



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UE-003-2012

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ANTE AMENAZAS NATURALES DEL TRAMO ENTRE LOS KILOMETROS 0+000 y 59+000 (NARANJO - FLORENCIA) DE LA RUTA NACIONAL 141

Preparado por:

Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional

San José, Costa Rica
Julio, 2012

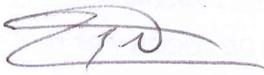
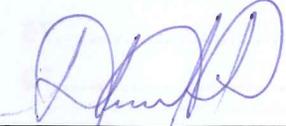
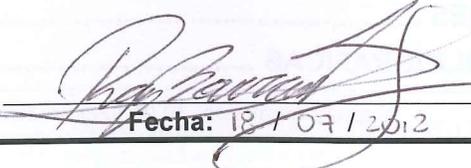
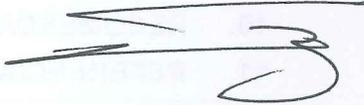
1. Informe LM-PI-UE-003-2012		2. Copia No. 1
3. Título: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ANTE AMENAZAS NATURALES DEL TRAMO ENTRE LOS KILOMETROS 0+000 y 59+000 (NARANJO - FLORENCIA) DE LA RUTA NACIONAL 141		4. Fecha del Informe Julio 2012
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias No aplica		
9. Resumen <i>Este estudio presenta los perfiles de vulnerabilidad ante amenazas naturales de la infraestructura vial, para el tramo de la Ruta Nacional 141 comprendido entre los kilómetros 0+000 a 59+000. Dicho segmento comunica la comunidad de Naranjo con Zarcero, Ciudad Quesada y Florencia de San Carlos. El análisis de las amenazas evaluadas se realizó mediante la aplicación de metodologías de zonificación en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para la zonificación de deslizamientos se utiliza la metodología del ángulo crítico, la cual permite establecer rangos de susceptibilidad de deslizamientos para diferentes geologías, a partir de un análisis estadístico. Para la zonificación de flujos de lodos y detritus se utilizó la metodología de Kanji, la cual toma en cuenta factores como intensidad de lluvia, aspectos geológicos, uso de suelo y características de propias de las cuencas analizadas. Para la evaluación de capacidad hidráulica de las alcantarillas se utilizó la metodología de Rodriguez, la cual compara el caudal teórico, según las características de sección transversal, y el caudal máximo probable para diferentes periodos de retorno. La vulnerabilidad de los puentes ante sollicitaciones sísmicas se realizó con el método de Risk Management Solutions, Inc. (RMS), el cual determina un nivel de daño probable causado por sollicitaciones sísmicas para cada puente, relacionado con sus características estructurales. Los resultados de la combinación de amenazas naturales consideradas se presentan en perfiles de vulnerabilidad, para lo cual se segmentó la carretera en tramos de 200 metros. Mediante los perfiles se identificaron tramos críticos donde la carretera presenta vulnerabilidad alta o muy alta, sobre todo relacionada con la susceptibilidad de deslizamientos, la vulnerabilidad de obras de drenaje menor a caudales extremos y flujo de lodos, así como la vulnerabilidad de puentes ante amenaza sísmica. En estos tramos debería priorizarse, por parte de la Administración, la realización de medidas de mitigación para reducir su vulnerabilidad.</i>		
10. Palabras clave Evaluación, amenazas naturales, vulnerabilidad, red vial, Ruta Nacional 141	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 92
13. Preparado por:		
Rosario Espinoza Carazo Asistente de Ingeniería 	Ing. Diego Cordero Carballo, M.Sc. Ingeniero Civil 	
Fecha: 18 / 07 / 2012	Fecha: 18 / 07 / 2012	Fecha: / /
14. Revisado por:		15. Aprobado por:
Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal Externo LanammeUCR 	Ing. Roy Barrantes Jiménez Coordinador Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional 	Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA 
Fecha: 18 / 07 / 2012	Fecha: 18 / 07 / 2012	Fecha: 18 / 07 / 2012



Tabla de Contenidos

ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
INDICE DE CUADROS.....	7
1. POTESTADES.....	9
2. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN.....	10
3. ALCANCE DE LA EVALUACIÓN.....	11
4. INTRODUCCIÓN.....	12
5. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD.....	14
5.1. AMENAZA.....	14
5.2. VULNERABILIDAD.....	15
6. RUTA NACIONAL 141.....	17
6.1. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO ENTRE LOS KILÓMETROS 0+000 Y 59+000.....	17
6.2. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA DEL TRAMO ENTRE LOS KILÓMETROS 0+000 Y 59+000.....	18
6.3. GEOLOGÍA DEL TRAMO ENTRE LOS KILÓMETROS 0+000 – 59+000.....	21
6.4. TIPOS DE SUELO.....	22
6.5. USO DE SUELO.....	25
7. VULNERABILIDAD ANTE AMENAZAS NATURALES DEL TRAMO ENTRE LOS KIÓMETROS 0+000 Y 59+000 DE LA RUTA NACIONAL 141.....	28
7.1. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN UTILIZADA EN EL ESTUDIO.....	28
7.2. VULNERABILIDAD DE OBRAS DE DRENAJE MENORES.....	30
7.2.1. PUNTOS CRÍTICOS.....	31
7.2.2. TAMAÑO REQUERIDO DE OBRAS DE DRENAJE MENORES PRINCIPALES.....	35
7.2.3. TAMAÑO REQUERIDO DE OBRAS DE DRENAJE MENORES SECUNDARIAS.....	37
7.2.4. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS OBRA DE DRENAJE MENORES EVALUADAS.....	40
7.3. SUSCEPTIBILIDAD A FLUJOS DE LODOS Y DETRITUS.....	43
7.4. SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.....	47
7.5. VULNERABILIDAD DE PUENTES.....	55
7.5.1. PUENTES SOBRE EL TRAMO ENTRE LOS KILÓMETROS 0+000 Y 59+000.....	55
8. PERFILES DE VULNERABILIDAD.....	72
8.1. PERFILES DE SUSCEPTIBILIDAD ANTE AMENAZAS Y VULNERABILIDAD.....	72
9. CONCLUSIONES.....	74
10. RECOMENDACIONES.....	76
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79



12. ANEXOS	81
12.1. VALORES PARA EL CÁLCULO DE CAUDAL (M^3/S) PARA CADA CUENCA.	81
12.2. FACTORES, GRADOS PARCIALES, GRADO FINAL Y NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD A FLUJOS DE LODOS Y DETRITUS.....	83
12.3. PERFIL DE VULNERABILIDAD.	85
12.4. EJEMPLO DE CÁLCULO DE CAUDAL MÁXIMO UTILIZANDO NOMOGRAMAS DE LA FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION DE LOS ESTADOS UNIDOS.....	90





ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL TRAMO ANALIZADO.....	17
FIGURA 2. PERFIL DE ELEVACIONES DEL TRAMO ENTRE LOS KILÓMETROS 0+000 – 59+000 DE LA RUTA NACIONAL 141.....	18
FIGURA 3. PERFIL DE TEMPERATURAS PROMEDIO ANUALES DEL TRAMO ANALIZADO.....	20
FIGURA 4. PERFIL DE PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL PARA EL TRAMO ANALIZADO.....	20
FIGURA 5. PERFIL DE DÍAS DE LLUVIA POR AÑO PARA EL TRAMO ANALIZADO.....	21
FIGURA 6. GEOLOGÍA DE LA ZONA.....	22
FIGURA 7. TIPOS DE SUELO DE LA ZONA.....	24
FIGURA 8. USO DE SUELO DE LA ZONA EN ESTUDIO.....	26
FIGURA 9. METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL ESTUDIO.....	29
FIGURA 10. VULNERABILIDAD DE OBRAS DE DRENAJE.....	32
FIGURA 11. DIAGRAMA DE TALBOT (ÁREA DE CONDUCTO VS ÁREA DE CUENCA).....	36
FIGURA 12. DIAGRAMA DE TALBOT (ÁREA DE CONDUCTO VS ÁREA DE CUENCA).....	39
FIGURA 13. ALCANTARILLA SIN ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN A LA SALIDA EN EST. 42+230.....	40
FIGURA 14. ALCANTARILLAS CON SEDIMENTOS, VEGETACIÓN Y BASURA.....	41
FIGURA 15. ALCANTARILLA CON SOCAVACIÓN A LA SALIDA EN EST. 21+640.....	42
FIGURA 16. ALCANTARILLAS CON TUBERÍAS QUE LAS ATRAVIESAN.....	43
FIGURA 17. SUSCEPTIBILIDAD ANTE FLUJOS DE LODOS/DETRITUS CONSIDERANDO EL FACTOR LLUVIA.....	46
FIGURA 18. SUSCEPTIBILIDAD ANTE FLUJOS DE LODOS/DETRITUS SIN CONSIDERAR EL FACTOR LLUVIA.....	47
FIGURA 19. DESLIZAMIENTO EN ESTACIONAMIENTO 07+060.....	48
FIGURA 20. DESLIZAMIENTO EN ESTACIONAMIENTO 21+460.....	48
FIGURA 21. DESLIZAMIENTO EN ESTACIONAMIENTO 40+870.....	49
FIGURA 22. DESLIZAMIENTO EN ESTACIONAMIENTO 54+090.....	49
FIGURA 23. DESLIZAMIENTO EN ESTACIONAMIENTO 54+190.....	50
FIGURA 24. PORCENTAJE DE ÁREA DESLIZADA NORMALIZADA POR ÁREA TOTAL.....	50
FIGURA 25. PORCENTAJE DE ÁREA DESLIZADA NORMALIZADA POR ÁREA TOTAL.....	51
FIGURA 26. PORCENTAJE DE ÁREA DESLIZADA NORMALIZADA POR ÁREA TOTAL.....	51
FIGURA 27. PORCENTAJE DE ÁREA DESLIZADA NORMALIZADA POR ÁREA TOTAL.....	52
FIGURA 28. PORCENTAJE DE ÁREA DESLIZADA NORMALIZADA POR ÁREA TOTAL.....	52
FIGURA 29. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.....	55



FIGURA 30. MAPA DE ACELERACIÓN PICO EN ROCA PARA T=100 AÑOS.....	56
FIGURA 31. MAPA DE ACELERACIÓN PICO EN ROCA PARA T=500 AÑOS.....	57
FIGURA 32. PUENTE SOBRE EL RÍO PILAS.	58
FIGURA 33. PUENTE SOBRE EL RÍO PILAS.	59
FIGURA 34. PUENTE SOBRE EL RÍO BARRANCA.....	60
FIGURA 35. PUENTE SOBRE EL RÍO BARRANCA.....	60
FIGURA 36. PUENTE SOBRE EL RÍO ESPINO.....	61
FIGURA 37. PUENTE SOBRE EL RÍO ESPINO.....	62
FIGURA 38. PUENTE SOBRE EL RÍO ZARCERO.....	63
FIGURA 39. PUENTE SOBRE EL RÍO ZARCERO.....	63
FIGURA 40. PUENTE SOBRE EL RÍO TAPEZCO.....	64
FIGURA 41. PUENTE SOBRE EL RÍO TAPEZCO.....	65
FIGURA 42. PUENTE SOBRE EL RÍO JILGUERO.....	66
FIGURA 43. PUENTE SOBRE EL RÍO JILGUERO.....	66
FIGURA 44. PUENTE SOBRE EL RÍO LA VIEJA.	67
FIGURA 45. PUENTE SOBRE EL RÍO LA VIEJA.	68
FIGURA 46. PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE NUEVO.....	69
FIGURA 47. PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE NUEVO.....	69
FIGURA 48. PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	70
FIGURA 49. PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	71
FIGURA 50. PERFIL DE VULNERABILIDAD.....	73



