

Investigaciones geográficas

ISSN: 0188-4611

ISSN: 2448-7279

Instituto de Geografía, UNAM

Quesada Román, Adolfo; Zamorano Orozco, José Juan
Zonificación de procesos de ladera e inundaciones a partir de un
análisis morfométrico en la cuenca alta del río General, Costa Rica
Investigaciones geográficas, núm. 99, 2019, pp. 1-19
Instituto de Geografía, UNAM

DOI: <https://doi.org/10.14350/ig.59843>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56975600002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

Zonificación de procesos de ladera e inundaciones a partir de un análisis morfométrico en la cuenca alta del río General, Costa Rica

Hillslope processes and floods zoning from a morphometric analysis in the Upper General Basin, Costa Rica

Adolfo Quesada Román* y José Juan Zamorano Orozco**

Recibido: 22/01/2019. Aprobado: 06/05/2019. Publicado en línea: 18/06/2019.

Resumen. En países tropicales como Costa Rica, la incidencia de procesos de ladera e inundaciones están condicionados por las lluvias extraordinarias, el tipo de sustrato y su grado de meteorización, la sismicidad, la morfología y la inclinación del terreno. La recurrencia y magnitud de estos procesos afectan la cuenca alta del río General en términos de pérdidas económicas y muertes en sus comunidades. En este trabajo se realiza un análisis que calcula y analiza siete variables morfométricas (altimetría, inclinación del terreno, densidad de la disección, profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y erosión total). Mediante la integración espacial de las siete variables morfométricas se elaboran mapas de susceptibilidad a inundaciones y procesos de ladera. Tres categorías de susceptibilidad fueron definidas para cada peligro geomorfológico: máxima ocurrencia, ocurrencia frecuente y área potencial. Estos mapas son comparados espacialmente con la base de datos de desastres DesInventar. Un 85.15% de los reportes coinciden con las zonas identificadas como propensas a inundación y el 76.54% con las áreas susceptibles a procesos de ladera. El método morfométrico utilizado es de bajo costo, y además podría ser replicado en otras regiones tropicales y en países en vías de desarrollo como insumo de base para la toma de decisiones en la gestión del riesgo a desastres y el ordenamiento territorial.

Palabras clave: peligros geomorfológicos, geomorfometría, gestión del riesgo de desastres, Pérez Zeledón, América Central.

Abstract. In tropical countries as Costa Rica, mass movements and floods are triggered by intense precipitation events, weathering, rock control, seismicity, morphology, and slopes 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 Costa Rica. A morphometric analysis is performed to calculate and analyze seven variables (altimetry, slopes, dissection density, dissection profundity, relief energy, potential erosion, and total erosion). Within this analysis, five morphological regions were determined: mountain zone (Cordillera de Talamanca), floodplain, accumulative ramp (alluvial fans), minor mountain ranges (Fila Brunqueña), and mountain foothills covered by proluvial sediments. The mountain zone is intensely modeled with the presence of extensive weathering crusts on inclined and fractured slopes, which favors fluvial-gravitational processes. The minor mountain ranges serve as limit to the alluvial plain of the Pacuar and General River, that due to its sedimentary

* Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, Suiza. Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0001-6601-5254>. adolfo.quesada@unige.ch; adolfo.quesadaroman@ucr.ac.cr

** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. <https://orcid.org/0000-0002-9575-5734>. zamojj@yahoo.com.mx

lithology, steep slopes, the rain regime and changes of land use, favor the slope instability of this region. The mountain foothills have a plateau morphology with alluvial covers on the base of the slopes. The accumulative pluvial ramp is the transition between the mountain zone and the floodplain, its morphology is defined by the presence of alluvial fans superimposed and continuous as a glacis. Finally, the floodplain is defined by the seasonal and extraordinary flooding areas.

The slopes map is a first approximation of the gravitational dynamics. It helps to identify landforms associated with the fluvial erosive-accumulative action. The dissection density map showed zones of greater or lesser erosion, where the channels concentration are linked to rainy zones (>2500 mm annually), the existence of a poorly consolidated and altered substratum (weathering crusts), the presence of disjunctive structures, large areas without significant lithological changes, and a heterogeneous morphology. In addition, the dissection profundity makes evident the influence of the disjunctive structures in the erosive and accumulative relief dynamics. In this context it is necessary to consider that the valleys vertical growth causes slopes instability and favor gravitational processes.

The relief energy integrates fluvial action (dissection density and dissection profundity) and slopes in its analysis. These three elements are closely linked to mass wasting. It also considers lithology, the influence of weathering, the faults activity, earthquakes and precipitation. On the other hand, potential erosion locates indirectly areas with denudation susceptibility, linked to factors such as specific lithological characteristics, topographic contrasts, morphological variety, hydroclimatic conditions, vegetation cover, and even land use changes. In the case of total erosion, areas with greater erodibility and with older morphologies were distinguished through the terrain roughness, and the role played by variables such as lithology age, disjunctive

structures, the past climate (glaciations), the current rainfall patterns, and slopes are inferred.

To produce the flood and hillslope processes susceptibility maps, each morphometric variables result were grouped into three ranges (high, medium and low), which allowed a cross analysis. The territories where up to two morphometric indicators coincided, were considered as potential areas; the areas where three indexes were overcome, were classified as frequent occurrence areas, and the spaces classified as maximum occurrence were those where four or five variables were present. These criteria were applied for hillslope processes as well as for floods.

These maps are spatially compared with the disaster database DesInventar where 85.15% of the reports coincide with the zones identified as prone to flooding and 76.54% with susceptible areas to hillslope processes. This method can be easily replicated since only the contours lines and rivers are used, the measurements are simple and can be made from a Geographical Information System (GIS) in its entirety. This condition speeds up the digitization times of fluvial channels, the processing of information, the systematization of the procedure, and the practicality to make different measurements as well as to take precise data of contour lines and fluvial data.

The procedure can be implemented for watersheds territorial management and political-administrative units at local and regional scales. Geomorphometry is a practical tool for mitigating disaster risk by determining floods and hillslope processes susceptible areas. The morphometric method proves to be a low-cost method that could be replicated in other tropical regions and developing countries as a baseline input for decision making in disaster risk management and land use planning.

Keywords: geomorphological hazards, geomorphometry, disaster risk reduction, Pérez Zeledón, Central America.

INTRODUCCIÓN

El territorio analizado se caracteriza por la heterogeneidad de su relieve, un régimen pluvial que supera los 2500 mm anuales, así como bruscos cambios en altitud y pendientes abruptas (Quesada-Román, 2016). El factor condicionante para las mayores inundaciones y procesos de ladera en el territorio son los ciclones tropicales del Mar Caribe y el océano Pacífico; entre los eventos más recordados por sus cuantiosos daños y muertes están los relacionados a los huracanes Joan en 1988 y César durante 1996, así como las tormentas tropicales Alma en 2008 y Nate en 2017 (Alfaro, Quesada-Román y Solano, 2010; LA RED, 2016).

El área de estudio se encuentra ubicada en su mayoría en la provincia de San José, en el cantón de Pérez Zeledón, aunque también abarca pequeñas porciones de la provincia de Puntarenas, Cartago y Limón. Dicho territorio se localiza entre las coordenadas geográficas: $9^{\circ} 12' 46'' - 9^{\circ} 35' 03''$ Latitud Norte y $83^{\circ} 28' 47'' - 83^{\circ} 49' 07''$ Longitud Oeste (Figura 1).

La cuenca alta del río General se encuentra en la zona centro-sur de Costa Rica en la vertiente pacífica, y está integrada por las subcuenca Buena-vista, Chirripó Pacífico, Peñas Blancas y San Pedro. Todas ellas confluyen en el río más grande del país, el Téraba. Las elevaciones del área de estudio varían entre los 320 y 3820 msnm, desde el Cerro Chirripó hasta la llanura aluvial del río General.

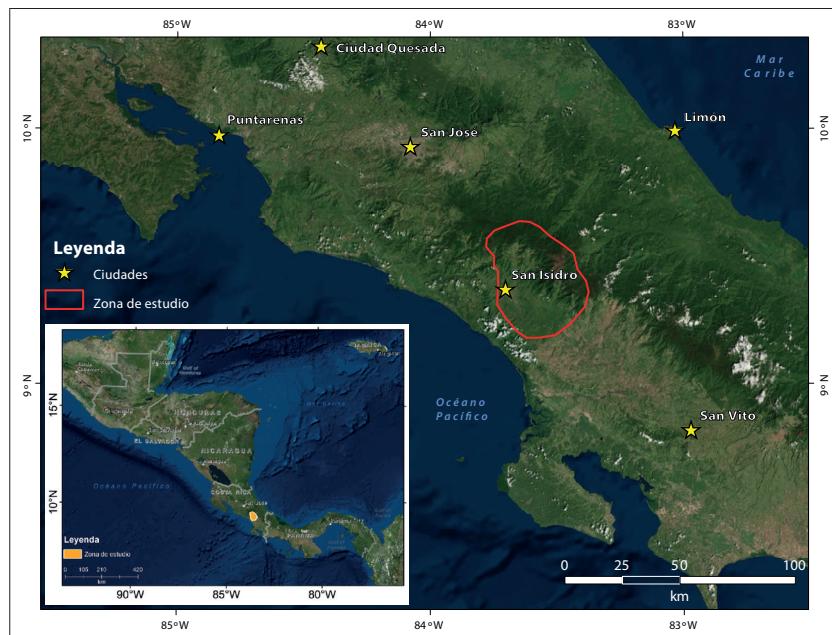


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Una de las características de este territorio es su variada litología, el sector septentrional, en particular la Cordillera de Talamanca, la cual está integrada de rocas volcánicas extrusivas (brechas, andesitas y depósitos de flujos piroclásticos) e intrusivas (granitoides con facies gabroides) del Mioceno. El piedemonte es resultado de la sobreposición de secuencias de fanglomerados que definen una morfología de abanico (Plio-Pleistoceno). El cauce del río General ocupa una llanura aluvial amplia y de fondo plano (Cuaternario). La Fila Brunqueña define el límite sur de la zona de estudio y se trata de un conjunto montañoso menor, de composición sedimentaria (lutitas y areniscas) del Oligoceno-Mioceno (Denyer y Alvarado, 2007).

