



**Peligros Geomorfológicos en Costa Rica: Cuenca Alta del Río General**  
Geomorphological Hazards in Costa Rica: Upper General River Basin

Adolfo Quesada-Román<sup>1,2</sup> & José Juan Zamorano Orozco<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University of Geneva, Institute for Environmental Sciences,  
Climate Change Impacts and Risks in the Anthropocene, 66, Boulevard Carl-Vogt, 1205, Switzerland

<sup>2</sup>Universidad de Costa Rica, Escuela de Geografía, San Pedro 2060, Costa Rica

<sup>3</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México D.F

E-mails: [adolfo.quesada@unige.ch](mailto:adolfo.quesada@unige.ch); [zamojj@yahoo.com.mx](mailto:zamojj@yahoo.com.mx)

Recibido em: 25/06/2018 Aprobado em: 18/09/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_239\\_251](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_239_251)

## Resumen

En países tropicales como Costa Rica, la incidencia de procesos de ladera e inundaciones es activada por las lluvias extraordinarias, la meteorización, el tipo de sustrato, la sismicidad, la morfología y la inclinación del terreno. La recurrencia y magnitud de estos procesos afectan en términos de pérdidas económicas y muertes en las comunidades de la cuenca alta del río General en el centro-sur del país. Este trabajo determina por medio de mapas morfométricos y morfogenéticos, las zonas de mayor susceptibilidad a estos peligros geomorfológicos. En el pasado eventos como el sismo de Buenavista (1983), los huracanes Joan (1988), César (1996), la tormenta tropical Alma (2008) y el huracán Nate (2017) causaron pérdidas humanas y graves daños económicos en líneas vitales (vías de comunicación, cableado eléctrico y acueductos) así como en el sector agropecuario.

**Palabras clave:** Cartografía geomorfológica; Morfometría; Inundaciones; Procesos de ladera

## Abstract

In tropical countries as Costa Rica, landslides and floods are triggered by intense precipitation events, weathering, rock control, seismicity, morphology and the slope angle. The recurrence and magnitude of these processes provoke economic losses and casualties in the communities of the Upper General River Basin in the center-south of the country. The current work determines based on morphogenetic and morphometric maps, the higher susceptibility zones affected by these geomorphological hazards. In the past events such as the Buenavista earthquake (1983), hurricanes Joan (1988), César (1996), tropical storm Alma (2008), and hurricane Nate (2017) caused human losses and serious economic damage to vital lines (roads, electric lines, and aqueducts) as well as in the agricultural sector.

**Keywords:** Geomorphological mapping; Morphometry; Floods; Landslides

## 1 Introducción

Los desastres ocurren en todo el mundo, no obstante afectan en mayor medida a países en desarrollo como Costa Rica dada su localización geográfica y las diversas vulnerabilidades tanto económicas, sociales, políticas y culturales que posee, producto de un desarrollo histórico particular (Alcántara-Ayala, 2002). Las amenazas naturales y los registros de desastres más comunes en Costa Rica, son las inundaciones y procesos de ladera (generalmente llamados deslizamientos), que en conjunto suman el 90% de los registros entre 1970 y 2015 para el país (Quesada-Román & Calderón-Ramírez, 2018; Quesada Román & Calderón-Ramírez, 2018).

Los procesos de ladera y las inundaciones son fenómenos recurrentes en la zona de estudio, esta dinámica es responsable de pérdidas económicas y daños severos a la infraestructura de la cuenca alta del río General. La activación repentina de estos procesos sumada con la existencia de asentamientos humanos en terrenos inclinados o en el fondo de los valles, incrementa su vulnerabilidad física y hace que el potencial impacto del peligro geomorfológico sea mayor. El objetivo de este trabajo es entender cómo la dinámica de este territorio se ve influencia-

da por eventos de intensas lluvias estacionales, el impacto indirecto de ciclones tropicales y la sismicidad que disparan procesos de ladera e inundaciones, a través de un análisis morfométrico, morfogenético y finalmente un mapa de peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera.

## 2 Materiales y Métodos

### 2.1 Área de Estudio

La zona de estudio se localiza entre los  $9^{\circ} 12' 46'' - 9^{\circ} 35' 03''$  de latitud N y los  $83^{\circ} 28' 47'' - 83^{\circ} 49' 07''$  de longitud W. Forma parte de la provincia de San José; cantón de Pérez Zeledón en su mayor parte, e incluye tres pequeños sectores de las provincias de Cartago (extremo N), Limón (sector E) y Puntarenas en su porción SE (Figura 1). El relieve de la cuenca alta del río General es resultado de una dinámica tectónica compleja, que tiene relación con los movimientos regionales del fondo oceánico y del continente. En esta geodinámica se vinculan varias placas tectónicas en un proceso de subducción entre Cocos y Caribe, la colisión de la Cordillera submarina de Cocos (Cocos Ridge), la junta triple entre Placas Cocos, Caribe y Nazca y fallas activas (transcurrentes) asociadas a la Placa Panamá (Bird, 2003; Denyer *et al.*, 2003).

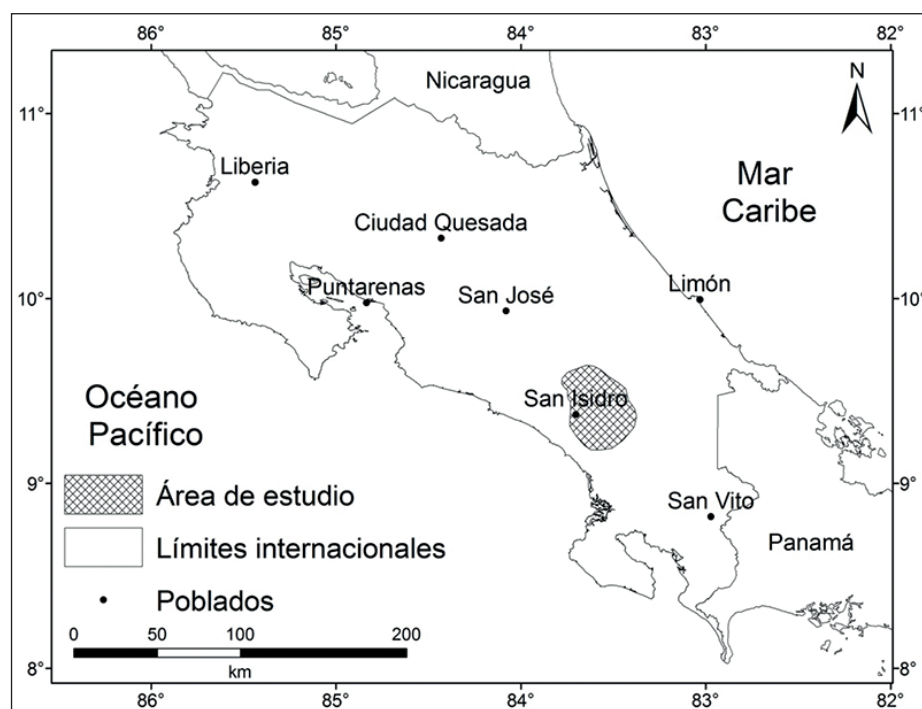


Figura 1 Localización de la cuenca alta del Río General.