INDICE DE CUADROS

CUADRO 1. EFECTOS DESTRUCTIVOS POTENCIALES DE LAS AMENAZAS NATURALES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA VIAL.....	13
CUADRO 2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS CUALITATIVAS DEL CLIMA DE LAS DIFERENTES REGIONES QUE ATRAVIESA EL TRAMO ESTUDIADO.....	19
CUADRO 3. LONGITUD DE SECCIONES DE LA RUTA ANALIZADA SEGÚN EL TIPO DE SUELO QUE ATRAVIESA.	24
CUADRO 4. LONGITUD DE SECCIONES DEL TRAMO ANALIZADO SEGÚN EL USO DE SUELO QUE ATRAVIESAN.....	27
CUADRO 5. CARACTERÍSTICAS DE CUENCAS CON AFECTACIÓN SOBRE OBRAS DE DRENAJE PRINCIPALES PARA EL TRAMO ANALIZADO.....	30
CUADRO 6. VALORES DE COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA.....	31
CUADRO 7. RESUMEN DE OBRAS DE DRENAJE MENORES PRINCIPALES.....	33
CUADRO 8. RESUMEN DE OBRAS DE DRENAJE MENORES SECUNDARIAS.....	33
CUADRO 9. TAMAÑOS DE OBRAS DE DRENAJE MENORES PRINCIPALES, SEGÚN LA FÓRMULA DE TALBOT, PARA CUENCAS HIDROGRÁFICAS CON AFECTACIÓN SOBRE LA CARRETERA.....	35
CUADRO 10. TAMAÑOS DE OBRAS DE DRENAJE MENORES SECUNDARIAS.....	37
CUADRO 11. GEOINDICADOR PARA LA GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	44
CUADRO 12. GRADO FINAL Y NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD DE CUENCAS.....	44
CUADRO 13. MODIFICACIÓN DE LOS PESOS AL NO CONSIDERAR EL FACTOR LLUVIA.....	45
CUADRO 14. GRADO FINAL Y NIVEL DE SUSCEPTIBILIDAD DE CUENCAS.....	45
CUADRO 15. RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO PARA LA GEOLOGÍA A3....	53
CUADRO 16. RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO PARA LA GEOLOGÍA A8....	53
CUADRO 17. RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO PARA LA GEOLOGÍA A9 ^{II} ..	54
CUADRO 18. RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO PARA LA GEOLOGÍA A9 ^{IV} ..	54
CUADRO 19. RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO PARA LA GEOLOGÍA Q.....	54
CUADRO 20. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PILAS.....	58
CUADRO 21. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO BARRANCA.....	59
CUADRO 22. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO ESPINO.....	61
CUADRO 23. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO ZARCERO.....	62
CUADRO 24. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO TAPEZCO.....	64
CUADRO 25. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO JILGUERO.....	65
CUADRO 26. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO LA VIEJA.....	67



CUADRO 27. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE NUEVO.....	68
CUADRO 28. CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.	70
CUADRO 29. DAÑO ASIGNADO A LOS PUENTES Y CRITERIO DE VULNERABILIDAD.....	71
CUADRO 30. NIVELES CUALITATIVOS DE SEVERIDAD DE AMENAZAS NATURALES Y EQUIVALENCIAS NUMÉRICAS PARA LA ZONIFICACIÓN APLICADA A LA INFRAESTRUCTURA VIAL.....	73





1. POTESTADES

La ejecución de las evaluaciones técnicas realizadas por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica (UCR) de los distintos parámetros de la Red Vial Nacional, como son las evaluaciones de vulnerabilidad ante amenazas naturales de la red vial nacional, se fundamentan en las disposiciones que establece el Artículo 6 de la Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias.

Se responde de esta forma al mandato expreso de la ley de realizar “Evaluación bienal de toda la Red Vial Nacional pavimentada” y de informar “para lo que en derecho corresponda, a la Asamblea Legislativa, al Ministerio de la Presidencia, al MOPT, a la Contraloría General de la República y a la Defensoría de los Habitantes, el resultado final de las auditorías técnicas realizadas a proyectos en ejecución y de las evaluaciones efectuadas a la red nacional pavimentada, las carreteras y los puentes en concesión”.

Con estos informes se busca, además, aportar a los objetivos del “Modelo de Valoración de Vulnerabilidad ante el Riesgo de Desastres, Aplicable a Amenazas Naturales”, creado mediante decreto N°36721-MP-PLAN del 15 de julio de 2011, y del Plan Nacional para la Gestión del Riesgo (CNE, 2010), como herramienta preventiva para la planificación adecuada y el uso eficiente y ágil de los recursos durante los procesos de rehabilitación y reconstrucción de los proyectos viales, con el fin de reducir los factores de riesgo y no reconstruir la vulnerabilidad en estos proyectos.



2. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN

El objetivo de este trabajo es evaluar la vulnerabilidad ante amenazas naturales de distintos componentes de la infraestructura vial del tramo ubicado entre los kilómetros 0+000 y 59+000, de la Ruta Nacional 141, mediante metodologías técnicas y objetivas, de manera que se aporten elementos que promuevan un proceso de planificación y acciones preventivas o correctivas por parte de la Administración activa del Estado costarricense.

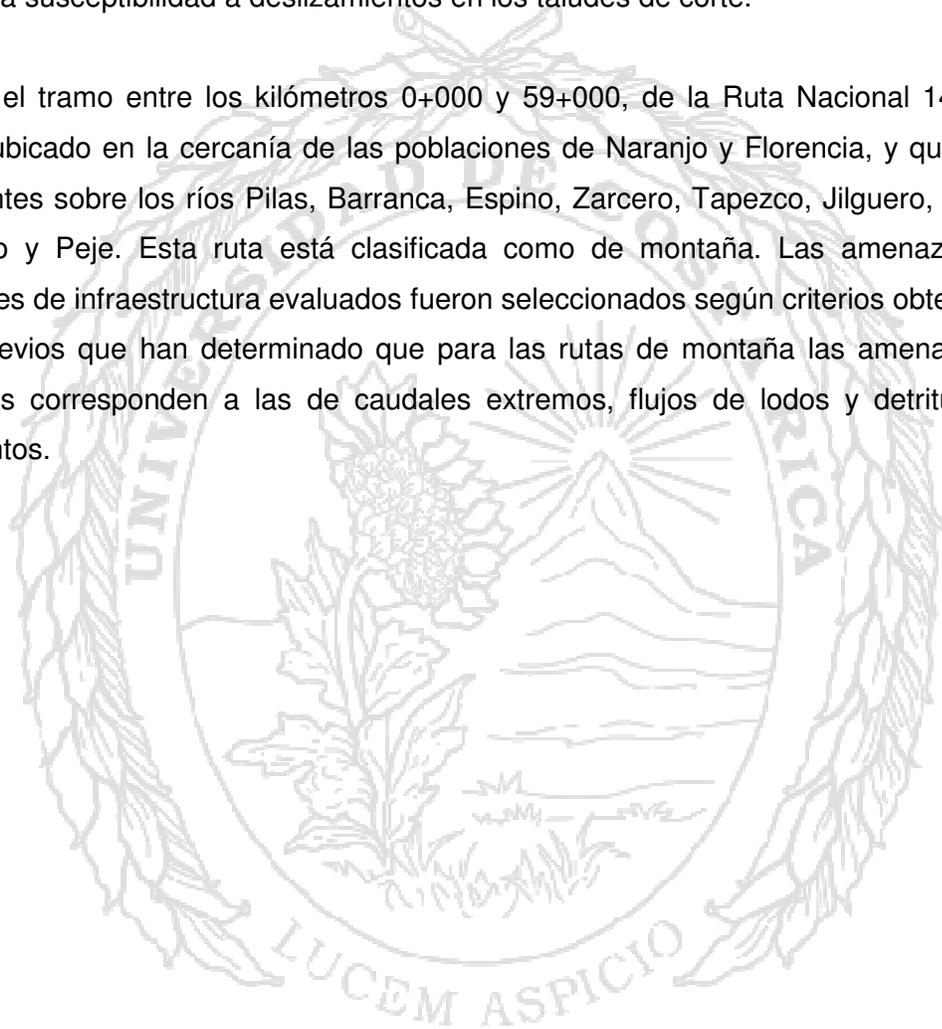




3. ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Dentro de las metodologías aplicadas por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional para la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura se incluyen análisis de la vulnerabilidad de los sistemas de drenaje menores (e.g., pasos de agua, alcantarillas) ante caudales torrenciales extremos y a flujos de lodos y detritus, de puentes ante aceleraciones sísmicas y la susceptibilidad a deslizamientos en los taludes de corte.

Se analizó el tramo entre los kilómetros 0+000 y 59+000, de la Ruta Nacional 141, en el segmento ubicado en la cercanía de las poblaciones de Naranjo y Florencia, y que incluye nueve puentes sobre los ríos Pilas, Barranca, Espino, Zarcero, Tapezco, Jilguero, La Vieja, Peje Nuevo y Peje. Esta ruta está clasificada como de montaña. Las amenazas y los componentes de infraestructura evaluados fueron seleccionados según criterios obtenidos de estudios previos que han determinado que para las rutas de montaña las amenazas más significativas corresponden a las de caudales extremos, flujos de lodos y detritus, y los deslizamientos.





4. INTRODUCCIÓN

Costa Rica cuenta con una gran diversidad geomorfológica producto de su gran dinamismo hidrometeorológico, tectónico y volcánico, dando como resultado una gran variedad de sitios altamente vulnerables a las amenazas naturales. Estas condiciones del medio deben considerarse en la concepción y desarrollo de la infraestructura del país, con la meta de reducir al máximo su vulnerabilidad ante estas amenazas.

Las rutas nacionales, como la analizada en este trabajo, son de importancia para el país desde un punto de vista económico y social, siendo estas vías primordiales para el transporte de personas y mercancías, y para el acceso a ciudades importantes del país, en este caso poblaciones como Naranjo, Zarcerro y Ciudad Quesada.

En los últimos 30 años, el país ha presentado importantes daños en sus carreteras debido a eventos naturales, como son las lluvias, huracanes (e.g., Juana, 1988; César, 1996; Mitch, 1998; Alma, 2008) y eventos sísmicos importantes (e.g., Pérez Zeledón, 1983; Limón, 1991; Cinchona, 2009), lo cual es un reflejo de una condición de alta vulnerabilidad generalizada de la infraestructura vial.

La evaluación de las zonas susceptibles a daños en la infraestructura, por causas naturales o antropológicas, debe ser de gran importancia para los encargados de tomar decisiones a nivel técnico y político, especialmente a la hora de asignar recursos públicos para realizar reparaciones o rehabilitaciones de la infraestructura que presente algún nivel de daño.

El Cuadro 1 muestra las amenazas relacionadas con fenómenos naturales en función de los posibles efectos negativos sobre componentes de la infraestructura vial.

Cuadro 1. Efectos destructivos potenciales de las amenazas naturales sobre la infraestructura vial.

Evento	Tipo de amenaza	Componente de la infraestructura	Efectos directos	Consecuencias sobre el tránsito
Huracanes (vientos fuertes)	Vibraciones fuertes	Señales aéreas, cables (electricidad y teléfono, TV, etc.)	Voladura	Interrupción
		Puentes colgantes	Daños estructurales, posible colapso	Restricción
Huracanes y tormentas (lluvias intensas)	Carga de agua y sedimento, tránsito de avenidas, inundación	Paso bajo nivel	Inundación	Interrupción
		Terraplenes y puentes pequeños	Arrastre o demolición, deslizamiento, falla	Interrupción
		Taludes de corte	Falla, deslizamiento, arrastre	Interrupción
		Puentes	Socavación de pilas, accesos y cimientos, destrucción de las bases	Restricción o interrupción temporal, interrupción
		Caminos	Inundación temporal, erosión y arrastre	Interrupción temporal
		Sistemas de desagüe	Obstrucción, destrucción, desplome	Interrupción
	Movimientos de masa (deslizamientos), flujo de detritus, flujos de lodo	Terraplenes	Fracturas en el suelo	Interrupción
		Caminos	Fracturas, aluviones	Interrupción
		Túneles	Obstrucción de entrada	Interrupción
Terremotos	Vibraciones fuertes, deformaciones permanentes del terreno	Puentes y pasos	Fallas en los cimientos, columnas, desplazamiento de las plataformas (losas)	Interrupción

Fuente: Vargas & Garro, 2003.

