen un rasgo fisiográfico prominente en Venezuela occidental. Se extienden en dirección SO-NE por unos 350 km, desde la frontera colombiana hasta la ciudad de Barquisimeto, estando sus picos más elevados próximos a los 5000 m en proximidad a Mérida. La formación de la cadena resulta de transpresión de edad plio-cuaternaria asociada a la convergencia oblicua entre los bloques continentales de Suramérica y Maracaibo (e.g., Audemard y Audemard, 2002). Esta configuración geodinámica actual es responsable de la ocurrencia de partición de deformaciones,

donde la cadena montañosa y ambos pie de montes se acortan en dirección NO-SE, mientras la falla subaxial de Boconó acomoda trancurrencia dextral paralelamente a la cadena (Audemard y Audemard, 2002). Audemard (2003) señala que los movimientos en masa sísmicamente inducidos y DSGSD (i.e.: “gravitational spreading”) juegan un papel mayor en la evolución paisajística en alta montaña y en la transferencia de masas desde las vertientes hasta los torrentes.

La falla de Boconó y su actividad tectónica cuaternaria

La falla de Boconó es una falla dextral activa que se extiende por unos 500 km, parcialmente a lo largo de los Andes venezolanos y de la depresión de Yaracuy (i.e., Audemard, 2009). Esta falla presenta numerosas evidencias geomorfológicas, persistentes y consistentes, a lo largo de su traza principal de comprobada actividad tectónica cuaternaria, y hasta holocena, así como una comprobada actividad sísmica instrumental, histórica y prehistórica.

Por razones de espacio en esta versión resumida, se invita al lector a nutrirse de estas evidencias profusamente descritas en la versión original de este trabajo en Audemard *et al.* (2010), y particularmente presentes en el segmento bajo estudio.

DSGSD en el valle de los ríos Santo Domingo y Aracay

Dos DSGSD han sido reconocidos y mapeados en el valle de los ríos Santo Domingo-Aracay, siendo el punto más bajo de su talweg aquel donde fue emplazada la presa José Antonio Páez (Santo Domingo). Cada DSGSD está respectivamente en las cabeceras de los ríos Santo Domingo y Aracay, en los páramos de Mucubají y Llano Corredor, respectivamente. Ambos movimientos en masa superan los 9 km de longitud, pero son bien distintos entre sí. Primero, describiremos el de Mucubají, ubicado hacia el SO del área de estudio, para luego hacer lo propio con el de Llano Corredor, ubicado diametralmente opuesto al primero (Fig. 1).

