

RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y LA VULNERABILIDAD DE ALGUNAS RUTAS DE MONTAÑA DE COSTA RICA

William Vargas Monge y José Francisco Garro Mora¹.

Resumen

La vulnerabilidad de una carretera ante amenazas naturales es un factor determinante de la seguridad vial evidente, aunque los problemas se presentan en forma puntual y esporádica. Este artículo resume las investigaciones sobre la vulnerabilidad de las rutas nacionales, realizadas en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, que permitieron identificar una relación estrecha de ese aspecto con las características geométricas de las rutas de montaña.

Se analizaron cuatro rutas que comunican la Gran Área Metropolitana de Costa Rica con otras zonas del país donde se encuentran la producción agrícola y las atracciones turísticas. Las rutas evaluadas tienen en común el tipo de tránsito, mezcla de transporte de carga pesada, pasajeros y turistas, así como el haber evolucionado a partir de antiguos caminos de carretas, de los siglos XIX y XX. Se estudiaron los aspectos geotécnicos e hidráulicos de la vulnerabilidad física y su relación con el radio de curvatura horizontal y la pendiente de las rutas mediante el uso de metodologías de evaluación desarrolladas en Lanamme y de un sistema de información geográfica.

En todos los casos analizados se encontró una coincidencia en ubicación de la vulnerabilidad geotécnica alta de los taludes de corte, las pendientes longitudinales fuertes y los radios de curvas reducidos de las rutas. Se concluyó que la relación es consecuencia directa de las limitaciones técnicas y económicas para la construcción de puentes en la época, la topografía montañosa y la presencia de suelos residuales de gran espesor.

La ampliación de las vías sin un diseño geotécnico adecuado de los taludes, la falta de mantenimiento de los sistemas de drenaje y el cambio climático producen actualmente condiciones propicias para la falla y deslizamiento de los taludes por saturación del suelo con mayor frecuencia, y el peligro consecuente para los usuarios.

¹ Programa de Investigación de Riesgos Naturales, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica

Introducción

Las rutas que comunican la Gran Área Metropolitana (GAM) o “Meseta Central” de Costa Rica con las zonas transmontanas (planicies aluviales) del país tienen una gran importancia para la economía nacional puesto que en la GAM se concentra alrededor de dos tercios de la población total y en las zonas transmontanas se cultivan los principales productos de consumo y de exportación. Además, esas rutas son parte de los principales ejes del turismo dirigido a las zonas costeras del Pacífico y a la periferia del volcán Arenal en la zona Norte, el sitio más visitado por los turistas extranjeros en la actualidad.

En este estudio se analizaron las rutas N° 3, tramo La Garita – Orotina, N° 712,120 y 126, tramos Alajuela – Varablanca – San Miguel de Sarapiquí y N° 141-703 y 702, entre San Ramón y Ciudad Quesada. La ubicación de las rutas y algunos centros de población importantes a los cuales sirven se muestran en la Figura 1.

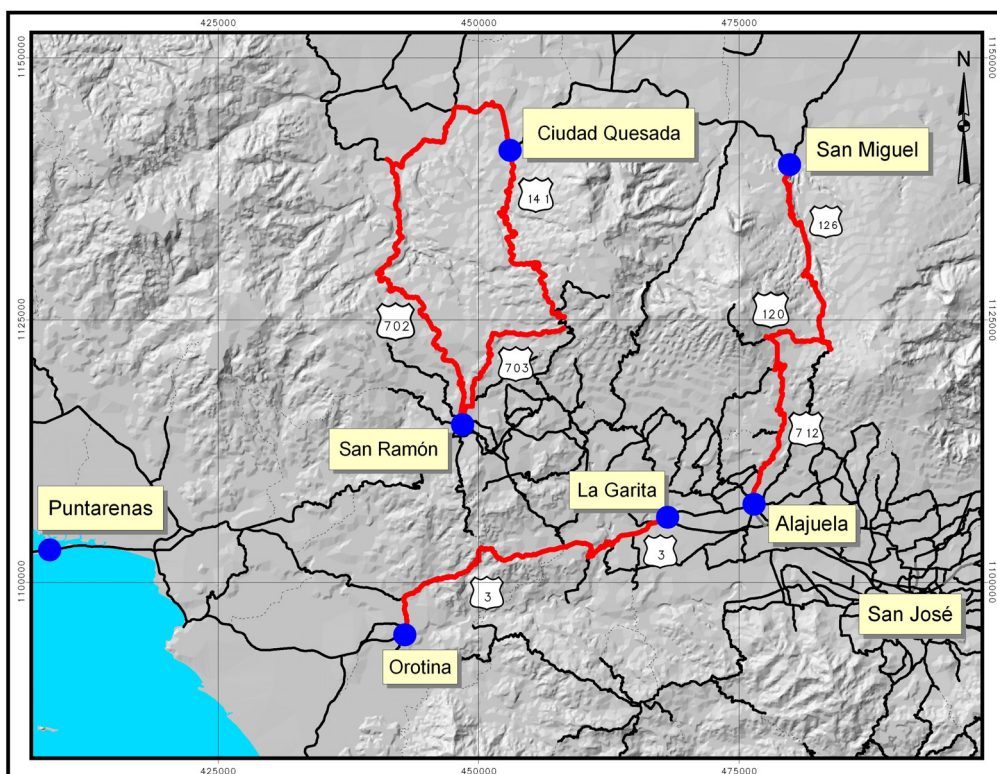


Figura 1. Rutas nacionales de montaña cuyas vulnerabilidades y características geométricas fueron evaluadas.

Actualmente, estas rutas presentan altos niveles de tránsito, compuesto por vehículos de carga pesada y transporte de productos agrícolas, autobuses, automóviles particulares y de turismo. Sin embargo, en su origen, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, fueron caminos de mulas y de carretas construidos con limitaciones técnicas y económicas, sin diseño o ingeniería y con los pocos recursos de una nación en su comienzo.

Actualmente, es frecuente encontrar en las rutas de montaña de Costa Rica, señales de desvío y de advertencia del riesgo en las zonas en que el relleno, el talud de corte u otras obras han fallado. Entre esas “*Carril cerrado adelante*”, “*Puente en mal estado*”, “*Derrumbes en la vía*” y “*Conduzca bajo su propio riesgo*” demuestran la mínima atención a la vulnerabilidad de las carreteras, la irresponsabilidad, la falta de rendición de cuentas y hasta el cinismo o impunidad de las autoridades. Estas señales transmiten de manera poco sutil el mensaje de que el riesgo existente no se atiende ni se maneja, sino que simplemente se traslada a los usuarios.

Para determinar la relación entre las características geométricas, que inciden sobre el nivel de servicio y la vulnerabilidad física, y por ende sobre la seguridad de las vías, se estudiaron los riesgos geotécnicos e hidráulicos de la infraestructura, el radio de curvatura horizontal (R) y la pendiente longitudinal (m). Las principales herramientas utilizadas en el estudio fueron las metodologías de evaluación de amenazas, vulnerabilidades y características geométricas, desarrolladas o adaptadas en LanammeUCR para ser aplicables en un sistema de información geográfica (SIG).

Evaluación de riesgos naturales

UNESCO define los riesgos naturales como las probabilidades de que la infraestructura y la población de una región sufran daños o pérdidas como resultado de eventos destructivos o peligros de origen natural, geológicos y climáticos. El riesgo es el producto o convolución de dos factores denominados *amenaza* (A) y *vulnerabilidad* (V). La amenaza es el factor natural y la vulnerabilidad es el factor humano del riesgo.