Las rutas nacionales, por su topografía, pueden ser clasificadas en rutas de montaña o rutas de llanura/planicie, clasificación que permite relacionar a cada una las amenazas geológicas más comunes en nuestro país, siendo éstas los deslizamientos para las rutas de montaña y las inundaciones para las rutas de llanura/planicie. En ambos casos hay otros aspectos geotécnicos de los materiales localizados a lo largo de las rutas que de igual manera deben ser tomados en cuenta en el diseño de obras, como son los suelos expansivos o suelos con insuficiente capacidad de soporte.



5. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La evaluación de la vulnerabilidad ante amenazas naturales de un corredor vial es la determinación de la capacidad de las obras que lo componen para resistir los eventos potencialmente destructivos que producen los procesos geodinámicos propios de la región o entorno. Por lo tanto, en primera instancia se requiere de la evaluación de las principales amenazas naturales del entorno y de la cuantificación de su probabilidad de ocurrencia.

5.1. Amenaza

Una amenaza es definida como cualquier efecto de los procesos dinámicos naturales del entorno potencialmente dañino o destructivo para la población y la infraestructura. La mayoría de las amenazas naturales ocurren en forma de eventos extraordinarios, recurrentes y transitorios, resultado de procesos permanentes de cambio propios del planeta Tierra.

Las amenazas naturales se cuantifican como probabilidades de ocurrencia de eventos destructivos en un determinado espacio e intervalo de tiempo. Así definida, una amenaza natural (A) está compuesta por tres factores principales: la *susceptibilidad* (S_u), la *frecuencia* (F) y la *severidad* (S_e).

$$A = S_u \cdot F \cdot S_e$$

La *susceptibilidad* es la distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia de eventos en la región de análisis. La *frecuencia* es la recurrencia temporal o probabilidad de ocurrencia en el intervalo de tiempo. La *severidad* es la magnitud de los eventos y típicamente es inversamente proporcional a la frecuencia.

En muchos casos, la ausencia o falta de registros históricos impide determinar la relación específica entre frecuencia y severidad de eventos, por lo que la evaluación de la amenaza se ve reducida a la de susceptibilidad, es decir, a determinar la incidencia probable de eventos destructivos en el espacio. Esta se puede evaluar detalladamente para propósitos de diseño en la mayoría de los casos mediante la investigación, que usualmente involucra



las ciencias de la Tierra (i.e., geofísica, geología, hidrología) y la ingeniería civil (i.e., ingeniería geotécnica e ingeniería hidráulica). Sin embargo, para evaluaciones extensas ese nivel de detalle está fuera del alcance y la susceptibilidad se puede determinar mediante indicadores físicos y geométricos tales como el tipo de roca o material geológico, la presencia de agua, la pendiente, la elevación, etc. Existen metodologías para ese propósito que asignan severidad según las combinaciones de los indicadores y los resultados representan usualmente el peor escenario posible.

5.2. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la incapacidad de la población o la insuficiencia de la infraestructura para soportar los eventos potencialmente destructivos (amenazas). Es una característica netamente social que refleja el grado de desarrollo humano específico del grupo expuesto y de sus instituciones.

La vulnerabilidad de la infraestructura tiene dos aspectos: el físico y el funcional. La vulnerabilidad física es el nivel de daño probable de las obras y sus componentes estructurales, que puede llegar hasta la falla total y el colapso. La vulnerabilidad funcional es la pérdida relativa de capacidad global de un sistema de infraestructura distribuida espacialmente.

La vulnerabilidad física es específica, según la amenaza, y se cuantifica como la probabilidad de daño, siendo 0 ningún daño y 1 el daño total o colapso. La vulnerabilidad física es el producto de dos factores principales, la *exposición* (E) y la falta de (o el inverso de) la *calidad* (C).

$$V = \frac{E}{C}$$

La *exposición* (E) es la ubicación de la infraestructura y la población en un espacio no óptimo para su seguridad. Se relaciona directamente con la susceptibilidad del sitio a las amenazas y su severidad. La *calidad* (C) es la capacidad global de respuesta a las demandas de las

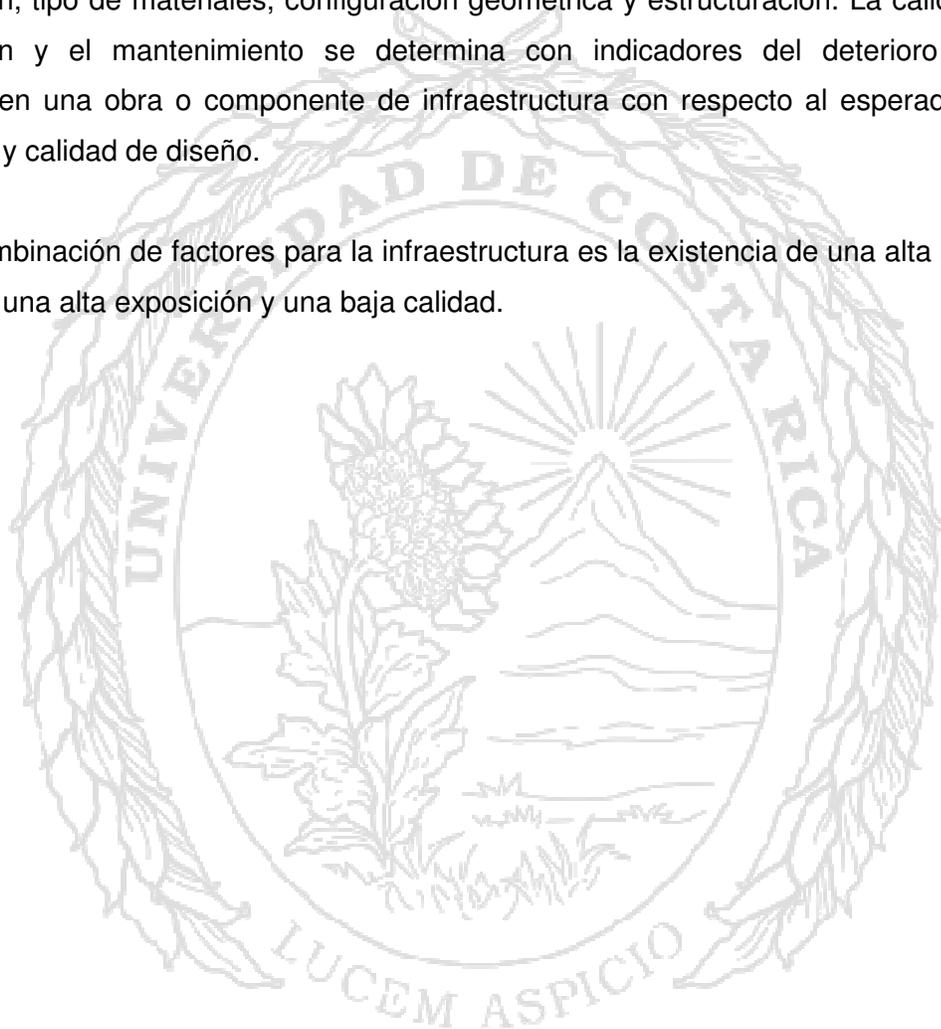


amenazas, que es determinante del daño probable. Se compone de las calidades del *diseño*, la *construcción* y el *mantenimiento* o actualización.

$$\text{Calidad} = \text{Calidad}_{\text{diseño}} + \text{Calidad}_{\text{construcción}} + \text{Calidad}_{\text{mantenimiento}}$$

La valoración de la calidad de diseño se realiza mediante indicadores tales como fecha de construcción, tipo de materiales, configuración geométrica y estructuración. La calidad de la construcción y el mantenimiento se determina con indicadores del deterioro o daño observado en una obra o componente de infraestructura con respecto al esperado por su antigüedad y calidad de diseño.

La peor combinación de factores para la infraestructura es la existencia de una alta amenaza natural con una alta exposición y una baja calidad.



6. RUTA NACIONAL 141

6.1. Descripción del tramo entre los kilómetros 0+000 y 59+000

El tramo en estudio inicia en el kilómetro 0+000 de la Ruta Nacional 141, cerca de la población de Naranjo, del cantón del mismo nombre y finaliza en el kilómetro 59+000, cerca de la población de Florencia de San Carlos. Recorre en total una distancia de 59 kilómetros. La Figura 1 muestra la ubicación del tramo analizado.

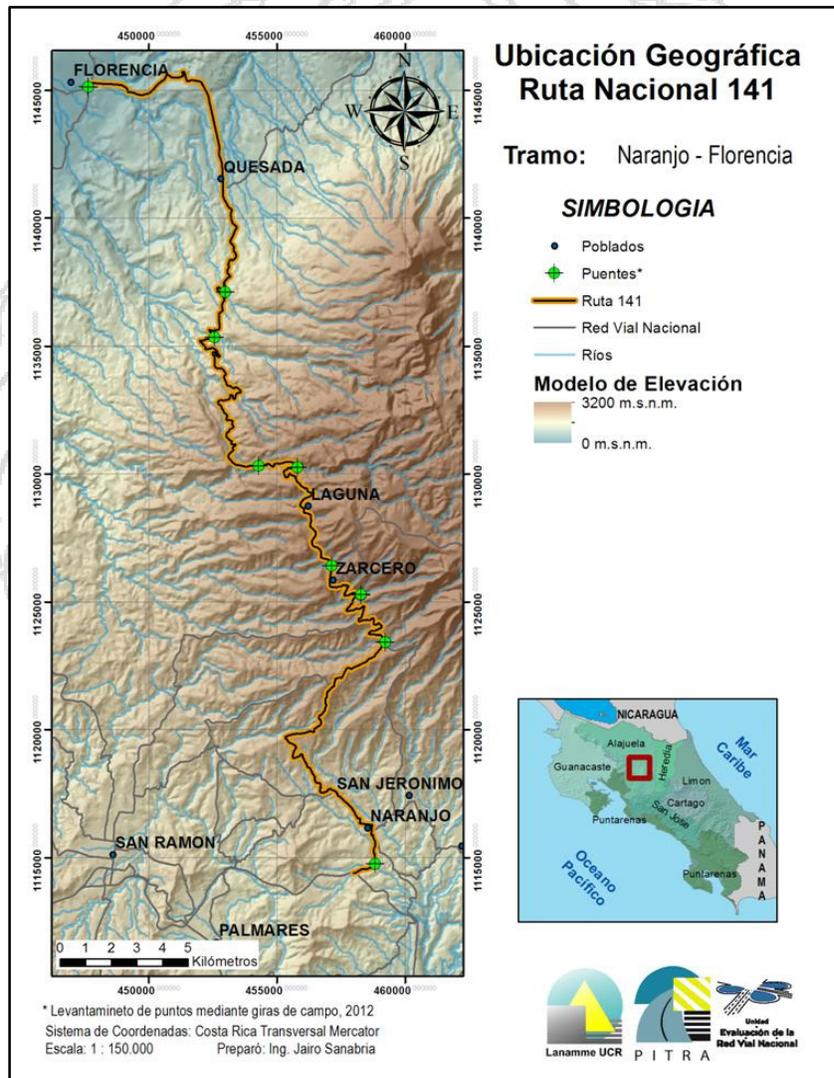


Figura 1. Ubicación geográfica del tramo analizado.