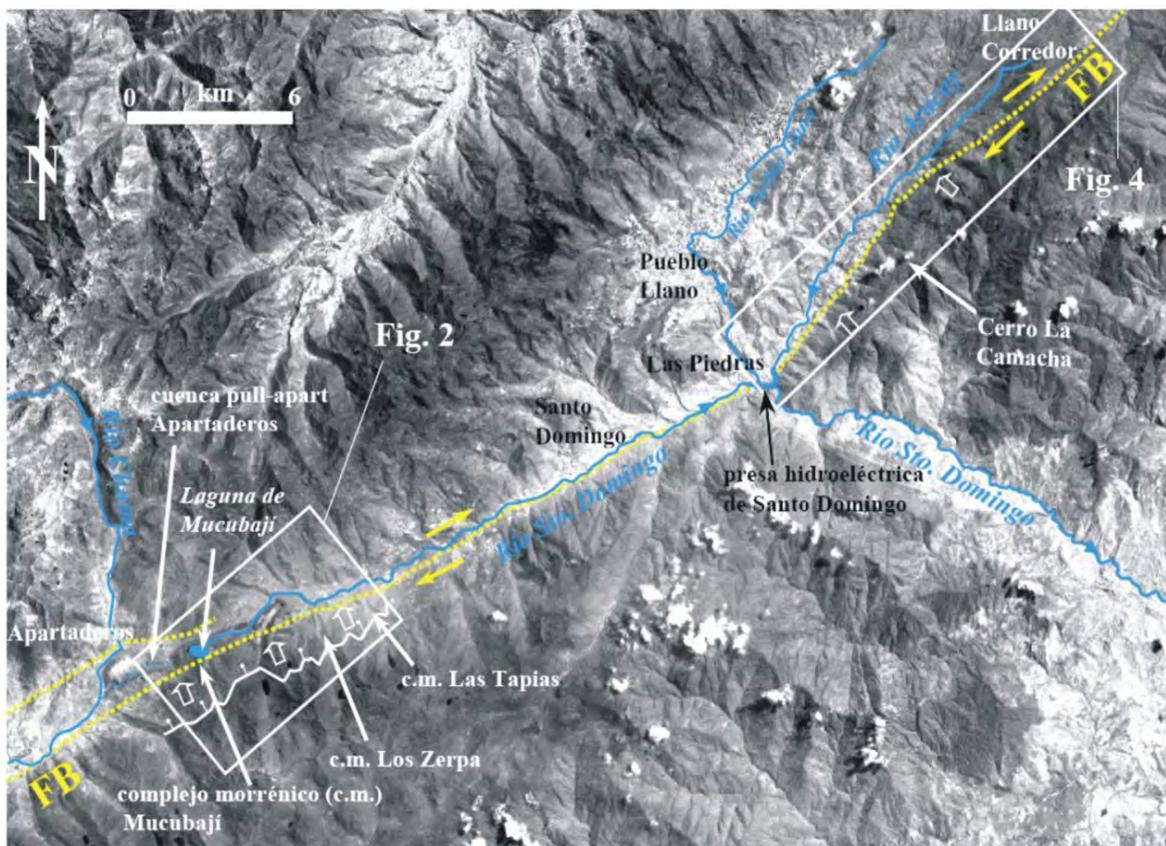


Figura 1. Fotografía aérea mostrando la ubicación relativa de los movimientos de laderas descritos a lo largo de la traza de la falla (línea punteada amarilla) sísmogénica de Boconó (FB) en el valle de los ríos Santo Domingo y Aracay. Se indica la ubicación de las figuras 2 y 4.

El deslizamiento de Mucubají

La región de Mucubají expone un conjunto de complejos morrénicos en la divisoria de aguas de Mucubají, los cuales están bien preservados en el flanco noroeste, el menos soleado, de la Sierra de Santo Domingo. La Laguna de Mucubají se ubica en la divisoria de aguas de los ríos Santo Domingo y Chama (Fig. 1). Este antiguo lago glaciar está represado detrás de la morrena terminal del Pleistoceno tardío. El río Mucuñuque, el cual drena este complejo morrénico y alimenta la laguna, solía descargar en el río Chama hacia el SO antes de ser capturado por el río Santo Domingo, tal como lo evidencia el vertedero abandonado preservado hacia el SO de la morrena más externa (Fig. 2). Este abandono ha sido relacionado con un cambio mayor en la evolución de la laguna de Mucubají, registrado en los sedimentos lacustres y que tuvo lugar alrededor de 14-14,5 ka (referirse a Carrillo *et al.*, 2008 para más detalles). Esta morrena, así como 3 otras (La Victoria, Los Zerpa y Las Tapias, de SO a NE; Figs. 1 y 2) están desplazadas por la traza activa principal de la falla de Boconó (Fig. 2).

El complejo de Mucubají muestra la particularidad de albergar un lago activo (la laguna de Mucubají) justo detrás de la morrena más externa (Fig. 2), en vez de estar en una posición más hacia el macizo rocoso, como se esperaría en un sistema morrénico en retroceso; lo mismo ocurre en la morrena La Victoria. Por otra parte, el curso del río Mucuñuque actual está recostado contra su morrena lateral derecha (o noreste). Esto está adicionalmente sustentado por la presencia de abras de viento (antiguas gargantas de ríos) al oeste del curso actual del río Mucuñuque, preservadas en cuatro morrenas frontales de retroceso, inscritas dentro del complejo morrénico de Mucubají. Interpretamos que estas 3 evidencias son consecuencia del basculamiento hacia el NE y movimiento cuesta abajo de la totalidad de este complejo morrénico. Este movimiento gravitacional del complejo morrénico de Mucubají se ve atestiguado por un escarpe de exposición NO, de unos 5 a 6 m de alto, que corta el complejo morrénico en proximidad a su contacto basal discordante con las rocas ígneo-metamórficas precámbricas

aflorantes (Fig. 3). Este rasgo puede seguirse de forma confiable desde el fondo del complejo morrénico, hacia el NE como al SO, como se ilustra en la figura 2, sobre una distancia de al menos 9 km, siempre muy cerca o en el contacto antes indicado (Figs. 2 y 3), asemejando mucho a una estructura tipo "rimaya". Corre en posición proximal o basal de los complejos morrénicos de Las Tapias, Los Zerpa, La Victoria, Mucubají y parcialmente de El Caballo (de NE a SO; Fig. 2). El extremo noreste de la "rimaya" termina con los afloramientos de depósitos morrénicos del LGM. Por el contrario, su otro extremo está mal definido, aunque aún se visualiza con claridad en el fondo de la morrena de El Caballo. Este rasgo es característico de los DSGSD. Todos los rasgos antes descritos sugieren que la desestabilización de los complejos morrénicos del LGM ocurre hacia el norte-NE, aprovechando la alta energía gravitacional asociada a la fuerte incisión del río Santo Domingo. Esto podría verse adicionalmente favorecido por el hecho que la falla de Boconó corta el pie de la masa deslizada,

