

Contexto de inestabilidad de laderas en la Ruta Nacional 613 en 2020, Coto Brus, Costa Rica

Slope instability context in the National Route 613 in 2020, Coto Brus, Costa Rica

Jose María Sequeira-Arguedas 

Universidad de Costa Rica

San Pedro, Costa Rica

jose.sequeiraarguedas@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 07-04-2023 - Fecha de aprobación: 29-06-2023

RESUMEN

Se presenta la caracterización regional del contexto de inestabilidad de laderas y taludes a lo largo de la Ruta Nacional de montaña 613 ubicada en Coto Brus, Costa Rica, disparada por precipitaciones intensas durante el paso del huracán Eta entre el 1 y 6 de noviembre de 2020. Estableciendo el contexto geológico, geomorfológico e hidroclimático, además de observaciones de campo, mapas inventario de deslizamientos y depurado de insumos geoespaciales, se brinda una propuesta de zonificación *a priori* del corredor montañoso en tramos estables y propensos ante deslizamientos (presencia deslizamientos, pendiente, altura taludes y laderas). A partir de mapas inventario de deslizamientos, estudio por subcuencas hidrológicas, interpretación geológica y predominancia de suelos MH derivados de materiales volcánoclasticos, se determina moderada a alta disección en gran parte de la zona de influencia del corredor, determinándose que al menos 24 % de la ruta es susceptible a procesos de remoción en masa, con influencia de controles geológico-estructurales. Además, los moduladores hidroclimáticos e hidrometeorológicos (larga y corta estancia, respectivamente), que favorecen con cada época lluviosa los eventos extremos de precipitación en el Pacífico sur, podrían disparar a futuro inestabilidad de laderas en el corredor; sin excluir escenarios de sismos superficiales generados en alguna de las cinco fallas geológicas por las cuales atraviesa el corredor. Este estudio contribuye a la definición posterior del peligro y riesgo, como estudio base que establece las condiciones ambientales del corredor vial.

Palabras clave: deslizamiento, geología, precipitación, huracán Eta, zonificación.

ABSTRACT

In this regional investigation, it is characterized the slope instability along the 613 National Road corridor located in Coto Brus county in Costa Rica, triggered by intense precipitation rates between November the 1st and the 6th related to Eta's hurricane pathway. By establishing the geological, geomorphological and hydroclimatic context, besides field annotations, landslides map inventory and geospatial terrain inputs, it is proposed *a priori* road zonation in stable and landslide prone sections of the mountain corridor (considering landslide occurrence, slope, and slope height). From landslides map inventory, hydrological sub-basin analysis, geological setting and MH soil-type predominance derived from volcanoclastic deposits allows to determine moderate to high terrain dissection and at least 24 % of the road corridor is prone to slope instability with a clear influence of geological tectonic features. In addition, there are hydroclimatic and hydrometeorological features (long and short period modulators, respectively) that could trigger hillslope instability along the road corridor in the near future, by the development of extreme precipitation events every rainy season on Costa Rica's southern Pacific, without excluding possible superficial seismic rupture scenarios at one of the five active fault traces that crosses the road corridor. This study contributes to future geological hazard and risk assessments, as a base study of the environmental conditions that moderate geodynamic processes at the road corridor.

Keywords: landslides, geology, precipitation, hurricane Eta, road zoning.

Introducción

La Ruta Nacional 613 (RN-613) es un corredor vial de 30,84 km ubicada en el cantón de Coto Brus, Puntarenas, Costa Rica, comunicando los poblados de San Vito, Sabalito y Las Mellizas en su extremo norte (Figura 1). Se caracteriza por ser un corredor vial de montaña sinuoso, con múltiples pasos fluviales, cortes de talud y redes de servicios básicos. Según Garro *et al.* (2017) el ancho promedio de la ruta es de 5,5 m; la caracterizan como una ruta con gran cantidad de curvas, pendientes elevadas, tramos de escasa visibilidad, un único puente sobre el río Sabalito (otros pasos de cauce emplean alcantarillas) y, adicionalmente, el uso de taludes con bermas, muros anclados, de gaviones y tablaestaca como los elementos de contención geotécnica típicos. Asimismo, estos autores reportan deterioros progresivos, especialmente concentrados en cercanías de obras geotécnicas como agrietamientos de la losa asfáltica, escaso mantenimiento en drenes y ausencia de cunetas de desfogue en algunos sectores, así también reportan un deslizamiento mayor en el estacionamiento 15 + 580 km.

La zona contribuye económicamente al sector primario del país con producción ganadera y de café, además, la RN-613 constituye la vía de ingreso a la zona protectora Las Tablas, la cual alberga una importante captación para sistemas de distribución de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y, adicionalmente, comunica el poblado de Río Sereno y Volcán de Panamá con el cantón de Coto Brus (Figura 1). En 2020 se generaron extensivos movimientos en masa atribuidos al paso de la tormenta tropical -posteriormente huracán- Eta entre el 1 y 6 de noviembre de 2020 (Chinchilla, Morera y Navarro, 2020); el cual generó acumulados extremos de lluvia en 24 horas en la vertiente Pacífico y efectos conexos, culminando con la declaración del estado de emergencia (Comisión Nacional de Riesgos y Atención de Emergencias, 2021).

Durante febrero a marzo de 2021 se realizaron visitas al campo que permitieron constatar las afectaciones y los efectos de Eta en la RN-613, en una época lluviosa particularmente intensa (National Hurricane Center, 2022). Entre las más relevantes se incluye infraestructura hidráulica