La precipitación, en este territorio, condiciona la evolución del relieve y es de mayo a noviembre cuando su influencia es mayor. En este sentido, los datos promedio registrados en las estaciones meteorológicas cercanas (Repunta, Coopeagri y Chirripó), son de 2500 mm anuales, no obstante, en las montañas con altitudes mayores a los 1000 msnm, con facilidad superan los 4000 mm de lluvia. El histograma que resulta de estos registros es el típico de las zonas tropicales húmedas, con lluvias intensas relacionadas con sistemas de baja presión

y ciclones tropicales entre agosto, septiembre y octubre (IMN, 2009).

Por otro lado, la afectación ciclónica es importante en esta zona, de manera directa se ha visto perjudicada por el huracán Joan en 1988 y César en 1996, las tormentas tropicales Alma en 2008 y Nate en 2017, eventos que generaron cuantiosos daños, e incluso muertes (Quesada-Román y Zamorano-Orozco, 2018b). Estos episodios extraordinarios de precipitación son los responsables de las inundaciones y de numerosos movimientos en masa. A esto se suma el carácter sismogenerador asociado a las fallas activas de Pangolín, Buenavista y División, todas ellas con historial sísmico reciente y a las que se les atribuye el devastador sismo de Buenavista en 1983 (Mora y Peraldo, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo tiene como punto de partida el análisis morfométrico, con el objetivo de establecer la intensidad de procesos exógenos y su vínculo con la dinámica del relieve, a partir del cálculo y análisis matemático de las formas terrestres (Goudie, 2004). Además, se define como un importante

componente del análisis del terreno y el modelado de la superficie terrestre (Huggett, 2007). Este tipo de mapas son muy útiles en estudios de evolución de laderas, evaluación de erosión, así como de riesgos (Peña-Monné, 1997).

Los métodos morfométricos utilizados siguen los criterios de Simonov (1985), Lugo (1988) y Zamorano (1990). Los parámetros elegidos en este análisis son: altimetría, inclinación del terreno, densidad de la disección, profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y erosión total. La interpretación integral de este tipo de cartografía, permitió entender los mecanismos de ocurrencia de inundaciones y procesos de ladera, y, del mismo modo, zonificar los terrenos que favorecen su existencia.

Para establecer la susceptibilidad a procesos de ladera e inundaciones se sobrepusieron, a través de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.3), los siguientes mapas morfométricos: densidad de la disección, profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y erosión total. En cada uno de ellos los datos se agruparon en tres rangos (altos, medio y bajos), proceder que permitió el análisis del cruce entre variables. De esta manera, en la medida que los valores bajos coinciden en uno o varios sectores de la cartografía síntesis, se hacen evidentes los terrenos subhorizontales o deprimidos y, por tanto, es posible deducir la dinámica asociada, inundaciones en este caso.

Por otro lado, los polígonos que representan valores altos ponen de manifiesto los terrenos montañosos, y entre más cruces de información coincidan, la morfología es más heterogénea, las laderas son más abruptas y la dinámica que se deduce para estas áreas es la gravitacional. Los datos intermedios, manifiestan una aparente estabilidad del terreno (Figura 2). Este tipo de información permite conocer la espacialidad de los procesos moderadores a partir de una zonificación precisa, lo que facilita una planeación objetiva del trabajo campo y la elaboración de la cartografía geomorfológica detallada.

Los territorios en donde coincidían hasta dos indicadores morfométricos se consideraron áreas potenciales; las zonas donde llegaban a sobreponerse tres índices se clasificaron de ocurrencia frecuente

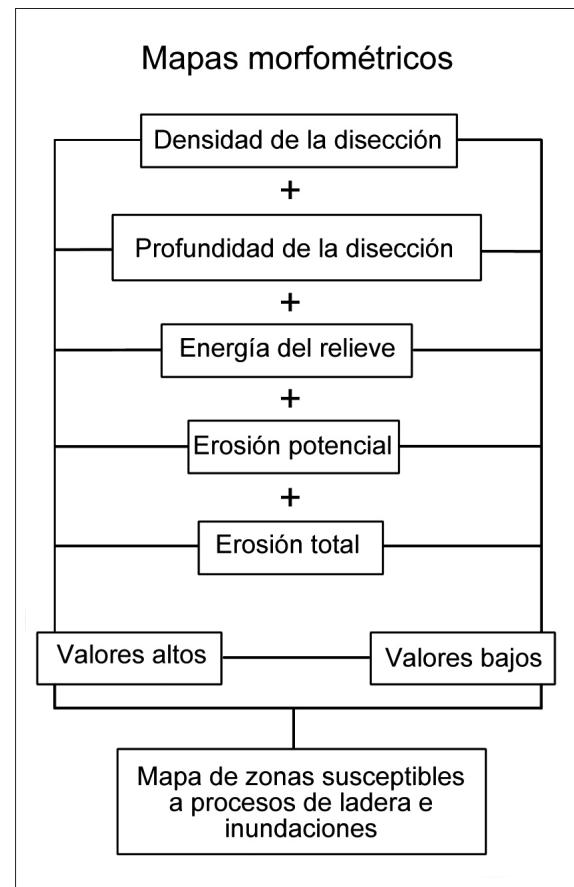


Figura 2. Procedimiento utilizado para obtener la zonificación de procesos de ladera e inundaciones en la cuenca alta del río General por métodos indirectos.

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.

Por último, fue posible comparar las áreas obtenidas como de ocurrencia de procesos gravitacionales e inundaciones con los eventos registrados en la base de datos de desastres DesInventar para Costa Rica entre 1970 y 2015 (LA RED, 2016).

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO

Altimetría

Este documento simplifica la información topográfica, muestra la espacialidad y características de los

contrastos altitudinales. Cuando esta información se sobrepone con el mapa de inclinación del terreno y se analiza junto con información geológica, es posible establecer unidades geomorfológicas; cada una de ellas define territorios similares en cuanto a génesis, morfología y dinámica. De este proceso resultaron las siguientes regiones morfológicas: zona de montaña (Cordillera de Talamanca), sierras menores (Fila Brunqueña), llanura aluvial, rampa acumulativa proluvial y estribaciones montañosas cubiertas por detritos proluviales (Figura 3).

La zona de montaña se presenta intensamente modelada, y en su expresión ha tenido que ver la existencia de potentes cortezas de intemperismo sobre laderas inclinadas y fracturadas, lo que favorece la existencia de procesos fluvio-gravitacionales. Las sierras menores sirven de límite

a la planicie aluvial del río Pacuar y General, el carácter sedimentario, la falta de consolidación de los materiales, la existencia de laderas con fuerte inclinación, el régimen pluvial y cambios de uso de la tierra, los que convierten en susceptibles a estos terrenos a desarrollar procesos de ladera. Las estribaciones montañosas presentan una cima plana, y definen una morfología de mesetas con cubiertas aluviales sobre la base de las laderas. La rampa acumulativa proluvial es la transición entre el sector montañoso y la parte baja, su morfología está definida por la presencia de abanicos aluviales sobrepuertos y continuos a manera de glacis. Por último, en la llanura aluvial se reconocen el área de inundación estacional, la más baja, y la extraordinaria con expresión en gradería por la existencia de terrazas.

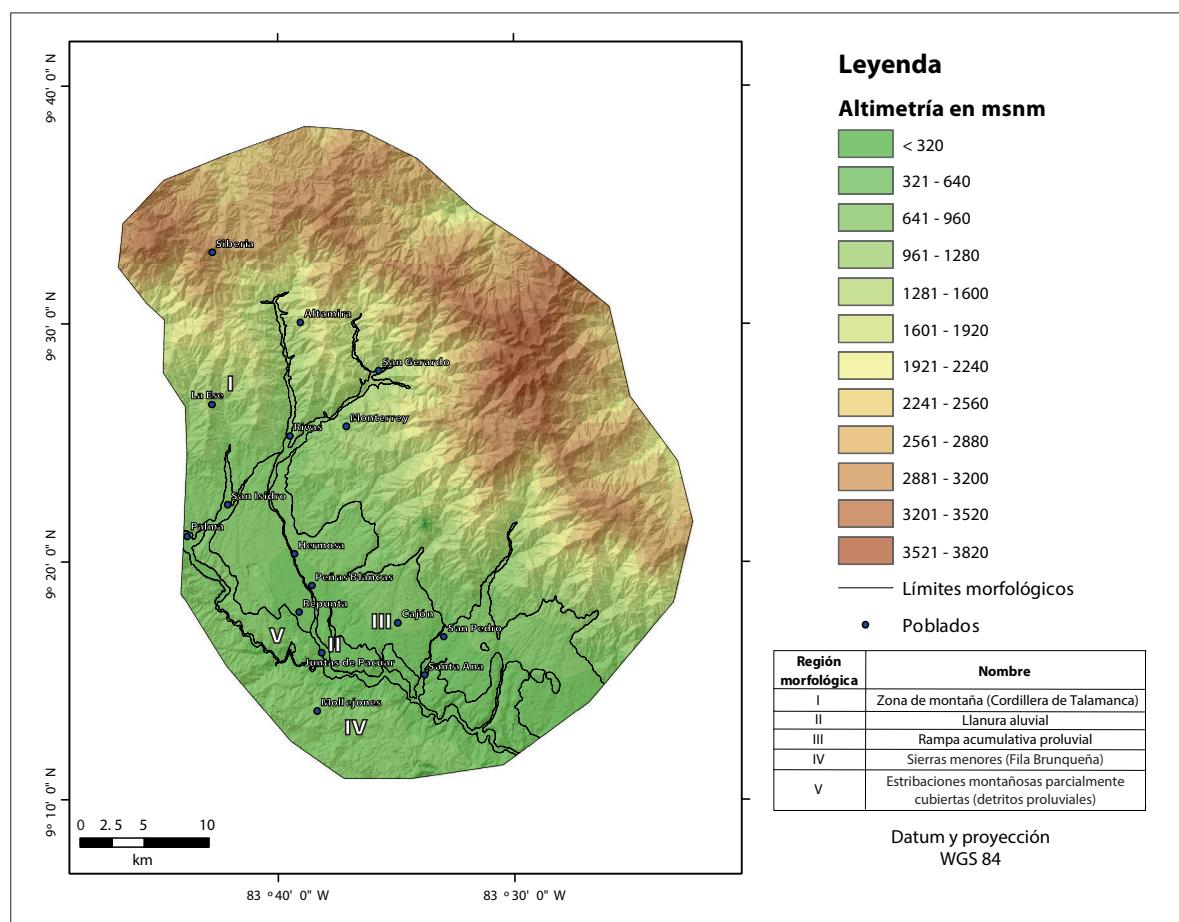


Figura 3. Mapa altimétrico y regiones geomorfológicas. Fuente: elaboración propia.