Amenazas naturales

Una amenaza natural se define como la probabilidad de ocurrencia de eventos destructivos producidos por los procesos geodinámicos y meteorológicos, en una región

o espacio (S) y en un intervalo de tiempo (Δt) específicos. La amenaza se caracteriza en función de la *susceptibilidad* de los sitios o terrenos (probabilidad espacial), la *severidad* (magnitud, intensidad, duración) y la *frecuencia* (probabilidad temporal) de los eventos. La susceptibilidad es el factor de amenaza más fácil de evaluar y la frecuencia el de mayor dificultad, especialmente en el caso de las amenazas geológicas tales como los sismos y las erupciones volcánicas. El calentamiento global y el cambio climático han hecho que la frecuencia de eventos extremos tales como los huracanes y las inundaciones, aumente en todo el planeta.

Las amenazas más importantes para la infraestructura vial de Costa Rica son las inundaciones y ondas de agua (caudales extremos), los deslizamientos de tierra y las vibraciones sísmicas. En un segundo nivel de importancia se ubican los flujos de lodo, los lahares, la licuación de suelos y la socavación. Para la seguridad vial son también importantes las amenazas de las lluvias intensas y la neblina. Las amenazas de menor incidencia son los vientos fuertes o turbulentos, la ruptura superficial de fallas, los tsunamis y en general las amenazas asociadas con la actividad volcánica.

Vulnerabilidades

La vulnerabilidad física también es denominada *fragilidad* y se define como el grado de daño que puede sufrir la infraestructura o la población por su mal desempeño o insuficiencia cuando es sometida a los efectos de las amenazas. La vulnerabilidad puede variar entre 0 (ningún daño) y 100% (pérdida total) y depende de la *exposición* o ubicación espacial de las obras de infraestructura y de la población con respecto a las amenazas, así como de la *calidad* o la *fortaleza* de las obras o estructuras. La calidad de una obra es cuantificable en función de su resistencia, durabilidad, adaptabilidad y resiliencia y es determinada por su concepción o diseño, su construcción y mantenimiento.

Los pavimentos son las estructuras de menor vulnerabilidad de la infraestructura vial y los terraplenes y taludes de corte los de mayor propensión al daño, por la variedad de amenazas que los afectan. Los puentes también son estructuras vulnerables, especialmente a los sismos y en caso de que el diseño (o la calidad) sea deficiente, lo cual puede darse si no reciben mantenimiento adecuado o no son readecuados para que cumplan con la normativa de diseño sismo-resistente más actualizada. Los

drenajes son medianamente vulnerables y la frecuencia de falla está relacionada directamente con la frecuencia de la amenaza de crecidas.

Riesgo total

El riesgo total (R_t) es la suma de los riesgos específicos (R_i) de los componentes de un sector o infraestructura y se puede cuantificar en términos económicos. El riesgo específico de un elemento individual es la convolución de los factores de amenaza (A) y vulnerabilidad (V), los cuales son funciones del tiempo y del espacio. En su forma matemática más simple, el riesgo total puede ser expresado como:

$$R_t = \sum R_i = \sum_i \sum_j A_j * V_{i,j} \quad \text{Ecuación 1}$$

La Ecuación 1 indica claramente que sin amenazas o sin vulnerabilidades específicas no existen riesgos. Por ejemplo, la vulnerabilidad específica a las vibraciones sísmicas de los pavimentos flexibles durante su vida útil es muy baja, lo cual implica que el riesgo específico o pérdida potencial de este tipo de estructuras a causa de las vibraciones sísmicas es prácticamente nulo. Sin embargo, los pavimentos son muy vulnerables a los desplazamientos permanentes del terreno, tales como los que producen los deslizamientos de tierra o la licuación de suelos, por lo que el riesgo sísmico total de este componente de la infraestructura vial no es nulo.

Gestión de riesgos de la infraestructura vial

La mayoría de las amenazas naturales no son susceptibles a la manipulación o al control humano o tecnológico, por lo que la Ecuación 1 también indica que, cuando existen amenazas, la reducción de la vulnerabilidad es la mejor y tal vez la única forma factible de reducir el riesgo. La gestión de riesgos consiste en la implementación sistematizada de medidas de reducción de la vulnerabilidad y la verificación de su eficacia. La reducción de la vulnerabilidad se logra con medidas estructurales que procuran la modificación de los factores que la producen, tales como la reubicación y el aumento de la resistencia de las obras (i.e. readecuación o reconstrucción) o medidas no estructurales tales como la implementación de sistemas de alerta temprana de eventos (prevención) y de mecanismos paliativos del daño (mitigación y aseguramiento).

Idealmente, con recursos limitados se debe trabajar en las medidas de tipo estructural hasta lograr reducir la vulnerabilidad y el riesgo a un nivel *manejable*, en un plazo *razonable*. Un nivel de riesgo manejable es aquel en el cual las pérdidas o daños en caso de eventos potencialmente destructivos no generan emergencias y se pueden atender con la capacidad de respuesta local. Un plazo razonable es un intervalo de tiempo inferior al período de recurrencia de la amenaza, en el cual la razón beneficio/costo de la inversión realizada llega a ser superior a la unidad. La ausencia de gestión adecuada de los riesgos naturales es la causa de desastres y emergencias, definidos estos como eventos cuyas consecuencias exceden la capacidad de respuesta local y requieren de asistencia externa o recursos extraordinarios.

La gestión de riesgos debe basarse necesariamente en la identificación y cuantificación (evaluación) y priorización de los mismos. En el Programa de Investigación de Riesgos Naturales de LanammeUCR, se trabaja desde el año 2002 en la evaluación de los riesgos naturales de la infraestructura vial, al amparo y por mandato de la Ley N° 8114. La investigación ha abarcado tanto la evaluación de amenazas como la de vulnerabilidades de los componentes estructurales más importantes de la infraestructura vial, a saber, puentes, taludes de corte, terraplenes o rellenos y alcantarillas. Como resultado, se han adaptado y desarrollado metodologías probabilísticas de evaluación cuya precisión y utilidad para la toma de decisiones se ha comprobado mediante la aplicación a casos de estudio.

Metodología de evaluación de riesgos naturales de la infraestructura vial

La metodología empleada en los estudios realizados en LanammeUCR para evaluación de riesgos naturales de la infraestructura vial se resume en el esquema de la Figura 2. En el primer nivel de la metodología se encuentran los insumos necesarios para la evaluación de amenazas y vulnerabilidades específicas, según los procedimientos que se detallan más adelante. Al combinar los resultados de las evaluaciones se obtienen los perfiles de vulnerabilidad, los cuales son verificados con una visita al campo, y se utilizan para detectar o identificar los componentes o segmentos críticos, de mayor vulnerabilidad, así como para definir las soluciones típicas aplicables, que podrían ser consideradas en la propuesta de anteproyectos. Más allá del alcance de la metodología se encuentra el análisis económico (beneficio/costo) de las soluciones, la definición de prioridades de inversión y la implementación de proyectos de reducción de

vulnerabilidad. Estos son los pasos de la gestión de riesgos que corresponden a las autoridades del sector.