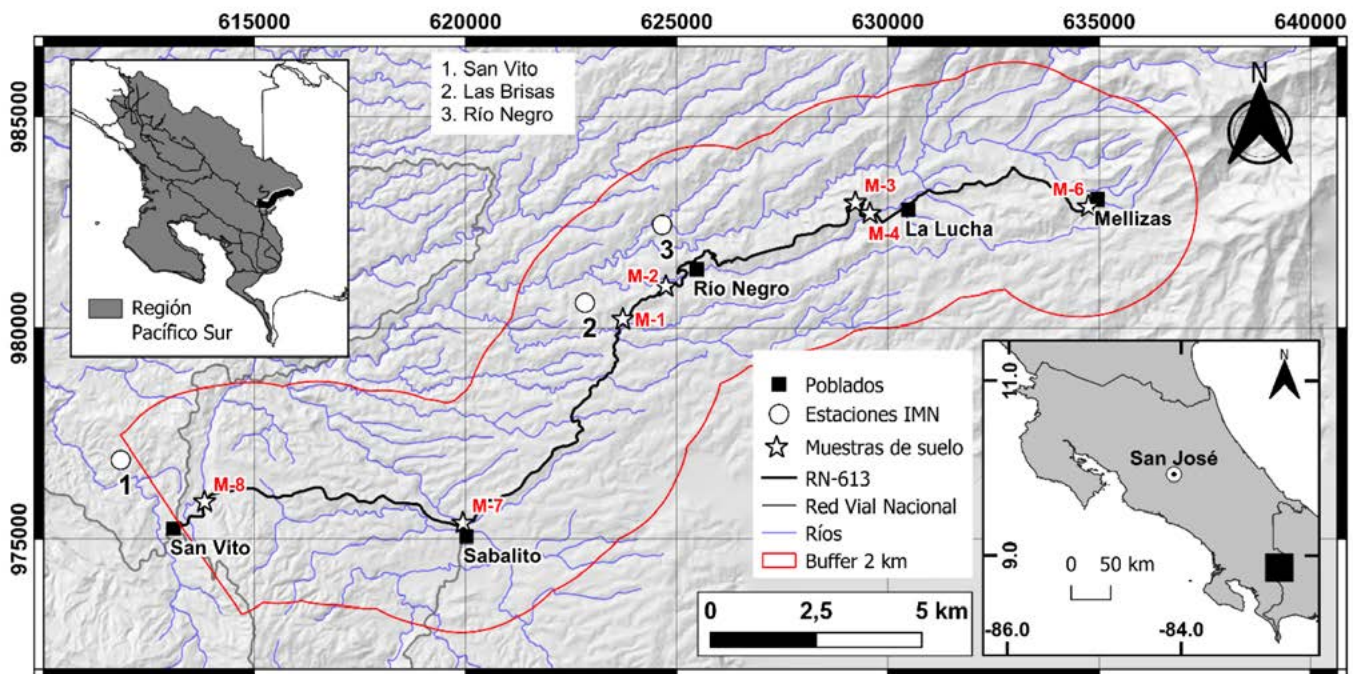


Figura 1. Ubicación del corredor vial de la RN-613 en Coto Brus (zona climática Pacífico Sur), muestras de suelo colectadas y estaciones meteorológicas cercanas (coord. CRTM-05). La estación 0 km se halla en San Vito y la 30+84 km en Mellizas

(accesos, pasos de cauce, captaciones, tuberías) de AyA, fallas en taludes de la carretera, colmatación de sedimentos en alcantarillas y progradación del deslizamiento en el estacionamiento 15 + 580 km que compromete el derecho de vía y redes de servicios (Figura 2). Sobresalen decenas de movimientos en masa e inestabilidad en gran parte del trayecto entre Sabalito y Las Mellizas, siendo el tramo con mayor densidad de pasos fluviales, mayor desnivel del trazado y afloramiento de materiales inconsolidados susceptibles a erosión.

Anteriormente el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) reportó afectaciones geotécnicas y dio seguimiento a la RN-613 en puntos específicos, focalizado en obras de contención para el periodo 2012 a 2017 (e.g. Garro, Naranjo, Vega y Valverde, 2017). La Comisión Nacional de Emergencias (CNE) por su parte no registra deslizamientos activos para la ruta, usando escala 1:50 000. Sin embargo, la región ni la RN-613 cuentan con publicaciones que caractericen o zonifiquen las amenazas geológicas e hidrometeorológicas (Comisión Nacional de Riesgos y Atención de Emergencias, 2019).

A pesar de las condiciones hidrometeorológicas extremas durante 2020 y su efecto en la saturación de suelos y la escorrentía, surge la interrogante de ¿cuáles son las condiciones geológicas y geomorfológicas del corredor vial que favorecen la inestabilidad en taludes y laderas en algunos puntos de la RN-613 o puede simplemente atribuirse a deficiencias de diseño y obras conexas? Así también, ¿cuáles son las climatologías típicas de la región Pacífico sur y por qué al paso de Eta, la vertiente Caribe no resultó con afectaciones similares?

Para Costa Rica existen estudios similares en otras vías. Solís (2018) realizó una caracterización multifactorial por sectores de la susceptibilidad en la RN-219 (comunica San José y Cartago) empleando el método Mora-Vahrson con disparo por lluvia y sismo, el método HSQI y la metodología del ángulo crítico, así como estimación de caudales pico para puentes y alcantarillas y estimación del peligro ante flujos de detritos, sin emplear muestreo de materiales, ni parámetros físicos o de corte. Otro estudio es de Carballo (2019),

quien emplea el método HSQI sobre la sección montañosa de la RN-32 (San José-Guápiles-Limón), empleando valoraciones de campo, levantamiento geológico y geomorfológico que incluye inventario de deslizamientos con LIDAR, muestreo de materiales para propiedades físicas y resistencia al corte, clasificando la susceptibilidad de baja a alta en la ruta. Quesada *et al.* (2019) emplean sensores remotos y un modelo de disparo para corroborar deslizamientos y flujos de detritos cartografiados para el volcán Miravalles ante el paso del huracán Otto de 2016 y previa ocurrencia de un sismo de 5,4 Mw; estudio comparable con esta investigación, pues los procesos de remoción en masa ocurrieron en materiales volcánicos finos inconsolidados, haciendo uso extensivo de sistemas de información geográfica (SIG) para caracterizaciones *a priori* de la inestabilidad de laderas.

En zonas tropicales, Aristizábal *et al.* (2022) emplean los modelos físicos SHALSTAB y TRIGRS para evaluar el efecto de la precipitación (intensidad y duración) sobre el disparo de deslizamientos en regiones montañosas de los Andes colombianos en términos del factor de seguridad (FS), usando sensores remotos, inventario de deslizamientos y datos hidroclimáticos para la zona, así como propiedades geotécnicas reportadas en la literatura para modelar la respuesta de los materiales volcánicos y sedimentarios. Otro caso exitoso en zonificar el peligro por procesos de remoción en masa se muestra con Valdés *et al.* (2022) para el suroeste del estado de Michoacán, México. Estos autores evalúan el disparo por precipitaciones de 1995 a 2020 atribuidas al paso de ciclones tropicales en unidades y suelos volcánicos cuaternarios.

Ante este contexto, esta investigación constituye un insumo base que emplea la caracterización del relieve por medio de SIG, la integración de valoraciones de campo, el inventario de deslizamientos y la contrastación con la geología regional, incluyendo el fallamiento activo y la geodinámica externa. No se pretende abarcar análisis geotécnico sitio a sitio (propiedades de resistencia al corte, equilibrio límite, métodos tenso-deformacionales), sino un enfoque regional semi-cuantitativo que permita dar a conocer las condiciones ambientales del corredor que determinan los procesos erosivos y factores

disparadores para futuras afectaciones. Se pretende contribuir al conocimiento de rutas de montaña en zonas tropicales, el cual puede ser extrapolado a otras rutas de Costa Rica, inclusive los que comunican al Valle Central con las costas.

Objetivos

- Evaluar las condiciones geológicas, geomorfológicas y de disparo por eventos extremos de precipitación relacionadas con la inestabilidad de laderas a lo largo de la RN-613, empleando recopilación bibliográfica, interpretación geológica, geomorfología y ensayos de clasificación SUCS para muestras de suelo colectadas en deslizamientos activos, empleando los estándares ASTM D-422, ASTM D-4318 y ASTM D-6913.
- Sintetizar el contexto hidrometeorológico e hidroclimático causantes del régimen de precipitaciones para el sector noreste del cantón de Coto Brus, por medio del análisis de series temporales y algunos índices sinópticos.
- Identificar los tramos del corredor vial más propensos a procesos de remoción en masa de acuerdo con la integración del inventario de afectaciones, valoraciones de campo, parámetros físicos, su condición geomorfológica y geológica.

