

Procesos de ladera cosísmicos del terremoto de Cinchona (Costa Rica) del 8 de enero de 2009 ($M_s = 6,2$)

Adolfo Quesada Román*

Gustavo Barrantes Castillo**

Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia – Costa Rica

Resumen

El terremoto de Cinchona, ocurrido el 8 de enero de 2009, provocó grandes impactos físicos, como la destrucción de infraestructura pública y privada, y sociales, al dejar un total de 2.326 personas damnificadas, 91 heridos, 7 desaparecidos y 25 muertos. Con base en fotografías aéreas y un levantamiento LIDAR de alta resolución, posterior al sismo, se clasificaron 1.900 procesos de ladera basadas en los trabajos de Alcántara-Ayala (2000), Cruden y Varnes (1996) y Highland y Bobrowsky (2008). La importancia de este trabajo para Costa Rica radica en que es la primera vez que se utiliza la clasificación internacional de procesos de ladera de la WP/WLI planteada en 1990.

Palabras clave: Cinchona, clasificación internacional movimientos en masa, Costa Rica, procesos de ladera, terremoto.



DOI: dx.doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.52590

RECIBIDO: 13 DE MAYO DE 2014. ACEPTADO: 8 DE ABRIL DE 2015.

Artículo de investigación donde se genera una clasificación de los distintos tipos de procesos de ladera cosísmicos (desprendimientos, deslizamientos, flujos y movimientos complejos) dados después del terremoto de Cinchona en enero de 2009.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO: Quesada Román, Adolfo y Gustavo Barrantes Castillo. 2016. "Procesos de ladera cosísmicos del terremoto de Cinchona (Costa Rica) del 8 de enero de 2009 ($M_s = 6,2$)". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 25 (1): 217-232. DOI: 10.15446/rcdg.v25n1.52590

* Dirección Postal: Universidad Nacional de Costa Rica, Escuela de Ciencias Geográficas. 86-3000, Heredia, Costa Rica.

Correo electrónico: adolfo.quesada.roman@una.cr

** Correo electrónico: gustavo.barrantes.castillo@una.cr

Processos de escorregamento cosísmico do terremoto de Cinchona (Costa Rica) de 8 de janeiro de 2009 ($M_s=6,2$)

Resumo

O terremoto de Cinchona, ocorrido no dia 8 de janeiro de 2009, provocou grandes impactos físicos, como a destruição de infraestrutura pública, privada e sociais, ao deixar um total de 2.326 pessoas danificadas, 91 feridos, 7 desaparecidos e 25 mortos. Com base em fotografias aéreas e um levantamento LiDAR de alta resolução, após o sismo, foram classificados 1.900 processos de escorregamentos baseados nos trabalhos de Alcántara-Ayala (2000), Cruden e Varnes (1996), e Highland e Bobrowsky (2008). A importância deste trabalho para a Costa Rica está em que é a primeira vez que se utiliza a classificação internacional de processos de escorregamento da WP/WLI, proposta em 1990.

Palavras-chave: Cinchona, classificação internacional movimentos de massa, Costa Rica, processos de escorregamento, terremoto.

Hillside coseismic processes of the Cinchona earthquake (Costa Rica) January 8, 2009 ($M_s=6,2$)

Abstract

The Cinchona earthquake of January 8, 2009, caused great physical impacts such as the destruction of the public and private infrastructure, including social, and left a total of 2,326 persons displaced, 91 injured, 7 missing, and 25 dead. Based on aerial photographs and the implementation of high resolution LiDAR, after the earthquake, 1,900 hillside processes were classified based on the Works of Alcántara-Ayala (2000), Cruden and Varnes (1996) and Highland y Bobrowsky (2008). The importance of this work for Costa Rica lies in the fact that it is the first time the international classification of hillside processes of the WP/WLI established in 1990 was used.

Keywords: Cinchona, international classification mass movements, Costa Rica, hillside processes, earthquake.

Introducción

Costa Rica colinda con la fosa mesoamericana, zona de subducción que divide la placa del Coco de la placa de Caribe y la microplaca de Panamá. De acuerdo con Montero (2001) el “Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica” es el área que marca el límite norte de la microplaca de Panamá, se trata de una zona de deformación con un ancho de más de 100 km sobre el centro del país y que continúa en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá.

Esta condición genera un gran potencial sísmico interplaca, como lo ha mostrado el reciente terremoto de Nicoya del 5 de septiembre de 2012, con una magnitud 7,6 Mw a una profundidad de 18 km. Por otro lado, la acumulación del estrés sísmico de esta condición tectónica se manifiesta en la ocurrencia de sismos intraplaca que, debido a su poca profundidad, a las condiciones del suelo y a la topografía, pueden convertirse en grandes desastres, como fue el caso del llamado Terremoto de Cartago en 1910, o el terremoto de Fraijanes de 1889.

A estas condiciones de la geodinámica interna se le suman una serie de características exógenas, como precipitaciones superiores a los 2.000 mm, hasta incluso superar los 8.000 mm; además de temperaturas que varían entre

los 10° como media anual en las partes más altas del país (más de 3.000 msnm) y superiores a 30° en las planicies costeras. Estas características favorecen el modelado del relieve y su rápida modificación a través del tiempo geológico. Costa Rica cuenta con una serie de variables que determinan y potencian los procesos de ladera, como la sismicidad derivada del proceso mismo de subducción y la activación de una densa red de fallas locales. También se tienen profundas cortezas de intemperismo que son producto de la meteorización de los suelos a lo largo de miles de años, y de regímenes pluviométricos de hasta 6.000 mm que disparan los movimientos en masa en regiones con pendientes superiores a los 35° en sustratos geológicos de edades variables. Un ejemplo de cómo la sismicidad sumada a las condiciones del medio puede disparar una extensa cantidad de procesos de ladera fue el terremoto de Limón de 1991.

Área de estudio

El área de estudio seleccionada corresponde a un rectángulo que se ubica entre las coordenadas CRUTM05: 1131801,572473 Norte, 474586,375545 Oeste; 1131801,572473 Norte, 483834,100696 Este; 1126178,492233 Sur,

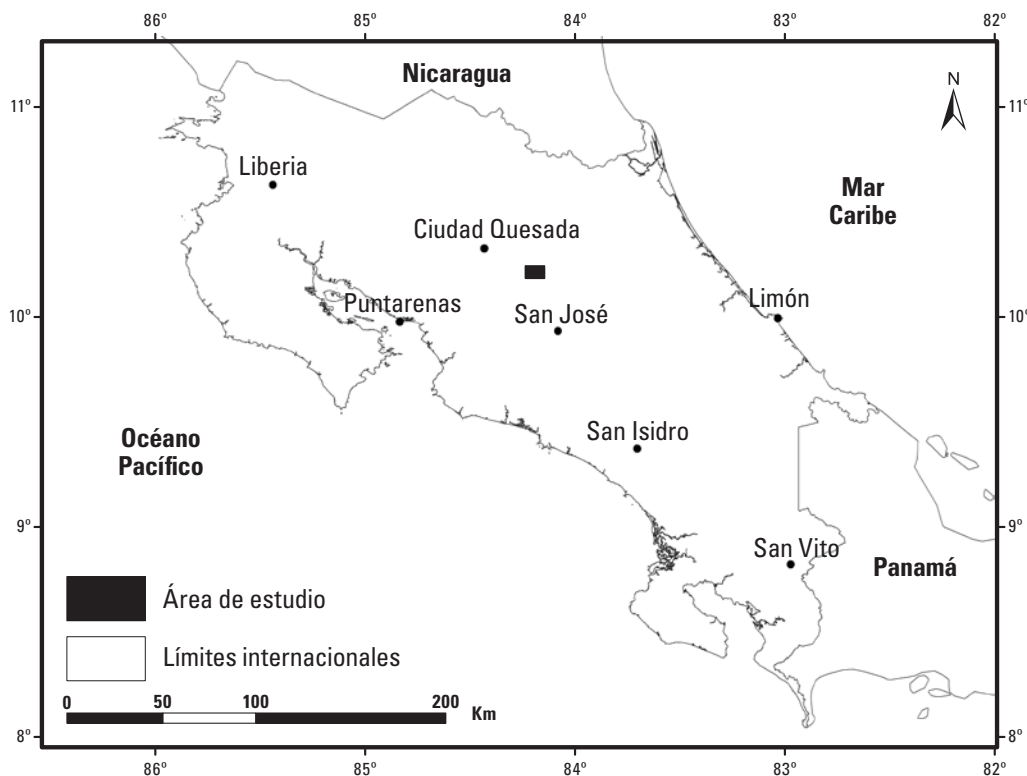


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en el contexto nacional y regional.