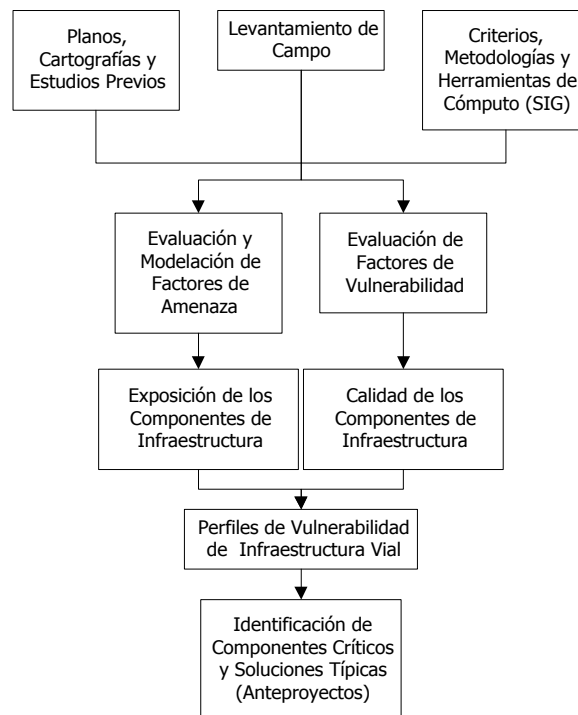


Figura 2. Esquema metodológico para la evaluación de riesgos naturales de la infraestructura vial. (Modificado de Vargas y Garro, 2003).

Evaluación de la amenaza de deslizamiento

La evaluación probabilística de la amenaza de inestabilidad de suelos tiene la dificultad de que la frecuencia de los eventos destructivos no se puede predecir con certeza, dado que son disparados por varios mecanismos, entre ellos la acumulación de humedad, los sismos y la actividad humana. La evaluación se limita, en consecuencia, a los aspectos de susceptibilidad y magnitud potencial del problema.

Sin cartografías adecuadas de todos los factores determinantes, algunas metodologías desarrolladas en otros países no pueden ser aplicadas al análisis de zonas o proyectos específicos. Sin embargo los estudios han demostrado que los factores determinantes de la susceptibilidad más importantes son el tipo de material y la pendiente o ángulo de inclinación de las laderas y taludes. Otros factores pueden ser omitidos en un modelo

analítico para localizar las zonas más propensas a la inestabilidad de una carretera, sin pérdida significativa de precisión en los resultados. A partir de esa observación, en Lanamme se desarrolló la metodología de “ángulo crítico” (Vargas y Garro, 2006), que permite definir niveles de severidad o intensidad probable de la amenaza de inestabilidad con base en mapas topográficos y geológicos, los cuales tienen cobertura y disponibilidad amplia en Costa Rica.

Metodología de “ángulo crítico”

La metodología desarrollada en LanammeUCR (Vargas y Garro, 2006) y probada en varios casos de estudio (Umaña, 2003; Navarro, 2004; Badilla, 2005; Castro, 2005; Gamboa, 2005; Matamoros, 2005; Zamora, 2005). Se basa en el análisis estadístico de la pendiente de las laderas naturales y de las áreas de deslizamiento de las zonas de influencia de las carreteras, separadas en las unidades de un mapa geológico o una zonificación geotécnica y es aplicable a zonas con suelos residuales y características climáticas homogéneas. En Costa Rica este criterio equivale a segmentos de aproximadamente 50 a 100 kilómetros de longitud de carretera de montaña.

El “ángulo crítico” se define como el valor promedio del ángulo de la pendiente en las zonas deslizadas y es una propiedad específica de los suelos, cercana pero superior al ángulo de resistencia del material. Para su determinación con la ayuda de un SIG se elabora un modelo de elevación digital (MED) a partir de la cartografía topográfica y se separa en las distintas unidades de un mapa geológico o geotécnico. El análisis estadístico de las pendientes en las zonas deslizadas dentro de una unidad, obtenidas de un mapa específico, de un catálogo de fotografías aéreas o de un levantamiento de campo, permite determinar el valor promedio y su variabilidad (desviación estándar). Con base en estos valores se definen los intervalos de pendientes que corresponden a distintas probabilidades de falla. A esos intervalos se asocian niveles cualitativos de la amenaza (de intensidad) desde “muy bajo” hasta “muy alto” y se asignan a las pendientes en la zona del mapa geológico o geotécnico bajo análisis. Las zonificaciones obtenidas de esta manera tienen una exactitud superior al 60%, medida como el porcentaje de áreas deslizadas que se localizan en los niveles superiores de susceptibilidad a la amenaza (“moderado”, “alto” y “muy alto”). Los detalles de la aplicación se encuentran en las referencias (Vargas y Garro, 2006).

Hernández (2006) con base en la zonificación geotécnica de Bogantes y otros (2002) determinó que la mayoría de los suelos de las rutas de montaña de Costa Rica son arcillosos con alto contenido de óxidos (rojizos), (mal) llamados “lateríticos”, constituidos por materiales residuales de antiguas rocas y cenizas volcánicas, así como de rocas sedimentarias. Según los resultados de los estudios realizados en LanammeUCR entre 2003 y 2006, los ángulos de fricción de estos materiales son típicamente de 25° y los ángulos críticos de alrededor de 27°, con desviaciones estándar de 10°. A partir de los valores anteriores se proponen los criterios generalizados para definir el nivel de amenaza de inestabilidad que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios para la clasificación de la susceptibilidad a deslizamiento.

Ángulo de la pendiente, θ (°)	Nivel de amenaza	Color
$\theta \leq 10^\circ$	Muy Bajo	Azul
$10^\circ < \theta \leq 20^\circ$	Bajo	Verde
$20^\circ < \theta \leq 30^\circ$	Moderado	Amarillo
$30^\circ < \theta \leq 40^\circ$	Alto	Naranja
$\theta > 40^\circ$	Muy Alto	Rojo

Evaluación de la vulnerabilidad geotécnica

A partir de la zonificación de la amenaza de inestabilidad se identifican las áreas de mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en la zona de impacto directo de la carretera. Esta se define como un ancho de al menos 200 metros a ambos lados del eje de la vía, en los cuales la inestabilidad de las laderas tiene el potencial de producir daños. Los cortes de la carretera pueden estar ubicados en esa zona, lo cual hace que tengan un factor de exposición relativa y la vulnerabilidad específica dependerá en esos casos de la calidad de su diseño, construcción y mantenimiento. Desde el punto de vista geotécnico, los taludes de cortes y de rellenos (terraplenes) se deben diseñar de manera que su *inclinación* y *altura* sean adecuados para evitar la falla por cortante de los materiales, lo cual se refleja en el factor de seguridad contra inestabilidad, que debe ser superior a 1,5 en condición estática y al menos de 1,15 con carga sísmica, si no existen estructuras cercanas (Ulloa, 2006).

En los casos estudiados, se hizo evidente la ausencia de diseño geotécnico, dado que los ángulos de inclinación de los taludes de corte y relleno usualmente superan el

ángulo de fricción de los materiales, lo cual hace que sean inestables a largo plazo y propensos a la falla en condición drenada. Este tipo de falla es poco frecuente debido a la humedad casi perenne de los terrenos montañosos. Los taludes con inclinaciones mayores al ángulo de fricción dependen de la resistencia adicional que aporta la succión en condición no saturada del suelo, la cual normalmente se da en las montañas de Costa Rica. Sin embargo, el cambio climático y el abandono o falta de mantenimiento adecuado de las obras de drenaje producen la saturación de suelos y la falla de los taludes con frecuencia cada vez mayor en la estación lluviosa.