Metodología

En primera instancia, se realizó una inspección de campo para levantar los sitios con colapsos gravitacionales y pasos de cauce en el corredor (Figura 2 y Figura 3B). Para ello, se emplearon descripciones del estado geomecánico del deslizamiento, corroboración de los materiales y georreferenciación con coordenadas CRTM-05. El inventario se procesó en el SIG QGIS 3.16, dentro del cual se delimitó una zona de influencia de 2 km en ambos márgenes, principales poblados, vías secundarias, infraestructura, pasos de cauce y pendientes a partir de las curvas de nivel 1:25 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para la fase de recopilación bibliográfica, se realizó revisión de información geológica y geofísica

disponible para la región, incluyendo unidades litoestratigráficas, fallamiento activo y sismicidad superficial (< 35 km profundidad) reportada por la Red Sismológica Nacional de 2010 a 2021 (National Seismological Network, 2022).

Con los insumos geoespaciales depurados, se realizó interpretación geomorfológica de los agentes de geodinámica modeladores del relieve según la clasificación por origen propuesta por van Zuidam (1986), además de delimitación de subcuencas hidrológicas aguas arriba (dentro de la zona de influencia de 2 km) y análisis de la disección fluvial por km² con el fin de estimar la densidad del drenaje, valor que indica de manera relativa la disección por cuadrante a lo largo del corredor. Como referencia, se toman valores mayores que 1,5 km/km² para cuencas bien drenadas o disectadas y pobremente drenadas o con baja disección fluvial si la densidad es menor a 0,5 km/km² (Araque *et al.*, 2019). Se incluyó el cálculo de algunos índices representativos de subcuenca como el factor de forma (F), pendiente media, hipsometría, compacidad (Kc), tiempo de concentración (Tc) y caudal teórico máximo (Q), empleando las expresiones de Kirpich y envolventes de Creager (con C = 100), respectivamente (Breña y Jacobo, 2006).

Se adquirió y procesó la serie de precipitación diaria para la estación Las Brisas (Figura 1), la cual contaba con datos de 1997 a 2022 y las series mensuales para las estaciones San Vito y Río Negro (1980-2021) del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Los máximos diarios se corroboraron de forma cruzada en boletines mensuales del IMN (Instituto Meteorológico Nacional, 2022) con el objeto de asociar los sistemas hidrometeorológicos presentes durante dichas fechas.

De igual manera, se realizó la recolección de ocho muestras de suelo para determinar su clasificación SUCS, distribuidas a lo largo del corredor y siguiendo los estándares ASTM D-422, ASTM D-4318 y ASTM D-6913. Las muestras son alteradas y se recolectaron del material colapsado exclusivamente para los depósitos de *debris flow* y *debris avalanche*, unidad que presentó todos los deslizamientos asociados con el paso del huracán Eta. No se realizó muestreo equiespaciado, sino que se priorizaron los sitios entre Sabalito y

Mellizas (sector norte) con las muestras M-1 a M-6 para caracterizar la granulometría y plasticidad de los materiales que componen los taludes y subrasantes de la RN-613, acorde con el presupuesto disponible para el proyecto. La muestra M-5 debió excluirse del análisis por su alta dispersión en los valores de plasticidad, sobre todo al localizarse entre la muestra M-4 y M-6 (634032 E/ 983223 N) y correspondía con la misma unidad, siendo complejo replicar las condiciones de muestreo después de la visita al campo. Las muestras M-7 y M-8 fungieron como control para estimar la variación en la plasticidad y granulometría en el extremo sur del corredor, donde se evidenció menor grado de meteorización en la unidad y mayor contenido de clastos rocosos.

Con la caracterización hidroclimática, geológica, geomorfológica, mapas inventario de deslizamientos e interpretación de patrones erosivos dominantes en el corredor, se zonificaron los tramos estables y susceptibles ante procesos de remoción en masa, que a futuro podrían generar afectaciones ante eventos extremos de precipitación (EEP), sismos o ambos, siendo sectores prioritarios a valorar por parte de las autoridades pertinentes. Para esto, se consideraron los tramos con presencia de deslizamientos como primer criterio de selección, estos se extendían si tenían taludes con una o más bermas identificadas en campo (inclusive sin falla por deslizamiento) o donde hubieran laderas que superaran los 10 m de altura y pendiente mayor a los 20° en uno o en ambos márgenes de vía, sin emplear ponderaciones por factor. Otro criterio de selección de tramos propensos es si existe un paso de cauce, ya que ante la ocurrencia de un EEP podría colapsar la RN-613 con la formación de flujos de detritos.

Según González de Vallejo *et al.* (2002), los mapas inventario anteceden los mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo, sirviendo como insumo base para estimaciones determinísticas o probabilísticas más complejas, que complementa los mapas del peligro geológico de Coto Brus (Comisión Nacional de Riesgos y Atención de Emergencias, 2019). En este caso, el énfasis es inventariar e introducir los factores condicionantes de la susceptibilidad del terreno en la RN-613, por

lo que este estudio tiene un enfoque descriptivo y exploratorio. Entre las limitaciones se cita que no se realizan valoraciones de la resistencia al corte ni modelos físicos de estabilidad de laderas o hidrológicos. Tampoco es un estudio que estime la vulnerabilidad ni el riesgo.

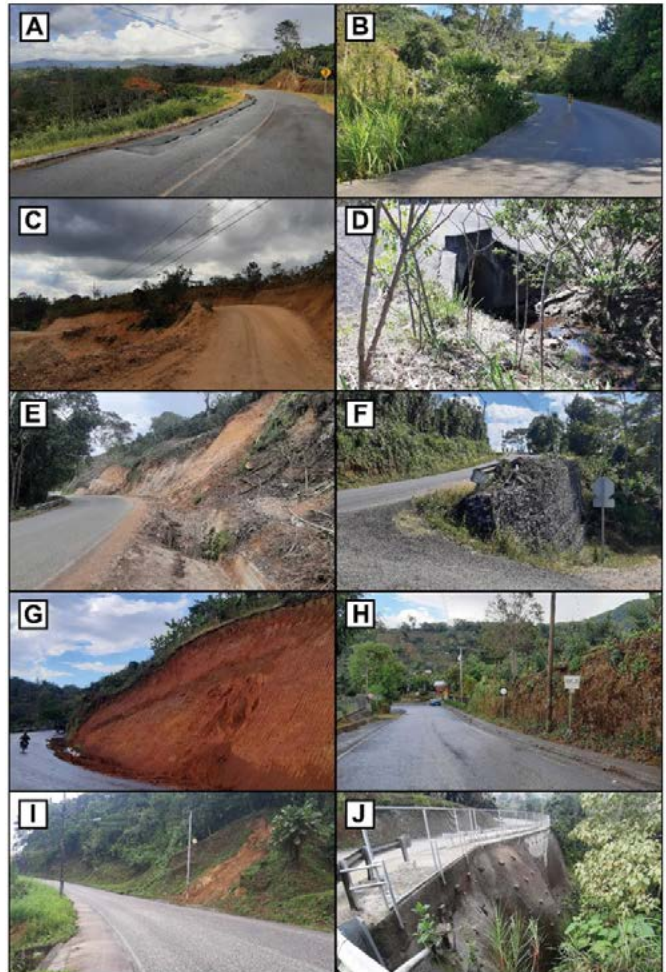


Figura 2. A) y B) Vista de la estructura de pavimentos con fallas en los estacionamientos + 18 y + 19 km. C) Deslizamiento en el estacionamiento 15 + 580 km. D) Alcantarilla circular típica cerca del poblado de La Lucha. E) Corte en bermas de talud entre estaciones + 17 y + 18 km. F) Vista de estructuras de muro de gaviones en la ruta. G) Falla en talud cercano a La Lucha (+ 23 km). H) Vista del final de la ruta, sector norte en Las Mellizas. I) y J) Falla en talud y muro anclado, sector de San Vito conjunto a la quebrada Pavo y el aeródromo