La cuenca alta del río General se localiza entre dos regiones fisiográficas que determinan su dinámica geomorfológica: la Cordillera de Talamanca y la Fila Brunqueña. La primera, es un importante sistema montañoso del Mioceno ubicado al N del área de estudio, la cual debe su origen al proceso de subducción entre las placas de Cocos y Caribe y el posterior cese del vulcanismo local por el arribo de la cordillera submarina de Cocos, una extensión del punto caliente de Galápagos que modificó el ángulo de la fusión del *slab* de la placa de Cocos, lo que ha generado su incesante ascenso; además ha intensificado la erosión y permitió el afloramiento de plutones graníticos. Por otro lado, la Fila Brunqueña al S, es producto de la deposición de sedimentos continentales en el talud continental del Océano Pacífico durante el Mioceno, bloque que fue levantado y basculado en forma de monoclinal, provocado por un sistema de fallas longitudinales con rumbo NW-SE (Denyer *et al.*, 2003).

Las edades de las rocas que conforman el área de estudio varían entre el Paleoceno y el Holoceno, las litologías más predominantes son los intrusivos graníticos del Mioceno, seguido por extensas áreas cubiertas de productos volcánicos efusivos del Mioceno, todos ellos ubicados hacia el norte en la Cordillera de Talamanca. Por su parte, el material sedimentario del Mioceno y el Cuaternario forma parte de las unidades del piedemonte, la llanura aluvial y la Fila Brunqueña al sur (Linkimer & Aguilar, 2000; Alvarado *et al.*, 2009). En todo este territorio es evidente el control estructural de las fallas tectónicas locales y múltiples lineamientos dispuestos en los cauces fluviales con orientaciones hacia el NW-SE y N-S, que propician la activación de procesos de remoción en masa y por ende la modificación de las laderas. El emplazamiento del eje neotectónico a lo largo de la llanura aluvial del río General, se asocia con la ampliación de esta fosa tectónica y favorece su dinámica acumulativa alimentada por inundaciones constantes con diversos grados de intensidad (Denyer & Alvarado, 2007; Alvarado *et al.*, 2009).

Otras de las variables que hacen particular este territorio son la precipitación, la vegetación y los usos de la tierra. La cuenca alta del río General posee vínculo directo entre las zonas de mayor precipitación (entre 4000 y 5500 mm anuales) con

amplias regiones de laderas que son modeladas por la actividad gravitacional, así como las vertientes afectadas por la reptación y la arroyada. Además, se encontraron relaciones tangibles entre los distintos rangos de precipitación que varían en función de los cambios en altitud e influyen en el desarrollo de los diferentes tipos de bosques de la zona de estudio y tienen asociación con zonas de aparente estabilidad a procesos de ladera. Los usos de la tierra en el área de estudio corresponden a zonas agrícolas con pendientes bajas como abanicos aluviales y llanuras aluviales, en el caso del café este cultivo se vincula con elevaciones superiores a 700 msnm con suelos producto de la meteorización de rocas volcánicas y plutónicas; por su parte el uso forestal y el páramo, quedan relegados a niveles altitudinales que superan los 1000 y 3000 msnm, respectivamente (Quesada-Román, 2016).

## 2.2 Análisis Morfométrico

Se analiza en primera instancia el mapa de zonificación de inundaciones y procesos de ladera a partir de la integración de valores morfométricos (densidad de la disección, profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y erosión total). Los insumos necesarios para el desarrollo de este método son las curvas de nivel a escala 1:25.000 y los cauces fluviales inferidos a partir de dichas isohipsas. Esta cartografía representa la primera aproximación en la zonificación de las regiones morfológicas y las áreas susceptibles a procesos de ladera e inundaciones (Lugo, 1988; Quesada-Román & Barrantes, 2017; Quesada-Román, 2017; Quesada-Román & Feoli-Boraschi, 2018). Este documento resulta de sobreponer los índices numéricos bajos y altos (máximos y mínimos) de cada mapa morfométrico y con la ayuda de la herramienta Union (ArcGis 10), se obtuvo uno nuevo. El análisis de la información se realizó una vez diferenciados los valores altos y bajos, en cada uno de los mapas morfométricos. El documento que resultó, se sobrepuso con la base topográfica a fin de revisar que las áreas obtenidas fueran correspondientes con el relieve real; en este proceso, fue determinante el conocimiento adquirido en los trabajos de campo y la interpretación de fotografías aéreas.

De esta manera, se obtuvo una nueva versión cartográfica y fue en este mapa, donde se procedió a categorizar áreas con incidencia de valores morfométricos. Con este procedimiento, se identificaron territorios donde ningún valor incidía o, por el contrario, se hicieron evidentes zonas donde llegaban a coincidir hasta cinco conjuntos de datos diferentes. Lo anterior fue el punto de partida para organizar de la siguiente manera el cruce de variables: los territorios en donde coincidían hasta dos indicadores morfométricos, se consideraron como áreas potenciales; las zonas donde llegaban a sobreponerse tres índices, se clasificaron como de ocurrencia frecuente y los espacios catalogados como de máxima ocurrencia, fueron aquellos donde se hacían presentes cuatro o cinco variables. Estos criterios se aplicaron tanto para procesos de ladera como a inundaciones. La zonificación de procesos de ladera e inundaciones, representa el análisis de todos los documentos morfométricos en conjunto, en el marco de las regiones morfológicas.

### 2.3 Análisis Morfogénético

Tanto la elaboración de la cartografía, la definición de la leyenda geomorfológica, así como el análisis de las formas del relieve de la cuenca alta del río General se basaron en el trabajo de Quesada-Román (2016). Para ello fue necesario interpretar un total de 251 fotografías aéreas a escala 1:25.000 bajo un criterio geomorfológico, de esta manera se obtuvo un mapa preliminar a escala 1:25.000, documento que fue verificado en campo. Los métodos gráficos usados en el mapa definitivo fueron variados y provienen de Tricart (1972), Bashenina (1977), Lugo (1988) y Verstappenn (1983). Con respecto a la clasificación del relieve (morfogénesis) y su leyenda, se tomó en cuenta el criterio de Simonov (1985); de esta manera, las formas quedaron concentradas en dos, de tres grandes grupos genéticos: endógeno-modelado y exógeno. El endógeno, primer grupo genético, no está representado de manera directa en este territorio; es decir, no existe una superficie que conserve su morfología primaria (sin la influencia de la acción exógena: erosión-acumulación).

### 2.4 Zonificación de Peligros Geomorfológicos

La realización de un mapa de peligros geomorfológicos parte de la interpretación geomorfológica

de los elementos morfométricos y morfogénéticos que fueron cartografiados mediante un extenso análisis de la zona de estudio, toda esta información fue contrastada en función de variables como la topografía y las pendientes para lograr determinar el mapa de peligros a procesos de ladera e inundaciones. A partir de la cartografía resultante se describen las condiciones que favorecen la existencia de terrenos susceptibles a presentar procesos de remoción en masa e inundaciones, así como diferenciar los diferentes grados de afectación real y potencial de estos territorios.