Inclinación del terreno

Esta variable tiene como objetivo reconocer terrenos potenciales a desarrollar procesos de ladera e inundaciones, al estar vinculados con la gravedad, la inclinación del terreno es de importancia para su desarrollo. De esta manera se pueden reconocer los rangos críticos y su concordancia con áreas estables e inestables. A su vez, se busca detectar la conexión entre la pendiente y la predisposición a procesos erosivos y acumulativos (Figura 4).

La zona de montaña presenta laderas con inclinaciones $>26^\circ$ y se caracterizan por ser superficies inestables, sobre todo en las cabeceras de ríos Chirripó Pacífico y Buenavista, en donde la pendiente en interacción con la precipitación, litología y estructuras disyuntivas, favorecen y magnifican los

procesos de ladera. Por otro lado, los valores $>15^\circ$ son característicos de la llanura aluvial y la rampa acumulativa proluvial, en ellas, además de existir una dinámica de deposición sobre la erosiva, existen inundaciones en períodos tanto en la temporada de lluvias como en los períodos extraordinarios. Con respecto a las sierras menores, su inclinación es heterogénea y responde a una litología variada que favorece la incisión de valles.

Regiones morfológicas

El análisis de relieve en general se hace a partir de territorios comunes en cuanto a origen, dinámica, morfología, evolución y edad relativa. En este marco la zona de montaña (Cordillera de Talamanca) se considera una región escarpada en donde la altitud

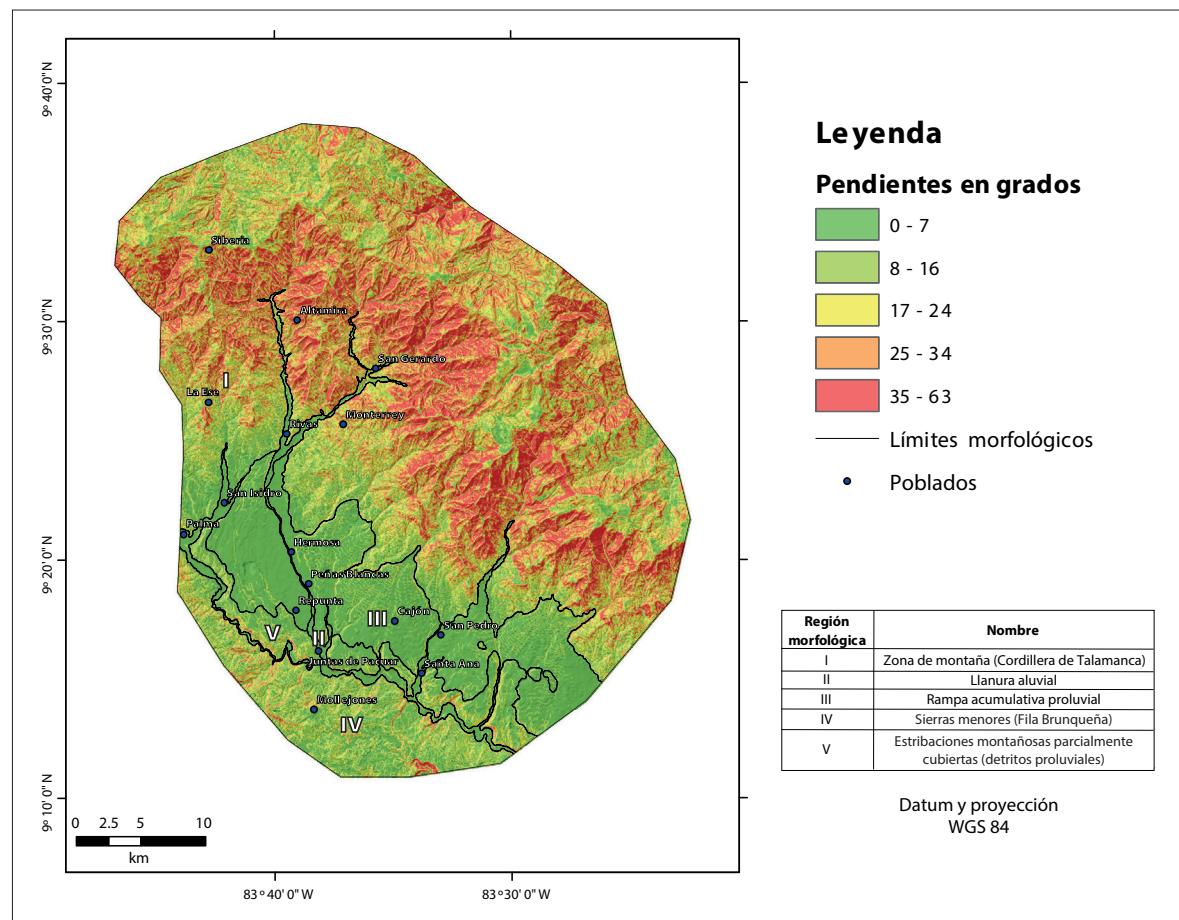


Figura 4. Inclinación del terreno. Elaboración propia.

varía de 640 a 3820 msnm; su valor máximo corresponde a la cima del Cerro Chirripó (el punto más alto del país).

La zona de montaña se orienta de NW-SE, ocupa el sector centro-norte de la zona de estudio, y a nivel regional representan una pequeña porción del sector SE de la Cordillera de Talamanca, uno de los sistemas montañosos más importantes de Costa Rica. La morfología característica es de cimas agudas y vertientes heterogéneas en longitud, geometría y orientación. Otro de sus rasgos es la presencia de marcados desniveles que definen laderas escarpadas y profundos valles excavados en granitos miocénicos, sustrato que predomina en toda la estructura.

Por último, hay que mencionar que, por encima de los 3500 msnm, existen rasgos morfológicos de origen glaciar desarrollados durante el Pleistoceno y que continuaron hasta 12 000-10 000 A.P. (Veas, Quesada-Román, Hidalgo y Alfaro, 2018). En estos terrenos el relieve característico es de circos y valles glaciares, morrenas (de fondo, laterales, frontales y colgadas), superficies pulidas, estriadas, aborregadas o con morfología de lomo de ballena y tarns (lagos) (Quesada-Román y Zamorano-Orozco, 2018a).

Las sierras menores (Fila Brunqueña), de origen sedimentario, tienen su comienzo en períodos de sedimentación marino-costeros durante el Oligoceno-Mioceno (Denyer y Alvarado, 2007). Esta estructura es de poca altitud (320 a 960 msnm), no obstante, existen desniveles profundos y escarpados que forman parte de numerosos valles fluviales; de todos ellos, destacan el Pacuar y el General. Los ríos que tienen desarrollo en esta unidad presentan un patrón dendrítico muy denso, lo que hace evidente un proceso erosivo intenso que llega a magnificarse como respuesta al cambio del uso de la tierra.

La llanura aluvial representa la región más deprimida de la zona de estudio y se dispone entre las cotas de 320-1920 msnm e inicia en la zona de montaña, como un lecho amplio que integra los valles intermontanos, conforme el cauce se desplaza río abajo incrementa su amplitud hasta adoptar una morfología subhorizontal en donde la inclinación es mínima. Estas condiciones persisten en la porción sur de la zona de estudio y es la prin-

cipal característica de los ríos Buenavista, Chirripó Pacífico, Pacuar y General.

La llanura aluvial se desarrolla en diferentes sustratos, tomando este hecho se ha dividido en tres segmentos; el primero, se ubica por encima de la cota de los 960 msnm, es estrecho y se emplaza sobre granitos con facies gabroides del Mioceno que se intercalan con tobas, areniscas, brechas e ignimbritas. El segundo sector se localiza entre los 600 y 960 msnm y en él predominan los detríticos, materiales que se asocian con extensos abanicos proluviales de edad Plio-Pleistoceno que sobre-yan a sedimentos continentales y de transición marina-costera del Cuaternario. Hay que mencionar que la susceptibilidad del material a la erosión fluvial favorece el desarrollo de las planicies fluviales en la horizontal (amplitud). La última región asociada a las planicies aluviales se dispone entre 320-600 msnm, en este sector afloran areniscas, conglomerados y lutitas de miocénicas (Denyer y Alvarado, 2007). Si bien el sustrato es competente a la erosión fluvial, su papel es secundario, ya que el desarrollo y disposición de las planicies aluviales está controlado por el trazo de los sistemas disyuntivos y la disposición de los ejes neotectónicos de fracturamiento.

La rampa acumulativa proluvial es una superficie poco inclinada, inicia a una altitud de 1600 msnm y su frontera más distal termina a los 320 msnm. Se ha desarrollado a partir de la coalición de abanicos aluviales de grandes dimensiones, en la mayoría de los casos no es posible reconocer de manera individual los límites de cada estructura, la orientación preferencial de todo el conjunto es NW-SE. Los detritos que la constituyen son relativamente recientes y poco consolidados; por un lado, se tienen conglomerados y areniscas fluvio-continentales del Plio-Pleistoceno como el sustrato principal en el sector NW, mientras que en el SE son sedimentos continentales y de transición marina-costera (Denyer y Alvarado, 2007). La existencia de una morfología conservada en cuatro de las grandes estructuras confirma, para ellas, una edad reciente.

Las estribaciones montañosas parcialmente cubiertas por detritos proluviales se presentan a manera de alveolos independientes y se localizan al

centro-sur del área de estudio, se orientan de NW a SE y se constituyen de detritos del Mioceno y del Plio-Pleistoceno (Denyer y Alvarado, 2007). La altitud varía de 320 a 640 msnm; no obstante, algunas de ellas son > 700 msnm. Esta unidad tiene su origen en la sobreposición de capas de detritos vinculados con antiguos abanicos aluviales; esta estructura es el basamento donde sobreyaace la rampa acumulativa proluvial. La morfología que predomina a lo largo de la frontera con la llanura aluvial es abrupta, a manera de frente montañoso, mientras, en sentido opuesto, hacia el norte, el contacto con la unidad III ocurre en forma de cubierta o manto, lo que favorece la existencia de una inclinación del terreno de 7° (Figura 5).

Densidad de la disección

A través de esta cartografía se hacen evidentes los territorios con mayor intensidad erosiva fluvial, y para ello se toma en cuenta la concentración de cauces en un área predeterminada. El primer paso en la elaboración de este mapa consistió en marcar

a detalle la red fluvial sobre un mapa topográfico (1:25 000), y después se midió la longitud de los cauces con un curvímetro convencional utilizando una malla de captura equivalente a 1 km². Los valores obtenidos en cada superficie fueron interpolados usando el método IDW (Inverse Distance Weighting) de ArcGIS 10.3. De esta manera se obtuvieron siete mapas, se presenta el que refleja la mejor distribución espacial de acuerdo con las características del territorio (Figura 6).