Desarrollo

Contexto geológico y geomorfológico

Desde un enfoque geológico y geomorfológico regional, debe considerarse que la subducción de la placa y dorsal del Coco bajo la microplaca de Panamá modela las deformaciones activas y la sismicidad de la región sur de Costa Rica (Alfaro *et al.*, 2018). La zona se incluye dentro de la Fila Costeña y la meseta volcánica de San Vito. En el margen suroeste (Figura 3) afloran secuencias de areniscas y lutitas turbidíticas del Oligoceno (aprox. 23 millones de años, Ma), que conforman la base estratigráfica (Denyer y Alvarado, 2007). Esta unidad es sobreyacida por secuencias de lavas dacíticas y andesíticas que se extienden en el sector norte del corredor hasta el río Cotón, sitio donde inicia la cordillera de Talamanca (Alfaro *et al.*, 2018). En el extremo norte, afloran rocas extrusivas (adakitas) asociadas con la formación de domos volcánicos ácidos y cuya edad se estima entre 1 y 4 Ma (Denyer y Alvarado, 2007; Alfaro *et al.*, 2018).

La unidad litológica más reciente la constituyen los depósitos de detritos y escombros (*debris flow* y *debris avalanche*) del Plio-Pleistoceno (1 a 3 Ma), ubicada en el margen central y este del área de estudio y que a su vez se compone por clastos de lavas meteorizadas y una matriz de piroclastos (Denyer y Alvarado, 2007). Estos depósitos se asocian al colapso y erosión de paleoestructuras volcánicas. Localmente, se corroboraron estos materiales volcanoclásticos en los cortes de la carretera con un grado elevado de alteración (colores rojizos en la Figura 2), condición que reduce la aptitud geotécnica de los materiales. Asimismo, se localizaron depósitos aluviales recientes en las cercanías del poblado La Lucha, donde disminuciones en el nivel base local del río Negro (Figuras 3 y 4) depositan sedimentos y favorecen la deyección lateral con lluvias intensas.

En cuanto a las propiedades físicas de los suelos ensayados (Cuadro 1), predominan las arcillas ligeras (CL) y limos elásticos (MH) con plasticidad moderada (LL = 40) a alta (LL > 50), asociables con una matriz de cenizas, así como el intemperismo

de clastos lávicos presentes en la unidad de flujos de detritos y de escombros. Los límites líquidos de los materiales son elevados e inclusive, algunos con potencial expansivo, permitiéndoles incorporar en su estructura mineralógica elevados contenidos de humedad durante el año pero en detrimento posiblemente de su cohesión y ángulo de corte efectivo, como indica Mora (1998) para suelos derivados (tipo MH) de *debris flow*, cenizas y tobas cuaternarias del Valle Central de Costa Rica, destacando alto intemperismo, cohesiones consolidadas no drenadas de 0 a 16 kPa y ángulos de fricción interna efectivo de 20° a 36° como máximo. Estos materiales descritos por Mora (1998) tienen similitudes con los aflorantes, con volcanismo genético similar y procesos de alteración similares.

Las muestras M-7 y M-8 presentan menor plasticidad, asociado a diferentes grados de intemperismo entre el extremo norte y sur del corredor, pues estos materiales afloran moderadamente sanos y con mayor resistencia a la disgregación mecánica hecha en campo, posiblemente atribuidas a diferencias mineralógicas y de exposición.

En cuanto a las estructuras tectónicas, Arroyo (2001) identifica cinco fallas activas de tipo dextral, con rumbo norte-sur y longitudes entre 9 y 15 km, que deforman la unidad de depósitos de flujo y escombros (Figura 3). Este aspecto y la sismicidad localizada por la Red Sismológica Nacional, demuestra que estos alineamientos tectónicos son activos y tienen potencial para generar sismos de 6,8 Mw. En el sector sur se ubica la falla San Vito, la cual bascula la meseta volcánica de San Vito y genera un escarpe prominente, controlando el curso de la quebrada Pavo (Figura 3). En el norte se localiza una seguidilla de fallas que atraviesan transversalmente el corredor, generan valles lineales, facetamientos y otras geoformas estructurales que permiten inferir actividad durante el Cuaternario (Arroyo, 2001). La sismicidad entre 2010 y 2021 denota enjambres concentrados principalmente, entre las fallas Alturas y Tigra, cuyas magnitudes van de 2,0 Mw a 4,7 Mw (Figura 3A). Sin embargo, también se identifican sismos aislados en el sector sur del corredor asociados posiblemente con la falla San Vito (NSN, 2022).

Cuadro 1. Clasificación de muestras de suelo colectadas y su ubicación

Muestra	Coord. CRTM-05	Clasificación SUCS	Límites Atterberg	% de grava	% de arena	% de finos
M-1	623780 E/ 980197 N	Limo elástico arenoso (MH) de plasticidad alta	LL= 62 LP= 48	0	13	87
M-2	624800 E/ 980980 N	Arcilla ligera arenosa (CL) de plasticidad moderada	LL= 43 LP= 31	7	57	36
M-3	629287 E/ 982960 N	Limo elástico arenoso (MH) de plasticidad alta	LL= 50 LP= 42	0	29	71
M-4	629630 E/ 982704 N	Arcilla ligera arenosa con grava (CL) de plasticidad moderada	LL= 45 LP= 33	16	39	45
M-6	634804 E/ 982870 N	Limo elástico arenoso (MH) de plasticidad extremadamente alta	LL= 138 LP= 85	0	14	86
M-7	619995 E/ 975381 N	Arena limosa (SM)	LL= 0 LP= 0	0	55	45
M-8	613877 E/ 975878 N	Limo elástico (MH) de plasticidad alta	LL= 52 LP= 41	0	0	100