En condiciones de taludes de corte y relleno intrínsecamente vulnerables desde su construcción, el factor determinante de la vulnerabilidad más importante es la altura de los mismos. Por lo tanto, la exposición es tomada directamente de la evaluación de amenaza (zonificación) y se modifica de acuerdo con la altura observada de los taludes para determinar la vulnerabilidad final, de acuerdo con los criterios de la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios para definir la vulnerabilidad de taludes de corte y relleno

Exposición (Amenaza)	Ángulo de la pendiente, θ (°)	Altura del talud H (m)	Vulnerabilidad	Color
Muy Baja	$\theta \leq 10^\circ$	$H < 10$	Muy Baja	Blue
		$H \geq 10$	Baja	Green
Baja	$10^\circ < \theta \leq 20^\circ$	$H < 5$	Muy Baja	Blue
		$5 \leq H \leq 10$	Baja	Green
		$H \geq 10$	Moderada	Yellow
Moderada	$20^\circ < \theta \leq 30^\circ$	$H < 5$	Baja	Green
		$5 \leq H \leq 10$	Moderada	Yellow
		$H \geq 10$	Alta	Orange
Alta	$30^\circ < \theta \leq 40^\circ$	$H < 5$	Moderada	Yellow
		$5 \leq H \leq 10$	Alta	Orange
		$H \geq 10$	Muy Alta	Red
Muy Alta	$\theta > 40^\circ$	$H < 5$	Alta	Orange
		$H \geq 5$	Muy Alta	Red

Los criterios de la Tabla 2 se basan en las características geométricas y geotécnicas de las rutas de montaña de Costa Rica (Ulloa, 2006; Ulloa y Vargas, 2007). El color se usa para identificar en el perfil gráfico de vulnerabilidad los segmentos en los que se ha dividido la carretera. Los segmentos usados en los estudios son típicamente de 200

metros, considerados adecuados para la escala de la información topográfica (1:25.000 a 1:50.000), según Vargas y Garro (2003). El perfil gráfico es probablemente el que transmite más fácilmente la información a los usuarios potenciales de la misma. Además del perfil gráfico, el SIG almacena en la tabla de atributos de cada segmento toda la información relativa a las amenazas y vulnerabilidades así como la que desee introducir el analista (fechas de visitas al campo, comentarios, vínculos a archivos complementarios, imágenes, etc.).

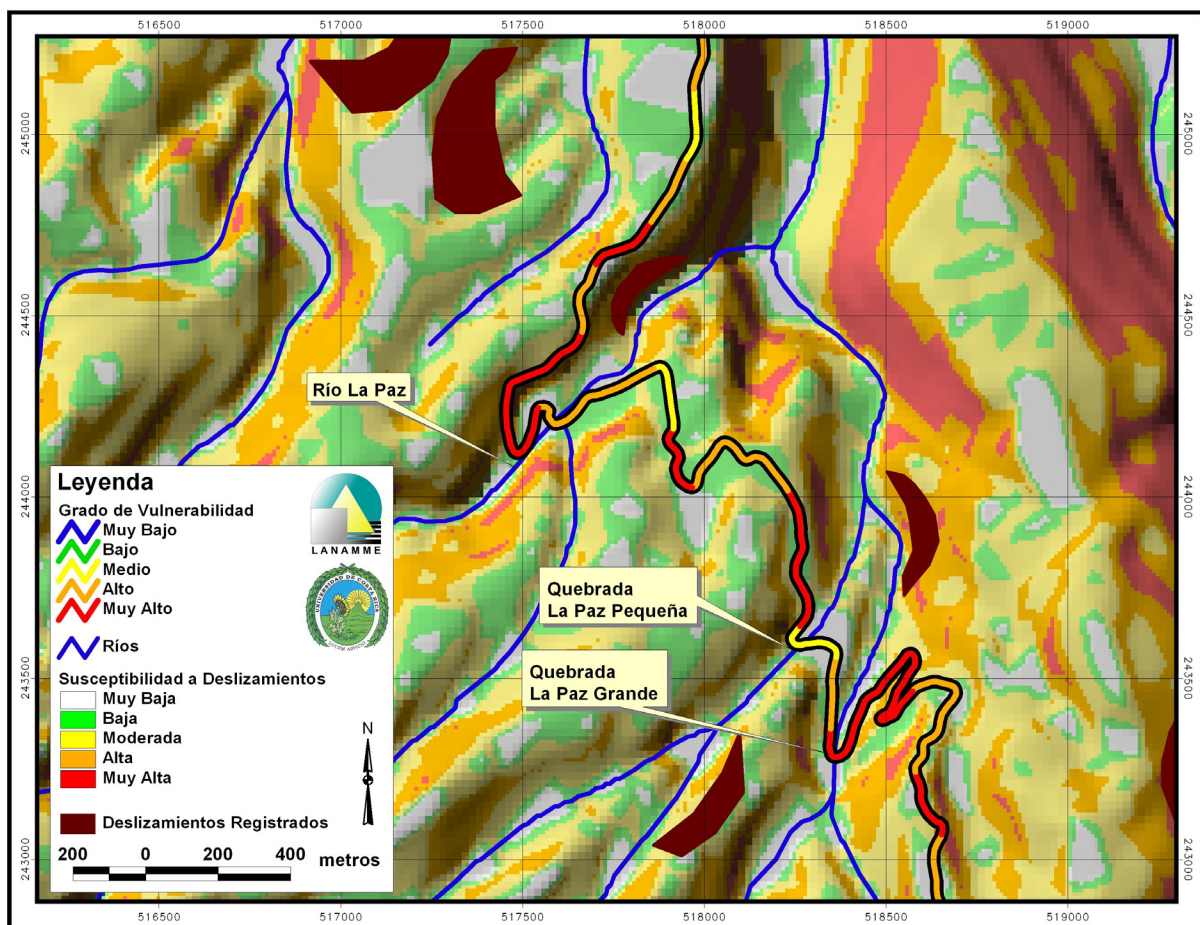


Figura 3. Detalle de la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos y vulnerabilidad de la Ruta 141, sobre un modelo de elevación digital.

Evaluación de la amenaza de caudales extremos

Esta es la amenaza de origen meteorológico más importante para las obras mayores de drenaje, es decir, las alcantarillas y los puentes. Las alcantarillas usualmente tienen

áreas de cuenca tributaria reducidas y los caudales se pueden determinar mediante la fórmula racional. En el caso de las rutas de montaña evaluadas, las alcantarillas han sido utilizadas en cuencas de áreas hasta 25 km². Las cuencas mayores tienen puentes y se omitieron en este artículo debido a que, mayoritariamente, los puentes en zonas montañosas no muestran señales de vulnerabilidad a caudales extremos.

La fórmula racional es aplicable a cuencas pequeñas solamente, debido a que asume una intensidad de la lluvia uniforme sobre toda el área. La fórmula para el cálculo del caudal, Q, se reduce en ese caso a la Ecuación 2.

$$Q = ciA$$

Ecuación 2

c: Coeficiente de escorrentía

i: Intensidad de la lluvia

A: Área de la cuenca

Esta ecuación es fácil de implementar en un SIG, puesto que todos los factores se pueden evaluar en forma automatizada, si se cuenta con las cartografías o mapas respectivos en formato digital. El coeficiente de escorrentía se obtiene de los mapas más recientes de cobertura vegetal y uso del suelo, usando ponderación de áreas en cuencas mixtas. La intensidad de lluvia se determina a partir de las isoyetas en el mapa de precipitación para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y los períodos de retorno que especifique la normativa de diseño aplicable. En los casos de estudio se evaluaron para períodos de retorno de 20 y 100 años. El tiempo de concentración se calculó con la fórmula de Kirpich, la cual se basa en la diferencia de elevaciones y la longitud del cauce principal, los cuales se obtienen de la topografía.