Datos: ITCR 2014.

474586,375545 Oeste; y 1126178,492233 Sur, 483834,100696 Este (figura 1).

El área corresponde con la zona de mayor afectación por movimientos gravitacionales relacionados con el denominado terremoto de Cinchona (Barrantes 2012). Entre las características consideradas en su delimitación está el contener relieve desde muy abrupto en la cima del volcán Poás a plano ondulado en las proximidades del río Sarapiquí, así como por abarcar cuatro formaciones geológicas distintas. El detalle de estos y otros aspectos físicos relevantes del área se describen a continuación.

El Terremoto de Cinchona

El 8 de enero del 2009 ocurrió un sismo de magnitud de 6,2 M_w a 6 km de profundidad a solo 6,5 km este del cráter activo del volcán Poás, con una intensidad máxima IX, relacionado con un movimiento de la falla El Ángel, que presenta un fallamiento oblicuo en dirección aproximadamente NW-SE, la ruptura ocurrida se extendió por unos 12 km en la horizontal (Barquero 2009). Este evento disparó miles de movimientos de ladera que agravaron significativamente las pérdidas, cobrando la vida de 25 personas y dañando infraestructuras tales como: puentes, caminos, viviendas, iglesias, líneas de transmisión eléctrica y las represas hidroeléctricas de Toro II y Cariblanco, del Instituto Costarricense de Electricidad, para un total de pérdidas estimadas en más de US\$ 100 millones (Laurent 2009).

Marco geológico

El área de estudio se extiende por la ladera NE del volcán Poás, que se localiza en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica y es uno de los 5 volcanes activos en el país. Su cráter principal se ubica en las coordenadas 10°11'54" latitud Norte y 84°13'51" longitud Oeste, su mayor elevación es de 2.708 msnm. Se trata de un estrato-volcán complejo de forma subcónica irregular (Alvarado 2011) cuyo foco eruptivo actual se ubica dentro de una fractura volcano-tectónica alineada de norte a sur, que incluye también los conos piroclásticos de Sabana Redonda, la Laguna Botos y el cono Von Frantzius, todos sobre el edificio volcánico del Poás.

De acuerdo con el registro histórico, el Volcán Poás ha presentado actividad moderada de forma casi continua, con emisiones de gases y ocasionales erupciones freáticas, además, se han producido explosiones vulcanianas y estrombolianas leves (Prosser y Carr 1987). La mayor

erupción histórica, según Mora (2010) ocurrió en el periodo eruptivo 1953-1955, con una columna eruptiva de poco menos de 8.000 msnm, este mismo autor le otorga un valor de 3 en el Índice de Explosividad Volcánica máxima (IEV).

En el área de estudio están presentes cuatro formaciones geológicas a saber (Ruiz et ál. 2010): Unidad Cima Poás, cuyo sector E se encuentra compuesto principalmente por lavas basálticas y andesitas basálticas provenientes del cráter Botos y por depósitos del cráter principal, en su mayoría, piroclastos distribuidos alrededor del cráter con una extensión considerable hacia el E y SE del cráter; la Unidad Andesitas la Paz, que corresponde a andesitas porfíricas con megafenocristales de plagioclasa, en su mayoría son lavas, así como brechas, tobas y epiclastos interdigitados; la Unidad Von Frantzius, compuesta principalmente por coladas de lava intercaladas con brechas y epiclastos, sobreyacidos por delgados depósitos epiclásticos y piroclásticos; y, finalmente, la Unidad Paleo Barva, formada principalmente por lavas andesíticas, así como por brechas y tobas subordinadas.

Atravesando el área de estudio se encuentran varias fallas normales relacionadas con la estructura cuspidal del volcán Poás, se trata de un sistema de fallas normales alrededor de la zona cuspidal (distribuidas al noreste y suroeste del mismo) que se detectan fácilmente por sus escarpes pronunciados. Por otro lado, también aparece la falla Ángel, una falla de rumbo que varía en su dirección entre N70°W y N-S, la misma se extiende por más de 20 km, según el trazo propuesto por Montero et ál. (2010).

El relieve y el clima

Geomorfológicamente el área de estudio puede dividirse en tres grandes unidades de relieve, la primera es la cima del Poás, que presenta un relieve suavizado en los alrededores del cráter activo con una pendiente más abrupta en el sector del cráter Botos. La segunda unidad es el edificio del Von Frantzius, que presenta una estructura elongada de noreste a suroeste con fuerte pendiente y un posible cráter en forma de U con su sector abierto en dirección del cráter principal; las laderas escarpadas de ambos edificios en su sector noreste corresponden a una sección fuertemente diseccionada sobre antiguas coladas de lava andesíticas provenientes de ambos edificios volcánicos. Por último, el sector de los cañones del río Sarapiquí y La Paz, este último caracterizado por la presencia del salto de La Paz, parte del cañón del Sarapiquí que es un valle con paredes abruptas que marcan un fuerte desnivel de más de 300 m en su pared este.

En cuanto a las condiciones climáticas, en términos generales, se trata de un clima tropical muy húmedo sin estación seca definida, característico de la vertiente Caribe de Costa Rica, donde la temperatura y la humedad varían con la altitud, presentándose una precipitación media anual entre 5.000 y 6.000 mm, en el edificio volcánico, y entre 5.000 y 4.000 mm en las secciones más bajas próximas al río Sarapiquí. Por su parte, la temperatura media anual varía de 8 a 16 °C sobre el edificio volcánico y entre 16 y 20 °C en las partes más bajas próximas al río Sarapiquí (IMN 2014).

Suelos

La mayoría del área de estudio (hacia el centro) se compone de inceptisoles con un horizonte B Cámbico (apenas se forma un B), sin otro horizonte de diagnóstico, son sustratos derivados de materiales volcánicos presentes en zonas escarpadas con pendientes que llegan hasta los 64°, se clasifican como *hydrandepts* (gran grupo), con alta presencia de agua a lo largo del año. Otra sección menor, relacionada con la orientación preferencial del viento a lo largo del año (SW), indica la presencia de grandes grupos de suelos *vitrandept* (con presencia de vidrio volcánico) (Buol, Hole y McCracken 2008).

Hacia los extremos orientales y occidentales se presentan dos manchas de Entisoles, del gran grupo *troporthent*, lo que indica suelos recientes con poco desarrollo de horizontes, donde solo se diferencia un epipedón ócrico (amarillento) cuyo proceso se debe a condiciones climáticas continuamente calientes y tropicales (Berstch 1995).

Por último, en un sector al NE se localiza una mancha de Ultisoles, con un horizonte argílico (20% de aumento en el contenido de arcillas en la sección de control) con menos de un 35% de saturación de bases en la sección de control. Son suelos, usualmente, profundos, bien drenados, de color rojo o amarillo y de relativa baja fertilidad, relacionados con zonas de baja pendiente y condiciones elevadas tanto de temperatura como de precipitación a lo largo del año (Berstch 1995; Buol, Hole y McCracken 2008).

Los procesos de ladera

Los procesos de ladera se presentan en todas las latitudes y altitudes del globo, tienen una vasta variedad de condiciones así como factores que los detonan, entre ellos las fuertes lluvias, los sismos y la actividad del ser humano (Anderson et ál. 2011; Sterlacchini et ál. 2011). A pesar de presentarse sin distinción geográfica, estos fenómenos se dan con mayor dominancia en ambientes

fríos (precipitaciones y temperaturas anuales menores 1.000 mm y 0 °C, respectivamente) y en zonas templadas a tropicales (precipitaciones y temperaturas anuales mayores a 1.700 mm y 0 °C) (Selby 1985).