LL: límite líquido, LP: Límite plástico

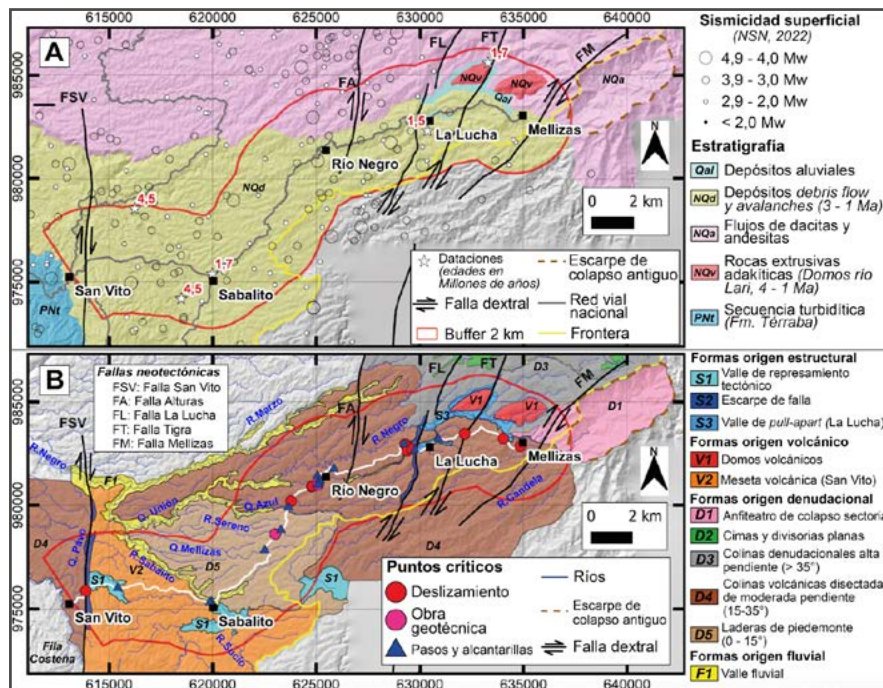


Figura 3. A) Mapa geológico regional con fallas activas y sismicidad superficial, basado en Alfaro *et al.* (2018), Arroyo (2001) y Denyer y Alvarado (2007). B) Modelo geomorfológico propuesto, inventario de deslizamientos y pasos de cauce

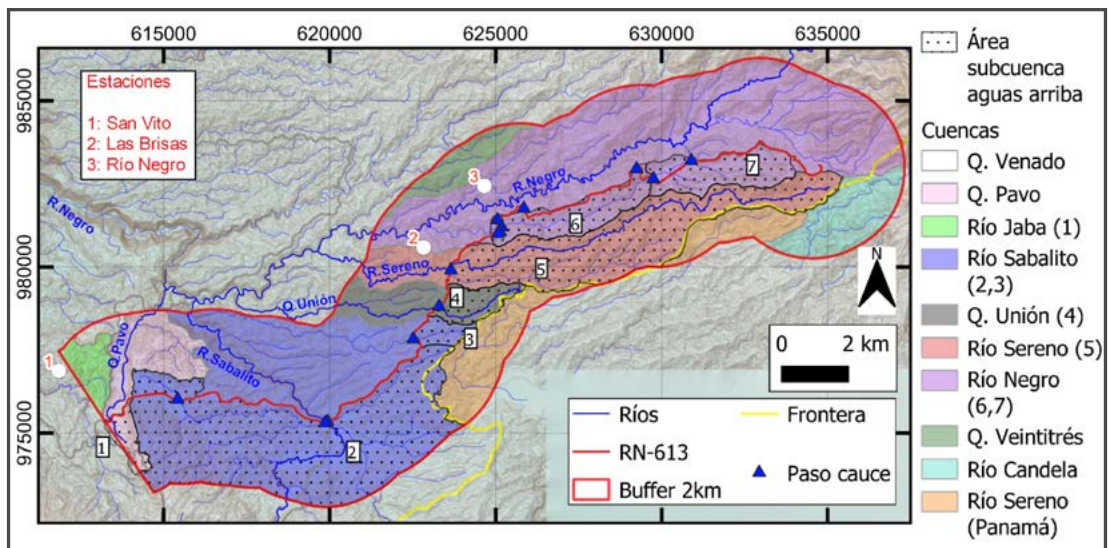


Figura 4. Subcuencas definidas para el corredor vial RN-613, con achurado área aguas arriba

Geomorfológicamente, se identifican morfologías estructurales prominentes (Figura 3B), sobre todo los escarpes de la falla San Vito y La Lucha, así como un valle de régimen distensivo (*pull-apart*) en las cercanías del poblado de la Lucha, modelado por movimientos derechos en las fallas La Lucha y Tigra, drenado a su vez por el río Negro. La falla San Vito genera basculamiento de la meseta volcánica hacia el este controlando el curso del río Sabalito, atenuando su nivel base.

Sobresalen morfologías como las colinas denudacionales de alta (> 35°) y moderada pendiente (15° - 35°) así como cimas y divisorias planas modeladas en unidades litológicas susceptibles a la erosión como los depósitos de *debris*; donde el relieve se “suaviza” ocasionando mesetas amplias y sinuosas. Los domos volcánicos se asocian con la litología reportada por Denyer y Alvarado (2007) y con el emplazamiento de un régimen distensivo anterior al evento de intrusión. Los drenajes de estas laderas son paralelos con orientación hacia el oeste y culminan tributando en el río Coto Brus. Es clara, la influencia del tectonismo en el levantamiento acelerado de la Fila Costeña, la meseta de San Vito y las laderas volcánicas, pues los drenajes discurren en sentido opuesto al rumbo esperado (hacia el NW) y no hacia la costa (sentido SW).

Contexto hidrológico e hidroclimático

Se identifican al menos 11 subcuencas hidroclimáticas y 7 de ellas tienen un cauce fluvial que atraviesa la RN-613, para un total de 13 alcantarillas y dos puentes en la confluencia del río Suncio y Sabalito, en cercanías del poblado homónimo (Figura 4). Las áreas aguas arriba respecto del sitio de paso (desfogue) varían de 1,14 km² a 27,37 km² con pendientes medias de 0,8 a 9,8 %. En cuanto a los factores de forma (F), son menores a 0,29, con excepción de la subcuenca río Sabalito #2 que es más ancha; indicando cuencas alargadas y menos propensas ante la concentración de tormentas. Las curvas hipsométricas (no mostradas) indican cuencas en estado intermedio de madurez, con tendencia hacia el potencial erosivo. El rango en los tiempos de concentración para las subcuencas considerando el desfogue en pasos de la RN-613 (área aguas arriba), varía de 17,2 min para la quebrada Pavo a 119,1 min, para el río Unión (Figura 4). Empleando la envolvente mundial de Creager, se estiman caudales pico teóricos mínimos de 61 m³/s (Q. Pavo) a un máximo de 856 m³/s para el río Sabalito #1, con un caudal pico promedio de 295 m³/s para las 7 subcuencas que atraviesan la RN-613.

Desde el punto de vista climático, la RN-613 se localiza dentro de la zona Pacífico sur, la cual se caracteriza por un régimen seco (de diciembre a abril) y lluvioso, con dos máximos de precipitación durante mayo y octubre (Figura 5A), que incluye un mínimo relativo (“veranillo”) durante junio y julio (Amador, 2008). Entre los moduladores de la precipitación más relevantes en esta región se encuentra la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CCBNC), El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) con sus fases neutral, El Niño y La Niña; y en menor medida, los efectos de sistemas ciclónicos. El CCBNC es muy relevante, pues traslada humedad a bajo nivel atmosférico desde el mar Caribe y permite la formación de lluvias orográficas en la vertiente Caribe. En la vertiente Pacífico genera migración al sur de la ZCI y con ello inicia la fase seca mencionada (Maldonado, Hidalgo y Alfaro, 2018; Amador, 2008).

En cuanto al ENOS, entre 2020 y 2021 estuvo en desarrollo una fase La Niña fuerte (MEI < -1,5, siglas en inglés del Índice Multivariado del ENOS) (Physical Science Laboratory, 2022), la cual debilita la circulación de los vientos alisios del noreste (Figura 5B), refuerza la convección y fomenta la migración al norte de la ZCI, permitiendo mayor formación

de lluvias convectivas y aporte de humedad en la vertiente Pacífico (Maldonado, Hidalgo y Alfaro, 2018). Si a estos moduladores de escala sinóptica, se adicionan eventos hidrometeorológicos de corta estancia como las tormentas tropicales y huracanes (Figura 5C) de la cuenca Atlántico Norte (AN), resultan en promedio acumulados de lluvia anuales elevados, generalmente superiores a 2600 mm. En promedio, en la cuenca AN por año se forman 17 sistemas ciclónicos, de ellos 7 evolucionan a huracanes (National Hurricane Center, 2022).