## 3 Resultados y Discusión

### 3.1 Cartografía Morfométrica

Mediante el análisis morfométrico se analizaron siete variables: altimetría, inclinación del terreno, densidad de la disección, profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y erosión total. A partir de la altimetría se lograron delimitar las regiones morfológicas de la cuenca alta del río General: I) Zona de montaña (Cordillera de Talamanca); II) Llanura aluvial; III) Rampa acumulativa (abanicos aluviales); IV) Sierras menores y V) Estructuras montañosas cubiertas por detritos aluviales. Por medio del mapa de inclinación del terreno se hizo una primera aproximación de la dinámica gravitacional y fue posible, identificar formas del relieve que se asocian con la acción erosiva-acumulativa fluvial. No obstante, los mapas utilizados para realizar el cruce de variables y obtener el mapa de zonificación de inundaciones y procesos de ladera por métodos morfométricos fueron la densidad de la disección, profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y erosión total (Figura 2).

El mapa de densidad de la disección evidenció zonas de mayor o menor erosión, donde la concentración de cauces se vincula con zonas de precipitación mayores a 2500 mm (promedio anual), la existencia de un sustrato poco consolidado y alterado (cortezas de meteorización), la presencia de estructuras disyuntivas, grandes áreas sin cambios litológicos significativos y una morfología heterogénea. Del mismo modo, la profundidad de la disección hace evidente la influencia de las estructuras disyuntivas en la dinámica erosiva y acumulativa del relieve. En este marco hay que considerar que el crecimiento de los valles en la vertical, en la mayoría de los casos,

Peligros Geomorfológicos en Costa Rica: Cuenca Alta del Río General  
 Adolfo Quesada-Román & José Juan Zamorano Orozco

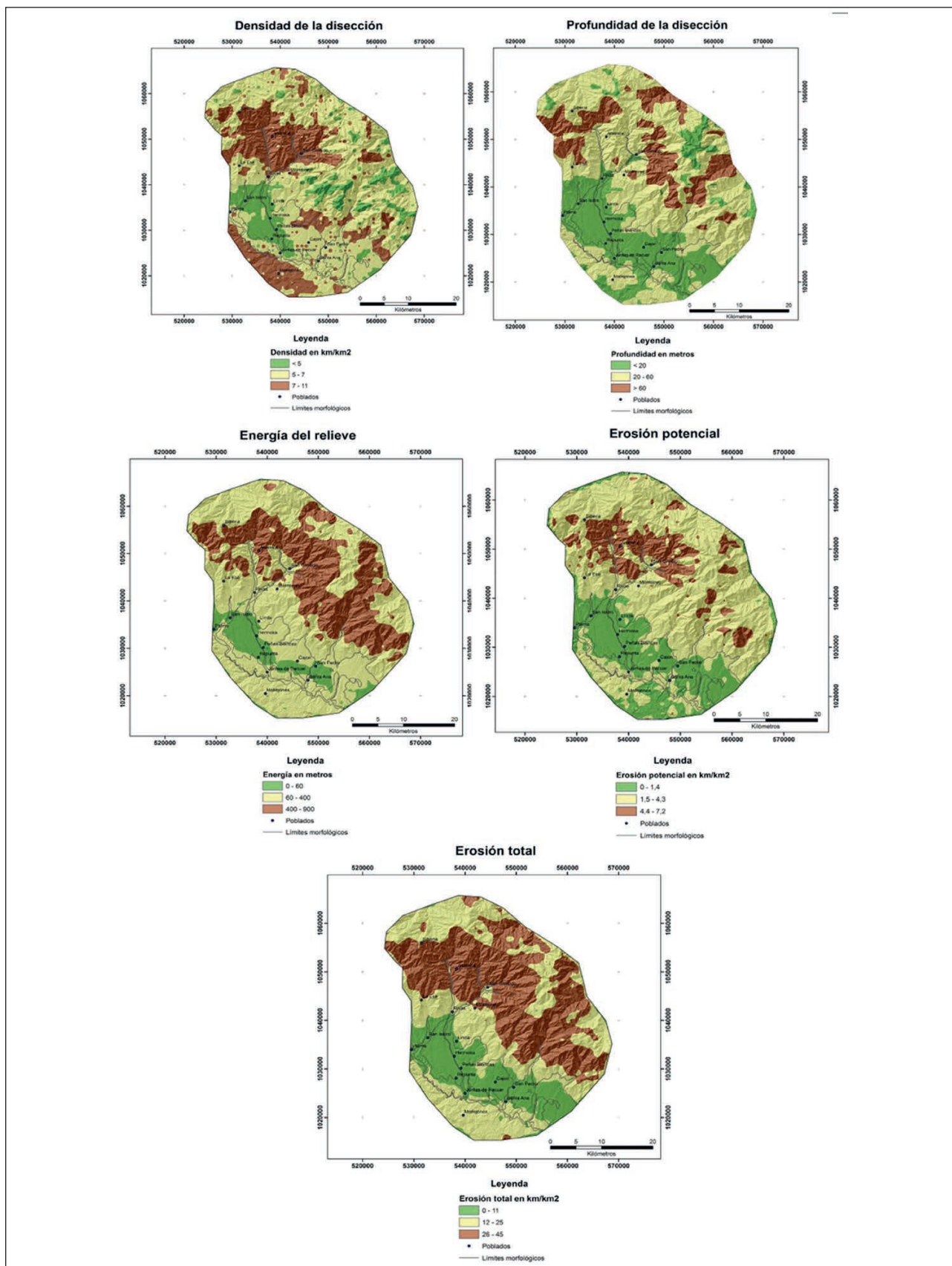


Figura 2 Variables utilizadas obtener el mapa de zonificación de inundaciones y procesos de ladera por métodos morfométricos.

provoca inestabilidad en las laderas y por tanto la existencia de variados procesos gravitacionales.

La energía del relieve es un importante índice que integra en su análisis la acción fluvial (densidad y profundidad de la disección) y la inclinación del terreno. Estos tres elementos se vinculan de manera estrecha con la remoción en masa; además considera la litología, la influencia de la meteorización, la actividad de las fallas, los sismos y la precipitación. Por otra parte, la erosión potencial permitió ubicar de manera indirecta, zonas con susceptibilidad a la denudación, vinculada a factores como características litológicas, contrastes topográficos, variedad morfológica, condiciones hidroclimáticas, cobertura vegetal e inclusive cambios en el uso de la tierra. En el caso de la erosión total se diferenciaron áreas con mayor erodabilidad y con morfologías más evolucionadas (más antiguas), a través de la rugosidad del

relieve; por lo que se infiere el papel que juegan variables como la edad de la roca, las estructuras disyuntivas, el clima pasado (glaciaciones), el actual (precipitaciones), la inclinación y orientación de las laderas.

El análisis morfométrico fue una útil herramienta en la determinación de zonas propensas a procesos de ladera e inundaciones, a partir del vínculo entre las variables trabajadas (energía del relieve, profundidad de la disección, densidad de la disección, erosión potencial y erosión total). La correlación de los resultados obtenidos fue esencial para realizar el mapa de susceptibilidad de procesos de ladera (58.7% del área total) e inundaciones (35.5% del territorio) mediante métodos morfométricos, el cual fue confrontado con los reportes de desastres en el área de estudio, la que tuvo una correlación positiva y ratificó la dinámica de las zonas peligrosas (Figura 3).