Según Alcántara-Ayala (2000) la terminología empleada deriva del inglés, la traducción al español a veces genera confusión, por lo que reconoce varias maneras de nombrar a los procesos que se dan en las laderas y están regidos por la gravedad, entre ellos se destacan: los procesos de ladera (*slope processes*), procesos gravitacionales (*gravitational processes*), procesos de remoción en masa (*mass movement processes*) o deslizamientos (*landslides*); todos ellos términos correctos.

Los procesos de remoción en masa son vistos como movimientos de masas de suelo, rocas o detritos que ocurren en una ladera como resultado de la influencia directa de la gravedad, y que pueden ser desencadenados por factores internos o externos. Existen varias clasificaciones de los procesos de remoción en masa que se basan en los atributos morfológicos de los movimientos, el tipo y velocidad del movimiento, el tamaño y tipo de los materiales involucrados, la antigüedad del movimiento y el tipo de clima (Alcántara-Ayala 2000).

En términos de desastres, los movimientos en masa varían de magnitudes bajas a altas, ocurren con una relativa frecuencia, son de poca duración, y su extensión areal, por lo general, es limitada (Gares et ál. 1994). Las causas que generan los procesos de ladera se podrían dividir en naturales y humanas, donde las primeras incluyen al agua, la actividad sísmica y la actividad volcánica, cada uno como un elemento individual o en combinación; las causas humanas o antrópicas van desde la deforestación, la urbanización, la ganadería y la agricultura, que modifican el ángulo de reposo de las laderas y propician su inestabilidad (Highland y Bobrowsky 2008).

Los diferentes procesos de ladera se clasifican en las siguientes clases (Alcántara-Ayala 2000; Cruden y Varnes 1996; Huggett 2007; WP/WLI 1990): deslizamientos, caídas, volteos, flujos, expansión lateral, movimientos complejos. Los materiales que componen los tipos de procesos de remoción en masa se dividen según el tipo de material: en roca, detritos (partículas mayores a 2 mm) y suelos (partículas menores a 2 mm). A continuación se particulariza cada uno de estos procesos:

Deslizamientos

Estos procesos se dan ladera abajo de una masa de suelo, roca o detritos y ocurren sobre una superficie de ruptura. Son movimientos súbitos cuya presencia está

determinada por su propio peso, las cargas externas (por ejemplo, suelos saturados de agua) y las fuerzas resistentes (cohesión y fricción) del talud que se desliza (Alcántara-Ayala 2000; Carlos-Valerio 2010; Goudie 2004).

Los deslizamientos se pueden dividir, según la superficie de ruptura, en rotacional o traslacional. El primer tipo se define como un deslizamiento donde el plano de resbalamiento es cóncavo y el eje de la masa desplazada es circular; se presenta normalmente bajo condiciones de poca o moderada saturación de agua, es común en espesores importantes y matrices arcillosas (Huggett 2007). Un deslizamiento traslacional es el que se presenta en una superficie de ruptura plana; su movimiento está controlado por los planos de debilidad de los materiales involucrados; según el ángulo y velocidad del proceso el deslizamiento puede darse de rocas, suelo o detritos (Goudie 2004).

Caídas

Son movimientos repentinos, en caída libre, de rocas, suelo o detritos de una ladera. El material subsecuentemente puede rodar, rebotar o caer. El proceso más común es la caída de rocas, debido a la inclinación de los afloramientos rocosos y el grado de fractura del sustrato (Highland y Bobrowsky 2008). Según el material involucrado su nombre varía (caída de suelo, caída de rocas, caída de detritos). Goudie (2004) dimensiona este proceso desde pequeños bloques hasta catastróficos movimientos de millones de metros cúbicos. La velocidad de las caídas va de rápida a extremadamente rápida (Alcántara-Ayala 2000).

Volteos

Este movimiento se da cuando un bloque cae fuera de un punto que sirve como pivote en la base del mismo y alrededor del cual se produce un giro o volteo (Carlos-Valerio 2010). Su movimiento va hacia adelante o hacia la parte externa, lo que incluye un basculamiento o inclinación, pero no el colapso de la masa involucrada. Por lo general, se dan en materiales con un sistema de discontinuidades preferenciales como diaclasas, fracturas, grietas de tensión o superficies columnares (Alcántara-Ayala 2000). Los volteos pueden ser clasificados en: volteos con flexión y volteos de bloques; el primero se da cuando un sistema de discontinuidades se orienta hacia el talud y delimita capas o columnas continuas que tienden a flexionarse y girar por su propio peso; el segundo se da cuando se vuelcan bloques fracturados que están muy espaciados entre sí.

Flujos

Es un movimiento espacialmente continuo donde las superficies de cizalla son pequeñas, por lo general son de poca duración debido a que están compuestos de altos contenidos de agua dentro de la masa desplazada (Highland y Bobrowsky 2008). Al comportarse de manera viscosa, los flujos, generalmente, son desordenados y tienden a producir formas lobulares en su depósito. Estos son clasificados según el tipo de material que predomina: roca, suelo o detritos. Huggett (2007) también agrupa los flujos en avalanchas (flujos que involucran un movimiento súbito y de grandes proporciones de tierra, rocas, nieve o hielo), flujos de detritos, de rocas, de suelo, de lodo y, cuando contiene materiales volcánicos como cenizas, lahares. La soliflucción y geliflucción son movimientos lentos de masas saturadas de agua o congeladas, que igualmente se consideran flujos.

Expansión lateral

Según Alcántara-Ayala (2000) son movimientos producto de la fracturación y expansión de suelos y rocas debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente. Este proceso se da, por lo general, en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad. Se clasifican en expansiones laterales en rocas, en derrubios y en suelos.

Movimientos complejos

Según Carlos-Valerio (2010) este tipo de procesos se refiere a dos o más mecanismos de falla. El tipo movimiento original se transforma en otro al desplazarse ladera abajo. Las expresiones más predominantes de estos movimientos son las avalanchas de rocas o aludes y los flujos deslizantes. Usualmente la morfología resultante es alargada y estrecha, el área de depósito tiene un espesor bajo (Alcántara-Ayala 2000).

Los movimientos en masa varían en forma, materiales y tipos de movimiento en función, a su vez, del tiempo. Los procesos que presentan una saturación mayor de agua tienden a ser más fluidos y por ende más rápidos. Los procesos de ladera que exhiben una velocidad intermedia son los deslizamientos en rocas, los flujos por la inconsistencia del material y el escurrimiento caracterizado por su humedad. Por último, los procesos lentos incluyen a la reptación en rocas y taludes, la reptación de suelos y la soliflucción dadas en ambientes con poca cohesión y mucha saturación de agua (tabla 1).

Tabla 1. Tipos de material, propiedades físicas, tipos y velocidades de los procesos de ladera

Tipos de materiales		Roca (seca)	Regolitos, suelos, aluviones, arcillas + agua	Agua + sedimentos
Propiedades físicas		Dureza, fragilidad, solidez	Substancia plástica	Masa fluida
Tipos de movimientos		Desprendimientos deslizamiento	Fluidización con la masa	Flujo fluido
Formas de movimientos en masa	Muy despacio	Reptación	Reptación/Solifluxión	Escurrimiento
	Intermedio	Deslizamientos/Vuelcos	Flujos de lodo	Escurrimiento
	Muy rápido	Desprendimientos	Avalancha de detritos	Escurrimiento

Fuente: Strahler 2011.

Metodología

Para este trabajo se utilizó como base el estudio de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García (2013), en el que se usaron ortofotografías con una resolución de 0,25 cm por pixel, y de un Modelo Digital de Elevación —en adelante, MDE— elaborado a partir de las nubes de puntos LiDAR. Se realizó una revisión visual de cada una de las fotografías para detectar y delimitar las áreas de procesos de ladera cosísmicos relacionados con el terremoto de Cinchona.