Las valores altos (7 a 11 km/km²) se localizan en la zona de montaña, en este territorio existe una morfología heterogénea en cuanto a longitud, orientación, geometría e inclinación del terreno. Estas características morfológicas, sumadas a una importante precipitación, favorecen la existencia de densas redes fluviales que definen patrones detriticos muy densos y valles angostos y profundos. Los valores, que varían entre 5 y 7 km/km², tienen una amplia distribución en las laderas montañosas medias y bajas, así como en las rampas periféricas a la planicie fluvial e incluso en ella, siguiendo la

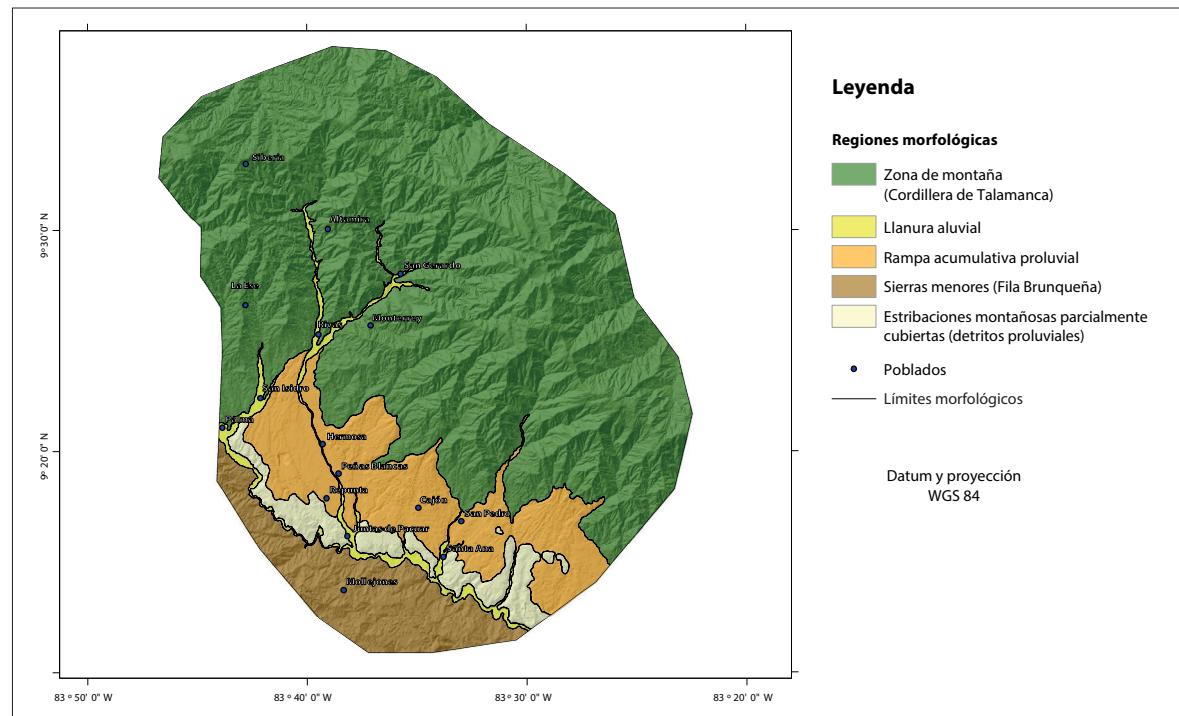


Figura 5. Regiones morfológicas. Fuente: elaboración propia.

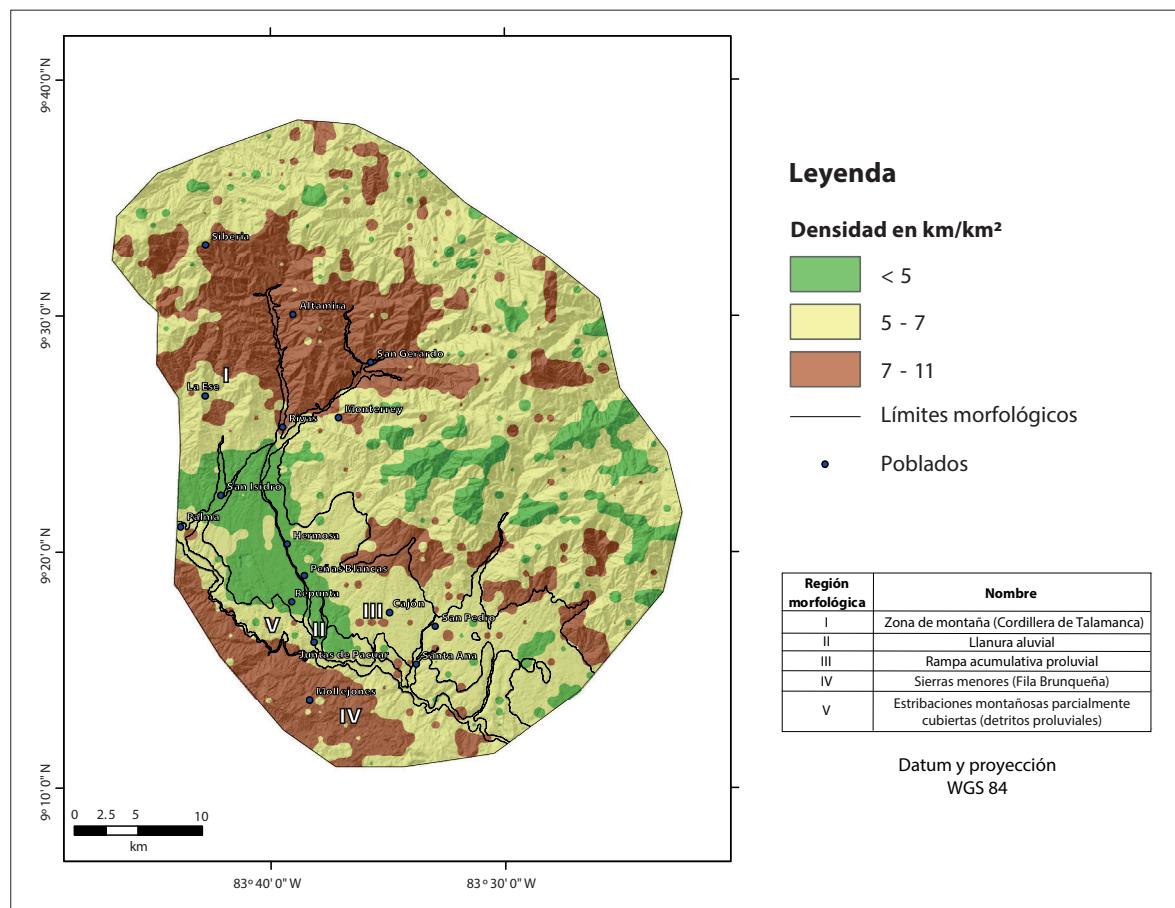


Figura 6. Densidad de la disección. Fuente: elaboración propia.

inclinación regional del terreno. Los valores < 5 km/km² hacen evidentes terrenos ligeramente inclinados, o subhorizontales, en donde la dinámica que predomina es acumulativa sobre la erosiva. Estos índices también son característicos de cimas interfluviales amplias, en donde la morfología tiene características ya mencionadas.

Profundidad de la disección

Por medio de esta variable se conocen las zonas donde la erosión ha incidido con mayor intensidad en el relieve (valles profundos), el corte vertical de los ríos está en función del tipo de roca, la existencia de fallas, la inclinación del terreno y de la precipitación (Lugo, 1988).

La información se obtuvo al medir la distancia entre el talweg y la ruptura de pendiente más

cercana al borde inferior del valle. La lectura se realizó utilizando la base topográfica y la malla de muestreo anterior. La interpolación se realizó por el método Natural Neighbor (ArcGIS 10) y el resultado se presenta en la Figura 7.

En general, la profundidad de la disección está condicionada por la competencia del material a la erosión, la inclinación del terreno, la presencia de estructuras de debilidad (fallas), rupturas de pendiente y una precipitación importante.

Los valles más profundos (> 60 m) han sido excavados en sustratos granitoides y gabrodes de la zona de montaña, en donde la fuerte inclinación del terreno y la existencia de densas redes de fallas ha favorecido la erosión vertical de los ríos. Esta dinámica es característica de cabeceras fluviales y de terrenos cercanos que integran la vertiente

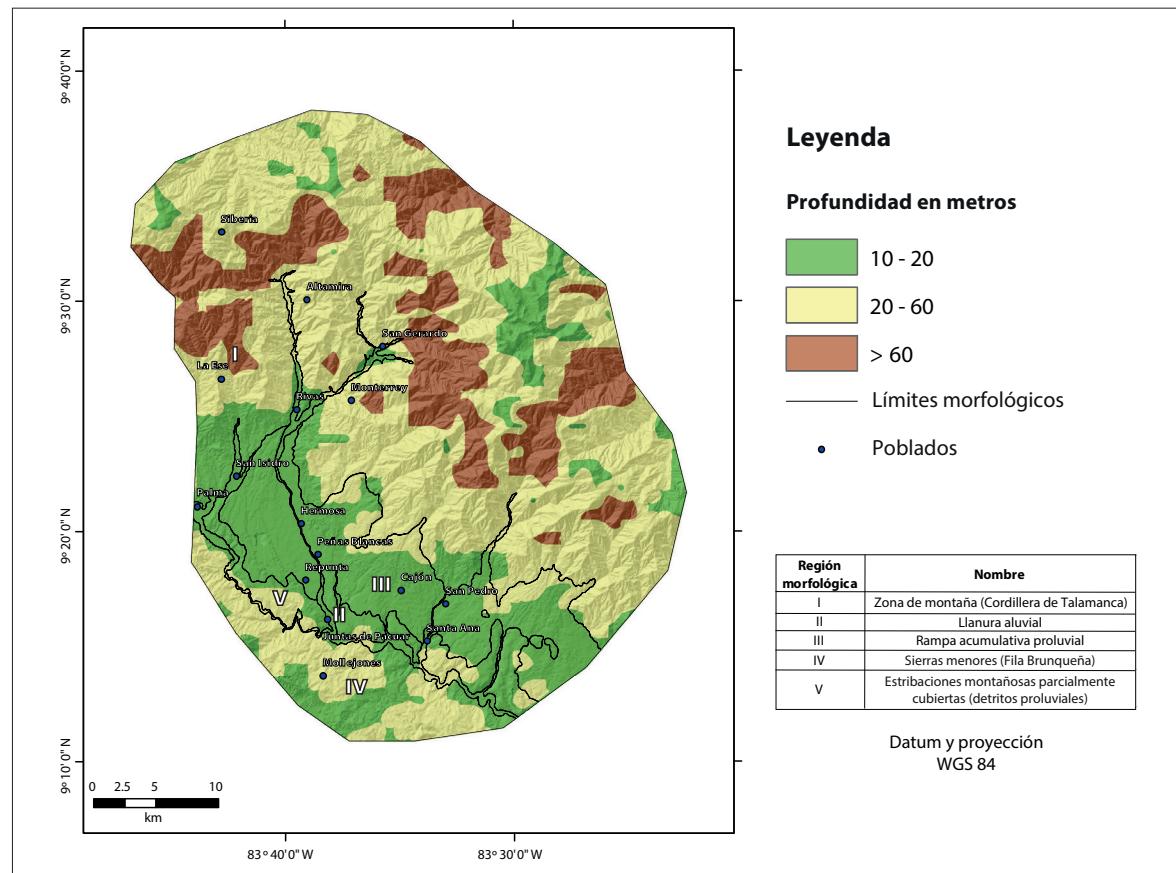


Figura 7. Profundidad de la disección. Fuente: elaboración propia.

pacífica, en ambos casos el área que ocupan es poco significativa (Figura 6).