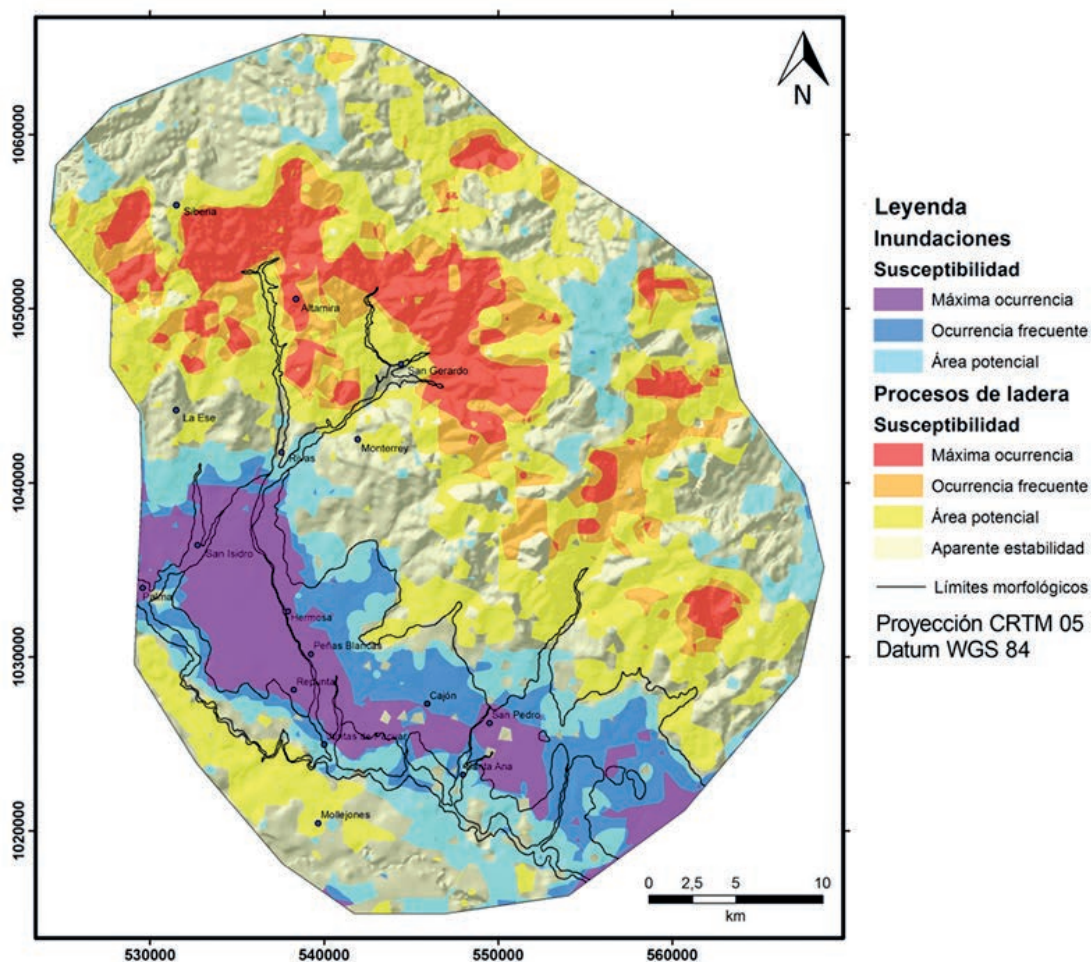


Figura 3  
Mapa de zonificación de inundaciones y procesos de ladera por métodos morfométricos.

### 3.2 Mapa Geomorfológico

De acuerdo a Quesada-Román (2016), por medio de esta clasificación se presenta un inventario de formas, procesos modeladores y dinámica del relieve expresada en 46 formas ordenadas en relieve endógeno modelado (laderas de montaña y tectónico) y exógeno (fluvial, gravitacional, y glaciar).

El relieve endógeno modelado se trata de superficies que sirven de enlace, entre la cumbre y los terrenos bajos ubicados en la cercanía de los lechos fluviales. Este tipo de vertientes representa el 79% de toda el área de estudio, se caracteriza por ser heterogéneas en cuanto a litología, longitud, orientación y morfología de laderas. La Cordillera de Talamanca (N) y la Fila Brunqueña (S), son un ejemplo representativo de este tipo de relieve. La dinámica y evolución de ambos conjuntos montañosos, se ve favorecida por una intensa precipitación (entre 2500 y 5500 mm anuales), que ampara una dinámica fluvial en donde el mecanismo de evolución principal es la erosión y la acumulación de detritos a gran escala.

Si bien este tipo de relieve es diverso, es posible clasificarlo en función de su altitud y morfología, de esta manera fue posible distinguirlas por su altura relativa en laderas altas, medias y bajas. Las primeras se localizan en los sectores más elevados de la montaña, sobre los 3 000 msnm y se distinguen por estar modeladas por la acción del hielo, en ellas las geometrías rectas y cóncavas son las que predominan. Las laderas que fueron denominadas como medias, ocupan las cotas de 1000 a 3000 msnm, se distinguen por presentar amplias y potentes cortezas de meteorización, que soportan una cubierta vegetal bien desarrollada y que contribuye a fijar los detritos eluviales sobre superficies muy inclinadas de morfología subhorizontal y convexas. Las laderas bajas se disponen por debajo de los 1000 msnm presentan una morfología poco inclinada, en la mayoría de los casos están en contacto o muy cerca del cauce. Estas superficies, son un soporte o basamento de series de terrazas, bancos arenosos y abanicos fluviales; también sobre ellas, sobreyacen depósitos aislados, en rampas y conos gravitacionales.

El relieve tectónico analiza las formas de origen tectónico vinculadas con la ruptura y desplaza-

miento de la corteza terrestre producto de una falla transforme identificada en el extremo SE de la zona de estudio, a partir de la interpretación de fotografías aéreas. En campo fue posible comprobar y caracterizar las morfologías propias de este sistema disyuntivo transforme (normal de componente diestro). Se reconoce que el relieve asociado a este mecanismo disyuntivo estaba modelado por la acción fluvial y en menor medida, por la remoción en masa. Fue posible analizar la espacialidad, arreglo, variedad y morfología de escarpes, deflexiones fluviales, domos de compresión (*shutter ridges*) y cuencas de tracción (*sag ponds*). La existencia de este tipo de relieves no es fortuita, siempre están asociados a sistemas tectónicos complejos y de escala regional. En el caso que se estudia, se vincula con la existencia de una fosa tectónica que es drenada por el río General (sector norte); en donde además, convergen las fallas activas Buenavista, División y Pangolín (Mora & Peraldo, 2011).

El relieve exógeno se origina de las fuerzas que se generan en la atmósfera y en las capas superiores de la litósfera. Los factores que condicionan la exogénesis son radiación solar y la fuerza de gravedad; la altitud y latitud, definen el agente modelador, su intensidad y área de influencia. Los procesos exógenos que han definido la configuración del relieve en el territorio de estudio son los fluviales, gravitacionales y glaciares. Por cada uno de ellos existen formas erosivas y acumulativas.