Como complemento a la identificación de un movimiento en masa, se visualizó la fotografía en Arc Scene (ESRI 2012) y el MDTLiDAR, para tener una vista en 3D. Posteriormente, se seleccionaron 1.893 unidades de las 4.600 del estudio de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García (2013), de esta manera fue posible clasificar en cuatro tipos los procesos de ladera para el área de estudio: desprendimientos, deslizamientos, flujos de lodo y movimientos complejos; clasificación basada en el WP/WLI (1990).

Para la clasificación de los procesos de ladera cosísmicos del terremoto de Cinchona fue necesaria la sobreposición e interpretación de diferentes variables. En un inicio las unidades cartografiadas que presentaron cicatrices de los movimientos en masa se analizaron con el MDE, para estimar el tipo de proceso acaecido.

Posteriormente, se cruzó esta información con las curvas de nivel (a cada metro de altitud), para diferenciar entre desprendimientos, deslizamientos y flujos de lodo. Por último, para confirmar el tipo de proceso de ladera, se revisaron los distintos rangos de pendiente en el área afectada. Al aumentar el número de variables para descartar los tipos de proceso de ladera se mejora el nivel de detalle y precisión de la clasificación. Una vez localizado y catalogado el movimiento en masa se digitalizó

utilizando una escala de referencia 1:1.000, para elaborar un mapa final a escala 1:10.000 con el total de registros.

Resultados

El evento disparador de los procesos de ladera fue un sismo superficial (6 km de profundidad), con una magnitud de 6,2 M_w y una intensidad máxima IX (MMI). Este proceso estuvo relacionado con un movimiento de la falla El Ángel, que presenta un fallamiento oblicuo en dirección aproximadamente NW-SE, dicha ruptura se extendió por unos 12 km en la horizontal (Barquero 2009).

A la magnitud e intensidad del terremoto mismo se le suma el sustrato altamente intemperizado, donde se han datado paleosuelos de más de 500 ka en la Unidad de Andesitas La Paz (Ruiz et ál. 2010) situación que indica el desarrollo de pedones con alto contenido de arcillas y un profundo horizonte B que facilitaron el movimiento de masas de detritos en laderas montañosas con pendientes que, por lo general, superan los 25°.

Cabe destacar que la densidad de bosque presente en prácticamente todo el territorio no fue un condicionante de estabilidad de las laderas; más bien, la magnitud del sismo y el tipo de sustrato mayoritario (suelos intemperizados) aunados al régimen de lluvias Caribe, que predomina en la zona de estudio (una pluviosidad superior a 4.000 mm anuales), favoreció el desarrollo de la alta cantidad de procesos de ladera (figura 2).

Los 1.893 procesos de ladera analizados fueron clasificados en: 1.561 unidades de desprendimientos (82%), 132 deslizamientos (7%), 90 flujos de lodo (5%) y 110 movimientos complejos (6%) (figura 3).

A partir de los resultados obtenidos se buscó determinar las características propias de cada uno de los tipos de procesos de ladera, que se clasificaron por su morfología, tipo y velocidad del movimiento, superficie de ruptura



A. 11-01-2007



B. 9-01-2009

Figura 2. Cañón del río Sarapiquí en las cercanías de Cinchona antes y después del sismo, con sus respectivas fechas
Fuente: Duarte 2009.

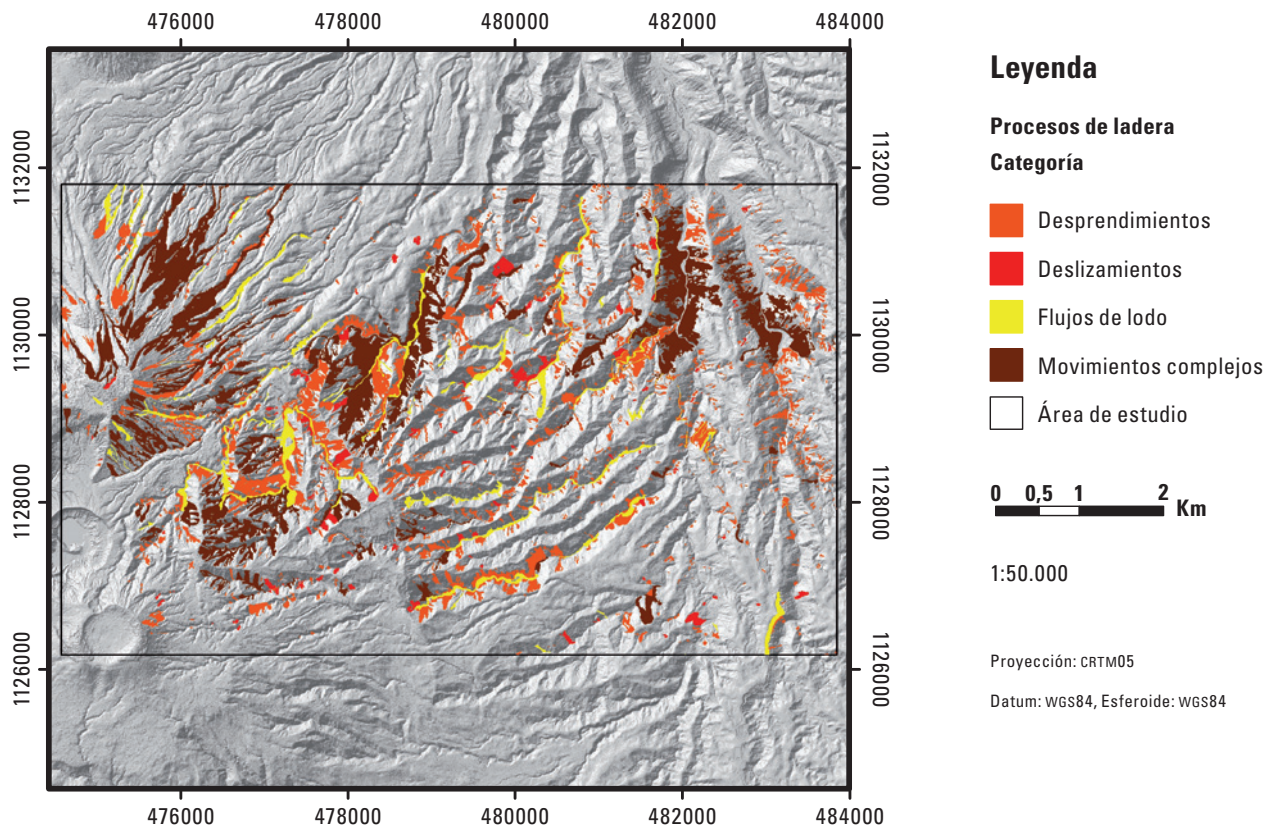


Figura 3. Procesos de ladera clasificados en el área de mayor impacto del terremoto de Cinchona.
Datos: Clasificación de los procesos de ladera a partir del trabajo de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García 2013.

y área de depósito, tamaño y tipo de los materiales, antigüedad del movimiento y tipo de clima donde se desarrolla. A su vez, estos procesos estuvieron condicionados por el tipo de sustrato, las pendientes, la precipitación y las estructuras disyuntivas.

A continuación se detallan las características de cada uno de los tipos de procesos de ladera que fueron clasificados en el polígono determinado como el de mayor impacto por el terremoto de Cinchona. Se explican los desprendimientos, los deslizamientos, los flujos de lodo y los movimientos complejos según las características morfológicas, de sustrato, pendientes y climáticas que favorecieron su desarrollo.

Desprendimientos

Se muestran como un movimiento de masa sin una corona definida ni un plano de ruptura cóncava, más bien, la morfología de sus laderas tiende a ser recta, no reconociéndose un depósito definido que, probablemente pudo haber sido acarreado por los ríos. La profundidad de la masa movilizada no supera los 5 m de profundidad y generalmente deja una cicatriz del movimiento realizado.

Tanto las curvas de nivel como las fotografías aéreas indican la movilización de una carpeta edáfica importante junto con bosque primario, por lo general. Se reconoce como un movimiento rápido y está muy relacionado con laderas orientadas hacia los cauces fluviales, siendo

probable que allí hayan quedado sus depósitos, los que posteriormente son tomados por la dinámica fluvial (figura 4).