Los valles con profundidades entre 20-60 m se presentan en la mayor parte del relieve montañoso y se excluyen rampas acumulativas y la llanura aluvial, que, por sus características morfológicas, no favorecen el desarrollo de cauces profundos. Los valores <20 m son característicos de terrenos ligeramente inclinados o subhorizontales, como las rampas acumulativas, las llanuras de inundación y los terrenos cumbrales. En todos ellos la dinámica que predomina es deposicional.

Energía del relieve

Este mapa expresa la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena; por tanto, valores altos de energía pueden asociarse a zonas de

mayor actividad tectónica como acumulación de materiales volcánicos o movimientos tectónicos de ascenso asociado a la actividad de las fallas, de esta manera, es posible conocer el potencial erosivo al que puede estar sujeto el relieve (Lugo, 1988). Los datos se obtienen de la resta del valor altitudinal mínimo al máximo, en una superficie de un km^2 a escala 1: 25,000. De esta manera, se obtiene una matriz de puntos que fue interpolada por el método Kriging (ArcGIS 10.3).

Los valores <60 m se localizan en terrenos donde los contrastes altitudinales no son representativos, como en la llanura aluvial, las rampas acumulativas y sectores de las sierras menores, en estos relieves la dinámica acumulativa esta sobre la erosiva. El rango de energía del relieve de mayor distribución es el de 60-400 m, se presenta como una zona de

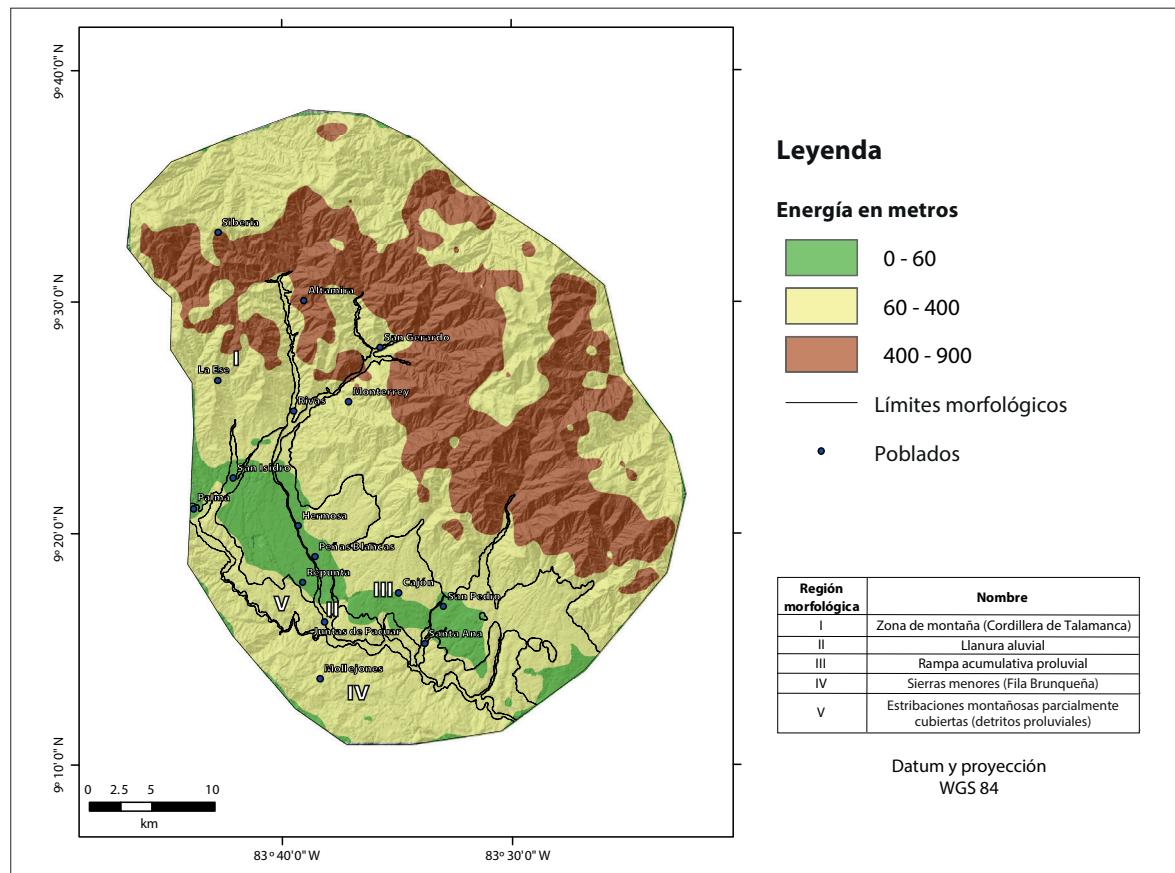


Figura 8. Energía del relieve. Fuente: elaboración propia.

transición, entre las planicies aluviales y las cimas más altas (Figura 8). La dinámica que caracteriza este territorio es mixta (deposición–erosión), responde a la existencia de un relieve de contrastes altitudinales, con vertientes heterogéneas en longitud, geometría y, alternancia de afloramientos rocosos y detriticos.

Los desniveles de 400 a 900 m se restringen a la zona cumbral y a las laderas altas de la vertiente pacífica, sector donde se localizan las cabeceras más importantes de los ríos de la región. Al interior de estas formas existen numerosos saltos de cabecera activos (erosión remontante), que han desarrollado en conjunto una morfología de desniveles a manera de gradería. Las precipitaciones intensas son comunes en este sector (cyclónicas) y a ellas se asocia la existencia de valles profundos y laderas escarpadas.

Erosión potencial

El mapa que se presenta muestra el estado actual de la disección, así como los terrenos susceptibles a ser erosionados. Su elaboración inició con el cálculo de la inclinación de la ladera más larga en un área de 1 km², y multiplicar este valor por el índice de densidad de la disección correspondiente (Lugo, 1988). Los valores resultantes fueron georreferenciados con el fin de interpolarlos mediante el método Natural Neighbor (ArcGIS 10.3).

Los valores que se obtuvieron fueron de 0 a 7.2 km/km², y con el fin de facilitar su análisis se establecieron tres rangos: 4.4-7.2 km/km², 1.5-4.3 km/km² y 0-1.4 km/km², y se analizan tomando en cuenta las unidades morfológicas (Figura 9).

Los valores <1.4 km/km² son representativos de la llanura aluvial y en los abanicos aluviales

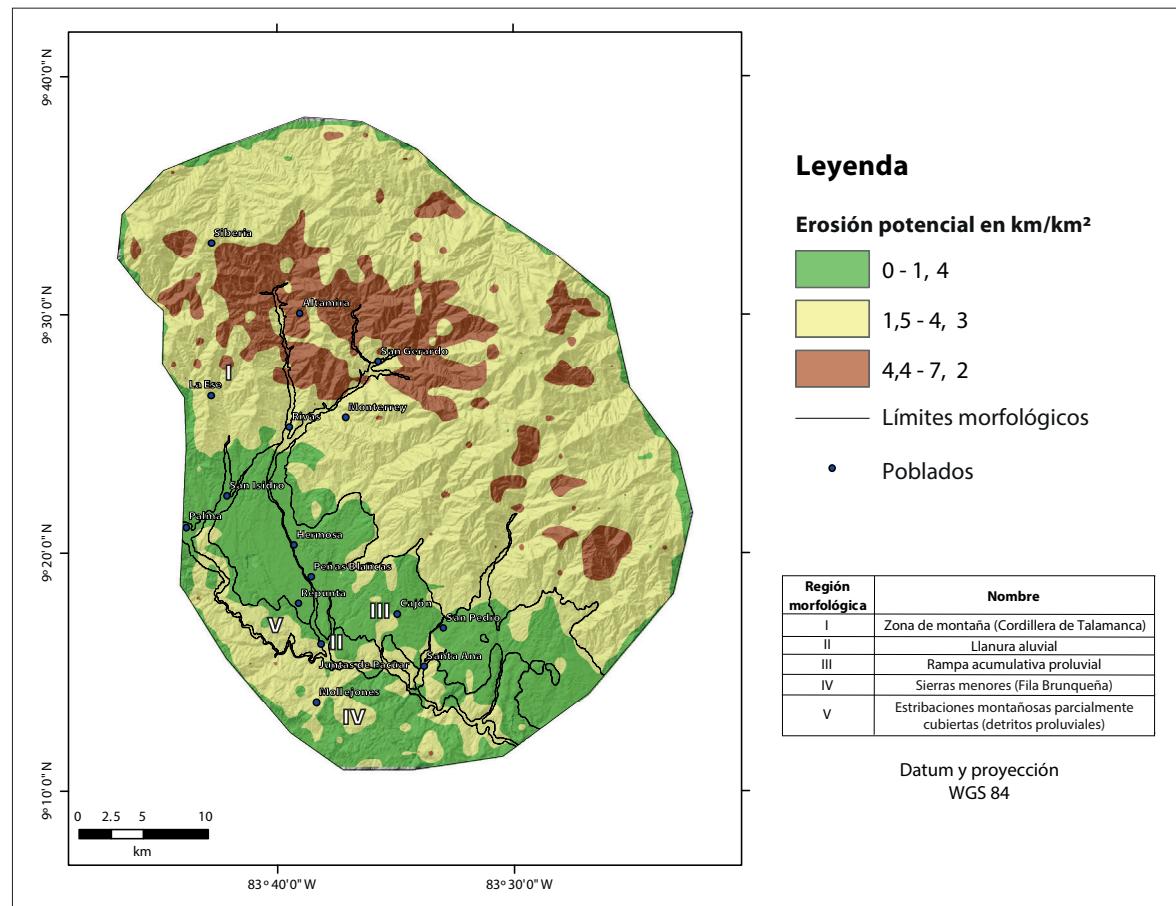


Figura 9. Erosión potencial. Fuente: elaboración propia.

y al SE, en algunos sectores de la rampa acumulativa proluvial. Estos relieves se caracterizan por presentar una inclinación que no favorece el desarrollo de cauces y, por lo tanto, la dinámica fluvio-gravitacional; no obstante, estos terrenos están constituidos por materiales competentes al transporte (detritos de compactación media o baja).