Las elevaciones a lo largo del segmento estudiado varían entre los 240 msnm, cerca del poblado de Florencia, hasta los 1840 msnm, cerca del poblado de Laguna. La Figura 2 muestra el perfil de elevación de la ruta.

En las figuras 2, 3, 4 y 5, la línea de colores en la parte superior corresponde a las zonas climáticas definidas por Orozco (2007) para Costa Rica. La identificación de cada zona climática se muestra en la parte inferior de las figuras.

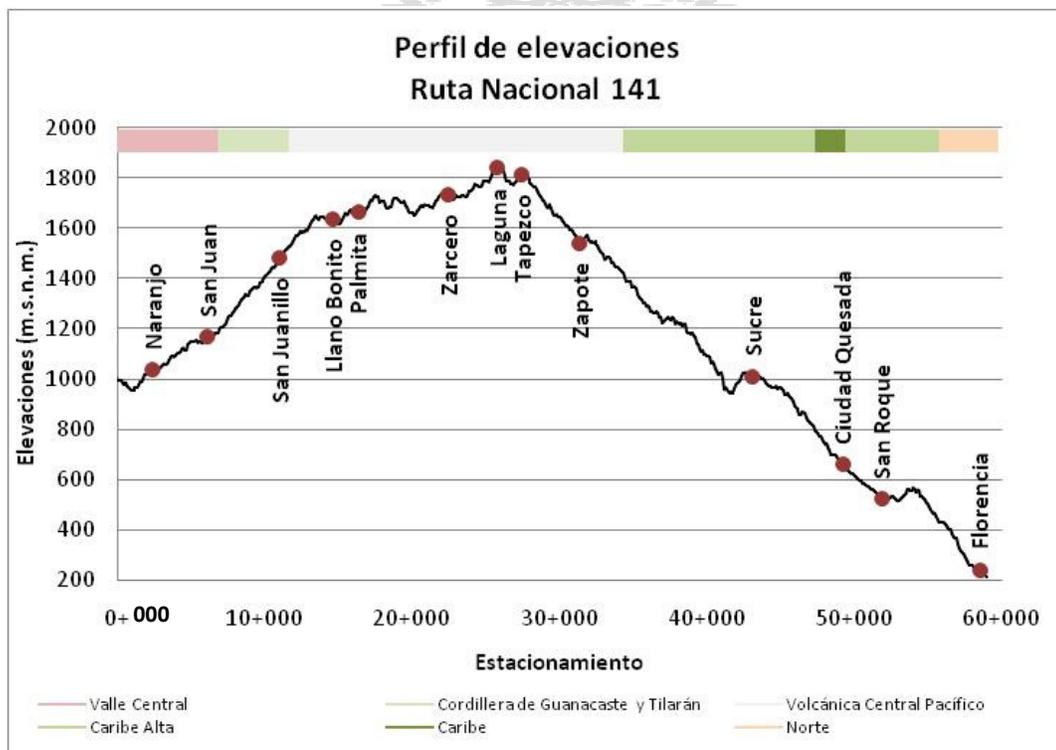


Figura 2. Perfil de elevaciones del tramo entre los kilómetros 0+000 – 59+000 de la Ruta Nacional 141.

Derivado de curvas de nivel 1:25000 del Proyecto Terra, 1998.

6.2. Información climatológica del tramo entre los kilómetros 0+000 y 59+000

De acuerdo con Orozco (2007), en su trabajo “Zonificación climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial”, el tramo estudiado se ubica en las regiones climáticas “Valle Central” (VC), “Cordillera de Guanacaste y Tilarán” (CGT), “Volcánica Central Pacífico”

(VCP), “Caribe Alta” (CA), Caribe (C) y “Norte” (N). El cuadro 2 muestra las características principales de las diferentes regiones climáticas.

Cuadro 2. Principales características cualitativas del clima de las diferentes regiones que atraviesa el tramo estudiado.

Estacionamiento	Región	Características principales
0+000 – 7+600	Valle Central	Condiciones climáticas muy regulares, período seco prolongado, vientos fríos y de alta velocidad en el inicio de la época seca.
7+600 – 12+380	Cordillera de Guanacaste y Tilarán	Precipitaciones moderadas en el año, zonas con importante velocidad del viento en los pasos de montaña, presencia de nubosidad ocasional en los pasos de montaña, altas intensidades de lluvia en algunas zonas.
12+380 – 35+150	Cordillera Volcánica Central Pacífico	Condiciones climáticas muy regulares, disminución de la temperatura conforme se asciende sobre la Cordillera, presencia de neblina en las zonas más altas, principalmente las que están cerca de los pasos de montaña (Coronado, Zarcero, San José de la Montaña, Pacayas de Alvarado entre otras).
35+150 – 48+150 y 50+150 – 56+550	Caribe Alta	Precipitaciones por orografía durante todo el año, mayor régimen de humedad del país, mayor cantidad de días de lluvia, presencia de neblina casi perenne para elevaciones entre los 600 y 1500 m.s.n.m., topografía irregular, alta propensión a deslizamientos.
48+150 – 50+150	Caribe	Precipitaciones muy altas durante todo el año, inundaciones, alta humedad, altas temperaturas.
56+550 – 59+000	Norte	Alta cantidad de días de lluvia en el año, alta precipitación anual, elevada humedad, altas temperaturas.

Fuente: Orozco, 2007

La Figura 3 muestra el perfil de temperaturas máxima, mínima y promedio anual del tramo analizado, mientras que las figuras 4 y 5 muestran el perfil de precipitación promedio anual y el perfil de días de lluvia por año para esa sección.

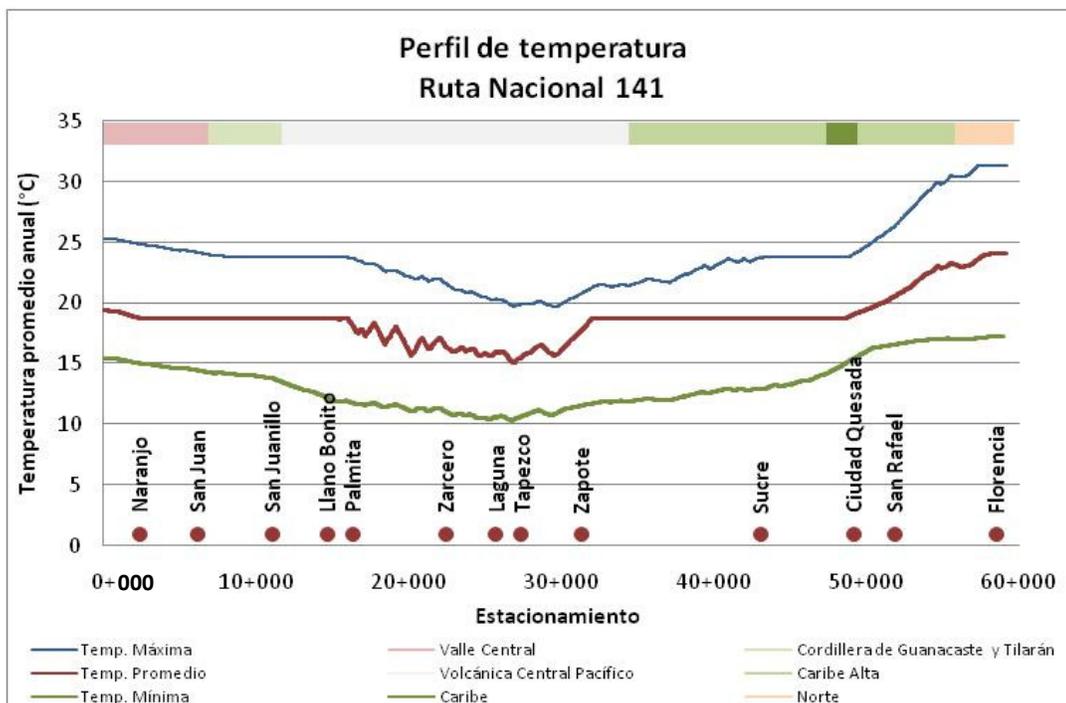


Figura 3. Perfil de temperaturas promedio anuales del tramo analizado.

Adaptado de Orozco, 2007.

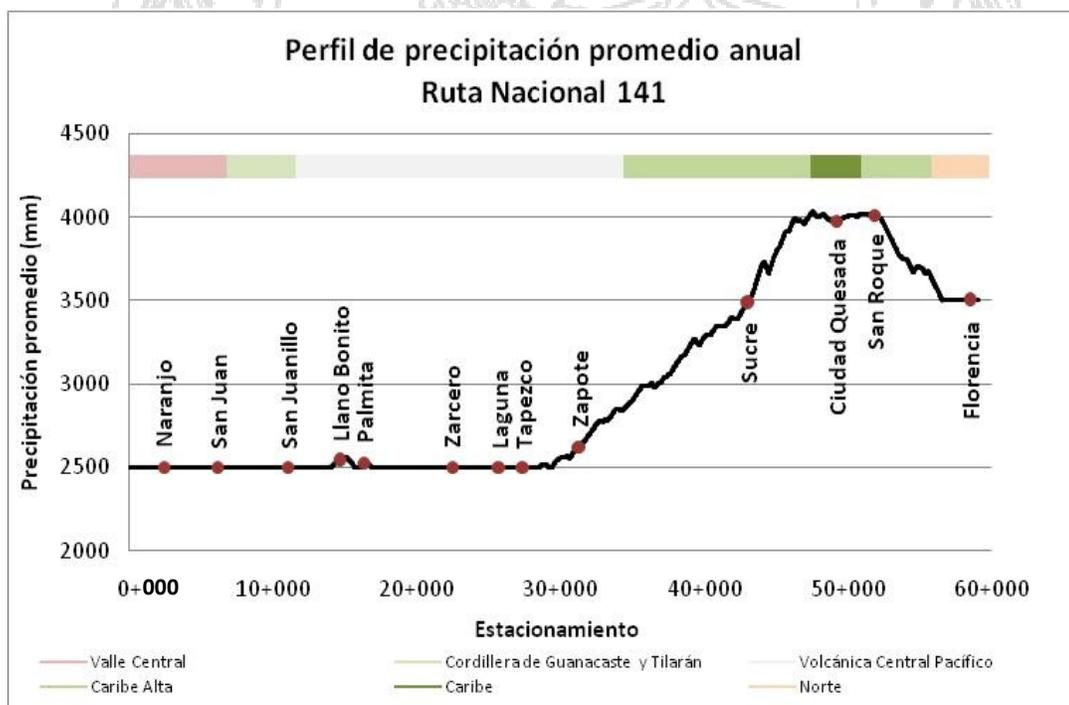


Figura 4. Perfil de precipitación promedio anual para el tramo analizado.

Adaptado de Orozco, 2007.