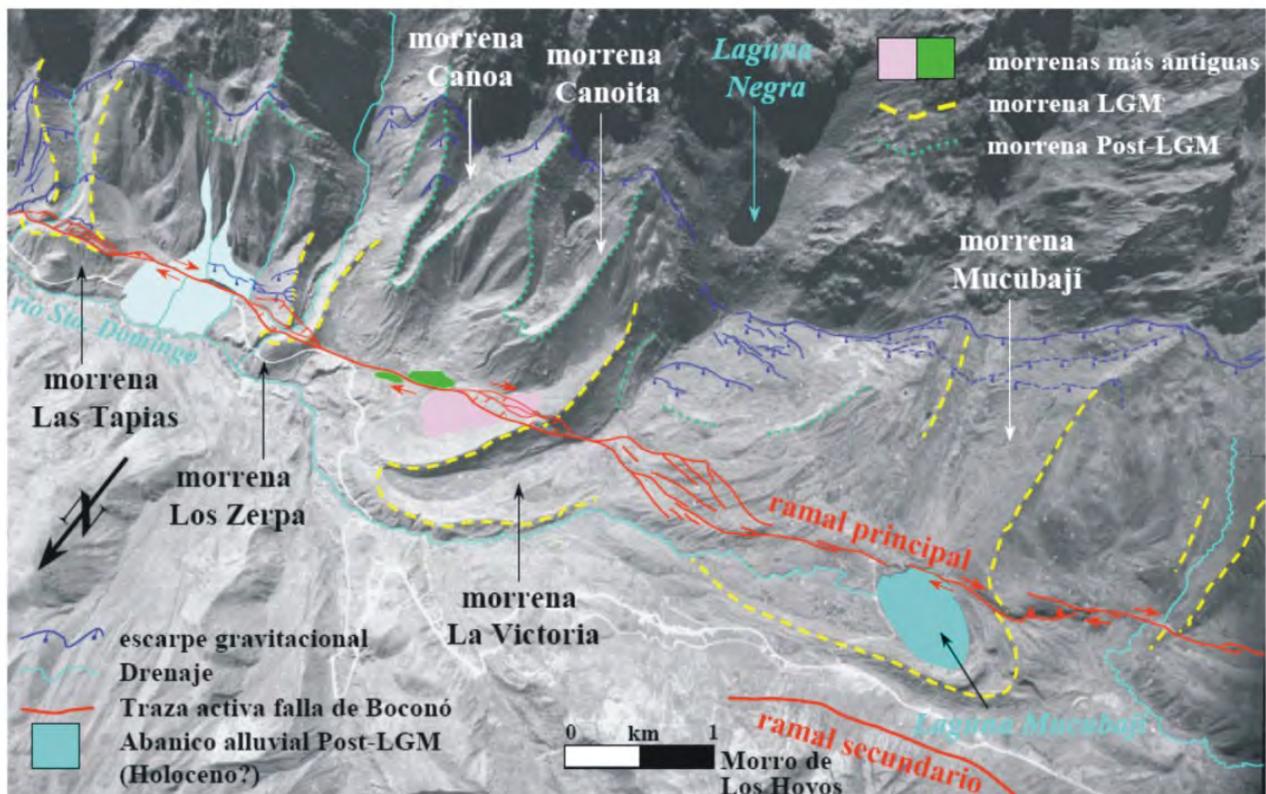


Figura 2. Cartografía del movimiento en masa del páramo de Mucubají y su relación con las morrenas del Pleistoceno tardío en el área, así como con la traza activa de la falla de Boconó. La ubicación relativa de esta figura se muestra en la figura 1.

sumado al efecto de descompresión que incorporaría un plano de falla de Boconó buzando al SE. Es muy probable que los desplazamientos cosísmicos, así como la excitación sísmica, a lo largo de este segmento de la falla de Boconó, pudiesen acelerar, sino desencadenar, movimientos episódicos de este gigantesco movimiento en masa. Tomando en cuenta su longitud, como el hecho que involucra varios complejos morrénicos en distintas posiciones altitudinales, entre 2800 y 3500 m, consideramos que es un deslizamiento profundo. Por otra parte, dado que el escarpe o corona de deslizamiento se encuentra en o en proximidad al contacto basal morrena-macizo rocoso, consideramos que el DSGSD está enraizado al nivel de esa frontera reológica, lo cual implica que la superficie de deslizamiento está al menos a 100 m de profundidad (como en Los Zerpa; Audemard *et al.*, 2002; Carrillo *et al.*, 2006) y eventualmente hasta tan profundo como a 500 m, como en el páramo de Mucubají (Audemard *et al.*, 2002).

La edad de activación de este DSGSD es desconocida, pero aparenta haberse movido en el Cuaternario tardío, principalmente en el Pleistoceno tardío y Holoceno, por

diversas razones: a) todos los depósitos del LGM en la región del páramo de Mucubají están afectados por el deslizamiento. El movimiento más viejo conocido de este DSGSD corresponde al basculamiento, que induce el cambio de vertedero de la laguna de Mucubají (alrededor de 14-14,5 ka); b) El fondo del valle del complejo de Mucubají, drenado por el río Mucuñuque, aguas arriba de la corona de deslizamiento, exhibe un sistema de siete pequeñas terrazas aluviales escalonadas preservadas a los lados del río, que implican que el movimiento de la masa deslizada ha sido a brincos, forzando al río Mucuñuque a restablecer o mantener su nivel de base acorde con aquel presente en el bloque hundido o deslizado. Este comportamiento episódico sugiere un origen sísmico; y c) No sólo los depósitos del LGM están cortados por la cicatriz de deslizamiento, sino igualmente los complejos morrénicos post-LGM de La Canoa y Canoita (Fig. 2).