Los valores entre 1.5 y 4.3 km/km², además de mostrar una dinámica mixta entre la deposición y la erosión, se localizan en buena medida en las laderas que descienden de la zona de montaña hacia la rampa acumulativa proluvial y en algunas divisorias de aguas en la montaña. Este territorio es heterogéneo en morfología, inclinación, alternancia de afloramientos rocosos y detriticos. Estas características,

sumadas a la existencia de precipitaciones intensas, en particular las ciclónicas, hacen a estos terrenos vulnerables a los procesos fluvio-gravitacional.

Los valores entre 4.4 y 7.2 km/km² están presentes en los terrenos más abruptos, en las cimas de las montañas del NW y en las laderas altas que integran la vertiente pacífica. Las condiciones morfológicas y de precipitación son similares a las mencionadas en el párrafo anterior, excepto la pendiente que, al ser mayor en esta zona, favorece la intensidad y magnitud de procesos de ladera y acarreo fluvial hacia las partes bajas.

Erosión total

Por medio de este mapa se pueden inferir aquellos terrenos que han tenido más tiempo expuestos al

intemperismo y a la posterior actividad erosiva fluvial (gravitacional o incluso glacial). El punto de partida es la expresión, la densidad de curvas de nivel y la medición de la longitud de cada una de ellas usando la malla inicial de muestreo de 1 km^2 , y a través de la herramienta Line Density, los datos obtenidos se interpolaron través de Natural Neighbor (ArcGIS 10.3).

El mapa de erosión total hace evidentes los terrenos en donde los procesos erosivos han sido persistentes e intensos, de igual manera, es posible reconocer los relieves recientes asociados a la deposición (llanuras aluviales y rampas acumulativas). Los datos que se obtuvieron fueron entre 0 y 45 km/km^2 y con ellos se integraron los siguientes rangos: 0-13 km/km^2 , 14-22 km/km^2 y 23-45 km/km^2 (Figura 10).

Los índices $<11 \text{ km}/\text{km}^2$ se localizan en relieves de formación reciente y de origen exógeno acumulativo (abanicos y llanuras aluviales). Los valores entre 12 y 25 km/km^2 a manera de una franja de transición entre la zona de montaña y los relieves acumulativos. El sustrato donde se emplazan estos valores es de ígneo intrusivo (granitoides), cuya morfología se ha suavizado por la existencia y desarrollo de cortezas de intemperismo. El último rango (26-45 km/km^2) se presenta en la zona cumbral y en las laderas altas de la vertiente pacífica y caribeña, en donde predominan los terrenos rocosos abruptos, lo que dio como resultado una morfología variada. Hay que mencionar que las cubiertas detriticas (cortezas de intemperismo) no son representativas, debido a que fueron removidas por procesos fluviales, gravitacionales y glaciares.

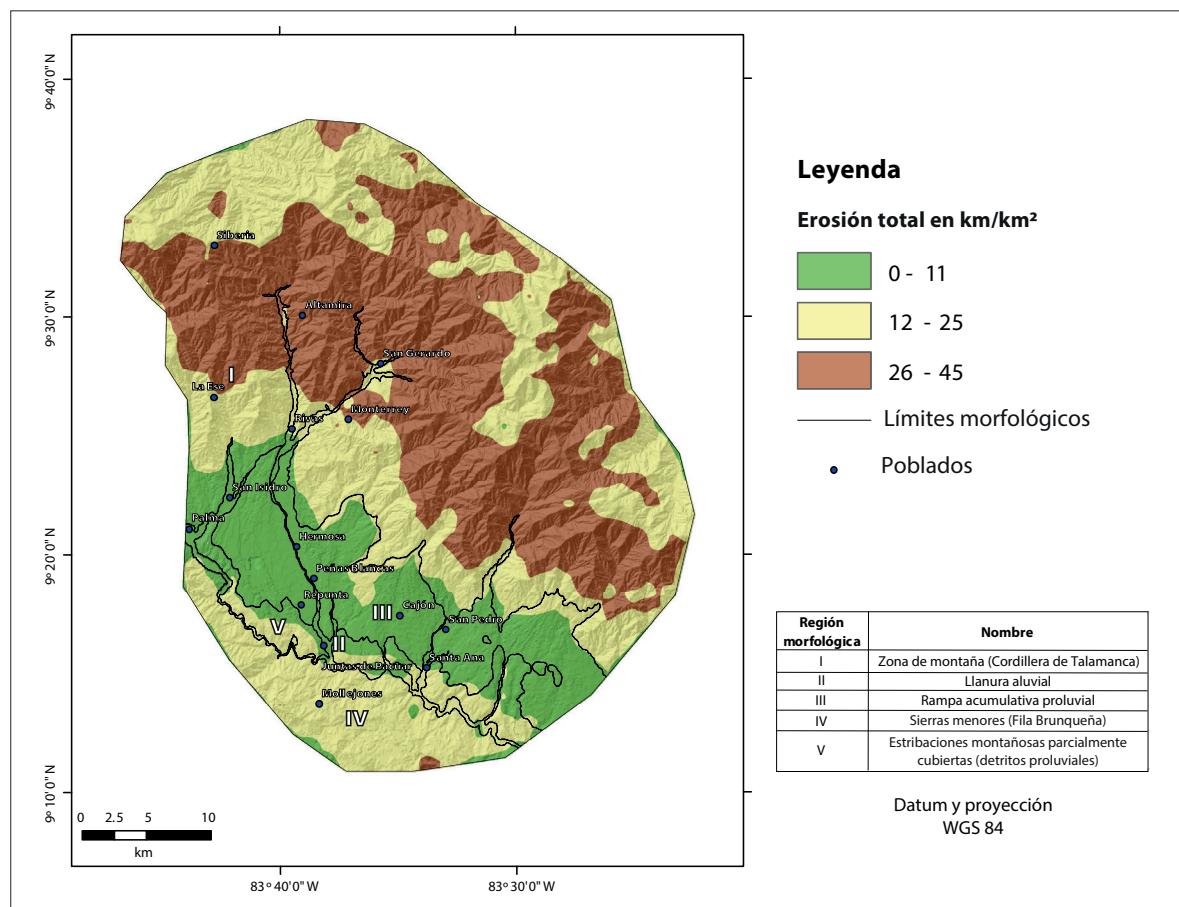


Figura 10. Erosión total. Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Zonificación de áreas susceptibles a procesos de ladera e inundaciones

Los métodos morfométricos son sencillos de elaborar, económicos y con resultados en poco tiempo, característica que cobra relevancia cuando se tiene como objetivo identificar territorios susceptibles a desarrollar peligros geomorfológicos, como la erosión, la colmatación, la remoción en masa y las inundaciones.

La zonificación que se presenta resulta de la integración espacial de los valores morfométricos (densidad y profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y total). El proceso de elaboración consiste en sobreponer los índices numéricos más bajos y altos de cada mapa

morfométrico para obtener uno nuevo usando la herramienta *Union* (ArcGIS 10.3). El mapa que resultó se analizó con la topografía a fin de revisar los resultados con el relieve, en ese proceso fue determinante el conocimiento adquirido en los trabajos de campo y la interpretación de fotografías aéreas (Figura 11).

El análisis espacial de los datos morfométricos, en el marco de las regiones morfológicas, permitió elaborar la zonificación de procesos de ladera e inundaciones; este método se enriquece con el trabajo de campo e información geomorfológica.

Asociación con los procesos de ladera

La zonificación de los procesos de ladera está muy bien definida, son característicos del relieve montañoso de la Cordillera de Talamanca, unidades que