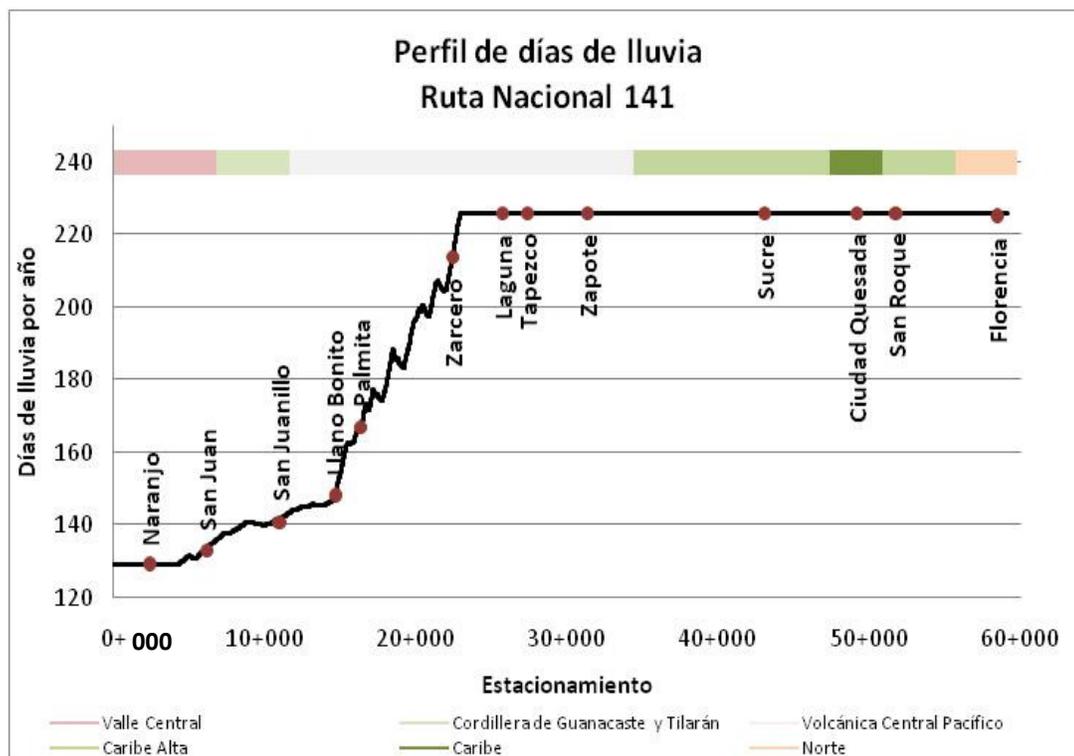


Figura 5. Perfil de días de lluvia por año para el tramo analizado.
Adaptado de Orozco, 2007.

6.3. Geología del tramo entre los kilómetros 0+000 – 59+000

La información geológica fue obtenida a partir de la zonificación del Mapa Geológico de Costa Rica 2007 (Denyer & Alvarado, 2007). De acuerdo a Denyer & Alvarado (2007), el tramo analizado de la Ruta Nacional 141 atraviesa las siguientes geologías:

- $\alpha 3$: Vulcanismo Mioceno (7-5 Ma)
- $\alpha 8$: Ignimbritas y tobas del Pleistoceno (1,8-0,3 Ma)
- $\alpha 9^{II}$: Vulcanismo del Pleistoceno (lavas, tefras, *debris avalanches*, *debris flows*) (0,6-0,2 Ma)
- $\alpha 9^{IV}$: Vulcanismo del Pleistoceno (lavas, tefras, *debris avalanches*, *debris flows*) (<0,2 Ma)
- Q: Sedimentos continentales y de transición marino-costera del Cuaternario

La Figura 6 muestra la zonificación geológica de la zona en estudio.

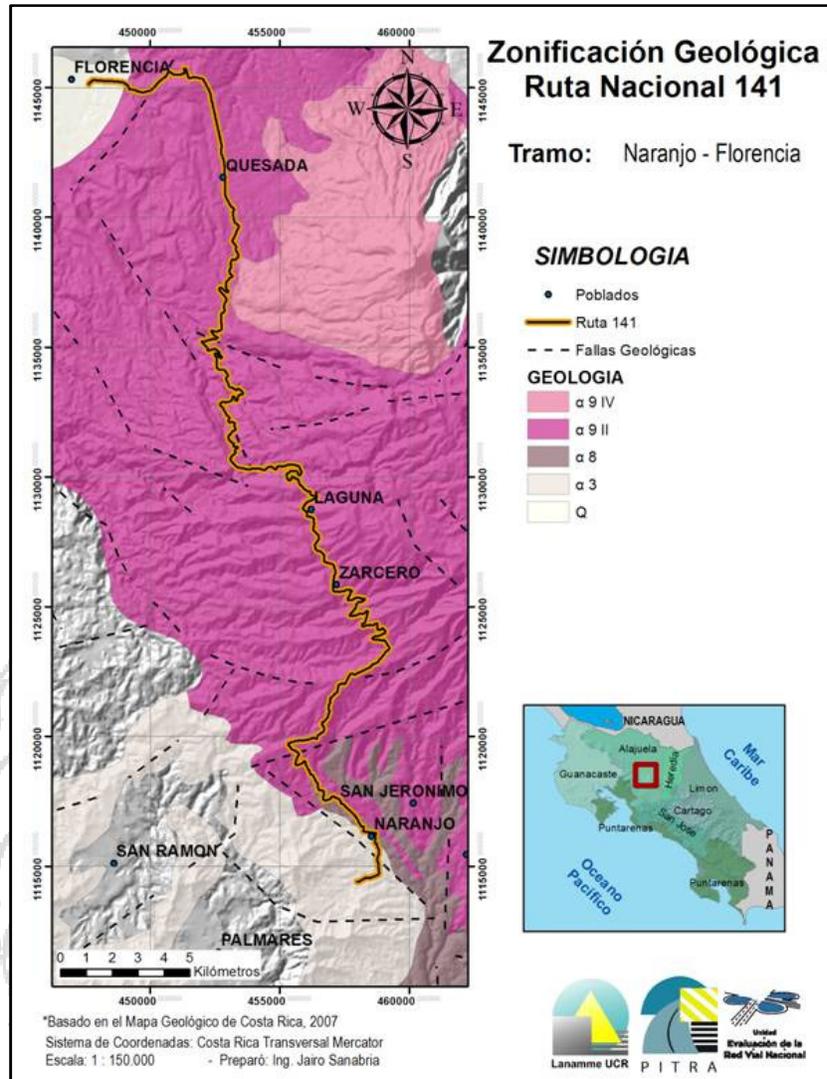


Figura 6. Geología de la zona.
Adaptado de Denyer & Alvarado, 2007.

6.4. Tipos de suelo

De acuerdo con Bogantes et. al (2002), el tramo entre los kilómetros 0+000 y 59+000, de la Ruta Nacional 141, atraviesa los tipos de suelos descritos a continuación (Ver Figura 7). La descripción de cada tipo de suelo corresponde a la dada por Bogantes et. al. (2002) en su trabajo “Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos”.

Informe LM-PI-UE-003-2012	Fecha de emisión: 18 de julio de 2012	Página 22 de 92
---------------------------	---------------------------------------	-----------------



- 1. Volcánico arcilloso (V3):** Son suelos derivados de cenizas volcánicas y de la alteración de rocas volcánicas. El contenido de las cenizas y su grado de meteorización determinan sus características. Este tipo de suelos presenta una leve influencia de la ceniza volcánica en su estructura, lo que se representa sutilmente en minerales tales como halloysita y alófana, productos de la alteración de estas cenizas. Su contenido de arena es de alrededor de 20% y generalmente se clasifican como MH o ML, según SUCS. Son suelos blandos, de buena permeabilidad con minerales arcillosos como halloysita, alófana y caolinita. En condiciones de saturación o de alta humedad permanente, las cenizas volcánicas que componen estos suelos pueden meteorizar a arcillas grises de alto potencial de expansión. Pueden presentar un comportamiento colapsable.
- 2. Volcánico arcillosos (Vw3):** Este tipo de suelos presentan humedades naturales muy altas, con frecuencias superiores al 100%, y por lo general tienen una estructura más porosa que los suelos V3. Su compactación puede ser difícil, dadas las altas humedades óptimas de compactación que requieren y las bajas densidades secas que se obtienen, lo que lo hace un suelo difícil de trabajar. El alto contenido de humedad natural de estos suelos dificultan disminuir su contenido de humedad para alcanzar valores cercanos a la humedad óptima.

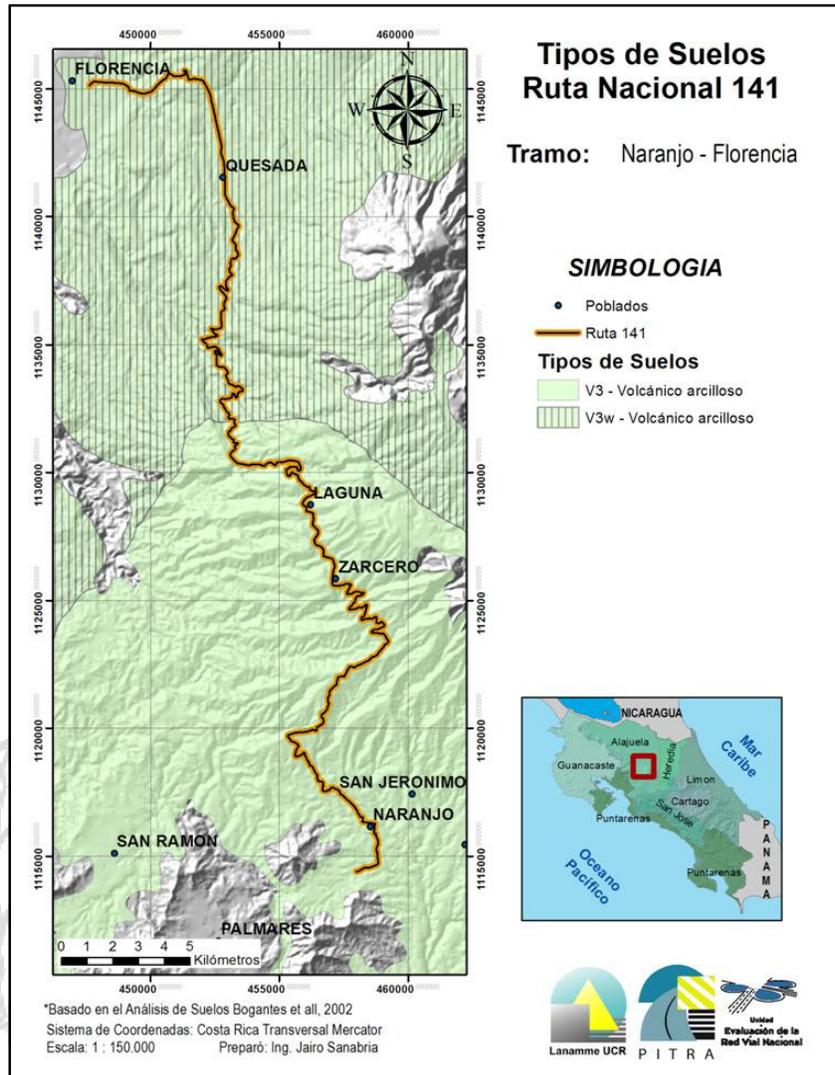


Figura 7. Tipos de suelo de la zona.

Adaptado de Bogantes et al., 2002.

El Cuadro 3 muestra la ubicación de los cambios y las longitudes de cada tipo de suelo.

Cuadro 3. Longitud de secciones de la ruta analizada según el tipo de suelo que atraviesa.

Tipo de suelos	Longitud		Ubicación aproximada por estacionamiento
	En metros	En porcentaje	
Volcánico Arcilloso (V3)	34410	58,3	0+000 a 34+410
Volcánico arcilloso (V3w)	24590	41,7	34+410 a 59+000



En el mapa y el cuadro se observa que el tramo analizado se encuentra completamente ubicado sobre suelo volcánico arcilloso húmedo y con un alto contenido de arena, características que pueden dificultar la compactación de rellenos y subrasantes.

6.5. Uso de suelo

El tramo entre los kilómetros 0+000 y 59+000 atraviesa los siguientes usos de suelo: cultivos permanentes, cultivos estacionales, pasto con agricultura, bosque secundario, bosque natural intervenido, urbano y bosque natural. La clasificación de uso de suelo corresponde al año 1992 (Instituto Geográfico Nacional, 1992).

Es de esperar que el uso de suelo varíe en el tiempo con una tendencia al aumento del área con usos de suelos urbano, con cultivos permanentes y con agricultura y ganadería, esto por el crecimiento urbano en los últimos años y las actividades económicas propias de la zona. Esta variación en el uso de suelos se refleja a su vez en una variación del coeficiente de escorrentía, lo que tiene repercusiones en el mediano y largo plazo en el funcionamiento de las estructuras de drenaje a lo largo de su vida útil, así como implicaciones en la susceptibilidad a deslizamientos y flujos de lodos y detritus.