En referencia a su actividad presente, es probable que este DSGSD esté activo y moviéndose lenta y continuamente. Una red de puntos de triangulación geodésica por teodolito instalada en los años 1970 y 1980 por Henneberg y Schubert (1986)

para determinar la tasa de movimiento de la falla de Boconó, ha medido más bien acortamiento en la dirección NO-SE que transcurrencia dextral, de manera sorpresiva, en la zona correspondiente al pie del DSGSD. Este comportamiento cinemático y dinámico, se ha interpretado como acortamiento en la masa deslizada (complejo de Mucubají), por chocar contra la ladera opuesta, más rígida, de Morro de Los Hoyos.

El deslizamiento de La Camacha

El valle de Aracay, drenado por el río homónimo, presenta un gradiente longitudinal de 12°, descendiendo desde los 3500 m hasta 1700 m snmm, sobre una distancia de unos 10 km. El río Aracay escurre a lo largo de la falda NO del Cerro La Camacha, el cual está en perfecta extensión de la Sierra de Santo Domingo hacia el NE, más allá de la garganta del río Santo Domingo (emplazamiento de la presa homónima). Las cumbres más altas del Cerro La Camacha alcanzan por encima de los 3800 m snmm y su línea de cresta se mantiene sobre los 3600 m por una distancia de 4 km. La traza de la falla de Boconó bordea el pie de la falda noroeste del Cerro La Camacha; el cual está constituido por rocas del Complejo Iglesias del Arqueano, de igual manera que la Sierra de Santo Domingo, y rocas intrusivas ricas en sílice del Paleozoico medio (Hackley *et al.*, 2005). En esta región, estas rocas presentan espesos mantos de alteración, en el caso que no fuesen posteriormente removidos por acción de los glaciares de alta montaña del LGM, como se puede observar en las partes altas del Cerro La Camacha por medio de fotos aéreas.

Tres movimientos en masa pueden distinguirse en el Cerro La Camacha; dos de ellos muy grandes mientras el tercero es más bien pequeño. Los más grandes están en los sectores oriental y central, mientras el más pequeño se ubica en su extremo más occidental, sobre el que el estribo izquierdo de la presa de Santo Domingo y su lago artificial se apoyan (Fig. 4). Cada uno de los escarpes (o coronas) identificados en los dos deslizamientos más grandes se

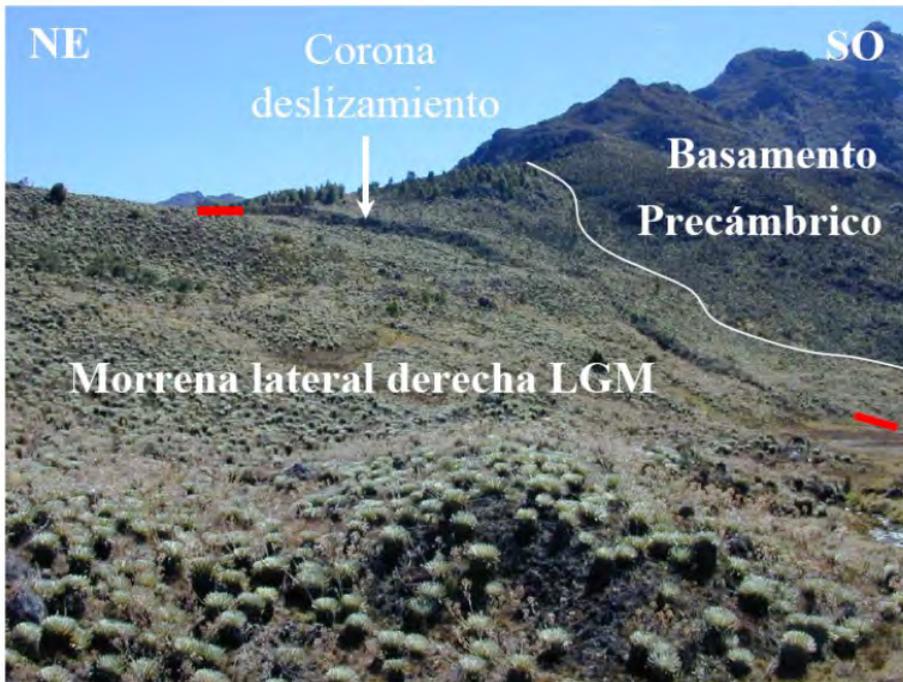


Figura 3. Vista de terreno hacia el sur de la corona de deslizamiento, donde afecta el complejo morrénico de Mucubají, en el fondo del valle del río Mucuñuque. Vista tomada desde el interior del complejo.