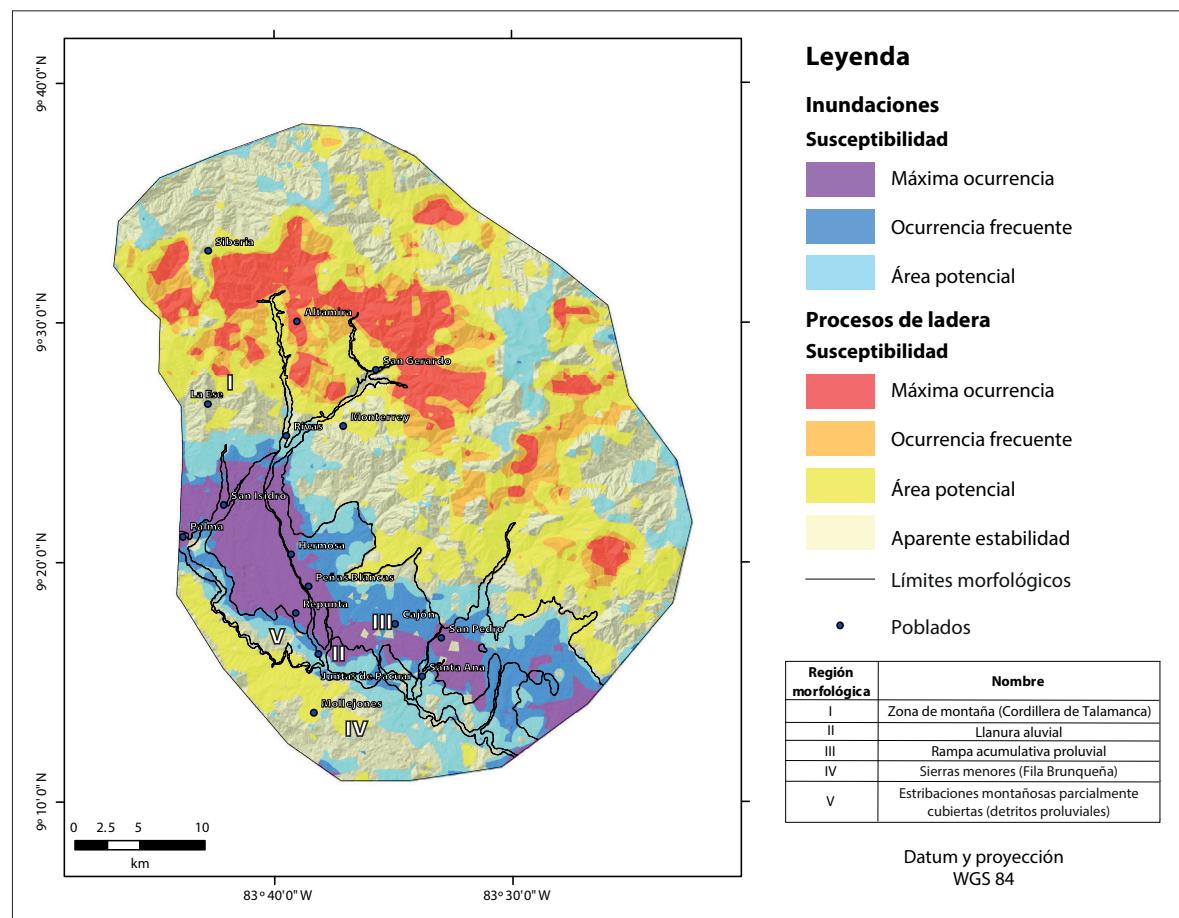


Figura 11. Zonificación de procesos de ladera e inundaciones. Fuente: elaboración propia.

están presentes en las cabeceras de los principales afluentes del río General; todas ellas tienen un arreglo que tiende a ser concéntrico. Las regiones asociadas con procesos de ladera contabilizan un área de 913 km², lo que representa un 58.7% del territorio total del área de estudio (1560.5 km²); estas zonas se localizan en laderas de valle tanto de la Cordillera de Talamanca como de la Fila Brunqueña. Cabe resaltar que, a partir de un análisis estadístico de frecuencias, se logró establecer que la única variable que se repitió en más ocasiones fue la erosión total.

Los territorios en donde coincidían hasta dos valores morfométricos altos se consideraron áreas potenciales; las zonas donde llegaban a sobreponerse tres índices se clasificaron de ocurrencia frecuente y los espacios catalogados como de máxima ocurrencia, fueron aquellos donde se hacían presentes cuatro o cinco variables (Quesada-Román *et al.*, 2018).

La zona de máxima ocurrencia coincide con los terrenos cumbrales y la porción más alta e inclinada de las laderas de montaña. Los valles característicos de estos territorios son profundos con morfología de cañón; en conjunto integran las cuencas de captación de los ríos más importantes de la región (Buenavista y Chirripó Pacífico), y se extienden a lo largo de 184.3 km², lo que equivale al 20% de los terrenos asociados a procesos de ladera.

La litología de este sector es de granito y rocas volcánicas del Mioceno (en ambos casos), fracturadas por dos sistemas disyuntivos orientados de NW-SE y de N-S. Hay que mencionar que las condiciones de humedad y temperatura que existen en la zona de estudio han dejado su huella, ambos sustratos se presentan alterados y en la mayoría han desarrollado cortezas de intemperismo de espesores variables que afloran de manera irregular o aislada.

Las condiciones naturales de este territorio, considerado como el más susceptible a desarrollar procesos de ladera, son evidenciadas por el análisis numérico; en estas zonas coinciden los valores de cuatro o cinco variantes morfométricas. Por último, hay que tomar en cuenta que la lluvia (estacional o extraordinaria), los sismos, los cambios de uso de la tierra, la construcción de obras de infraestructura y vivienda, pueden catalizar la dinámica de laderas.

La zona de ocurrencia frecuente se presenta en dos sectores; el primero, se dispone bordeando la zona anterior y si bien presenta las mismas características morfológicas, litológicas, estructurales y climáticas; la segunda, en las Sierras menores, en frentes montañosos que dan al río Pedregoso. La diferencia radica en que en estas áreas coinciden tres de las cinco variantes morfométricas. Por su arreglo espacial pueden considerarse como una superficie de transición integrada por laderas de montaña medias. Representan un área de 191.1 km², equivalente al 21.2% de los terrenos asociados a procesos de ladera. La mayor parte de la Fila Brunqueña está considerada en esta categoría, a excepción de su extremo SE. Las condiciones naturales se mantienen; es decir, son similares a las ya descritas, solo que el granito está ausente.

Los territorios potenciales se asocian también con relieves montañosos y, en particular, con las laderas bajas de la Cordillera de Talamanca y el sector SE de la Fila Brunqueña. Estas regiones se extienden a lo largo de 537.6 km², lo que equivale al 58.6% de los terrenos asociados a procesos de ladera. Si bien existen todas las condiciones morfológicas, geológicas y estructurales para que se desarrollen procesos de ladera, para su ocurrencia hace falta un agente catalizador que inicie el proceso (natural o antrópico). Por último, hay que mencionar que en estas áreas coincide de una a dos variantes morfométricas.

Los terrenos donde no coincidió ningún índice morfométrico son casos aislados y en esta fase del análisis, fueron considerados como zonas de estabilidad aparente. Su extensión espacial es de 88 km², lo que representa un 5.6% del área de estudio.

Asociación con inundaciones

Este aspecto fue interpretado a partir del análisis de la espacialidad de los valores morfométricos bajos, mismos que se disponen en el centro-sur de la zona de estudio. Este sector incluye la porción más deprimida (llanura aluvial) y territorios adyacentes (abancos aluviales). Los relieves involucrados son homogéneos en morfología, inclinación y litología. Estas características determinan su dinámica; cuando llegan a presentarse lluvias intensas, los volúmenes de agua se distribuyen por toda la por-

ción baja de manera turbulenta en la mayoría de los casos.

Las zonas asociadas con inundaciones tienen una extensión de 555 km², lo que representa un 35.5% del total de la cuenca alta del río General. A partir de un análisis estadístico de frecuencias se estableció que las variables que se repitieron en más ocasiones fueron la profundidad de la disección y erosión total.

Las zonas en donde coinciden uno o dos valores morfométricos bajos se consideraron como áreas potenciales; las regiones donde llegaban a sobreponerse tres variantes se clasificaron como de ocurrencia frecuente y los sitios catalogados como de máxima ocurrencia fueron aquellos donde se hacían presentes cuatro o cinco variables.

Los territorios a presentar inundaciones con una máxima ocurrencia ocupan la mayor parte de la rampa acumulativa que está formada por amplios abanicos aluviales (Quesada-Román, 2017). Estos terrenos suman un área de 93.3 km², lo que equivale a un 16.8% de las zonas asociadas a inundaciones en la cuenca alta del río General. La morfología de estas estructuras permite la circulación del agua en sus sectores convexos (porción central), mientras en los extremos o bordes laterales la geometría se invierte y tiende a ser cóncava; por tanto, el agua se concentra y retarda su circulación, lo que favorece la inundación. Esta es la situación de las llanuras aluviales de los ríos Pedregoso y General.

Las zonas de ocurrencia frecuente se localizan al norte de la rampa acumulativa a manera de una franja continua e irregular. Esta disposición refleja un control morfológico de los abanicos sobre esta área; es decir, la geometría ligeramente convexa de estas estructuras funciona como obstáculo y

retarda la circulación de las corrientes fluviales. Esta condición cobrará importancia en la temporada de lluvias extraordinarias, donde este factor favorecerá la inundación. Estas regiones se extienden a lo largo de 69.3 km², lo que equivale al 12.4% de los terrenos asociados a inundaciones.

El área potencial se refiere a aquellas zonas susceptibles a inundación desde un punto de vista geomorfológico; sin embargo, debido a que se encuentran ligeramente más altas en relación con la zona de máxima ocurrencia, deben existir o coincidir con condiciones extraordinarias para favorecer la dinámica, por ejemplo, temporada de lluvias intensas y ciclón o la obstrucción de un río por un proceso de ladera y rompimiento repentino de la represa natural. Representan un área de 392.4 km², equivalente al 70.6% de los terrenos asociados a inundaciones.

VALIDACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN MORFOMÉTRICA CON LOS PROCESOS DE LADERA E INUNDACIONES OCURRIDOS ENTRE 1970-2015

Los valores fueron revisados en campo para delimitar aún mejor las áreas de afectación real, con las que la morfometría podría malinterpretar la información. Al contrastar las áreas resultantes con estudios de los impactos en el área de estudio realizados por Peraldo (2004) y los impactos reportados en la base de datos DesInventar (LA RED, 2016), se confirma que las zonas de mayor susceptibilidad, tanto en procesos de ladera como inundaciones, coinciden con eventos reales suscitados (Tabla 1).

Tabla 1. Área en km² de cada tipo de susceptibilidad por peligro geomorfológico.

Tipo de susceptibilidad/Peligro geomorfológico	Procesos de ladera	Inundaciones	Total
Máxima ocurrencia	184.3	93.3	277.6
Ocurrencia frecuente	191.1	69.3	260.4
Área potencial	541.6	392.4	934
Estabilidad aparente			88
Total	917	555	1560

La base de datos DesInventar está estructurada por la fecha de registro, el tipo de evento, la localización a la mayor escala de detalle (municipio o incluso distrito), el lugar, la fuente, las observaciones del evento. Por otro lado, registra el número de muertos, desaparecidos, heridos, víctimas, afectados, evacuados, relocalizados, casas destruidas, casas afectadas, hectáreas de cultivos y plantaciones forestales afectadas, rutas de comunicación afectadas, centros de educación afectados, centros de salud afectados, cabezas de ganado afectadas, pérdidas en moneda local, pérdidas económicas en dólares, otras pérdidas, sectores públicos afectados (transporte, comunicaciones, instalaciones de organizaciones de ayuda, acueductos, alcantarillado, educación, energía, industria, salud, entre otros), duración del evento, magnitud del evento, tipo de causa y observaciones de la causa (LA RED, 2016). Para Costa Rica, los reportes son realizados mediante la utilización de notas periodísticas, donde destacan las siguientes fuentes: periódico *La Nación*, informes de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, entre otros. Los datos abarcan de 1970 a 2015 (LA RED, 2016).