En las zonas que presentan desarrollo de nuevas edificaciones y caminos, la escorrentía tiende a incrementarse al haber más superficies impermeables. Estas variaciones en la escorrentía deben ser consideradas en la vida útil de las estructuras para determinar su funcionalidad en el tiempo y tomar las medidas de ajuste necesarias.

El detalle de los usos de suelo de la zona al año 1992 se muestra en la Figura 8.

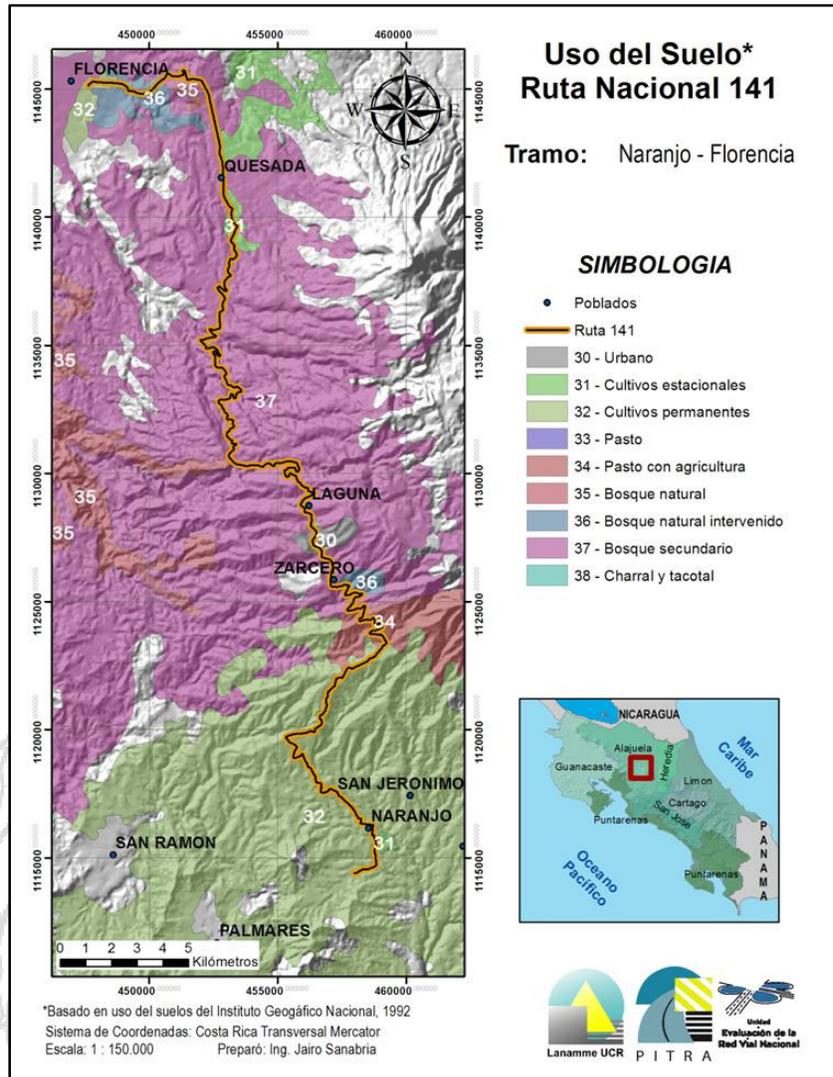
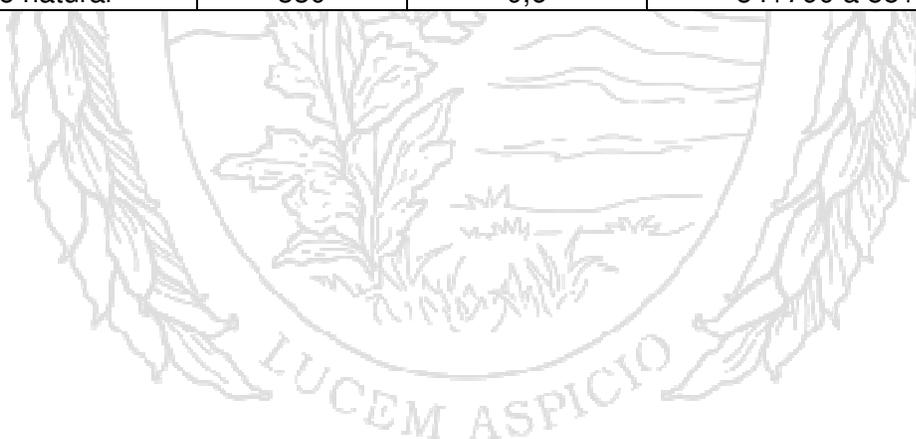


Figura 8. Uso de suelo de la zona en estudio.
Adaptado de Instituto Geográfico Nacional, 1992

El Cuadro 4 muestra la ubicación de los cambios de uso de suelo y las longitudes asignadas a cada uso.

Cuadro 4. Longitud de secciones del tramo analizado según el uso de suelo que atraviesan.

Uso de suelos	Longitud		Ubicación aproximada por estacionamiento
	En metros	En porcentaje	
Cultivos permanentes	14860	26,0	0+000 a 1+450 1+910 a 12+910 13+230 a 15+040 57+900 a 59+000
Cultivos estacionales	3420	5,8	1+450 a 1+910 46+670 a 48+490 50+040 a 50+460 50+700 a 51+420
Pasto con agricultura	3510	5,9	12+910 a 13+230 15+040 a 18+230
Bosque secundario	31500	53,4	18+230 a 19+740 20+480 a 21+080 21+410 a 23+520 25+070 a 46+670 48+490 a 50+040 50+460 a 50+700 51+420 a 54+790 55+120 a 55+640
Bosque natural intervenido	3330	5,6	19+740 a 20+480 21+080 + 21+410 55+640 a 57+900
Urbano	1550	2,6	23+520 a 25+070
Bosque natural	330	0,6	54+790 a 55+120





7. VULNERABILIDAD ANTE AMENAZAS NATURALES DEL TRAMO ENTRE LOS KIÓMETROS 0+000 Y 59+000 DE LA RUTA NACIONAL 141

La evaluación de vulnerabilidades en un corredor genera gran cantidad de información que se puede presentar de varias maneras o formatos, utilizando para ello Sistemas de Información Geográfica.

La salida más empleada en los estudios realizados son los mapas temáticos, en los cuales se reúnen varios elementos tales como modelos de elevación digital y de vulnerabilidad/susceptibilidad a distintas amenazas.

El presente apartado presenta una descripción de la metodología de evaluación utilizada en este estudio así como los resultados de la aplicación de las diferentes metodologías descritas.

7.1. Metodología de evaluación utilizada en el estudio

Para el desarrollo de este estudio profesionales del LanammeUCR realizaron recorridos para recopilar información sobre deslizamientos, sistemas de drenaje menores y de nueve puentes que atraviesan diferentes ríos ubicados a lo largo de la ruta.

En dichos recorridos se recopiló información de los deslizamientos, tales como su ubicación geográfica y tamaño. Para los sistemas de drenaje menor se levantó su ubicación geográfica, geometría, tipo de estructura (e.g., alcantarillas de cajón, alcantarillas de caños ovalados) y estado de la misma (e.g., limpia, obstruida). Para el caso de los puentes se revisó su configuración estructural y el estado de sus componentes estructurales.

La información recolectada se complementó con información disponible de la zona (e.g. mapas geológicos, mapas de tipo de suelo), para posteriormente ser procesada por medio de los Sistemas de Información Geográfica ArcView y ArcGis.

Como resultado final se obtuvieron los perfiles de vulnerabilidad/susceptibilidad que se muestran posteriormente.

La Figura 9 muestra la metodología de trabajo utilizada.

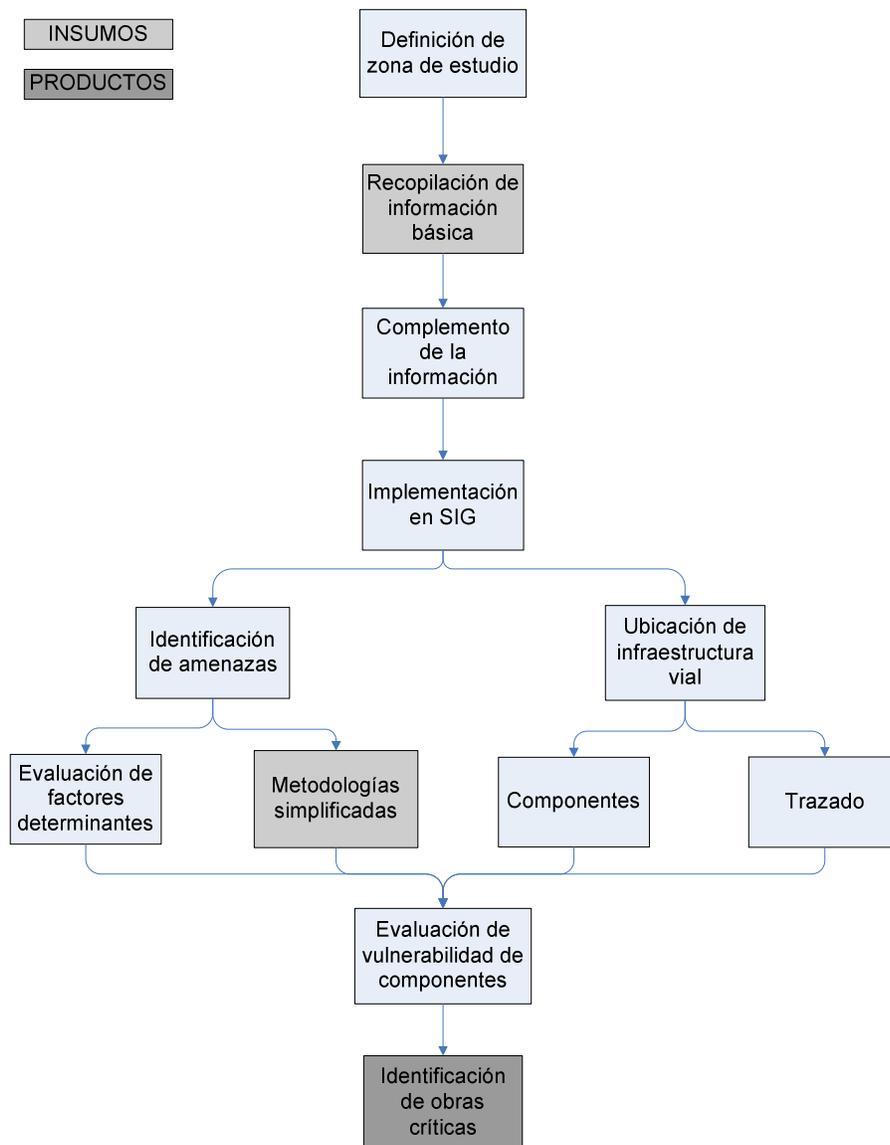


Figura 9. Metodología utilizada en el estudio.

7.2. Vulnerabilidad de obras de drenaje menores

Para el análisis de vulnerabilidad de los sistemas de drenaje menor se utilizó una metodología que permite evaluar la vulnerabilidad por falta de capacidad hidráulica de cada alcantarilla ubicada a lo largo del tramo estudiado. El análisis se dividió para considerar por separado las alcantarillas que sirven a ríos o quebradas (principales) y las que sirven para encauzar el agua de un lado a otro de la carretera (secundarias).

Se muestran en el Cuadro 5 los datos de las cuencas con afectación sobre alcantarillas principales ubicadas a lo largo del tramo entre los kilómetros 0+000 y 59+000.