Las formas fluviales erosivas son resultado de la acción de los ríos, que al actuar en conjunto con los movimientos gravitacionales forman valles, los cuales no son estructuras aisladas, se vinculan con otras formas fluviales, tanto erosivas como acumulativas como los circos, cabeceras, barrancos y cárcavas. El relieve acumulativo fluvial comienza a surgir en el momento en que el perfil longitudinal del río disminuye su inclinación y se asocia con formas de relieve como los abanicos aluviales, llanuras aluviales, terrazas de inundación y conos aluviales.

Los abanicos aluviales se forman cuando el cauce reconoce un cambio de pendiente importante, que favorece el depósito de la carga. Su origen y evolución está condicionada por la tectónica y el

clima de manera directa. La primera variante, se vincula con el ascenso del área fuente, la Cordillera de Talamanca; el levantamiento se ha calculado en 1.1 mm al año y ha sido constante en los últimos 2 Ma (Gardner *et al.*, 1992). Esta condición sumada a la amplia y densa red de cauces ha favorecido la erosión y con ello, el transporte y acumulación de importantes depósitos detríticos al sur de la cadena montañosa más extensa del país.

La influencia del clima se hace evidente a partir de los 3000 msnm, región que estuvo bajo condiciones gélidas durante el Último Máximo Glaciar, mismas que terminaron hace 10 ka (Orvis & Horn, 2000); con la existencia de formas de relieve de origen glaciar (herencias geomorfológicas) que al estar constituidas de detritos, quedaron a disposición de la erosión fluvial quien las desmanteló, las transformó o destruyó. Los ríos transportaron detritos a través de los valles glaciares, en algunos casos este proceso logró transformar o desaparecer la morfología dejada por el paso del hielo. La mayor parte de estos materiales pasaron a formar parte de extensos abanicos en la periferia de la montaña, un total de 14 que representan un área de 213.8 km<sup>2</sup>. En general mantienen una inclinación < 10°, un rasgo singular es la posición de los ápices (881 msnm en promedio) y la orientación de la distancia más larga, al SW, y fueron clasificados de acuerdo a su altura relativa en tardíos, intermedios y tempranos.

Las llanuras aluviales son relieves que ocupan el fondo de valles amplios, que en la mayoría de los casos estos terrenos son zonas de inundación en la temporada de lluvias o en periodos extraordinarios de precipitación (ciclones tropicales) que se clasificaron en intermontanas, de transición (entre abanicos aluviales) y de superficies amplias: ríos Pacuar y General. Las llanuras aluviales alternan con terrazas de inundación que se caracterizan por ser simétricas y asimétricas, se reconocen tres niveles de terrazas: estacional, extraordinaria y excepcional. Estas características revelan una dinámica erosiva lateral y vertical asociada a movimientos neotectónicos intensos.

Las formas de relieve gravitacional se localizan en laderas donde la inclinación del terreno es > 15° y en donde el sustrato es poco consolidado

(rocas fracturadas o meteorizadas, detritos o suelos), la presencia de estructuras disyuntivas favorece su desarrollo y la precipitación magnifica su dinámica (> 2500 mm anuales). Bajo este rubro se explican los circos asociados a deslizamientos, desprendimientos, flujos de lodo y rocas; así como las morfologías que presentan las deposiciones, resultado de la dinámica exógena que los modela como las acumulaciones asociadas a deslizamientos con morfologías escalonada y lobular; así como, flujos de lodo con morfología lobular y rampas coluviales.

Las morfologías glaciares son formas del relieve originadas hace más de 10,000 años durante la fase de glaciación del Último Máximo Glaciar y el Glaciar Tardío (Orvis & Horn, 2000). Dichas morfologías respondieron a la acumulación de nieve y hielo, las cuales fueron modeladas por el pulimento glaciar debido al movimiento de las masas de hielo asociado con el diaclasamiento por crioclastia, se consideran como paleoformas, debido a que el agente geomorfológico que las formó, no existe en la actualidad. Entre las formas de origen glaciar de carácter erosivo se consideran los circos, crestas, escalones, escarpes de captura, lagos, superficies rocosas (subhorizontales o inclinadas con morfología de lomeríos) y circos fluvio-glaciares. Las morfologías de origen glaciar que tienden a acumular sedimentos producto de los procesos glaciares del pasado, las formas más representativas son las morrenas (laterales y frontales), lomeríos (superficies onduladas) y lagos glaciares. Estas regiones paleoglaciares están asociadas con humedales palustres y lacustres que actualmente tienen una importante función hidrológica y ecosistémica (Esquivel *et al.*, 2018; Veas *et al.*, 2018).

El relieve sedimentario se expresa como laderas de areniscas y conglomerados modeladas por la actividad fluvial, las cuales se localizan al sur, posterior a la llanura aluvial de los ríos Pacuar y General, asociadas con la Fila Brunqueña. Su formación se debe a la deposición de sedimentos continentales en el talud continental del Océano Pacífico, el cual fue levantado por la dinámica tectónica, lo que dejó cimas que no superan los 1000 msnm a merced de los agentes exógenos, en especial de la precipitación y la temperatura, que favorecieron el desarrollo de densas redes fluviales.



### 3.3 Mapa de Peligros Geomorfológicos

El mapa de peligros geomorfológicos resume el análisis morfométrico y morfogenético en una clasificación de las zonas con distintos niveles de susceptibilidad a procesos de ladera e inundaciones, terrenos diferenciados en su explicación debido a que tienen agentes disparadores, extensiones espaciales y dinámicas distintas a partir de sus características geomorfológicas (Figura 4).

#### 3.3.1 Terrenos Susceptibles a Procesos de Ladera

Los sitios de máxima ocurrencia a procesos de ladera se componen de 15 zonas, de las cuales

tres se localizan en las cabeceras de los ríos Chirripó y Telire al NE, los cuales drenan sus aguas hacia el mar Caribe. Del lado de la vertiente del océano Pacífico se localizan doce zonas en las cabeceras de los ríos Savegre (hacia el NW), Buenavista y Chirripó Pacífico (al N), así como el Peñas Blancas, San Pedro y Volcán (hacia el SE), terrenos que suman un total de 130 km<sup>2</sup>, equivalente al 8% de la superficie de estudio. Son zonas que se relacionan de manera directa con la región morfológica I: Zona de montaña (Cordillera de Talamanca), donde se presentan inclinaciones superiores a 25° donde los afloramientos geológicos típicos son de rocas volcánicas y plutónicas del Mioceno en morfologías de laderas cóncavas y rectas. Los valores más altos registrados