Los desprendimientos se localizan en pendientes que van de 3° hasta 65° , lo que ratifica la amplitud de inclinaciones donde se presentan, característica que es consecuente con el hecho de que sean el proceso de ladera con mayor incidencia en este sismo. La dinámica de estos procesos obedece a una rápida liberación de energía sísmica, en este caso el terremoto de Cinchona, que en asociación con materiales sin consolidar (suelos muy intemperizados) y un régimen de lluvias constante a lo largo del año disparó a niveles altos la cantidad y densidad de desprendimientos.

Se observa una correlación directa entre la mayor densidad de desprendimientos con la Unidad de Andesitas La Paz, que se compone de andesitas porfiríticas con megafenocristales de plagioclasa, que, además, es la formación geológica más antigua de la región con más de 500 ka años (Ruiz et ál. 2010). Esta coincidencia con la unidad de mayor edad se relaciona directamente también con la evolución del relieve y los efectos del tiempo. Las fuertes dinámicas fluvial (con una densidad de la disección entre moderada y alta) y pedogenética sufridas por estas superficies han modificado los suelos hacia cortezas de intemperismo altamente friables. Además,

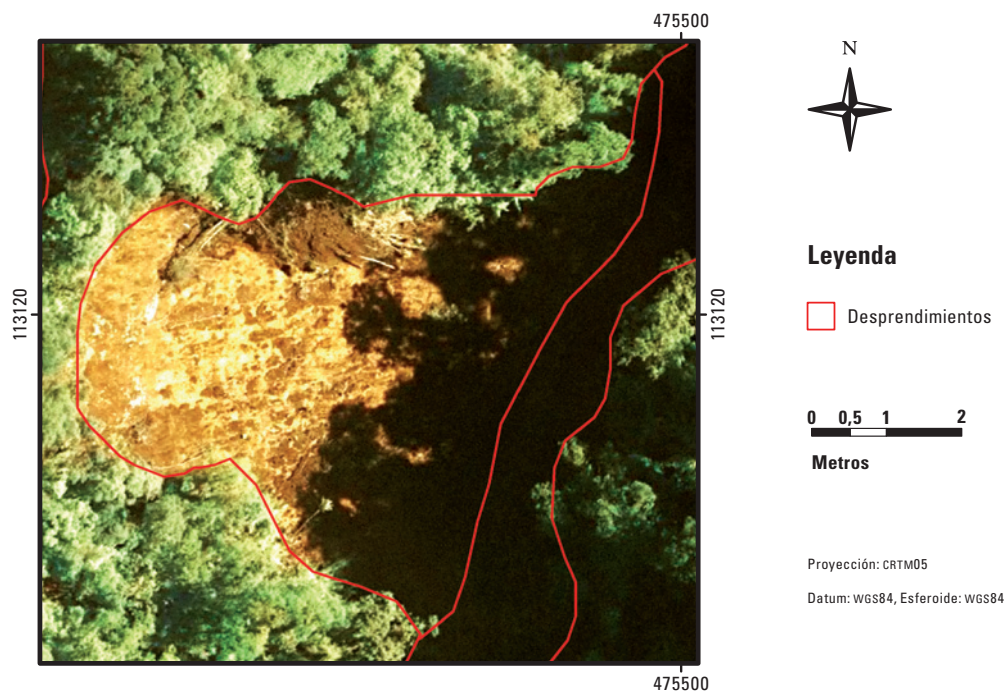


Figura 4. Desprendimiento clásico desarrollado a raíz del terremoto de Cinchona.

Datos: Clasificación de los procesos de ladera a partir del trabajo de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García 2013.

representaron un 35% de las áreas movilizadas con un total de 3,42 km² de superficies de afectación.

Deslizamientos

Estos se reconocen como morfologías cóncavas, y en algunas ocasiones, es posible diferenciar sus coronas. Son un movimiento de mediana velocidad que deja su rastro en una superficie de ruptura cóncava y una importante área donde descansa el depósito (figura 5). Estas formas del relieve fueron observadas tanto en usos del suelo de bosques (su mayoría), como en las cercanías de los poblados con una vocación agrícola y ganadera.

Estos procesos y sus formas resultantes se localizan, generalmente, en pendientes que varían desde los 2° hasta los 50°, sus dimensiones oscilan desde unos cuantos metros cuadrados hasta decenas de hectáreas. A pesar de no tener una recurrencia alta ni una concentración explícita en el área de estudio, su recurrencia es mayor en la Unidad de Andesitas La Paz, la más antigua (~500 ka) de este territorio. Estas unidades representaron un 5% de las superficies movilizadas, con un total de 0,46 km² (463.906,05 m²) de superficies de afectación.

Sus dimensiones y tipo de movimiento están ligados a la disposición de material sin consolidar, como gruesas

las capas de regolito, los suelos altamente intemperizados y arcillosos a un régimen de alta pluviosidad, los cambios en el uso del suelo y los cambios tectónicos bruscos como sismos provocados tanto por la dinámica de subducción entre las placas de Cocos y Caribe, como por la activación de fallas locales, como sucedió en este evento.

Flujos de lodo

Son movimientos en masa con una abundante cantidad de agua, por lo que tienden a ser móviles y de gran velocidad, razón por la que buscan los *talweg* de los ríos y se acomodan en estos. Alcanzan grandes distancias a partir de su área-cuenca de inicio y terminan con morfologías lobulares o en forma de lengua (figura 6).

Entre los factores condicionantes para la formación de flujos de lodo se resalta una cantidad considerable de material sin consolidación para poder deslizarse a lo largo de la ladera; no obstante, los factores que disparan estos procesos son la precipitación, en este caso más de 4.000 mm anuales, así como el detonante que es el sismo en sí, dadas sus características de superficialidad y magnitud.

Las morfologías de flujos de lodo se sitúan en inclinaciones menores a 25°, usualmente, y en limitadas ocasiones pueden llegar a los 50°. La mayoría de estos procesos

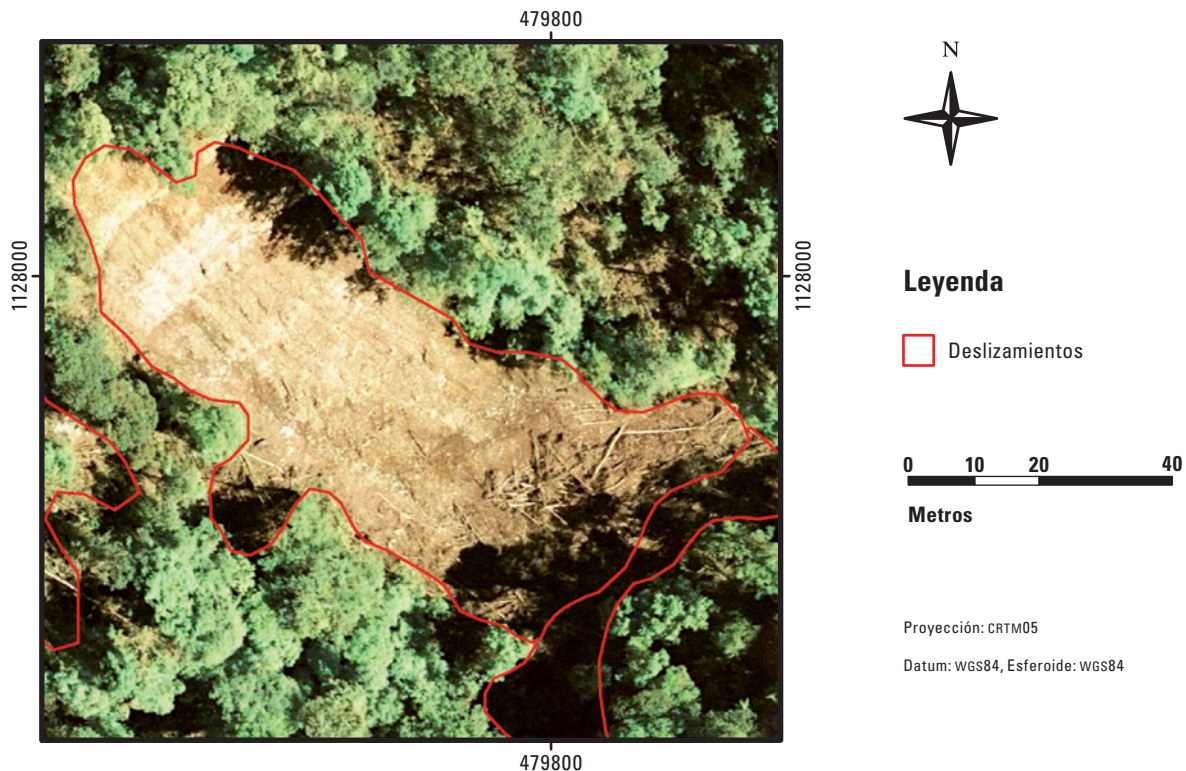


Figura 5. Deslizamiento con una marcada corona, una superficie de resbalamiento y un depósito cercano a un cauce. Datos: Clasificación de los procesos de ladera a partir del trabajo de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García 2013.