Cuadro 5. Características de cuencas con afectación sobre obras de drenaje principales para el tramo analizado.

Est.	Cuenca No.*	Nombre Río/Quebrada ¹	Área (km ²)	Longitud del cauce principal (m)	Diferencia de elevación (m)
7+120	3	Sin nombre	0,285	531	180
16+480	5	Sin nombre	0,446	470	200
21+250	8	Río Seco	1,883	2351	530
23+030	10	Sin nombre	1,249	469	420
23+550	11	Sin nombre	0,737	640	380
25+100	12	Sin nombre	0,837	673	300
32+840	16	Quebrada Zapote	0,610	1153	170
36+930	18	Quebrada Lajas	4,61	5690	930
43+010	20	Río Ron Ron	0,381	451	170
46+100	22	Quebrada San Pedro	0,0962	293	100

*El número de cuenca corresponde al asignado para el análisis.

Los datos de las cuencas correspondientes a obras de drenaje secundarias de la carretera se muestran en los Anexos.

Para determinar el coeficiente de escorrentía promedio para cada cuenca se utilizaron diferentes valores según el uso de suelo de cada cuenca u área tributaria. El Cuadro 6

¹ Según hojas cartográficas Aguas Zarcas (1986), Fortuna (1984), Miramar (1982), Naranjo (1982), Quesada (1966) y San Lorenzo (1966) (Escala 1:50000) del Instituto Geográfico Nacional.



muestra valores típicos de coeficiente de escorrentía para diferentes uso de suelo (Villón, 2004 & Castro, 2005) y utilizados en este trabajo.

Cuadro 6. Valores de coeficientes de escorrentía típicos para diferentes usos de suelo.

Uso de suelo	Coefficiente de escorrentía
Área urbana	0,70
Cultivo anual-permanente	0,35
Pasto	0,30
Uso mixto	0,45
Charral-tacotal	0,25
Bosque	0,30
Terreno descubierto	0,50
Carretera asfaltada	0,85

Fuente: Villón, 2004 & Castro, 2005.

El cálculo del caudal de cada cuenca se realizó mediante la fórmula racional, para lo cual se hizo uso del área de la cuenca, el coeficiente promedio de escorrentía y los valores de intensidad de lluvia para diferentes periodos de retorno, obtenidos a partir del mapa “Intensidades para una lluvia con una duración de 60 minutos y un periodo de retorno de 10 años”, preparado por el Ing. Erick Orozco en su trabajo “Zonificación Climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial” (Orozco, 2007).

7.2.1. Puntos críticos

Se presenta a continuación el perfil de vulnerabilidad de los sistemas de drenaje menor (i.e., pasos de agua y alcantarillas) del tramo analizado analizada (Figura 10). Dado que las obras de drenaje ubicadas a lo largo de la carretera corresponden tanto a drenajes de cuencas hidrográficas (principales) como de la carretera (secundarias), se procedió a realizar el análisis por separado, aunque los resultados se muestran en una misma figura.

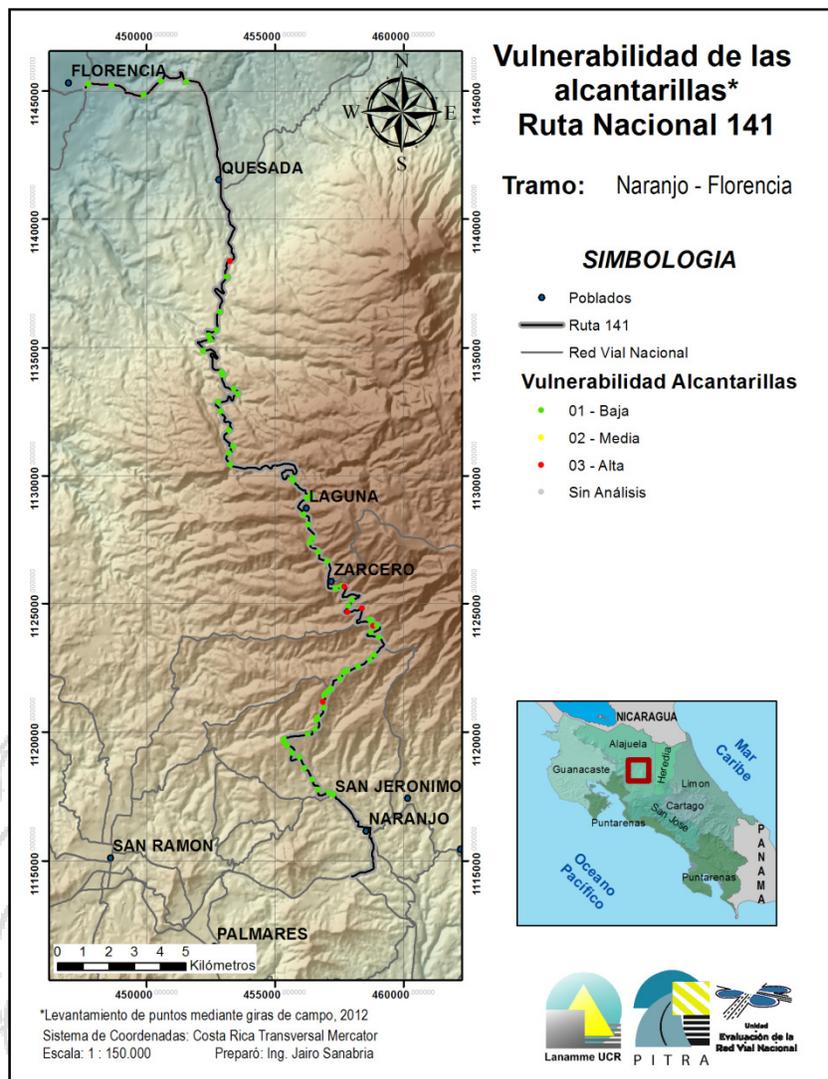


Figura 10. Vulnerabilidad de obras de drenaje.

La vulnerabilidad de los sistemas de drenaje menor se asigna mediante la falta de capacidad de la sección transversal para evacuar el caudal máximo probable para diferentes periodos de retorno (en este caso 20 y 100 años). Con el valor de caudal máximo se revisa la capacidad hidráulica de cada estructura respecto al caudal obtenido a partir de sus características.

Los cuadros 7 y 8 resumen las características de las estructuras consideradas así como el nivel de vulnerabilidad hidráulica asociado a cada una de ellas. Las obras de drenaje mayores (i.e., puentes) no fueron analizadas dado que requieren de una metodología de

Informe LM-PI-UE-003-2012	Fecha de emisión: 18 de julio de 2012	Página 32 de 92
---------------------------	---------------------------------------	-----------------

análisis distinta a la utilizada para las alcantarillas y pasos de agua. Dicho análisis se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

Cuadro 7. Resumen de obras de drenaje menores principales y nivel de vulnerabilidad asignado.

Est.	Caudal Q (m ³ /s)		Capacidad de la alcantarilla (m ³ /s)	Nivel de vulnerabilidad
	T=20 años	T=100 años		
07+120	3,45	5,02	1,4	Muy alta
16+480	4,62	6,73	4,5	Alta
21+250	20,52	29,97	1,0	Muy alta
23+030	16,60	24,22	7,8	Muy alta
23+550	18,99	27,71	5,8	Muy alta
25+100	9,93	14,49	6,6	Muy alta
32+840	6,82	9,96	14,0	Muy baja
36+560	47,75	69,55	17,0	Muy alta
43+010	3,95	5,75	33,0	Muy baja
46+100	1,00	1,45	4,9	Muy baja

Cuadro 8. Resumen de obras de drenaje menores secundarias y nivel de vulnerabilidad asignado.

Est.	Caudal Q (m ³ /s)		Capacidad de la alcantarilla (m ³ /s)	Nivel de vulnerabilidad
	T=20 años	T=100 años		
04+770	0,06	0,08	0,9	Muy baja
04+970	0,19	0,27	0,9	Muy baja
05+670	0,15	0,22	1,8	Muy baja
06+200	0,16	0,23	0,8	Muy baja
06+780	0,13	0,18	0,9	Muy baja
07+980	0,12	0,18	2,2	Muy baja
08+430	0,05	0,08	0,8	Muy baja
08+630	0,04	0,06	0,9	Muy baja
08+770	0,26	0,38	0,9	Muy baja
09+730	0,11	0,17	1,0	Muy baja
10+150	0,12	0,17	0,9	Muy baja
10+590	0,04	0,05	0,9	Muy baja
10+700	0,12	0,18	0,8	Muy baja
11+180	0,06	0,09	2,1	Muy baja

**Cuadro 8(cont.). Resumen de obras de drenaje secundarias
y nivel de vulnerabilidad asignado.**

Est.	Caudal Q (m ³ /s)		Capacidad de la alcantarilla (m/s ³)	Nivel de vulnerabilidad
	T=20 años	T=100 años		
11+420	0,08	0,11	1,9	Muy baja
11+710	0,05	0,07	1,0	Muy baja
11+900	0,05	0,07	0,9	Muy baja
12+070	0,17	0,24	1,1	Muy baja
12+690	0,08	0,11	1,0	Muy baja
12+970	0,06	0,10	0,8	Muy baja
13+190	0,06	0,10	0,8	Muy baja
13+640	0,14	0,21	0,9	Muy baja
14+180	0,08	0,11	0,8	Muy baja
14+430	0,07	0,11	2,0	Muy baja
15+310	0,15	0,21	1,1	Muy baja
16+040	0,06	0,09	0,7	Muy baja
16+770	0,06	0,08	0,9	Muy baja
16+960	0,04	0,06	1,9	Muy baja
17+110	0,17	0,25	0,9	Muy baja
18+960	0,04	0,06	0,8	Muy baja
19+410	0,09	0,14	2,1	Muy baja
19+700	0,09	0,14	2,0	Muy baja
21+380	0,07	0,11	0,9	Muy baja
21+640	0,11	0,15	0,8	Muy baja
24+180	0,06	0,09	0,9	Muy baja
24+430	0,17	0,25	3,7	Muy baja
25+540	0,09	0,13	1,8	Muy baja
26+530	0,19	0,28	1,1	Muy baja
26+630	0,03	0,05	0,5	Muy baja
27+730	0,09	0,13	0,9	Muy baja
27+850	0,03	0,05	0,7	Muy baja
32+300	0,17	0,25	0,9	Muy baja
33+200	0,07	0,10	11,0	Muy baja
34+150	0,27	0,39	0,9	Muy baja
35+220	0,30	0,44	0,9	Muy baja
35+750	0,15	0,21	1,2	Muy baja
37+200	0,07	0,10	1,2	Muy baja
38+110	0,19	0,27	7,2	Muy baja

Cuadro 8(cont). Resumen de obras de drenaje secundarias y nivel de vulnerabilidad asignado.

Est.	Caudal Q (m ³ /s)		Capacidad de la alcantarilla (m/s ³)	Nivel de Vulnerabilidad
	T=20 años	T=100 años		
38+240	0,04	0,06	1,1	Muy baja
40+360	0,08	0,11	2,6	Muy baja
41+320	0,27	0,40	2,0	Muy baja
41+630	0,17	0,25	1,4	Muy baja
42+230	0,10	0,15	2,1	Muy baja
45+230	0,16	0,23	6,5	Muy baja
53+980	0,15	0,23	1,3	Muy baja
55+610	0,46	0,67	6,0	Muy baja
56+470	0,24	0,36	2,2	Muy baja
57+900	0,40	0,59	2,4	Muy baja
58+820	0,26	0,38	3,8	Muy baja

7.2.2. Tamaño requerido de obras de drenaje menores principales

Aplicando la Formula de Talbot se estimó el tamaño requerido de las obras de drenaje para las cuencas con afectación sobre la carretera. El Cuadro 9 muestra los resultados obtenidos para valores de coeficiente igual a 0,20; 0,40; 0,50; 0,60; 0,80 y 1,00.