extienden de forma continua sobre unos 10 km y se solapan en su sector medio por unos 4 a 5 km. Estos escarpes de exposición NO corren de forma paralela a la traza activa de la falla de Boconó. La corona del tercer deslizamiento, por el contrario, exhibe una forma semi-circular y mira hacia el oeste (hacia el embalse). Este deslizamiento en roca parece rotacional y no mide más de 2 km de ancho (Fig. 4). Los dos deslizamientos mayores conjuntamente se extienden por 20 km a lo largo del Cerro La Camacha. La corona del deslizamiento más oriental se ubica a lo largo de la línea de cresta del Cerro La Camacha por un gran trecho de su extensión. Esta corona oriental puede subdividirse en tres tramos. Su porción oriental se ubica en la vertiente SE del cerro La Camacha, bajo la forma de un contraescarpe. Luego de cruzar la cresta, se exhibe como un tope con doble cresta (doble fila con depresión alargada en el medio). Luego, la porción central está representada por dos contraescarpes, uno en cada vertiente. Ello induce el colapso de la

zona de cresta. Aquí, el Cerro La Camacha presenta una cresta pobremente definida. La porción occidental de esta corona aparenta estar fuertemente controlada por la foliación (Fig. 4), lo cual no sucede en las otras 2 porciones por cortar oblicuamente a la foliación. Esta porción occidental de la corona, que se solapa con el segundo deslizamiento grande, corresponde a un contra-escarpe ubicado muy cerca de la línea de cresta. La altura de estos escarpes a partir de las vistas aéreas es al menos de la decena de metros.

El segundo deslizamiento puede subdividirse en dos porciones. La más oriental de estas porciones, que solapa el gran deslizamiento previamente descrito, se encuentra a media ladera de la vertiente NO del Cerro La Camacha y es un escarpe con exposición igual a la de la ladera. Este escarpe es paralelo a la foliación local (Fig. 4). Su orientación general es levemente oblicua (10°) a la de la traza de la falla de Boconó. Hacia el oeste, su corona

se mantiene constante altitudinalmente, hasta alcanzar la línea de cresta, donde converge con el escarpe principal del otro deslizamiento mayor. El Segundo segmento (el occidental) de este movimiento en masa pasa a la otra vertiente (la sureste), donde se exhibe como un contraescarpe. Se mantiene cerca de la línea de cresta del Cerro La Camacha, aún cuando ésta va perdiendo altura.

La descripción provista anteriormente de los 2 grandes deslizamientos permiten asemejarlos a “sackungen” descritos mundialmente. Es evidente que la superficie de deslizamiento reutiliza o se adapta a la foliación en rocas paleozoicas (Fig. 4). Además, estos 2 grandes movimientos en masa muestran bordes laterales mal definidos y no hay presencia de deformación de pie de ladera en el Cerro La Camacha. El DSGSD muestra una depresión elongada a lo largo de la cresta, donde la foliación por su oblicuidad con la vertiente no favorece los movimientos en masa (Fig. 4).