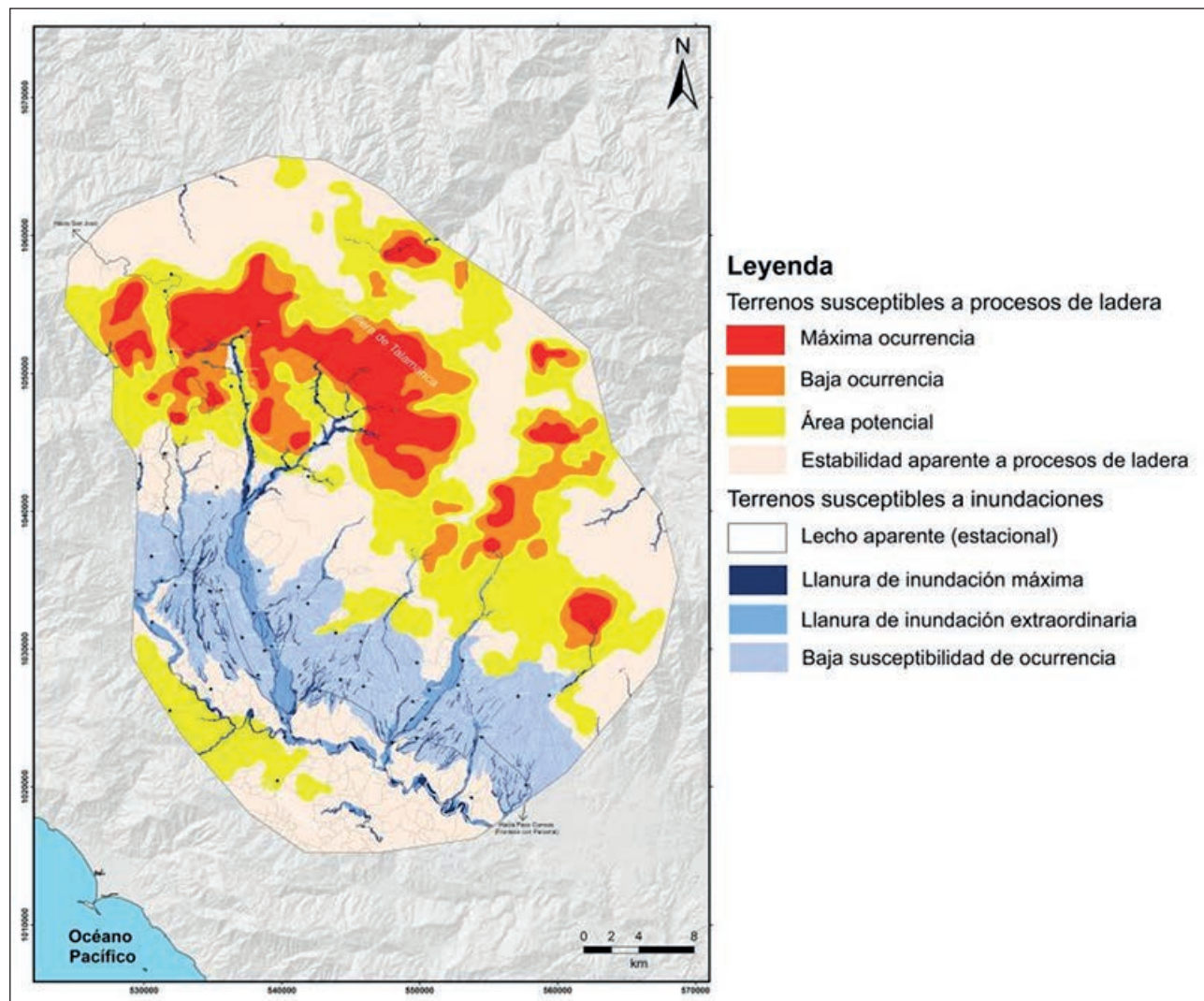


Figura 4 Mapa de peligros geomorfológicos de la cuenca alta del Río General.

en el análisis morfométrico dieron datos de densidad de la disección, energía del relieve, profundidad de la disección, erosión potencial y total que muestran regiones de fuerte inestabilidad de laderas (Quesada-Román *et al.*, 2018).

Los terrenos de máxima ocurrencia a procesos de ladera son activados por agentes de disparo bien identificados como son sustratos altamente intemperizados, las lluvias estacionales (> 2500 mm anuales) y ciclónicas (entre agosto y noviembre), además por la influencia sismo-tectónica (terremotos interplaca e intraplaca). De acuerdo al análisis geomorfológico en estas regiones se cartografiaron 21 deslizamientos, 307 desprendimientos, 12 flujos de rocas y 9 flujos de lodo. De acuerdo a los registros de desastres DesInventar (LA RED, 2011), entre 1980 y 2010 el 16,4% de los procesos de ladera reportados coinciden con estos sitios.

Los terrenos susceptibles a procesos de ladera de baja ocurrencia se definen como extensas áreas que encapsulan las regiones de máxima ocurrencia donde la localización de estas 17 zonas responde a una intensa inestabilidad de laderas en las cabeceras de las cuencas de los ríos Chirripó y Telire (vertiente Caribe) y los ríos Savegre, Buenavista, Chirripó Pacífico, San Pedro y Volcán (vertiente Pacífica). Cabe resaltar que los terrenos de baja ocurrencia se ubican en la región morfológica I: Zona de montaña (Cordillera de Talamanca) donde sobresalen valores morfométricos medios y altos; estas regiones suman un total de 146 km<sup>2</sup>, equivalente a un 9,35% del territorio.

Estos terrenos se desarrollan en laderas de montaña donde predominan las morfologías cóncavas y rectas con inclinaciones entre 16° y 63°, situados en sustratos de rocas granitoides del Mioceno con edades entre 11 y 6 Ma (Denyer & Alvarado, 2007). Los diferentes tipos de movimientos en masa que se pueden producir en estas zonas son deslizamientos, flujos de roca, flujos de lodo, caídas de rocas y desprendimientos; procesos que son detonados por la pluviosidad estacional superior a 2500 mm anuales así como las lluvias ciclónicas presentes entre agosto y noviembre, además de episodios sísmicos debido a varias fallas activas locales y la cercanía con la Trinchera Mesoamericana. En estas zonas

fueron identificados mediante el mapa geomorfológico 44 deslizamientos, 275 desprendimientos, 18 flujos de rocas y 9 flujos de lodo. Según el inventario de desastres DesInventar (LA RED, 2011) entre 1980 y 2010 un 13,1% de procesos de ladera se ubican en estas superficies. Un segmento de la Carretera Interamericana entre La Ese y Villa Mills se ubica en estos terrenos, por lo que en eventos extremos se podría ver comprometido el buen funcionamiento de esta importante vía de comunicación que conecta San José con la zona sur de Costa Rica.

Las Áreas potenciales a procesos de ladera se componen de 26 zonas que están relacionadas con las regiones morfológicas I y IV: Zona de montaña: Cordillera de Talamanca y Sierras menores (Fila Brunqueña), respectivamente. Se localizan cerca de poblados como División, San Juan Norte, San Gerardo de Rivas, Esperanzas y Mollejones; tienen una extensión territorial de 403 km<sup>2</sup>, lo que equivale a un 25,8% del área de estudio. Su vínculo con los valores morfométricos medios y altos es evidente, ya que además de esta condición se ubican en laderas de montaña rectas y cóncavas con pendientes que son menores a 25°, sobre sustratos volcánicos, plutónicos y sedimentarios del Mioceno con edades entre 29 y 2 Ma (Denyer & Alvarado, 2007).

En estas regiones se cartografiaron 73 deslizamientos, 333 desprendimientos, 47 flujos de rocas y 14 flujos de lodo y según la base de datos de desastres DesInventar (LA RED, 2011) entre 1980 y 2010, un 37,7% del total (61 registros) se ubica dentro de estas superficies. Estos terrenos han evolucionado en el tiempo dados la intensa precipitación (mayor a 2500 mm anuales), la tectónica y el fallamiento activo, además en la actualidad se presenta una modificación antrópica de bosques hacia usos agropecuarios que favorecen el incremento de dichas superficies.