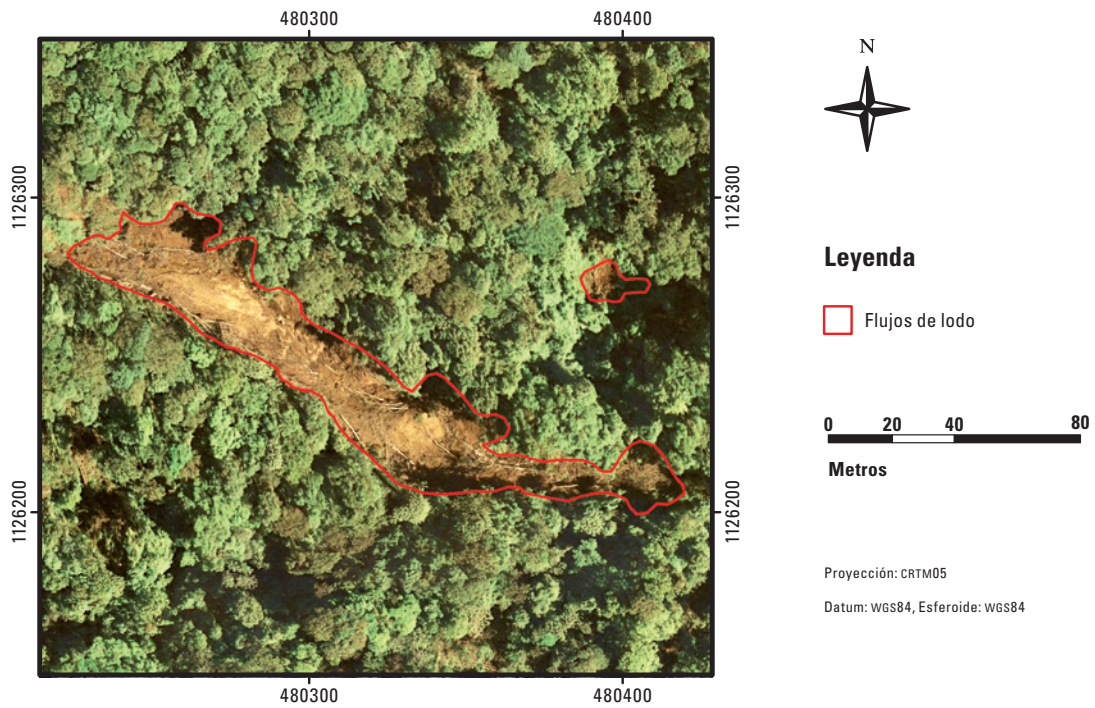


Figura 6. Flujo de lodo.

Datos: Clasificación de los procesos de ladera a partir del trabajo de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García 2013.

Nota: muestra su área fuente en el margen izquierdo de la fotografía, debido al movimiento arrastró una serie de árboles de importante altura (más de 25 m) hasta acumularse a manera de lóbulo hacia el margen derecho de la imagen.

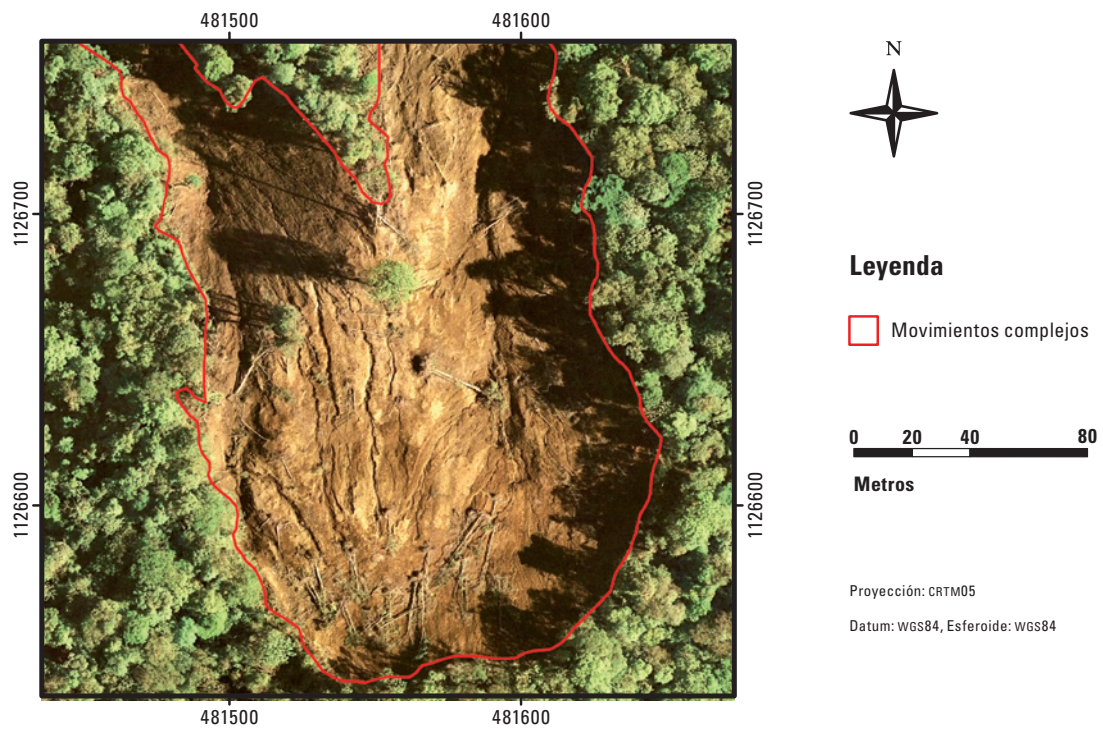


Figura 7. Movimientos complejos en la cuenca del río Sarapiquí.

Datos: Clasificación de los procesos de ladera a partir del trabajo de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García 2013.

Nota: en la imagen puede observarse el desprendimiento cercano a la corona del movimiento, una marcada ruptura de pendiente y la posterior fluidización de los materiales que bajan por la ladera.

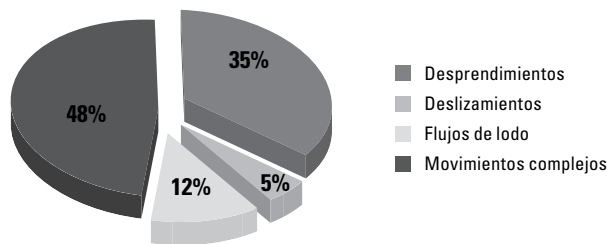


Figura 8. Porcentaje de áreas afectadas según el tipo de procesos de ladera debido al Terremoto de Cinchona (2009).
 Datos: Clasificación de los procesos de ladera a partir del trabajo de Barrantes, Jiménez Campos y Ocón García 2013.

se presentan en las superficies más antiguas de la zona de estudio (Unidad de Andesitas La Paz de unos 500 ka) y la Unidad Von Frantzius, que son lavas emitidas por el cono con el mismo nombre y cuya antigüedad se data entre 10 y 50 ka (Ruiz et ál. 2010). Además, representaron un 12% de las áreas movilizadas con un total de 1,21 km² de superficie de afectación.