Para Coto Brus durante el cuatrimestre agosto a noviembre (Cuadro 2), se esperan acumulados promedio diarios de 12,4 mm (Figura 5), mientras que para los EEP (percentil 90) son esperables entre 27,8 mm y 39,1 mm para el mes de octubre. Estos valores extremos se asocian con el paso de sistemas tropicales y para noviembre, con el inicio de la temporada de frentes fríos (Maldonado, Hidalgo y Alfaro, 2018). Los efectos indirectos por huracanes afectan mayormente la vertiente Pacífico, debido a que aire cálido y húmedo del océano Pacífico circula inversamente hacia centros ciclónicos de baja presión alojados en el mar Caribe, generando convergencia de masas de viento con la orografía y lluvias intensas (Hidalgo, Alfaro, Hernández y Pérez, 2020).

Cuadro 2. Valores extremos de precipitación acumulada diaria y anual estación Las Brisas

Valores máximos precipitación en 24 horas			Valores máximos precipitación anual		Valores diarios extremos y medios ASON*	
Día	Valor (mm)	Evento hidrom. asociado**	Año	Acumulado (mm)	Media Ago. a Nov. (mm)	12,4
04/11/2020	205,6	Hur. Eta	2010	3956,1	P90 Ago. a Nov. (mm)	34,8
30/10/2017	123,2	Hur. Ofelia y EF #2	2020	3616,4	P90 Ago. (mm)	27,8
4/10/2017	112,0	Hur. Nate	2017	3601,2	P90 Sep. (mm)	36,2
16/11/2005	96,6	TT Delta	1999	3442,4	P90 Oct. (mm)	39,1
21/10/2018	93,4	TT #43 y EF #1	2007	3155,3	P90 Nov. (mm)	34,2

*Cuatrimestre Ago-Nov y percentiles 90 (1997-2022)

** Instituto Meteorológico Nacional (2022)

TT: tormenta tropical

EF: empuje frío

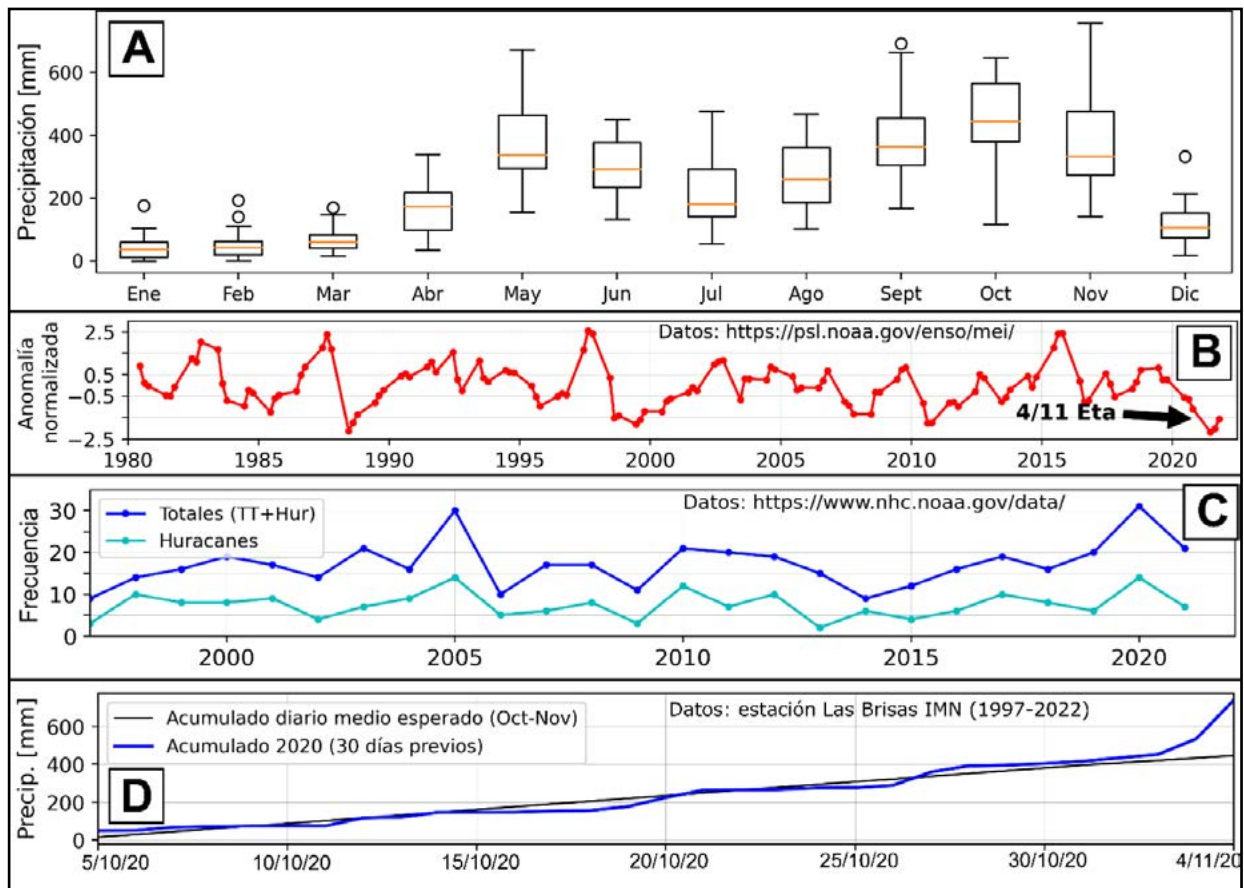


Figura 5. A) Climatología de precipitación para Coto Brus. B) Serie temporal del índice MEI v.2 para estimación de intensidad del ENOS (Physical Science Laboratory, 2022). C) Tormentas tropicales y huracanes de 1997 a 2021 (National Hurricane Center, 2022). D) Acumulados de precipitación diarios para los 30 días anteriores al 4/11/2020 (huracán Eta), respecto la media esperada acumulada diaria

Análisis de resultados

Tanto la estratigrafía como el fallamiento activo relacionado a un régimen de subducción genera deformaciones en el relieve, que incluye la Fila Costeña (sector SW del corredor), la meseta de San Vito y el inicio de la cordillera de Talamanca (sector N). El corredor atraviesa en gran parte, la unidad de depósitos de flujos de detritos y escombros; materiales volcánico-lásticos originados por procesos de colapso y erosión de paleoestructuras volcánicas que, actualmente se hallan intemperizados, inconsolidados, con aportes perennes de humedad, que degradan sus componentes mineralógicos y dan génesis a suelos finos con alta plasticidad poco resistentes al corte y, por ende, ante procesos erosivos que desencadenan en eventos de remoción en masa.