Los terrenos con estabilidad aparente a procesos de ladera suman un 64% (1002 km<sup>2</sup>) del área de estudio, donde la incidencia de procesos de ladera es mínima o nula debido en buena medida a la estabilidad de los materiales donde las pendientes por lo general se mantienen en los rangos medios o bajos (menores a 25°). A estas características cabe sumar-

se que una amplia área de unos 80 km<sup>2</sup> fue modelada por la acción glaciaria durante el Pleistoceno y en la actualidad presenta superficies rocosas pulidas, estables y en laderas subhorizontales. Por otro lado, las características climáticas tropicales presentes en estos terrenos favorecen el desarrollo de densos estratos arbóreos de bosques montanos entre los 1000 y 2800 msnm, lo que imprime condiciones de estabilidad a estas laderas de la Cordillera de Talamanca y una sección de la Fila Brunqueña. No obstante, por las condiciones de pluviosidad extraordinaria durante ciclones tropicales o frentes fríos (Alfaro *et al.*, 2010), además de la activa dinámica tectónica presente en fallas y la cercanía a la Trinchería Mesoamericana, no se descarta la ocurrencia de flujos de lodo en las zonas deforestadas o agropecuarias (pastos y agricultura); por otro lado, en los cortes de carretera es probable la presencia de desprendimientos y/o deslizamientos debido a la pérdida del ángulo de reposo como otro elemento causal.

### 3.3.2 Terrenos Susceptibles a Inundaciones

Los lechos aparentes (estacionales) se localizan en las secciones más bajas de ríos como el Buenavista, Chirripó Pacífico, Pacuar, San Pedro, Convento y General, donde se presentan cada año procesos de inundación y desbordamiento durante la época lluviosa entre mayo y noviembre cuando las precipitaciones varían de 2500 a 5500 mm anuales a lo largo de diferentes secciones de la cuenca alta del río General, las cuales tienen pendientes menores a 15° y en algunos casos incluso menores a 1°. En estos fluvios se conjugan en jerarquías de drenaje dendríticas, subdendríticas, trenzadas y dicotómicas, encargadas de evacuar la pluviosidad estacional mediante un sistema de cauces interconectado entre la zona de montaña, la rampa acumulativa (abanicos aluviales) y las llanuras aluviales (Quesada-Román, 2017).

Por tanto, los lechos aparentes al estar presentes en todo el territorio tienen una gran amplitud altitudinal de 2280 m (cota máxima y mínima: de 2600 a 320 msnm), lo que es reflejo de su dinámica y capacidad de carga. Estos terrenos tienen periodos de recurrencia de inundación de 1 a 2 años de acuerdo a los registros históricos (LA RED, 2011). Entre

los poblados que se afectan de manera frecuente por la dinámica de los lechos aparentes resaltan Rivas, Pueblo Nuevo, General Viejo, Bajos de Pacuar y Santa Ana, donde las inundaciones se dan año con año, se asocian con una carga de los ríos que ha venido en aumento en el tiempo dados los cambios en el uso de la tierra en las laderas adyacentes a las llanuras de inundación de los ríos.

Las llanuras de inundación máxima son terrenos donde las inundaciones se ven favorecidas por la baja inclinación del terreno (< 15°) y la morfología subhorizontal. A esta condición se le suma que en temporadas de lluvias los suelos están saturados de agua, lo que ayuda al desbordamiento de cauces. Estos procesos climáticos se presentan entre agosto y noviembre cuando la temporada de lluvias alcanza sus niveles máximos debido a que la Zona de Convergencia Intertropical se posiciona sobre el país. Se localizan en las cuencas de los ríos Buenavista, Chirripó Pacífico, Pacuar, Peñas Blancas, San Pedro y General; donde la incidencia de inundaciones se presenta una vez que las temporadas de lluvias sobrepasan encima del promedio anual, o tienen influencia de sistemas de baja presión, temporales o los efectos tanto directos como indirectos de ciclones tropicales con recurrencia menor a 5 años (LA RED, 2011). A partir de datos meteorológicos en eventos extremos se ha logrado determinar que en ocasiones dichos periodos lluviosos pueden incluso superar el 60% de la precipitación mensual y afectar pueblos como Fátima, Peñas Blancas, Hermosa, Miraflores, Morazán, el Hoyón, San Ramón Norte, San Gerardo y Herradura; en llanuras intermontanas, de transición entre abanicos aluviales y de superficies amplias.

Las llanuras de inundación máxima son terrenos localizados en los ríos Quebradas, Jilguero, Pacuar, General, Unión, San Pedro y Convento; se asocian a morfologías subhorizontales con inclinaciones menores a 15° que están dentro de las llanuras aluviales. Dichas regiones son activadas durante épocas lluviosas extraordinarias en conjugación con eventos extremos como el fenómeno de la Niña, las anomalías atmosféricas asociadas con la Zona de Convergencia Intertropical y los ciclones tropicales del mar Caribe y el océano Pacífico (Alfaro & Quesada-Román, 2010). Algunos de los ciclones tropi-

cales que causaron destrucción y muerte a su paso fueron Joan (1988), Cesar (1996), Alma (2008) y Nate (2017), en donde las precipitaciones en algunas ocasiones representaron el 80% de las lluvias mensuales. Se observa un periodo de retorno de aproximadamente 10 años que afecta comunidades como San Isidro del General, Rivas, General Viejo, Peñas Blancas, San Pedro y Santa Ana, de reconocida historia de impactos por estos peligros geomorfológicos (Campos-Durán & Quesada-Román, 2017).

Las superficies de baja ocurrencia a inundaciones se conforman de secciones que no pertenecen a las llanuras aluviales de los cauces que alimentan el río General; no obstante, por su cercanía a estas formas del relieve y pertenecer a la rampa acumulativa proluvial (abanicos aluviales y rampas detríticas) estas morfologías presentan pendientes menores a 15° y una importante densidad fluvial. Por tanto, estos terrenos son susceptibles a presentar inundaciones una vez que se combinen una serie de factores hidroclimáticos como los efectos del fenómeno de la Niña, una intensa época lluviosa, un temporal o las implicaciones que pueda tener un ciclón tropical en las cuencas que conforman el área de estudio. Entre los pueblos que se localizan dentro de esta categoría están Sonador, Convento, Cacao, San Pedro, Tambor, Cajón, Navajuelar, Pilar, Quizarrá, Santa Elena, Repunta, Palmares, Linda, Jilguero, Pedregoso y La Palma.

#### 4 Conclusiones

Las condiciones que favorecen la vulnerabilidad física del área de estudio se reconocen en localidades emplazadas en las llanuras aluviales del río General como Rivas, San Isidro del General, General Viejo y Santa Ana donde las inundaciones son frecuentes y se asocian a lluvias intensas, tanto estacionales como ciclónicas. En la zona de montaña es posible reconocer condiciones vulnerables en regiones donde la inclinación del terreno supera los 25°, en poblaciones como Monterrey, Zapotal, San Juan Norte, Alaska, San Rafael Norte y San Ramón Norte, sitios que pueden ver afectadas sus vías de comunicación (camino vecinales y la Carretera Interamericana).