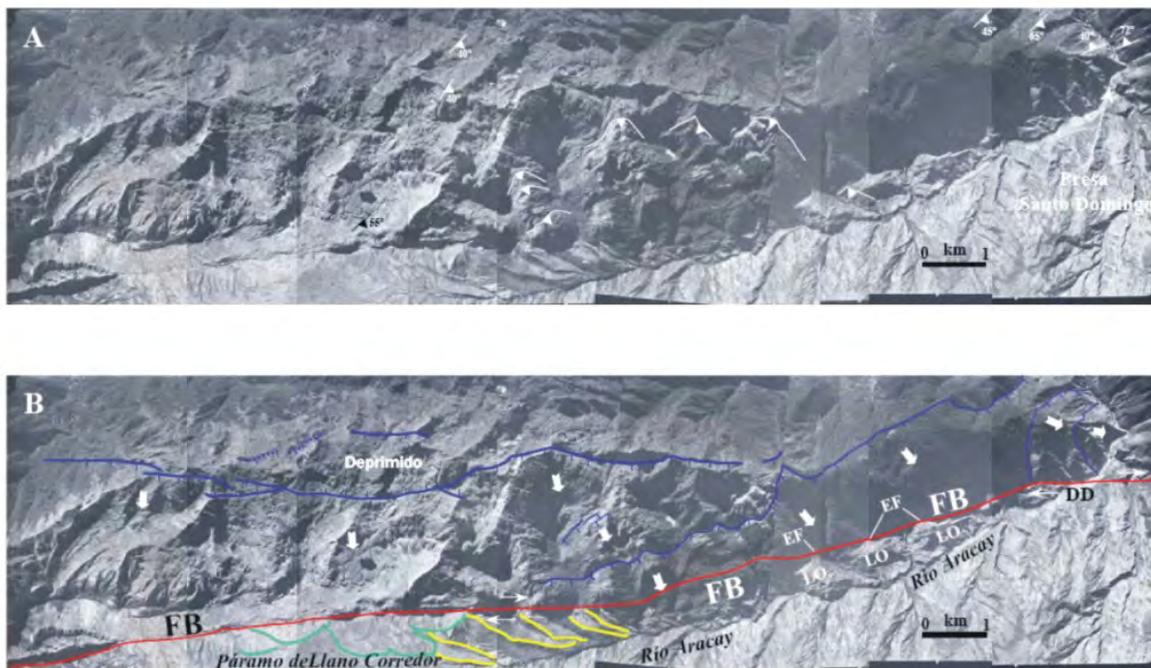


Figura 4. Fotomosaico aéreo del Cerro La Camacha, armado a partir de las fotos 091-100 de la misión 010455 (Cortesía de Cartografía Nacional; actualmente IGVSb). Su ubicación relativa se muestra en la figura 1. A) Vista aérea del Cerro La Camacha, indicando el emplazamiento de la presa de Santo Domingo. Nótese la expresión morfológica muy clara de la falla de Boconó a través de distintos ambientes.

B) Cartografía de los “sackungen” translacionales de La Camacha, igual que del deslizamiento rotacional pequeño afectando el sitio de presa. La traza de la falla de Boconó también se indica, la cual desplaza dextralmente varias morrenas del LGM y post-LGM en el páramo de Llano Corredor. Grandes lomos de obturación (LO) y ensilladuras de falla (EF) próximos a la presa delínean la falla. La leyenda de colores para las líneas de cresta de las morrenas es la misma que en la figura 2. DD: drenaje desplazado (bayoneta dextral del río Aracay).

El inicio de la activación de este sackung de más de 20 km de largo no ha sido aún precisada. No obstante, sí la hipótesis sugerida por Soulas *et al.* (1987) sobre un eventual abandono pretérito de la traza activa de Boconó a lo largo del curso del río Aracay fuese confirmada, se podría argumentar que la actividad acumulada de este gigantesco sackung en tiempo geológico habría podido finalmente desraizar la parte más superior del plano de falla de Boconó. La falla habría tenido entonces que rectificar su geometría fuertemente alabeada, cortando a través de la masa deslizada. Cabe también destacar que a pesar que los contraescarpes son excelentes receptáculos de depósitos cuaternarios, lo cual parece ser el caso en el sackung de La Camacha, sus escarpes cortan principalmente rocas del basamento paleozoicas o más antiguas. No obstante, podemos aseverar que este DSGSD del tipo sackung ha sido reactivado posterior al LGM (o Glaciación Mérida tardía). Algunos escarpes o porciones de ellos lucen redondeados y viejos, pero la mayoría de los cartografiados en la figura 4 se muestran filosos y jóvenes, inclusive aquellos contraescarpes que se oponen al movimiento descendente de los últimos glaciares del LGM.

Grado de asociación entre los DSGSD y la falla de Boconó

La falla de Boconó es la principal fuente generadora de terremotos en el occidente de Venezuela (Audemard *et al.*, 2000), produciendo los sismos más grandes con los períodos de retorno más cortos (Audemard *et al.*, 1999; 2008; Audemard, 2008; 2009b, 2010). Hemos mostrado que esta falla corre a lo largo del pie de estos grandes DSGSD, o dentro de la propia masa deslizada. Además, el movimiento dextral de Boconó, como para el valle inferior del río Aracay, aumenta por sí sólo el gradiente topográfico, al incrementar el relieve del Cerro La Camacha en comparación con el fondo del valle vecino del río Aracay. Por otra parte, un buzamiento alto hacia el SE de la falla de Boconó también incorpora un efecto de vacío por debajo del Cerro La Camacha, al desplazarse éste dextralmente por efecto de la falla de Boconó.

En términos de evidencias directas, una gran reorganización gravitacional cosísmica del complejo morrénico de Mucubají ocurrió cercano a 14-14,5 ka, induciendo un basculamiento general del sistema hacia el N-NE (Carrillo *et al.*, 2008). Este complejo también registra movimientos episódicos, como lo atestigua el conjunto de terrazas escalonadas del río Mucuñuque preservadas por encima de la corona del deslizamiento. Esta evidencia en particular sugiere contundentemente que la cinemática de tal DSGSD es inducida por terremotos fuertes. Por último, resultados geodésicos apuntan a la ocurrencia de deformaciones compresivas en el pie del deslizamiento. Esta información geodésica, aunada al comportamiento a brinco a largo plazo del DSGSD de Mucubají, permite proponer que éste se mueve de forma continua (“creep”) con aceleraciones puntuales cosísmicas. Para el sackung del Cerro La Camacha, no hay evidencia directa de activación alguna durante sismos aún, pero se han identificado sitios potenciales para evaluaciones paleosísmicas en escarpes del sackung como de la falla de Boconó.