Evaluación de vulnerabilidad hidráulica

Las alcantarillas son una contracción del área disponible para el flujo por lo que producen siempre un incremento de la velocidad cuyas consecuencias pueden ser la erosión del conducto o de la estructura a la salida y la socavación del terraplén. La vulnerabilidad de las alcantarillas es importante para la seguridad vial dado que la obstrucción de los conductos en la estación lluviosa tiene como consecuencias la saturación y falla del relleno, la posibilidad de escorrentía del agua sobre las estructuras de pavimento y, en caso extremo, la inundación.

Las alcantarillas son estructuras hidráulicas que por su función necesariamente están expuestas a la amenaza de los caudales extremos, y esto produce que los factores determinantes de su vulnerabilidad (o calidad) sean la capacidad hidráulica de los conductos y la falta de mantenimiento adecuado.

La capacidad hidráulica se evalúa mediante la curva de desempeño hidráulico, la cual relaciona el caudal con la altura del flujo en la entrada. La Figura 4 muestra una curva de desempeño hidráulico típica.

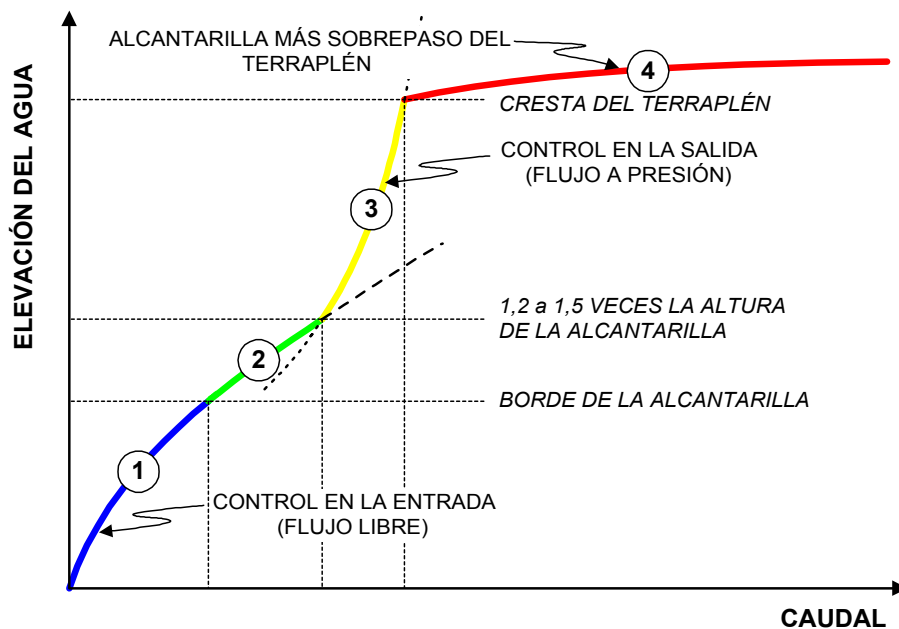


Figura 4. Curva de desempeño hidráulico de una alcantarilla

En función de la altura del flujo se pueden definir cuatro condiciones o “zonas” de operación, tal como se muestra en la Figura 4. En las zonas 1 y 2 la alcantarilla funciona como un canal abierto (operación normal y límite de operación normal, respectivamente). La zona 3 implica la acumulación de fluido a la entrada de la alcantarilla y su funcionamiento como tubería a presión, por lo que se considera inadecuada y potencialmente peligrosa para el terraplén. La zona 4 es inadecuada e implica la probabilidad de inundación de la vía.

La vulnerabilidad de las alcantarillas se relaciona con las condiciones de operación durante los caudales extremos. Según Rodríguez (1989), las alcantarillas deben ser diseñadas de manera que tengan una capacidad hidráulica suficiente para funcionar

como canal abierto en los caudales máximos con períodos de retorno de 20 años y como tubería a presión en los caudales máximos con períodos de retorno de 100 años, sin que excedan la cresta del relleno. Con base en la relación entre el caudal máximo de cada período de retorno y la capacidad hidráulica se definieron los criterios de vulnerabilidad de la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios de vulnerabilidad de alcantarillas con base en la curva de desempeño.

Vulnerabilidad	Zona de curva		Color	Comentario
	Q20	Q100		
Muy baja	1	1		Alcantarilla sobredimensionada
Baja	1	2		Operacional en cualquier caso
Moderada	2	2		Sensible a cambios en la cuenca
Alta	2	3		Insuficiente para eventos extremos
Muy Alta	3 ó 4	3 ó 4		Daños esperables en eventos moderados

La configuración del conducto también es un factor determinante de la capacidad para evacuar objetos arrastrados por los caudales extremos o los flujos de detritos, tales como troncos, rocas y hasta automóviles. Desde esta perspectiva, no se recomienda dividir el área requerida en dos conductos o colocar diafragmas que faciliten la obstrucción.

Perfiles de vulnerabilidad

La evaluación de amenazas y vulnerabilidades de un corredor genera una gran cantidad de información que se puede presentar de varias maneras o formatos cuando se utilizan las herramientas de un SIG para producir salidas (productos) impresos en papel o imágenes digitales. Entre estas las más comunes son los mapas temáticos y las tablas de atributos de los elementos de un mapa. Aunque las salidas son reducciones del potencial interno que provee el SIG para el usuario experto, son necesarias para comunicar los resultados a los no expertos y especialmente a los tomadores de decisiones, quienes pueden tener un trasfondo que no sea técnico. Por lo tanto, la información que se presente en una salida típica debe ser de fácil comprensión para cualquier usuario, lo cual requiere que sea simplificada al máximo sin perder su validez técnica.

La salida más empleada en los estudios realizados fueron los mapas temáticos, en los cuales se reúnen varios elementos tales como el modelo de elevación digital, la zonificación del potencial de inestabilidad (amenaza de deslizamiento) y la vulnerabilidad de la carretera, en segmentos de 100 a 200 metros de longitud. La segmentación es necesaria para producir un número finito de elementos de información y tiene como consecuencia la necesidad de fundir o ponderar las distintas vulnerabilidades que pueden estar presentes. En los casos de estudio se seleccionó el nivel mayor de vulnerabilidad (geotécnica, hidráulica o estructural) de cada segmento para el mapa, aunque la información completa se almacena como atributo del segmento. La Figura 5 muestra el perfil de vulnerabilidad final de una de las rutas evaluadas.