La intensidad de los procesos y agentes modeladores del relieve (sean endógenos, exógenos,

o su combinación) determinan el grado de magnitud de los peligros geomorfológicos, los cuales son procesos naturales que pueden llegar a generar un impacto en la sociedad. En la zona de estudio se tienen ejemplos de riesgos naturales que se convirtieron en desastres, donde la magnitud de los peligros geomorfológicos asociados (procesos de ladera e inundaciones) al sismo de Buenavista (1983), los huracanes Joan (1988), César (1996), la tormenta tropical Alma (2008) y el huracán Nate (2017), trajeron muertes y graves pérdidas económicas en líneas vitales (vías de comunicación, cableado eléctrico y acueductos) así como en el sector agropecuario.

Mediante la integración de la cartografía morfométrica y morfogenética se realizó el mapa de peligros geomorfológicos, el cual permitió determinar zonas con distintos niveles de susceptibilidad ante procesos de ladera e inundaciones. Los procesos de ladera presentaron los siguientes rubros de susceptibilidad: máxima ocurrencia, baja susceptibilidad de ocurrencia y área potencial. En el caso de las inundaciones, se presentaron los siguientes grados de susceptibilidad: Lecho aparente (estacional), Llanura de inundación máxima, Llanura de inundación extraordinaria y Baja susceptibilidad de ocurrencia. Estos terrenos ayudan a delimitar con una escala muy detallada las regiones expuestas a riesgos naturales que podrían generar pérdidas económicas en eventos extremos, resultando además como una herramienta para la planificación de este territorio. Esta técnica además puede ser empleada para otras zonas de Costa Rica así como otros países con fines diversos, entre ellos la evolución del relieve, mapas morfogenéticos a detalle, la prevención y mitigación de desastres, así como el ordenamiento territorial.

#### 5 Referencias

- Alcántara-Ayala, I. 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47: 107-124.
- Alfaro, E.; Quesada-Román, A. & Solano, F.J. 2010. Análisis del impacto en Costa Rica de los ciclones tropicales ocurridos en el Mar Caribe desde 1968 al 2007. *Revista Diálogos*, 11(2): 25-38.
- Alfaro, E. & Quesada-Román, A. 2010. Ocurrencia de ciclones tropicales en el Mar Caribe y sus impactos sobre Centroamérica. *Revista InterSedes*, 11(22): 136-153.

- Alvarado, G.E.; Barquero, R.; Taylor, W.; Mora, M.; Peraldo, G.; Salazar, G. & Aguilar, T. 2009. Geología de la hoja San Isidro. *Revista Geológica de América Central*, 40: 111-122.
- Bashenina, B. 1977. *Cartografía Geomorfológica*. Moscú, Unión Soviética: Editorial Educación Superior, (en ruso), 375p.
- Bird, P. 2003. An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3): 1-52.
- Campos-Durán, D. & Quesada-Román, A. 2017. Impacto de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica, periodo 2000-2015. *Revista Geo UERJ*, 30: 440-465.
- Denyer, P.; Montero, W. & Alvarado, G.E. 2003. *Atlas tectónico de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica, 79 p.
- Denyer, P. & Alvarado, G.E. 2007. *Mapa geológico de Costa Rica, Escala 1:400000*. San José, Costa Rica: Editorial Librería Francesa.
- Esquivel-Hernández, G., Sánchez-Murillo, R., Quesada-Román, A., Mosquera, G.M., Birkel, C., Boll, J. 2018. Insight into the stable isotopic composition of glacial lakes in a tropical alpine ecosystem: Chirripó, Costa Rica. *Hydrological processes*. doi: 10.1002/hyp.13286
- Gardner, T.W.; Verdonck, D.; Pinter, N.M.; Slingerland, R.; Furlong, K.P.; Bullard, T.F. & Wells, S.G. 1992. Quaternary uplift astride the aseismic Cocos Ridge, Pacific coast of Costa Rica. *Geological Society of America Bulletin*, 104(2): 219-232.
- LA RED (Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina) – Corporación OSSO. 2011. *Desinventar: Sistema de inventario de efectos de desastres de Costa Rica entre 1970 y 2010*. Ciudad de Panamá, Panamá: LA RED. Disponible en: [www.desinventar.org](http://www.desinventar.org)> Acceso: 15 de octubre de 2018.
- Linkimer, L. & Aguilar, T. 2000. Estratigrafía sedimentaria. In: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (Eds.), *Geología de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, p. 43-62.
- Lugo, J. 1988. *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos)*. Cidade do México: Editorial Instituto de Geografía UNAM, 128p.
- Mora, M. & Peraldo, G. 2011. Análisis macrosísmico del terremoto de Buenavista de Pérez Zeledón, 3 de julio de 1983 (Ms=6,1), Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 44: 43-72.
- Orvis, K. & Horn, S. 2000. Quaternary Glaciers and Climate on Cerro Chirripó, Costa Rica. *Quaternary International*, 54: 24-37.
- Quesada-Román, A. 2015. *Implicaciones en la gestión del riesgo de desastres y ambiente en el Valle Central en los últimos treinta años (1985-2015)*. Vigésimoprimer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Pavas, Costa Rica: CONARE, Programa Estado de la Nación, p. 1-39.
- Quesada-Román, A. 2016. *Peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del río General (Pérez Zeledón), Costa Rica*. Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Dissertação de mestrado, 157p.
- Quesada-Román, A. 2017. Geomorfología Fluvial e Inundaciones en la Cuenca Alta del Río General, Costa Rica. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40(2): 278-288.
- Quesada-Román, A. & Barrantes, G. 2017. Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 94: 1-12.
- Quesada-Román, A.; Moncada-López, R.; Paz-Tenorio, J.A.; Espinoza-Jaime, E.; Castellón-Meyrat, C. & Acosta-Galeano, N. 2018. Las investigaciones sobre movimientos de laderas en Costa Rica, Honduras, México y Nicaragua: enseñanzas desde la academia, las agencias de cooperación y las instituciones públicas. *Revista Geográfica de América Central*, 60: 17-59.
- Quesada-Román, A., & Calderón-Ramírez, G. 2018. Gestión del riesgo y política pública en el cantón de Desamparados, Costa Rica. *Uniciencia*, 32(2): 1-19.
- Quesada-Román, A. & Feoli-Boraschi, S. 2018. Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 61: 17-45.
- Simonov, Y. 1985. *Análisis morfométrico*. Moscú, Unión Soviética: Editorial Universidad Estatal de Moscú, Lomonosov (en ruso), 30p.
- Tricart, J. 1972. *Landforms of the humid tropics, forests and savannas*. London: Longmans, 306p.
- Veas-Ayala, N., Quesada-Román, A., Hidalgo, H., Alfaro, E. 2018. Humedales del Parque Nacional Chirripó, Costa Rica: características, relaciones geomorfológicas y escenarios de cambio climático. *Revista de Biología Tropical*, 66(4): 1436-1448.
- Verstappenn, H.T.H. 1983. *Applied geomorphology: geomorphological surveys for environmental development*. Enschede, Netherlands: ITC, 437p.