A escala geológica, estos materiales son poco resistentes a la erosión y aunado a la deformación incipiente del fallamiento activo manifestado en morfologías estructurales y sismicidad superficial aledaña; controlan y disectan el relieve con alta densidad relativa de cauces fluviales por km^2 , mayor que $1,78 \text{ km}/\text{km}^2$ (Figura 6). Esta textura de los suelos, determina la inestabilidad y concentración de deslizamientos sobre todo donde la unidad muestreada se halla más intemperizada (meteorizada) y podría favorecer nuevos deslizamientos o reactivación ante ocurrencia de EEP o sismos. Se correlacionan con materiales volcánicos y condiciones de intemperismo similares del Valle Central de Costa Rica, predominando suelos MH (Mora, 1998).

En el margen norte de la zona de influencia, se identifican cuadrantes de mayor disección con valores entre 1,78 - 2,66 km/km² (35 % del área) y máximos entre la falla La Lucha y Tigra. Es claro, que existen basculamientos y controles estructurales en los drenajes hacia el NW y no en su sentido normal hacia el SW, evidenciable en represamientos y disminuciones de los niveles base, atribuibles a la falla San Vito.

Los EEP contribuyen en esta dinámica del relieve, pues fomentan tanto la escorrentía superficial como la subsuperficial, acelerando procesos de remoción en masa e incrementando el transporte de sedimentos hacia los cauces fluviales. Los moduladores hidrológicos que ocasionan acumulados extremos diarios, permiten inferir lo esperable de futuras épocas lluviosas en la ruta. Para este caso particular, la cercanía de la ZCI sobre el sur de Costa Rica, la intensa temporada de huracanes 2020 y el paso de Eta (Figura 5C y 5D), generó el mayor acumulado diario en la historia de la estación Las Brisas, siendo el mecanismo de los efectos indirectos de sistemas ciclónicos del Caribe el causante del EEP (205,6 mm) registrado.

Con este contexto, a partir de los mapas inventario de deslizamientos y los criterios de selección expuestos, se zonificó (Figura 6) el corredor vial en áreas estables de baja pendiente (> 5°), así como las propensas a erosión y remoción en masa. Un 24 % de la RN-613 corresponde a sectores inestables, 11 % con trayectos planos (fondos de valles y divisorias) y cerca del 64 % son áreas de mayor estabilidad a largo plazo. La ampliación de los tramos propensos a procesos erosivos y con taludes o laderas potencialmente inestables por altura y tipo de suelos se extendió si habían pasos de cauce. Con estas consideraciones, se identifican tramos que ameritan auscultación, aunados a aquellas obras de contención y el deslizamiento del estacionamiento 15 + 580 km, dado que el contexto sísmico e hidrometeorológico expuesto demuestra que nuevos eventos ocurrirán y corresponde mitigar sus efectos.

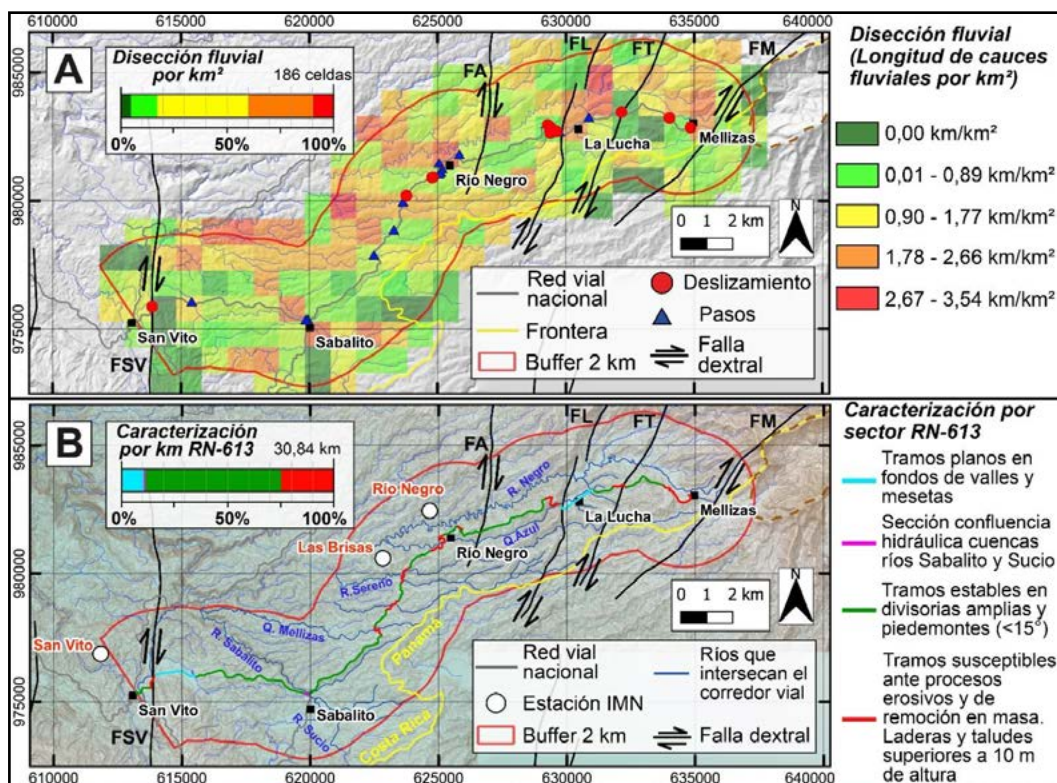


Figura 6. A) Densidad de drenajes por km² dentro del corredor. B) Zonificación de la RN-613 en sitios estables y propensos ante procesos de remoción en masa

Conclusiones

- Se identifica concentración de deslizamientos entre Sabalito y La Lucha, propiciados por la textura (fábrica) de los suelos que genera suelos finos (CL y MH), deformación tectónica que acelera procesos erosivos, propicia aumentos en la pendiente e incrementa la disección fluvial. La capacidad de incorporación de humedad en los horizontes más superficiales de suelo fue rebasada ante el paso del huracán Eta, posiblemente por la saturación previa en un momento donde la época lluviosa estaba consolidada, con ello altas tasas de infiltración disminuyeron el esfuerzo efectivo en algunos sitios de la ruta.
- Durante noviembre de 2020 convergieron factores hidrometeorológicos y sinópticos que contribuyeron con elevados aportes de humedad hacia el corredor vial, como la posición de la ZCI y efectos indirectos por aportes de humedad de alisios del Pacífico en su flujo hacia el mar Caribe producto del huracán Eta, que se estiman con precipitaciones de hasta 205,6 mm y superando el P_{90} diario para noviembre (34,2 mm).
- Las cuencas son alargadas y bien drenadas, con moderada a alta disección fluvial ($> 1,78 \text{ km}^2/\text{km}^2$), favorecida por controles estructurales y erosivos (*i.e.* falla San Vito). Los tiempos de concentración varían de 17,2 a 119,1 min, con caudales pico teóricos de 61 a $295 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Aproximadamente 24 % del corredor vial se clasifica como propenso ante procesos de remoción en masa, coincidiendo generalmente con cuadrantes de moderada a alta disección, pasos de cauce o zonas con concentración de morfologías estructurales cuaternarias (con sismicidad).
- Ante la dinámica de procesos erosivos, posibles sismos superficiales en el Pacífico sur y EEP pueden disparar nuevos eventos de remoción en masa o reactivación de deslizamientos y con ello, comprometer la estructura de pavimentos, taludes, pasos de cauce, infraestructura estratégica y productividad de este sector del cantón.