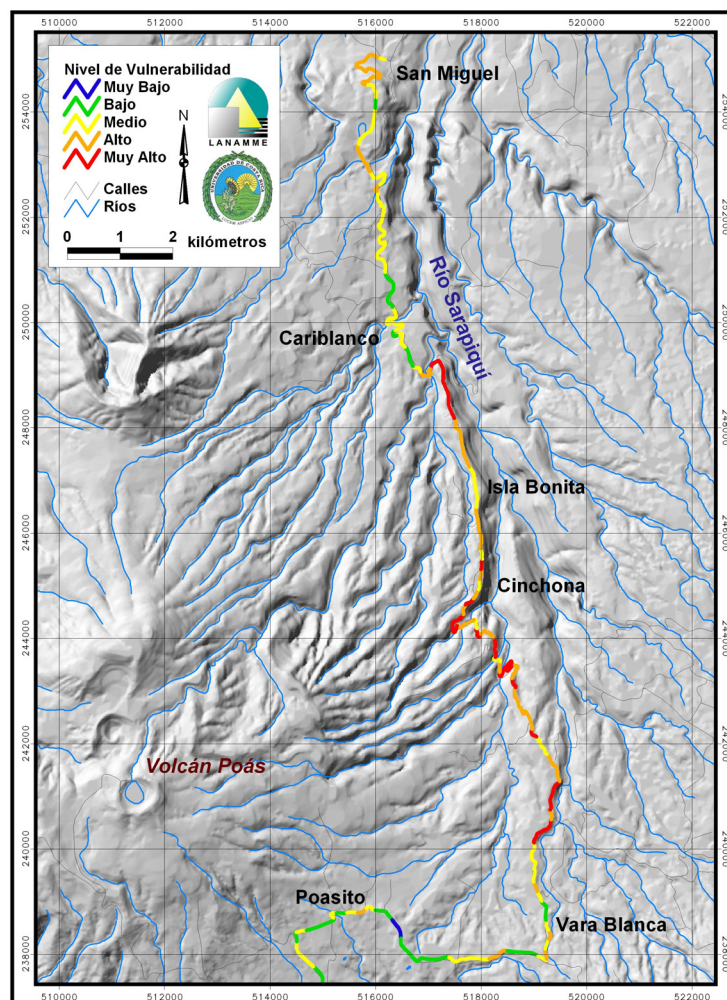


Figura 5. Perfil de vulnerabilidad final de la Ruta 141.

A partir de los resultados de la evaluación también se definieron los segmentos y obras que requieren atención prioritaria como aquellos con niveles de vulnerabilidad “alto” (color naranja) y “muy alto” (color rojo). La información de esos segmentos se recopila en una tabla de resumen en la cual se detallan la ubicación y todos los factores de riesgo (amenazas y vulnerabilidades) que llevaron a la clasificación final. Con base en la tabla de resumen de cada estudio se definieron las medidas de mitigación típicas aplicables a la reducción de vulnerabilidad específica de cada segmento u obra de infraestructura analizada. De esta manera, se facilita al usuario la toma de decisiones sobre las prioridades de inversión y las necesidades de estudios detallados posteriores para llegar a los anteproyectos de obras específicas de reducción de la vulnerabilidad.

Evaluación de las características geométricas de las rutas

Puesto que las carreteras estudiadas son antiguos caminos de carretas, de la primera parte de la historia nacional en los siglos XIX y XX, no se cuenta en la mayoría de los casos con planos a una escala adecuada. Además, los mapas existentes con cobertura del 100% del territorio continental de Costa Rica tienen una escala de 1:50.000, la cual no se considera suficientemente detallada para evaluar las características geométricas. Existen mapas digitales con escalas 1:25.000 y 1:10.000 que aunque son mejores en cuanto a precisión, no cubren todo el territorio nacional.

Como consecuencia de lo anterior, para los estudios se realizaron levantamientos con receptores de posición satelitales (GPS) de alta precisión ($\pm 0,5$ m en las coordenadas horizontales). Los levantamientos se hicieron a velocidades bajas y uniformes para obtener una serie de puntos con espaciamiento aproximadamente constante, entre 5 y 10 m. Los registros obtenidos fueron filtrados para eliminar el ruido, especialmente en la coordenada vertical, mediante el promedio ponderado o suavizado de los 5 puntos adyacentes y con la eliminación de frecuencias altas al aplicar la transformada rápida de Fourier a la serie de datos.

Los registros fueron posteriormente interpolados a intervalos de distancia horizontal constante ($d=5$ m) y se aplicaron algoritmos sencillos en el SIG para el cálculo de pendiente longitudinal y del radio de las curvas a partir de las coordenadas (x, y, z). El cálculo de la pendiente longitudinal es el más sencillo, según la Ecuación 3.

$$m_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{d}$$

Ecuación 3

El cálculo del radio de curvatura en cada punto (x_i, y_i) se calculó usando las ecuaciones 4 a 7, las cuales se basan en las coordenadas de los puntos de inicio y final de los intervalos de longitud constante interpolados, como se muestra en la Figura 6. La Ecuación 4 se usó como verificación de la interpolación previamente realizada.

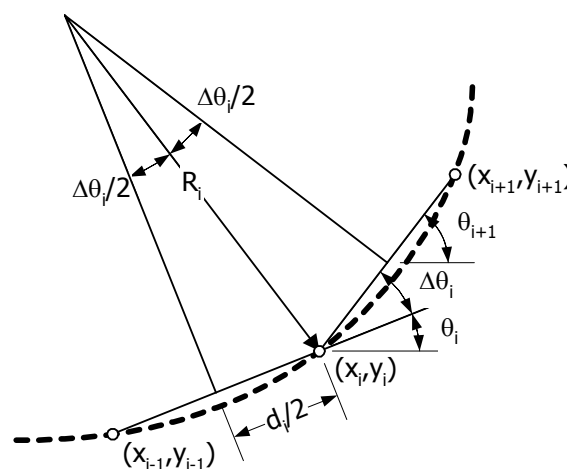


Figura 6. Elementos geométricos para el cálculo del radio de curvatura.

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

Ecuación 4

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right] \quad \theta_{i+1} = \tan^{-1} \left[\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right]$$

Ecuación 5

$$\Delta\theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$$

Ecuación 6

$$R_i = \frac{d_i/2}{\text{sen}(\Delta\theta_i/2)}$$

Ecuación 7

En conjunto, estas ecuaciones se usaron para calcular el radio de curvatura de funciones $y=f(x)$ discretizadas en puntos igualmente espaciados en la coordenada x solamente. El radio de curvatura se calculó también según la definición matemática y en la comparación se obtuvieron errores absolutos máximos de 1,5%. Adicionalmente, los valores del radio de cada punto se verificaron manualmente en el SIG, dibujando un círculo con el radio respectivo. Esta verificación comprobó la validez de las ecuaciones, tal como se muestra en la Figura 7.