Movimientos complejos

Son extensas áreas que combinan dos o más procesos de ladera, como desprendimientos, deslizamientos y flujos de lodo en diferentes proporciones. Debido a la magnitud del sismo de Cinchona amplias zonas fueron movilizadas, por lo que no es posible diferenciar los procesos particulares. Las condiciones propias de un sustrato meteorizado y profundo, un régimen lluvioso constante a lo largo del año y fuertes pendientes hacen favorable la dinámica de los movimientos complejos (figura 7).

Se presentan múltiples procesos de desprendimientos o deslizamientos que posteriormente se convierten en flujos de lodo, expresados en la morfología, que dibujan las curvas de nivel así como su acomodo a lo largo y ancho de los cauces fluviales. Los hay de diversas dimensiones, no obstante predominan en el contexto regional los de mayor tamaño.

Se desarrollan en pendientes que superan los 25° generalmente, ya que pocas veces son menos inclinadas. Se presentan en la Unidad de Andesitas La Paz, la Unidad Von Frantzius y la Unidad Paleo Barva, de unos ~250 ka (Ruiz et ál. 2010). Estas unidades representaron un 48% de las superficies movilizadas con un total de 4,69 km² de superficies de afectación.

Es importante recalcar que la mayoría de áreas afectadas por procesos de ladera fueron las que presentaron movimientos complejos, que constituyeron el 48% de las superficies movilizadas; por otro lado, los

desprendimientos le siguen con un 35%, posteriormente los flujos de lodo con un 12% y, por último, los deslizamientos con un 5% (figura 8).

Discusión de resultados

Aunque es de esperar que la intensidad de la sacudida sísmica se atenúe con la distancia al epicentro, este no parece ser el patrón seguido por los procesos de ladera, más bien, aparentan estar correlacionados con aspectos como la pendiente y la geología (figura 9).

Así, por ejemplo, los flujos de lodo y los movimientos complejos están asociados con las cimas de los edificios Poás y Von Frantzius, en el primer caso, específicamente sobre la unidad Andesitas la Paz. Se trata de materiales volcánicos antiguos y altamente meteorizados que se ubican en las zonas de mayor precipitación y pendiente, en terrenos profundamente disectados. También se presenta una concentración de movimientos complejos en las laderas de los cañones de los ríos La Paz y Sarapiquí, en este último sobre la unidad Paleo Barva.

Resulta interesante observar cómo los flujos de lodo al canalizarse por los cauces de los ríos reflejan el control estructural al que estos se encuentran sometidos, particularmente en la ladera oeste del edificio del Poás donde se presentan varias fallas de tipo normal.

Por otra parte, los deslizamientos no parecen seguir un patrón definido, más bien, se reparten por toda el área de estudio, lo mismo que los desprendimientos.

Por último, cabe resaltar que la unidad Cima Poás es la que presenta menos concentración de procesos de ladera, a pesar de que el epicentro del sismo se ubica sobre ella (figura 9) y que presenta similares condiciones de precipitación y pendiente que las unidades Andesitas la Paz y Von Frantzius. Esta situación es consecuente con lo descrito por Henri Pittier para el terremoto de Fraijanes de 1888 (González 1910), evento que, según Montero et al. (2010), estuvo relacionado con esta misma falla, dado que posee mejores condiciones mecánicas.

Conclusiones

Para el área de estudio se analizó un total de 1.893 procesos de ladera que fueron clasificados así: 1.561 desprendimientos (82%), 132 deslizamientos (7%), 90 flujos de lodo (5%) y 110 movimientos complejos (6%).

Los procesos de ladera activados por el Terremoto de Cinchona que afectaron el área de estudio, de acuerdo con el área desplazada, fueron los movimientos complejos,

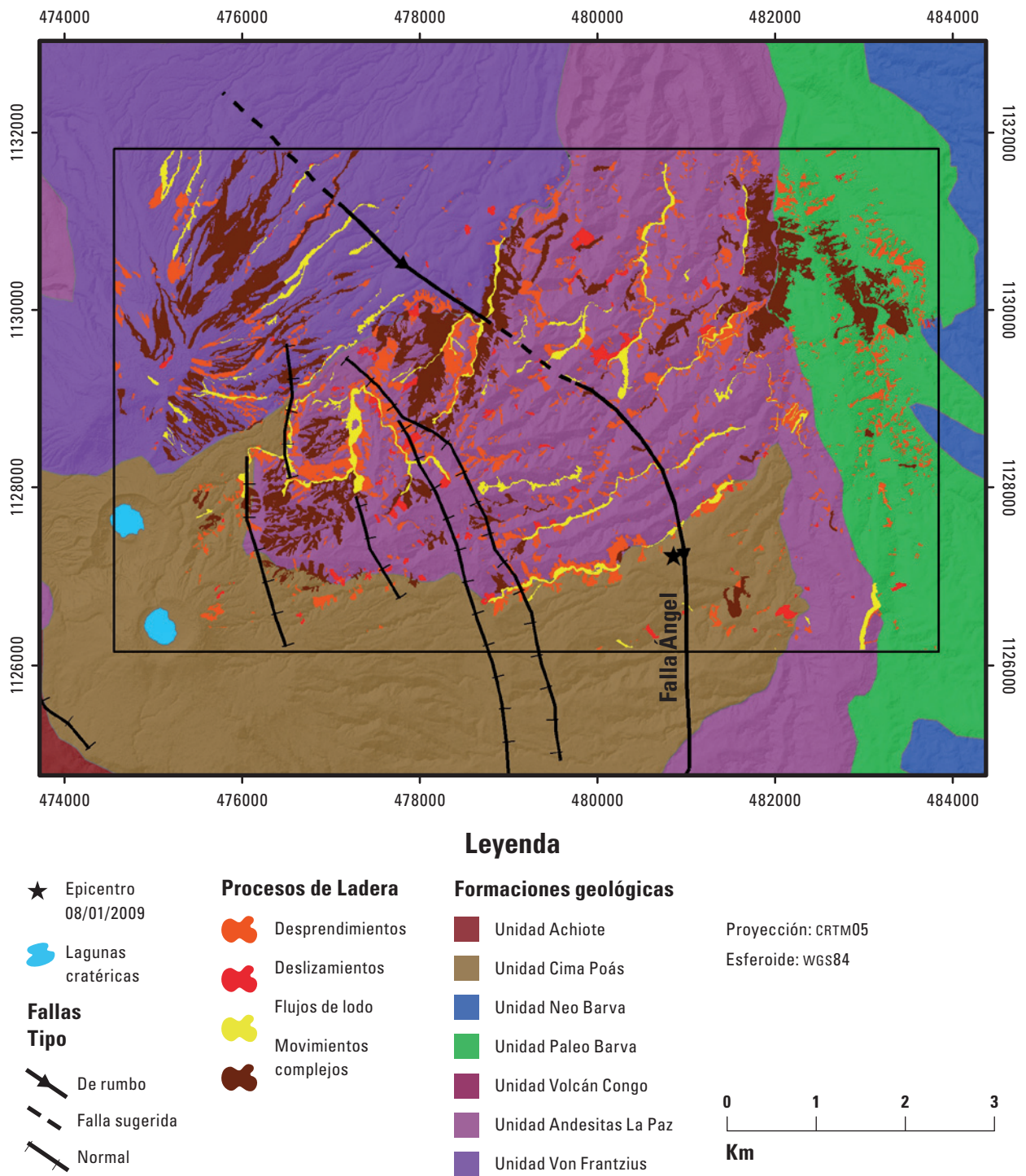


Figura 9. Procesos de ladera, formaciones geológicas y fallas del área de estudio.
Datos: Montero et ál. 2010; Ruíz et ál. 2010.

que representaron el 48% de las superficies movilizadas (4,69 km²); por otro lado, los desprendimientos le siguen con un 35% (3,42 km²), posteriormente los flujos de lodo con un 12% (1,21 km²) y, por último, los deslizamientos con un 5% (0,46 km²).