Conclusiones

Las zonas de alta montaña de los Andes de Mérida en Venezuela, particularmente en la Sierra de Santo Domingo, como en su extensión noreste denominada el Cerro La Camacha, en el noreste del estado Mérida, muestran claras evidencias de deformaciones gravitatorias profundas en laderas (DSGSD por sus siglas en inglés). Dos casos aquí se presentan y discuten: el páramo de Mucubají y el Cerro La Camacha. Ambos movimientos están en clara asociación con la traza activa de la falla de Boconó. El Cerro La Camacha está limitado al pie de su flanco noroeste por la traza activa de la falla de Boconó. El mismo flanco noroeste de este relieve se ve afectado por un sackung de al menos unos 20 km de largo. Este DSGSD involucra el basamento Precámbrico, reutilizando primariamente los planos de foliación. Se puede considerar un deslizamiento de tipo translacional. Los picos del Cerro La Camacha presentan un diferencial altitudinal de hasta unos 2.000 m por encima del fondo del valle del río

Aracay, y generalmente es de al menos 500 m, siendo un agente facilitador de la generación y posterior deslizamiento de este DSGSD.

El movimiento en masa del páramo de Mucubají está de hecho cortado por la traza activa de la falla de Boconó. Aunque se le puede clasificar como DSGSD, este deslizamiento únicamente afecta a los complejos morrénicos (de NE a SO, Las Tapias, Los Zerpa, La Victoria, Mucubají y El Caballo) del Último Máximo Glaciar (LGM, según sus siglas en inglés), despegados de su sustrato rocoso por la suela del deslizamiento. Este DSGSD también remobiliza complejos morrénicos más jóvenes (Canoa y Canoita) formados durante la desglaciación post-LGM. Dado que su corona luce como una estructura tipo rimaya, ubicada en el contacto entre los depósitos morrénicos y el sustrato rocoso competente, creemos que la superficie basal de deslizamiento se emplaza en dicha frontera reológica. Parece igualmente un deslizamiento translacional.

La combinación de una alta energía potencial típica de un relieve de altas pendientes y fuertemente inciso, con una excitación sísmica generada por una falla de sitio activa (sin considerar la talla del sismo que puede producir la falla de Boconó), es responsable de la desestabilización de los relieves limitados al pie por la falla de Boconó, en cada caso. El DSGSD del páramo de Mucubají muestra evidencias de movimientos episódicos al largo plazo, intercalados con movimiento continuo (“creep”) contemporáneo como lo sugiere la medición repetida de una red geodésica de triangulación por teodolito originalmente instalada para medir la cinemática de la falla de Boconó. Este movimiento en masa puede estar combinando deslizamiento cosísmico episódico con deslizamiento asísmico continuo intersísmico.

El extremo suroeste del Cerro La Camacha está seguramente deslizando de manera rotacional, como lo muestra la medición repetida de redes geodésicas de triangulación instaladas para el monitoreo de la presa José Antonio Páez en la década

de 1970 y 1980. Por el contrario, no tenemos evidencia aún de que el gigantesco sackung afectando este cerro sea (re-)activado por sismos, pero sí podemos precisar que se ha movido en tiempos post-LGM (es decir, en el Holoceno). Su origen sísmico se ve sugerido por sus dimensiones, tipo de movimiento en masa y geometría, así como su asociación directa con la falla de Boconó que afecta el pie del deslizamiento. La cinemática dextral de la falla de Boconó, aunada a un plano de falla buzante fuertemente al SE, igualmente favorecen la reactivación cosísmica del DSGSD de La Camacha. El efecto de vacío creado bajo una falla “aparentemente” inversa induciría la desestabilización o el colapso instantáneo de toda la vertiente.

Estos grandes deslizamientos de alta montaña tienen una contribución importante en el rebalanceo de las masas en la superficie terrestre, así como en la progresiva destrucción en tiempo geológico de las grandes cadenas de montañas.

Referencias

AUDEMARD, F. A. 2003. *Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela*. Quaternary International 101-102C: 43-65.

AUDEMARD, F. A. 2008. *Historia sísmica y segmentación sismogénica de la falla de Boconó con base en el análisis geológico de sedimentos recientes deformados (por vía de trincheras y núcleos continuos)*. Proyecto Fonacit 2001002492. Informe técnico final FUN-025, 2008. 83 pp + 1 anexo.

AUDEMARD, F. A. 2009. Falla de Boconó, Venezuela (VE-06b y VE-06c). *In Proyecto Mutinacional Andino. Geociencia para las comunidades andinas (eds.): Atlas de deformaciones cuaternarias de Los Andes*. Publicación Geológica Multinacional, 7: 260-272.

AUDEMARD, F. A. 2009b. *Segmentation of the Boconó Fault from paleoseismic trench results, Mérida Andes, Venezuela*.

VII International Conference on Geomorphology, Melbourne, Australia, 6-11/07/2009 (resumen; en CD).

AUDEMARD, F. A. 2010. *Seismogenic Fault Segmentation of the Boconó Fault from Paleoseismic Trench Results, Western Venezuela: NE-Directed Rupture during the Latest Earthquake Cycles?* Hokudan International Symposium on Active Faulting 2010, Japan: Forecasting Large Earthquakes from Active Faults in Time and Space: 6-8 (resumen extendido).