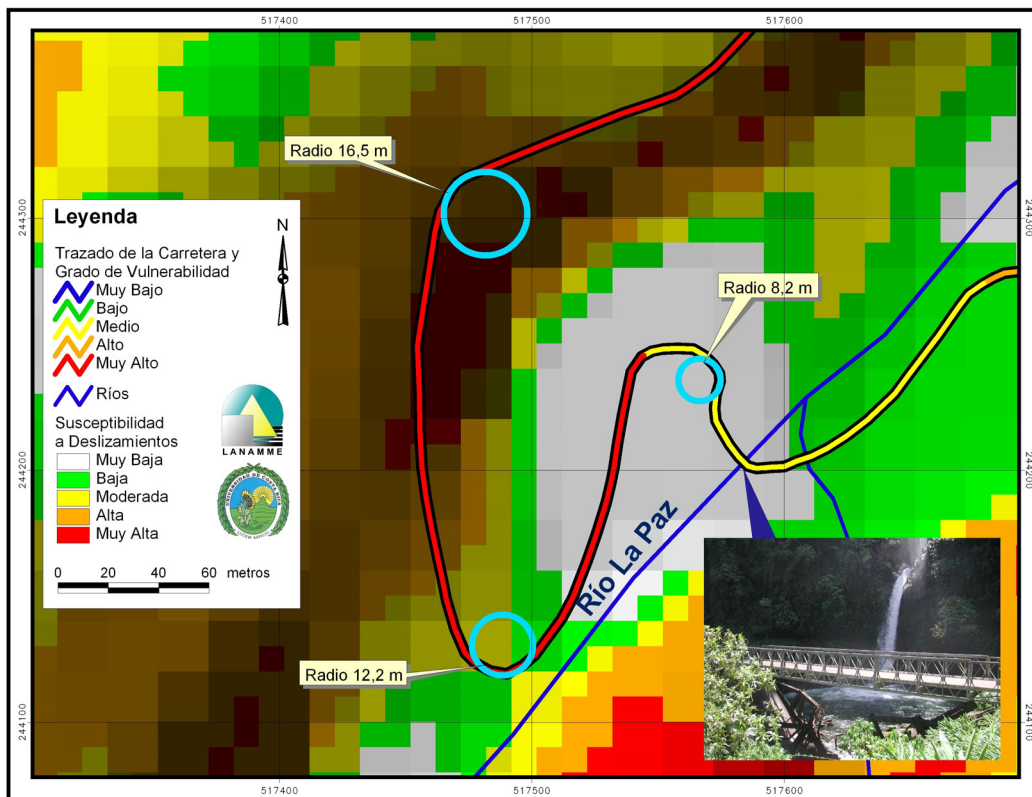


Figura 7. Detalle de la Ruta 141 para comprobación del cálculo del radio de curvatura en el SIG.

Para el análisis subsiguiente, se escogieron el radio mínimo y la pendiente longitudinal promedio de cada segmento del perfil de vulnerabilidad. Los segmentos rectos tienen radios que tienden a valor infinito, por lo que por razones prácticas se escoge un límite máximo de $R=10.000$ metros.

Relación entre la vulnerabilidad y las características geométricas

La investigación realizada ha evidenciado que la vulnerabilidad de las rutas de montaña de Costa Rica es el resultado de limitaciones técnico – económicas de la época en que fueron trazadas. El tipo de tránsito original y esas limitaciones condicionaron el ancho de vía y las longitudes de puentes a dimensiones reducidas. Para construir un puente con la longitud más corta posible, el camino debía adentrarse en el cañón del río hasta encontrar un sitio donde el cauce tuviera un ancho reducido y las márgenes fueran afloramientos rocosos preferiblemente. El origen volcánico de las montañas de la zona central de Costa Rica y el clima se han combinado para producir suelos residuales

arcilloso-limosos de gran espesor, cuyas malas propiedades mecánicas los hacen propensos a la inestabilidad (Vargas y Garro, 2006). La topografía típica de una montaña es tal que la pendiente del terreno natural aumenta al acercarse al cauce de un río y, consecuentemente, al profundizar en un cañón, los caminos inevitablemente producen volúmenes de material de corte cada vez mayores. Por lo tanto, la interrelación de la vulnerabilidad alta y las condiciones geométricas que impiden un buen nivel de servicio y afectan la seguridad de las vías (radios de curvatura reducidos y pendientes longitudinales altas) es, una característica intrínseca de las rutas estudiadas. Como ilustración la Figura 8 presenta las características geométricas de la Ruta 141, cuyo perfil de vulnerabilidad se puede observar en la Figura 5. La relación entre pendiente alta y radio de curvatura reducido es visualmente evidente.

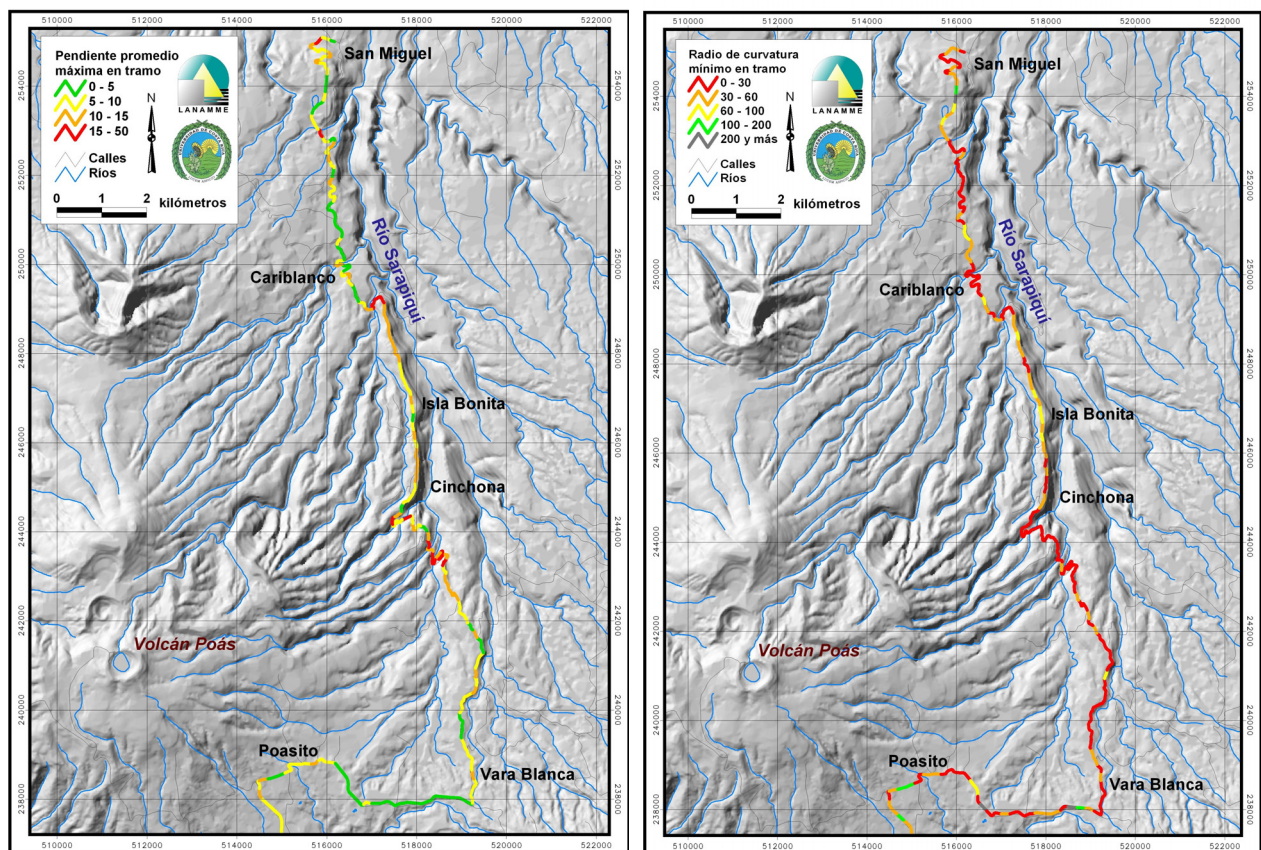


Figura 8. Características geométricas de la Ruta 141.

En la Figura 8 se han utilizado criterios para clasificación de pendientes longitudinales y radios de curvatura que se asocian con la velocidad máxima de circulación para los vehículos.

La relación entre las características geométricas y la vulnerabilidad de todas las rutas evaluadas se presenta en la Figura 9. Cada punto de la figura representa un segmento de 200 m de longitud; el radio de curvatura es el mínimo de todo el segmento, la pendiente es el promedio y la vulnerabilidad es el nivel máximo encontrado en el mismo.