El mapa de zonificación de procesos de ladera e inundaciones fue contrapuesto con la base de datos de desastres DesInventar. Los poblados como Buenavista, Palmital, Rivas, Guadalupe, San Gerardo y Herradura son afectados por movimientos en masa que han sido reportados e incluso cartografiados en estudios previos, y que, a su vez, se exhiben en el mapa resultado de este análisis. Extensos sectores de la Carretera Interamericana entre Siberia y San Isidro con frecuencia presentan procesos de ladera como desprendimientos.

Las comunidades, como Rivas, Peñas Blancas, Hermosa, General Viejo, Repunta y el centro urbano de San Isidro, han sido afectadas por efectos directos e indirectos de los ciclones tropicales con fuertes inundaciones, y dichos poblados resultan dentro del análisis zonas de alta susceptibilidad (Campos-Durán y Quesada-Román, 2017). Amplias zonas relacionadas con la llanura aluvial del río General y sus poblados aledaños se ven afectadas de manera frecuente por las inundaciones y desbordamientos que afectan áreas de cultivo e

infraestructura pública, lo que causa importantes pérdidas económicas en el municipio de Pérez Zeledón.

Del total de reportes para el área de estudio (209), 128 se relacionan con inundaciones y 81 con procesos de ladera. Estos datos fueron ubicados con la mayor precisión posible según cada reporte en el territorio, después fueron sobrepuertos en el mapa de zonificación de la susceptibilidad a procesos de ladera e inundaciones (Figura 12).

La ubicación de los reportes de DesInventar en el área de estudio se relacionan con el resultado de la zonificación de los procesos de ladera e inundación, y se logran calcular los porcentajes de validación según el número de datos que coinciden con las áreas susceptibles determinadas. El análisis determina que el 85.15% de los reportes coinciden con las zonas propensas a inundación mientras que los procesos de ladera tuvieron una relación del 76.54% con los sitios propensos a estos peligros geomorfológicos.

CONCLUSIONES

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) estribaciones montañosas cubiertas por detritos aluviales.

La zonificación de procesos de ladera e inundaciones resultó de la integración espacial de las siete variables morfométricas. Se lograron definir para cada peligro geomorfológico tres categorías de susceptibilidad: máxima ocurrencia, ocurrencia frecuente y área potencial. El mapa de zonificación de procesos de ladera e inundaciones fue corroborado con la base de datos de desastres DesInventar. El 85.15% de los reportes coinciden con las zonas propensas a inundación mientras que el 76.54% con las áreas susceptibles a procesos de ladera. Este

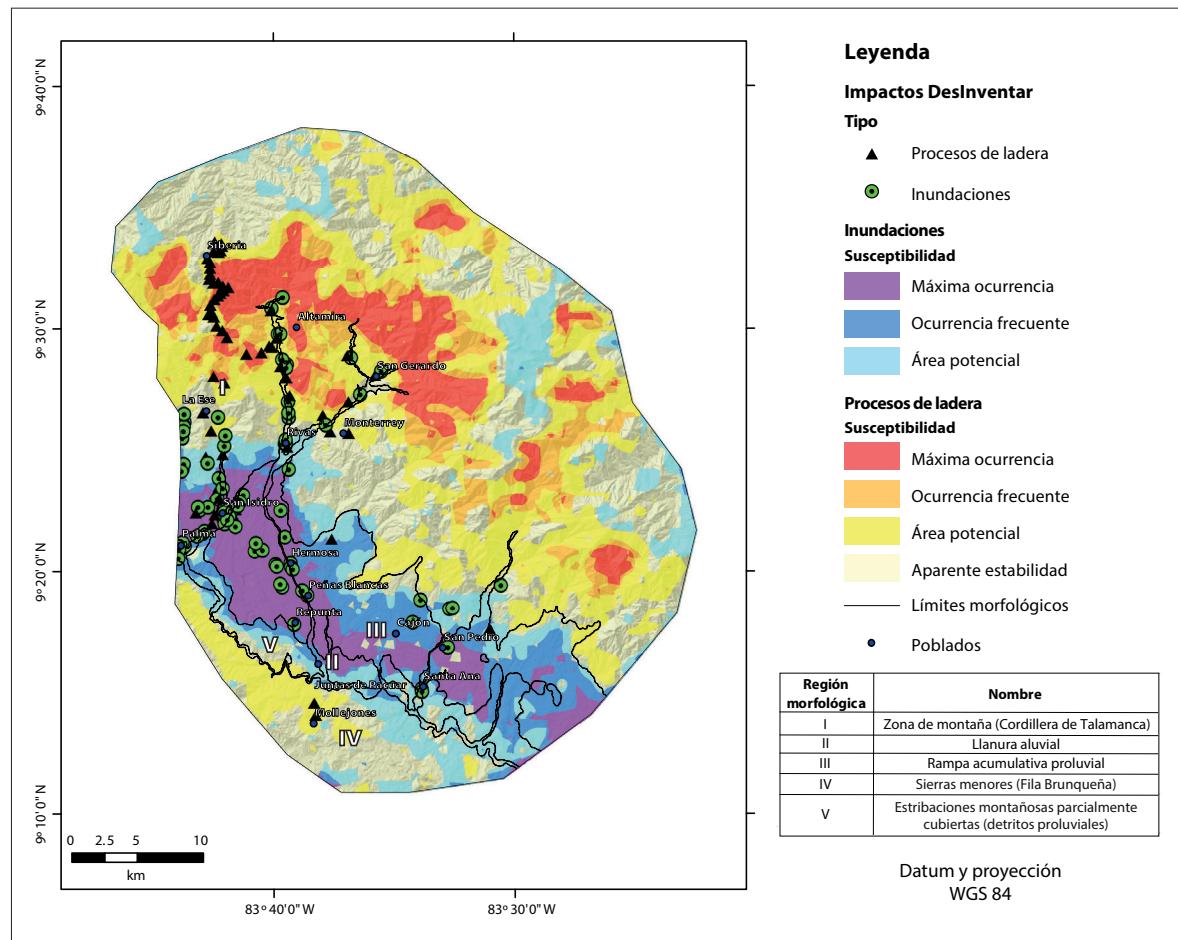


Figura 12. El mapa de zonificación e impactos de procesos de ladera e inundaciones cotejado con los impactos suscitados por estos procesos entre 1970 y 2015, según la base de datos DesInventar.

método puede ser replicado con facilidad dado que solamente se utilizan las curvas de nivel y ríos, las mediciones son sencillas y pueden ser realizadas a partir de un sistema de información geográfica en su totalidad. Esta condición agiliza los tiempos de digitalización de cauces fluviales, el procesamiento de la información, la sistematización del procedimiento y la practicidad tanto para hacer distintas mediciones como para la toma de datos puntuales de las isohipsas y ríos.

Por medio de este procedimiento se pueden hacer valoraciones de base para el ordenamiento territorial de cuencas hidrográficas y unidades político-administrativas a escalas locales y regionales. La geomorfometría es una herramienta práctica

para la mitigación del riesgo a desastres mediante la determinación de áreas susceptibles a inundaciones y procesos de ladera en general. No obstante, requiere una corrección con las formas del relieve para precisar las áreas a afectarse a partir de una cartografía de mayor precisión (escalas 1:25 000 o superiores), lo que solamente puede ser realizado por medio de un mapa geomorfológico a detalle.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al Dr. José Lugo Huber por el tiempo y dedicación a la lectura de nuestro manuscrito. También le agradecemos al Lic. Isaac

Quijada sus atinadas observaciones. Estas sugerencias y comentarios nos ayudaron a mejorar el artículo.

REFERENCIAS

- Alfaro, E., Quesada-Román, A. y 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. <https://doi.org/10.15517/dre.v1i12.578>
- Campos-Durán, D. y Quesada-Román, A. (2017). Impacto de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica, periodo 2000-2015. *Revista Geo UERJ*, 30, 440-465. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2017.26116>
- Denyer, P. y Alvarado, G. E. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica*. Escala 1:400 000. San José, Costa Rica: Librería Francesa.
- Goudie, A. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. Gran Bretaña: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Huggett, R. (2007). *Fundamentals of Geomorphology*. Nueva York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203947111>
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). (2009). *Datos de estaciones meteorológicas: Coopeagri, Repunta y Chirripó*. San José, Costa Rica.
- LA RED (Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina). (2016). *DesInventar: Sistema de inventario de efectos de desastres de Costa Rica entre 1970 y 2015*. Ciudad de Panamá, Panamá.
- Lugo, J. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos)*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Mora, M. y 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. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i44.3445>
- Peraldo, G. (2004). *La novedad de lo constante: el proceso del desastre y su relación con la gestión territorial. Caso del distrito de Rivas*. Pérez Zeledón, Costa Rica. Tesis de Estudios de Posgrado en Geografía con énfasis en Ordenamiento Territorial para optar al grado de Magíster Scientiae, San José, Costa Rica.
- Peña-Monné, J. L. (1997). *Cartografía Geomorfológica: Básica y Aplicada*. Logroño, España: Geoforma Ediciones.
- Quesada-Román, A. (2016). *Peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del río General (Pérez Zeledón)*, Costa Rica. Maestría en Geografía con énfasis en Geografía Ambiental, Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 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. https://doi.org/10.11137/2017_2_278_288
- Quesada-Román, A., Moncada-López, R., Paz-Tenorio, J. A., Espinoza-Jaime, E., Castellón-Meyrat, C. y 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. <https://doi.org/10.15359/rgac.60-1-1>
- Quesada-Román, A. y Zamorano-Orozco, J. J. (2018a). Geomorphology of the Upper General River Basin, Costa Rica. *Journal of Maps*, 15(2), 95-101. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1548384>
- Quesada-Román, A. y Zamorano-Orozco, J. J. (2018b). Peligros Geomorfológicos en Costa Rica: Cuenca Alta del Río General. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(3), 239-251. https://doi.org/10.11137/2018_3_239_251
- Veas-Ayala, N., Quesada-Román, A., Hidalgo, H. y Alfaro, E. (2018). Hamedales del Parque Nacional Chirripó, Costa Rica: características, relaciones geomorfológicas y escenarios de cambio climático. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1436-1448. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.31477>
- Zamorano-Orozco, J. J. (1990). *Ánálisis ingeniero-geomorfológico de la cuenca de México*. Tesis para optar por el título de Doctor en Geografía (Geomorfología), Facultad de Geografía, Universidad Estatal de Moscú, M.V. Lomonosov. Moscú, Rusia. (En ruso).