AUDEMARD, F. A., BECK, C. Y CARRILLO, E. 2010. *Deep-seated gravitational slope deformations along the active Boconó fault in the central portion of the Mérida Andes, western Venezuela*. Geomorphology 124: 164-177.

AUDEMARD, F.A., PANTOSTI, D., MACHETTE, M., COSTA, C., OKUMURA, K., COWAN, H., DIEDERIX, H. Y SAWOP PARTICIPANTS. 1999. *Trench investigation along the Merida section of the Boconó fault (Central Venezuelan Andes)*. Tectonophysics 308: 1-21.

AUDEMARD, F. A., OLLARVES, R., BETCHTOLD, M., DÍAZ, G., BECK, C., CARRILLO, E., PANTOSTI, D. Y DIEDERIX, H. 2008. *Trench investigation on the main strand of the Boconó fault in its central section, at Mesa del Caballo, Mérida Andes, Venezuela*. Tectonophysics 459: 38-53.

AUDEMARD, F. A., BECK, C., CANO, V., CARRILLO, E., CASTILLA, R., COUSIN, M., JOUANNE, F., MELO, L. Y VILLEMEN, T. 2002. *Stability of Quaternary morainic complexes cut by the Boconó fault, Mérida Andes, western Venezuela*. Proceedings Vth International Symposium on Andean Geodynamics –V ISAG-, Toulouse, France, 49-52.

AUDEMARD, F. E. Y AUDEMARD, F.A. 2002. *Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction*. Tectonophysics, 345(1-4): 299-327.

BOVIS, M. J. 1990. *Rockslope deformation at Affliction Creek, southern Coast Mountains, British Columbia*. Canadian Journal of Earth Sciences 27: 243-254.

CARRILLO, E., BECK, C., AUDEMARD, F. A., MORENO, E. Y OLLARVES, R. 2008. *Disentangling Late Quaternary climatic and seismo-tectonic controls on Lake Mucubají sedimentation (Mérida Andes, Venezuela)*. Special issue of Palaeogeography, Palaeoecology and Palaeoclimatology 259(2-3): 284-300.

CARRILLO, E., AUDEMARD, F. A., BECK, C., COUSIN, M., JOUANNE, F., CANO, V., CASTILLA, R., MELO, L. Y VILLEMEN, T. 2006. *A Late Pleistocene natural seismograph along the Boconó fault (Mérida Andes, Venezuela): the moraine-dammed Los Zerpa paleo-lake*. Bulletin de la Société Géologique de France 177(1): 3-17.

DRAMIS, F. Y BLUMETTI, A. M. 2005. *Some considerations concerning seismic geomorphology and paleoseismology*. Tectonophysics 408: 177-191.

DRAMIS, F. Y SORRISO-VALVO, M. 1994. *Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides, and tectonics*. Engineering Geology 38 (3-4): 231-243.

HACKLEY, P. C., URBANI, F., KARLSEN, A. W. Y GARRITY, C. P. 2005. *Geologic shaded relief map of Venezuela: 2 sheets*. Open-file report, USGS.

HENNEBERG, H. G. Y SCHUBERT, C. 1986. *Geodetic networks along the Caribbean-South-American plate boundary*. Tectonophysics, 130: 77-94.

MCCALPIN, J Y IRVINE, J. R. 1995. *Sackungen at Aspen Highlands Ski Area, Pitkin County, Colorado*. Environmental and Engineering Geoscience 1: 277-290.

NEMCOK, A. 1972. *Gravitational slope deformation in high mountains*. Proceedings of the 24th International

- Geologic Congress, Montreal, Section 13, 132-141.
- RADBRUCH-HALL, D. H. Y VARNES, D. J. 1976. *Landslides –cause and effect*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology –IAEG/AIGI-13: 205-216.
- SCHUBERT, C. 1974. *Late Pleistocene Merida Glaciation, Venezuelan Andes*. Boreas 3, 147-151.
- SOLONENKO, V. P. 1977. *Landslides and collapses in seismic zones and their prediction*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology –IAEG/AIGI-15: 4-8.
- SOULAS, J.P., SINGER, A. Y LUGO, M. 1987. *Tectónica cuaternaria, características sismogénicas de las fallas de Boconó, San Simón y del piedemonte occidental andino y efectos geológicos asociados a la sismicidad histórica (Proyecto Sumandes)*. Informe interno Funvisis para Maraven S.A., 90 pp.
- VARNES, D. J., RADBRUCH-HALL, D. Y SAVAGE, W. Z. 1989. *Topographic and structural conditions in areas of gravitational spreading of ridges in the western United States*. U. S. Geological Survey Professional Paper 1496, 28 pp.
- ZISCHINSKY, U. 1966. *On the deformation of high slopes*, Proceedings of 1st Conference of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon, 2: 179-185.