- Este estudio y sus mapas inventario, genera insumos base para análisis determinísticos o probabilísticos del peligro, vulnerabilidad y amenaza, especialmente priorizando la auscultación del corredor vial ante futuros eventos de disparo (EEP, sismos o ambos).
- A pesar del enfoque descriptivo del problema, algunas recomendaciones podrían derivarse para mitigar el peligro basándose en las inspecciones de campo. En cuanto a taludes debe impermeabilizarse (por ejemplo, bioestabilización que aumente la cohesión) los materiales cortados y manejar los desfuegos en los mismos con consideraciones hidrológicas atinentes, además de enfatizar seguimiento y mantenimiento a los elementos de contención ya construidos por parte de los entes estatales. Para pasos de cauce debe valorarse ampliar la sección transversal sobre todo para las alcantarillas circulares, revestir para minimizar la socavación y remover la acumulación de bancos de sedimentos y restos orgánicos, que podrían generar saturación y deyección lateral en futuras épocas lluviosas.

Agradecimientos

Se agradece al laboratorio Vieto y Asociados por la ejecución de ensayos de clasificación SUCS, así como el financiamiento para visitas de valoración. De igual manera, se extiende agradecimiento a los revisores anónimos, cuyas observaciones mejoraron el alcance de esta investigación y al equipo editorial, por su interés en difundir estudios de índole geológico y vinculados a temas hidroclimáticos, ámbitos clave en la estimación del peligro, vulnerabilidad y riesgo de la red vial costarricense.

Referencias

- Alfaro, A., Denyer, P., Alvarado, G. E., Gazel, E. y Chamorro, C. (2018). Estratigrafía y petrografía de las rocas ígneas en el sector superior de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 58, 7-36. <https://doi.org/10.15517/rgac.v58i0.32669>

- Amador, J. A. (2008). The Intra-Americas Sea Low-level Jet overview and future research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 153-188. <https://doi.org/10.1196/annals.1446.012>
- Araque, M., Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehm, C., Cevallos, C. y Ortiz, C. (2019). *Cuencas hidrográficas*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Aristizábal, E., García, E., Marín, R. Gómez, F. y Guzmán, J. (2022). Rainfall-Intensity effect on Landslide assessment due to Climate change in north-western Colombian Andes. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 103, 51-66. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201215>
- Arroyo, I. (2001). *Sismicidad y neotectónica en la región de influencia del proyecto Boruca: hacia una mejor definición sismogénica del sureste de Costa Rica* (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Breña, A. y Jacobo, M. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Carballo, R. (2019). *Aplicación y determinación de la eficiencia del método HSQI en la sección de montaña, entre el peaje del Zurquí y el cruce de Río Frío de la Ruta Nacional No. 32* (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Chinchilla, G., Morera, R., y Navarro, J. (2020). *Boletín Meteorológico Mensual. Noviembre 2020*. Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/490190/NOVIEMBRE>
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2021). *Plan general de la emergencia por situación provocada por los efectos del Huracán ETA - Decreto ejecutivo de emergencia N° 42705-MP*. Recuperado de <https://www.cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/planes/Plan%20General%20de%20la%20Emergencia%20Huracan%20Eta%2042705.pdf>
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2019). *Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Coto Brus*. Recuperado de https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/mapas_de_amaneza/puntarenas/Coto%20Brus.pdf
- Denyer, P. y Alvarado, G. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica (Escala 1:400000)*. San José, Costa Rica: Librería Francesa.
- Garro, J., Naranjo, R., Vega, P. y Valverde, C. (2017). *Evaluación de la Ruta Nacional 613, tramo entre los poblados de Sabalito y Las Mellizas, zona sur de Costa Rica LM-PI-UGERVN-5-2017*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación.
- Hidalgo, H., Alfaro, E., Hernández, F. y Pérez, P. (2020). Identification of tropical cyclones' critical positions associated with extremely wet precipitations events in Central America. *Atmosphere*, 11(10), 1123. <https://doi.org/10.3390/atmos11101123>
- Instituto Meteorológico Nacional (2022). *Boletín meteorológico*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>.
- Maldonado, T., Alfaro, E. y Hidalgo, H. (2018). A review of main drivers and variability of Central America's climate and seasonal forecast systems. *Revista de Biología Tropical*, 66(S1), 153-175. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.33294>
- Mora, R. (1998). Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del valle Central, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 19, 81-98. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i22.8602>
- National Hurricane Center. (2022). *Atlantic Hurricane Season*. Recuperado de <https://www.nhc.noaa.gov/data/>

National Seismological Network (2022). *The Costa Rica National Seismological Network Catalog during 1975-2022*. <https://doi.org/10.15517/TC>

Physical Sciences Laboratory (2022). *Multivariate ENSO index version2 (MEI.v2)*. Recuperado de <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>. National Oceanic and Atmospheric Administration.

Quesada, A., Fallas, B., Hernández, K., Stoffel, M. y Ballesteros, J. (2019). Relationships between earthquakes and landslides in Costa Rica. *Landslides*, 16, 1539-1550. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01209-4>

Solís, J. (2018). *Análisis de vulnerabilidad de la Carretera Nacional 2018 tramo Jaboncillal de Goicoechea a Carmen de Cartago* (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Valdés, A., Mendoza, M., Carlón, T. y Macías, J. (2022). Multitemporal Landslide inventory analysis of an intertropical mountain in west-central Mexico – Basis for hazard management. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1650-1669. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7223-3>

van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. The Hague: Smits Publishers.

ANEXOS: índices de cuenca y caudales teóricos

ID	Cuenca	Área (km ²)	Per. (km)	Hmáx (m)	Hmín (m)	Dist (km)	%	F	Kc	Tc (min)	Q (m ³ /s)
1	Q. Pavo	1,30	6,9	1060	985	0,77	9,77	0,29	1,71	17,2	69,0
2	Río Sabalito 1	27,37	33,8	1165	890	13,68	2,01	1,62	1,81	53,2	856,1
3	Río Sabalito 2	1,14	5,9	1021	987	1,95	1,74	0,29	1,54	31,9	60,6
4	Q. Unión	2,07	9,3	1066	996	2,99	2,33	0,23	1,82	39,2	106,2
5	Río Unión	15,30	31,8	1316	1007	14,21	2,18	0,10	2,27	119,1	560,0
6	R. Negro 1	4,39	12,6	1187	1037	5,88	2,55	0,05	1,68	90,9	206,3
7	R. Negro 2	4,40	11,5	1187	1144	0,66	6,47	0,22	1,54	36,1	206,8

Nota: pendiente media (%), factor de forma (F), compacidad (Kc), tiempo de concentración (Tc) y caudal teórico máximo (Q).

Los contenidos de este documento, representan insumos dentro de un proceso de gestión del conocimiento que, por sí mismos, a priori, no constituyen una declaración de una normativa, procedimiento, criterio o herramienta oficial de acatamiento obligatorio en la gestión de proyectos de obra vial pública de Costa Rica, por parte del LanammeUCR. Cualquier posición oficial para Costa Rica sobre aspectos puntuales contemplados en este documento, se realizarán por los medios que corresponden, según los lineamientos de la Universidad de Costa Rica, de la Ley 8114 y su Reglamento al Art 6 (Decreto 37016 – MOPT).