La vegetación no fue un atenuador en la dinámica de los procesos de ladera, de hecho, la mayoría de movimientos en masa sucedieron en usos de suelo de bosque.

Un alto número de procesos de ladera determinados en el área de estudio fueron desprendimientos (82%), debido a su dinámica de alta velocidad de disparo, un sustrato muy meteorizado y saturado de agua debido a su localización en la Vertiente Caribe, donde las lluvias son constantes a lo largo del año; a estas condiciones se le suman pendientes de hasta 65° y un sismo de 6,2 en la escala de Richter a una profundidad somera (6,5 km).

Los flujos de lodo y los movimientos complejos tienden a concentrarse en las laderas de los edificios Poás y Von Frantzius, especialmente sobre las unidades Andesitas la Paz y Von Frantzius, que están asociadas con fuertes pendientes, un alto grado de disección, altas precipitaciones y gruesos mantos de regolito. Asimismo, se nota el control estructural de las fallas normales sobre el recorrido de los materiales a lo largo de los cauces de los ríos.

Este inventario de procesos de ladera, que ha seguido la clasificación internacional de movimientos en masa, es utilizado por primera vez en Costa Rica para un evento cosísmico y por tal razón resulta de gran importancia, ya que puede ser replicado en otras regiones dadas las condiciones de pendiente, precipitación y variedad de sustratos del país.

Adolfo Quesada Román

Egresado de la Maestría en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Docente e investigador de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).

Gustavo Barrantes Castillo

Geógrafo, magíster en Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Docente e investigador de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).

Referencias

- Alcántara-Ayala, Irasema. 2000. "Landslides: ¿deslizamientos o movimiento del terreno? Definición, clasificaciones y terminología". *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía-UNAM* 41:7-25.
- Alvarado I., Guillermo E. 2011. *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente*. 1^{ra} re-impresión. San José: EUNED.
- Anderson, Malcom G., Elizabeth Holcombe, James R. Blake, Francis Ghesquire, Niels Holm-Nielsen y Tiguist Fisseha. 2011. "Reducing Landslide Risk in Communities: Evidence from the Eastern Caribbean". *Applied Geography* 31 (2): 590-599. DOI: 10.1016/j.apgeog.2010.11.001.
- Barquero, Rafael. 2009. *El Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009*. Reporte Técnico. San José: Universidad de Costa Rica, RSNUCR-ICE. http://iisee.kenken.go.jp/special/20090108costa_rica/TERR_CINCHONA5.pdf
- Barrantes, Gustavo. 2012. *Deslizamientos cosísmicos del terremoto de Cinchona, 8 de enero del 2009*. Mapa escala 1:10.000. Universidad Nacional de Costa Rica: Escuela de Ciencias Geográficas.
- Barrantes, Gustavo, Cristina Jiménez Campos y María José Ocón García. 2013. "Deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona de 2009, Costa Rica". *Revista Geográfica de América Central* 2 (51): 69-79.
- Berstch, Floria. 1995. *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Buol, Stanley, Francis Doan Hole y Ralph McCracken. 2008. *Génesis y clasificación de los suelos*. 2^{da} ed. Ciudad de México: Trillas.
- Carlos Valerio, Víctor. 2010. "Procesos de remoción en masa en rocas volcánicas, porción SO de la cuenca de México". Tesis de doctorado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal.
- Cruden, David Milne, David J. Varnes. 1996. "Landslides Types and Processes". En *Landslides: Investigation and Mitigation*, editado por Keith A. Turner y Robert L. Schuster, 36-75. Washington: National Academy Press.
- Duarte, Eliécer. 2009. *6 fotos comparativas del Terremoto de Cinchona (8 de enero de 2009) (o el impacto ecológico y ambiental todavía no cuantificado)*. San José: Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica-Universidad Nacional de Costa Rica.
- ESRI. 2012. *ARC GIS Desktop: Release 10*. California: Environmental Systems Research Institute.
- Gares, Paul A., Douglas J. Sherman y Karl F. Nordstrom. 1994. "Geomorphology and Natural Hazards". *Geomorphology* 10:1-18. DOI: 10.1016/0169-555X(94)90004-3.
- González V., Cleto. 1910. *Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica 1608-1910*. San José: Tipografía Avelino Alsina.
- Goudie, Andrew. 2004. *Encyclopedia of Geomorphology*. Vol. 2. Londres: Taylor & Francis Group.
- Highland, Lynn M. y Peter Bobrowsky. 2008. *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*. Circular 1325. Virginia: Reston, Geological Survey.
- Huggett, Richard John. 2007. *Fundamentals of Geomorphology*. New York: Routledge.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2014. *Datos meteorológicos de Costa Rica*. San José: MINAE. <http://www.imn.ac.cr/>
- ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 2014. *Atlas Digital de Costa Rica*. Cartago: ITC.
- Laurent, Jhon. 2009. "Evaluación económica de pérdidas y daños". En *El terremoto de Cinchona, 8 de enero de 2009*, editado por Rafael Barquero P., 101-127. San José: Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica (RSNUCR)-Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). 101-127. http://iisee.kenken.go.jp/special/20090108costa_rica/TERR_CINCHONA5.pdf
- Montero, Walter. 2001. "Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá". *Revista Geológica de América Central* 24:29-56. DOI: 10.15517/rgac.voi24.8551.
- Montero, Walter, Gerardo J. Soto, Guillermo E. Alvarado y Wilfredo Rojas. 2010. "División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica". *Revista Geológica de América Central* 43:13-36. DOI: 10.15517/rgac.voi43.3456.
- Mora, Raúl Alberto. 2010. "Peligrosidad volcánica del Poás, basado en las principales erupciones históricas de 1834, 1910 y 1953-1955". Tesis de Maestría en Gestión de Riesgos de Desastres y Atención de Emergencias, Universidad de Costa Rica, Montes de Oca.
- Prosser, Jerome. T. y Michael J. Carr. 1987. "Poás volcano, Costa Rica: geology of the summit region and spatial and temporal variations among the most recent lavas". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 33 (1-3): 131-146. DOI: 10.1016/0377-0273(87)90057-6.

- Ruiz, Pablo, Esteban Gazel, Guillermo Alvarado, Michael J. Carr y Gerardo Soto. 2010. "Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica". *Revista Geológica de América Central* 43:37-66. DOI: 10.15517/rgac.voi43.3457.
- Selby, Michael John. 1985. *Earth's Changing Surface*. Oxford: Oxford University Press.
- Sterlacchini, Simone, Cristiano Ballabio, Jan Blahut, Marco Masetti y Alessandro Sorichetta. 2011. "Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps". *Geomorphology* 125 (1): 51-61. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.09.004.
- Strahler, Alan H. 2011. *Introducing Physical Geography*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- WP/WLI (International Geotechnical Societies Unesco Working Party on World Landslide Inventory). 1990. "A suggested method for reporting alandslide". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 41:5-12. DOI: 10.1007/BF02590201.

Bibliografía

- Alvarado, Guillermo. E., Wendy Pérez y Carolina Sigarán. 2000. "Vigilancia y peligro volcánico". En *Geología de Costa Rica*, compilado por Percy Denyer y Siegfried Kussmaul, 251-272. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.
- RSN: UCR-ICE (Red Sismológica Nacional). 2009. "El terremoto de Cinchona del jueves 8 de enero de 2009". *Revista Geológica de América Central* 40:91-95. DOI: 10.15517/rgac.voi40.4188.
- Rojas, Wilfredo, Walter Montero, Geraldo Soto, Rafael Barquero, Ileana Boschini, Guillermo Alvarado y Alberto Vargas. 2009. "Contexto histórico, geológico, tectónico local, sismicidad histórica y registro sísmico instrumental". En *El terremoto de Cinchona, 8 de enero de 2009*, editado por Rafael Barquero P., 7-33. San José: RSNUCR-ICE. http://iisee.kenken.go.jp/special/20090108costa_rica/TERR_CINCHONA5.pdf