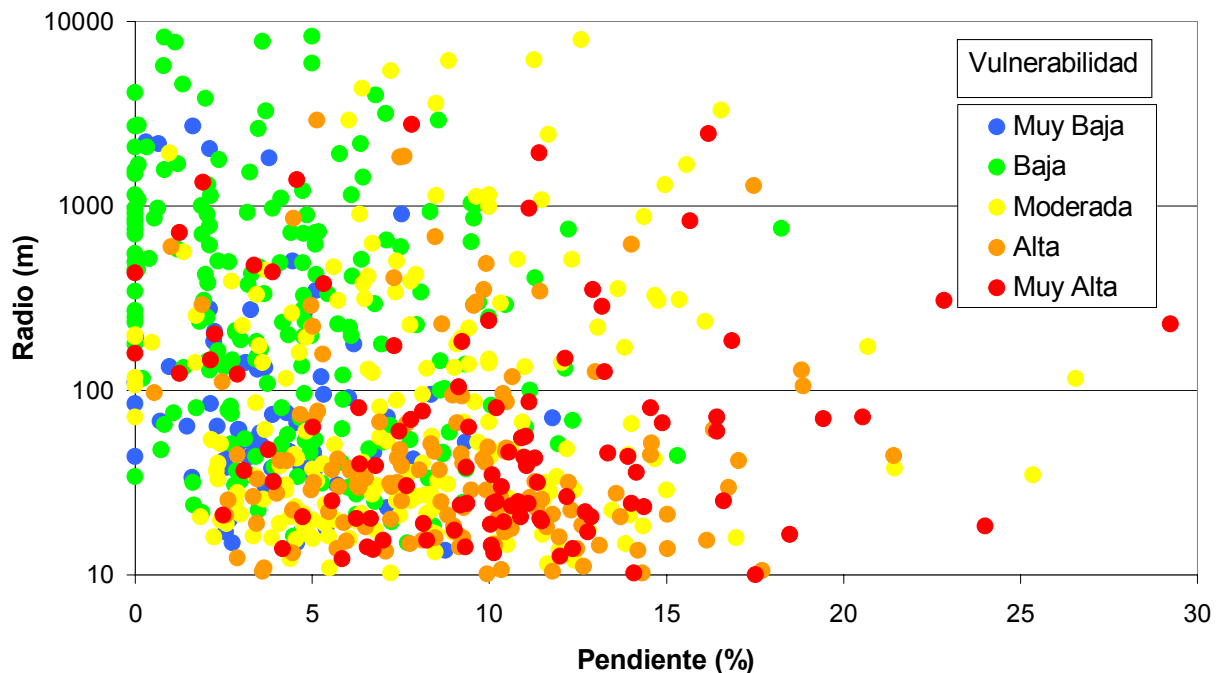


Figura 9. Relación entre características geométricas y vulnerabilidad de las rutas estudiadas.

En la Figura 9 es evidente que, en todos los casos analizados existe una altísima coincidencia en ubicación de la vulnerabilidad alta (geotécnica e hidráulica), las pendientes longitudinales fuertes y los radios de curvas reducidos, lo cual demuestra que estas características están intrínsecamente relacionadas en las rutas de montaña de Costa Rica. Las tres características inciden sobre la seguridad vial: la vulnerabilidad afecta directamente a los usuarios en caso de eventos y las características geométricas producen un bajo nivel de servicio y una visibilidad limitada que afecta las condiciones de circulación normal y aumenta la probabilidad de colisiones de vehículos conducidos por usuarios ocasionales, sin conocimiento de la ruta. A estas condiciones adversas podría sumarse, en algunos casos, la limitación visual que imponen la lluvia y la neblina, propias de las partes altas de la vertiente Caribe de Costa Rica.

Conclusiones

En las rutas de montaña de Costa Rica existe una relación intrínseca entre alta vulnerabilidad y condiciones geométricas de bajo nivel de servicio. Esta relación es consecuencia directa de las limitaciones técnicas y económicas con las cuales se construyeron los caminos de mulas y carretas originales, de la topografía montañosa y la presencia de suelos residuales de gran espesor.

Originalmente, la necesidad de reducir el número y la longitud de los puentes llevó a los constructores a ubicar esas estructuras dentro de los cañones de ríos y a poca altura sobre los cauces, en sitios de afloramiento de roca. Consecuentemente, las rutas tienen un trazado tortuoso, con taludes de corte de gran altura y potencialmente inestables. Desde entonces, la ampliación del ancho de las vías se ha hecho prácticamente sin modificar el derecho de vía y, en la mayoría de los casos, con un aumento de la inclinación de los taludes de corte y la construcción de pesados muros de gaviones en los rellenos, cuya aplicabilidad en esas condiciones es geotécnicamente muy cuestionable. Como resultado, la ampliación del ancho produce un aumento de la vulnerabilidad de las vías sin que se logre una mejoría significativa del nivel de servicio.

En las condiciones previas al cambio climático, los suelos residuales se mantenían húmedos sin saturación y el incremento de resistencia que produce la succión dio estabilidad a los taludes de corte y de rellenos con inclinaciones superiores a las máximas que soportarían esos materiales en condición saturada. Sin embargo, la falta de mantenimiento o inexistencia de obras de drenaje adecuadas, que son fundamentales para evitar la saturación del suelo, producen la acumulación de humedad y falla frecuente de los suelos. Todos estos factores, combinados con el cambio climático han hecho que hoy estos caminos de carretas evolucionados a carreteras de montaña sean altamente vulnerables e inseguros para los usuarios.

Referencias bibliográficas

Badilla B., Gladys. “*Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento de taludes en la zona del embalse del P. H. Pirris*”. Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2005.

Bogantes, Roy; Laporte, Gastón; Quesada, Carlos y Vázquez, Alexis. “*Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos*”. VIII Seminario Nacional de Geotecnia y III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, Costa Rica, 2002.

Castro H., Kattia. "*Vulnerabilidad física de la infraestructura vial en las rutas 130, 712, 146, 120 y 126 tramo Alajuela - Fraijanes - Vara Blanca - San Miguel de Sarapiquí*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2005.

Gamboa V., Ángel S. "*Estudio para la definición preliminar de prioridades en reducción de riesgos naturales de dos rutas de acceso al cantón de San Carlos*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2005.

Hernández M., Alexis. "*La investigación geotécnica de los suelos problemáticos para el diseño vía*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2006.

Matamoros P., Arnoldo. "*Perfil de vulnerabilidad ante amenazas naturales de la ruta #3 (tramo La Garita- Orotina)*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2005.

Navarro Q., Elier. "*Susceptibilidad ante amenazas naturales de la subcuenca del río General, Pérez Zeledón, Costa Rica*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2004.

Rodríguez P., Ernesto. "*Revisión de métodos de diseño hidrológico e hidráulico de alcantarillas para carreteras*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 1989.

Umaña R., Carlos L. "*Vulnerabilidad ante amenazas naturales de la ruta nacional Nº 10, tramo Turrialba-Siquirres*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2003.

Ulloa C., Álvaro. "*Vulnerabilidad geotécnica de rellenos en carreteras de montaña de Costa Rica*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2006.

Ulloa C., Álvaro y Vargas M., William. "*Vulnerabilidad geotécnica de rellenos en carreteras de montaña de Costa Rica*". XIV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Cuba. 2007

Vargas M., William y Garro M., José F. "*Gestión de riesgos naturales en infraestructura vial*". Documento interno del Programa de Investigación de Riesgos Naturales de la Infraestructura Vial. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica, 2003.

Vargas M., William y Garro M., José F., "*El ángulo crítico de la pendiente y la susceptibilidad a deslizamientos de laderas naturales*". IX Seminario Nacional de Geotecnia, Costa Rica. 2006

Zamora M., Ricardo A. "*Evaluación conjunta de amenazas naturales para la infraestructura civil y vial de las principales poblaciones del Sur de San José*". Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería civil) Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2005.