Cuadro 9. Tamaños de obras de drenaje menores principales, según la Fórmula de Talbot, para cuencas hidrográficas con afectación sobre la carretera.

Cuenca	Nombre de río/quebrada*	Área de la estructura de drenaje (m ²) para diferentes valores de C					
		C= 0,20	C= 0,40	C= 0,50	C= 0,60	C= 0,80	C= 1,00
3	Sin nombre	0,45	0,90	1,13	1,35	1,81	2,26
5	Sin nombre	0,63	1,26	1,58	1,90	2,53	3,16
8	Río Seco	1,86	3,72	4,65	5,58	7,44	9,30
10	Sin nombre	1,37	2,74	3,42	4,10	5,47	6,84
11	Sin nombre	0,92	1,84	2,30	2,76	3,68	4,60
16	Quebrada Zapote	0,80	1,60	2,00	2,40	3,19	3,99
18	Quebrada Lajas	3,64	7,29	9,11	10,93	14,57	18,21
20	Río Ron Ron	0,56	1,12	1,40	1,68	2,25	2,81
22	Quebrada San Pedro	0,20	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00

*La ubicación de las obras de drenaje deberá ser corroborada mediante levantamientos topográficos detallados y en campo, o por cualquier otro medio que sea necesario, según lo considere la Administración.

En la Figura 11 se muestran los resultados de aplicar la fórmula de Talbot para diferentes valores de coeficiente “C”. A cada alcantarilla se le asignó un color correspondiente al nivel de vulnerabilidad estimado: azul para una vulnerabilidad muy baja, verde para una vulnerabilidad baja, amarilla para una vulnerabilidad moderada, naranja para una vulnerabilidad alta y rojo para una vulnerabilidad muy alta.

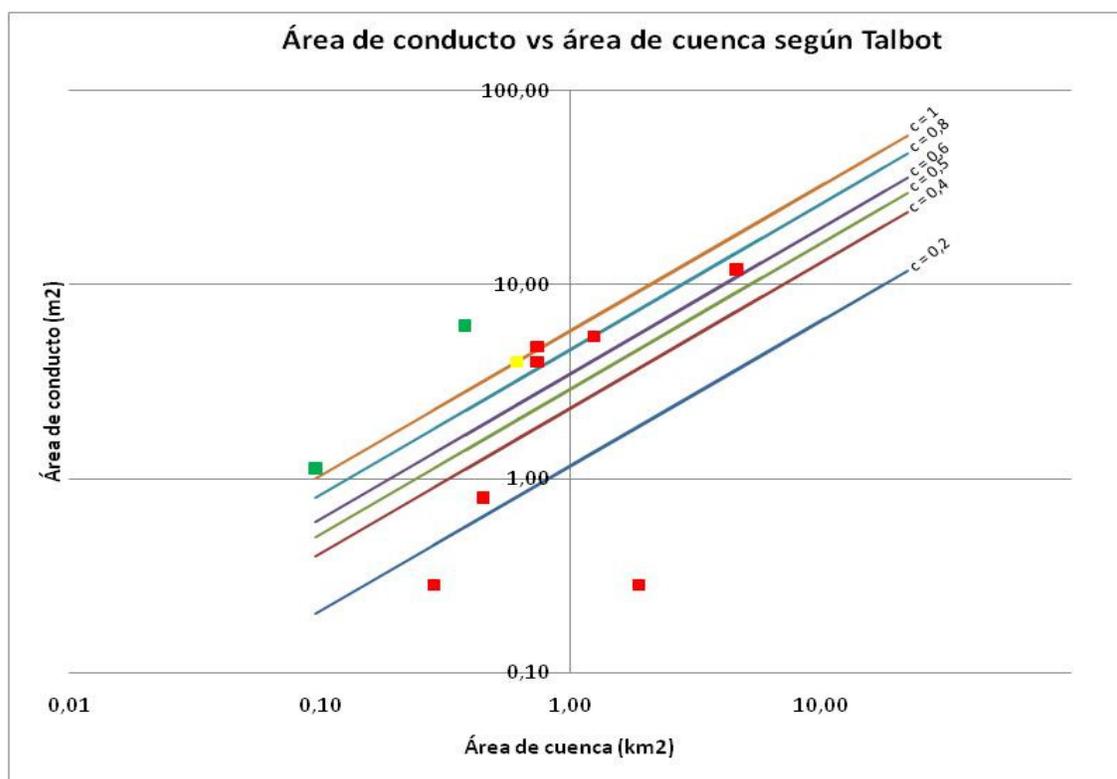


Figura 11. Diagrama de Talbot (área de conducto vs área de cuenca) para alcantarillas principales

Se observa en la figura anterior que el área medida en campo de las alcantarillas en general es menor que el área recomendada por Talbot para un coeficiente “C” igual a 1, correspondiente a terrenos montañosos y escarpados (Rodríguez, 1989) como el predominante en el tramo analizado de la Ruta Nacional 141.

Las alcantarillas ubicadas por encima de la línea correspondiente al valor de “C” de 1 corresponden con las alcantarillas asignadas con una vulnerabilidad baja, con excepción de la alcantarilla que corresponde a la cuenca número 5, ubicada en el kilómetro 16+480 (ver

Cuadro 5.). A partir de estos datos, se puede tomar el valor de coeficiente “C” igual a 1 como límite inferior de capacidad hidráulica adecuada (i.e., vulnerabilidad baja a moderada) para las condiciones de terreno predominantes en el tramo analizado. Por ende, las alcantarillas ubicadas por debajo de la línea correspondiente al valor de “C” igual a 1 son aquellas con vulnerabilidades moderadas a altas, lo que supone la necesidad de intervenirlas para aumentar su capacidad y disminuir su nivel de vulnerabilidad ante condiciones de servicio y condiciones límite, como pueden ser caudales extremos. Con estos valores del coeficiente “C” y haciendo uso de la fórmula de Talbot se puede estimar la sección hidráulica requerida para cada alcantarilla para disminuir su nivel de vulnerabilidad.

7.2.3. Tamaño requerido de obras de drenaje menores secundarias

Aplicando la Fórmula de Talbot se estimó el tamaño requerido de las obras de drenaje secundarias. El Cuadro 10 muestra los resultados obtenidos para valores de coeficiente igual a 0,20; 0,40; 0,50; 0,60; 0,80 y 1,00.

Cuadro 10. Tamaños de obras de drenaje menores secundarias según la Fórmula de Talbot.

Cuenca	Área de la estructura de drenaje (m ²) para diferentes valores de C					
	C= 0,20	C= 0,40	C= 0,50	C= 0,60	C= 0,80	C= 1,00
24	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
25	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,13
26	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,11
27	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11
28	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10
29	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09
30	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
31	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04
32	0,03	0,07	0,08	0,10	0,13	0,17
33	0,02	0,04	0,04	0,05	0,07	0,09
34	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09
35	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
36	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10
37	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
38	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
39	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
40	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05

Cuadro 10 (cont.). Tamaños de obras de drenaje menores según la Fórmula de Talbot.

Cuenca	Área de la estructura de drenaje (m ²) para diferentes valores de C					
	C= 0,20	C= 0,40	C= 0,50	C= 0,60	C= 0,80	C= 1,00
41	0,02	0,05	0,06	0,07	0,10	0,12
42	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
43	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
44	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
45	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10
46	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
47	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
48	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10
49	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
50	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
51	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04
52	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11
53	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04
54	0,01	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07
55	0,01	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07
56	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
57	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08
58	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06
59	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12
60	0,01	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07
61	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13
62	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
63	0,01	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07
64	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
65	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12
66	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
67	0,03	0,07	0,08	0,10	0,13	0,17
68	0,04	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18
69	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,11
70	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
71	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13
72	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04
73	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
74	0,03	0,07	0,08	0,10	0,13	0,17
75	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12
76	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
77	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11

Cuadro 10 (cont.). Tamaños de obras de drenaje menores según la Fórmula de Talbot.

Cuenca	Área de la estructura de drenaje (m ²) para diferentes valores de C					
	C= 0,20	C= 0,40	C= 0,50	C= 0,60	C= 0,80	C= 1,00
78	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,11
79	0,05	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25
80	0,03	0,06	0,08	0,09	0,12	0,15
81	0,04	0,09	0,11	0,13	0,18	0,22
82	0,03	0,06	0,08	0,10	0,13	0,16

En la Figura 12 se muestran los resultados de aplicar la fórmula de Talbot para diferentes condiciones del coeficiente C para las alcantarillas secundarias. En este caso, para todas ellas se estimó una vulnerabilidad baja.

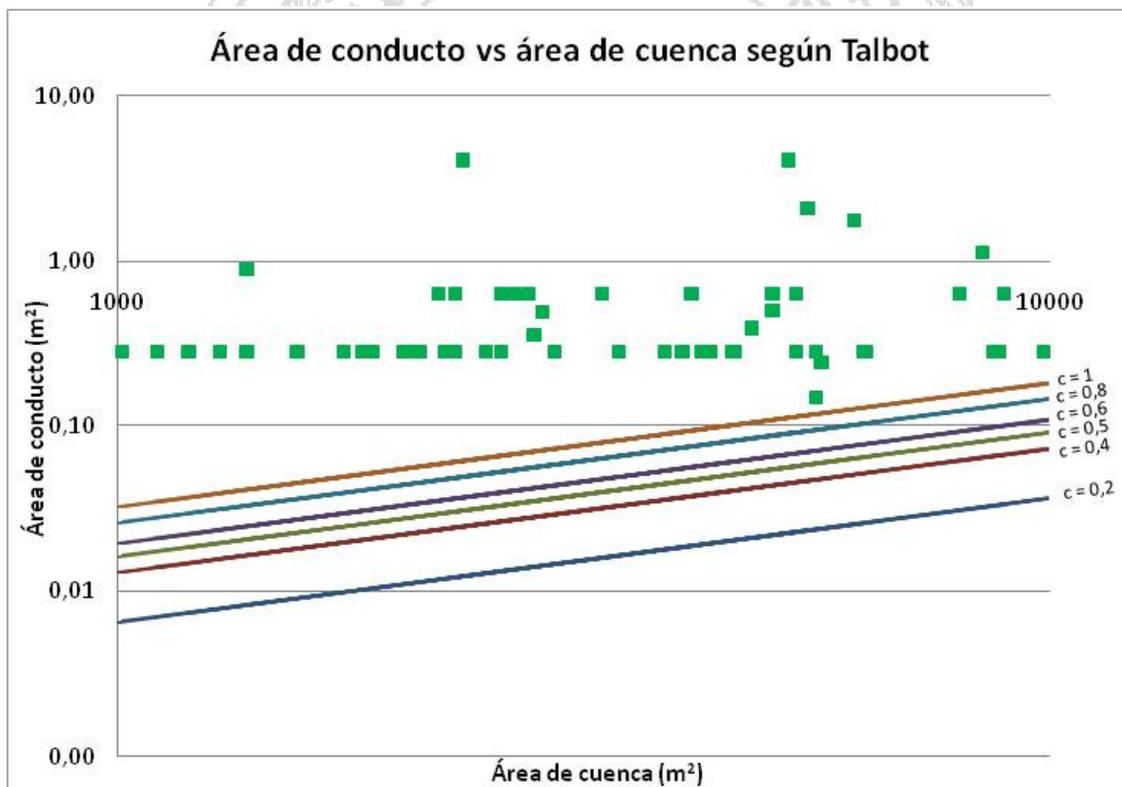


Figura 12. Diagrama de Talbot (área de conducto vs área de cuenca) para alcantarillas secundarias.

Se observa del gráfico anterior que el área medida en campo de las alcantarillas secundarias es superior al área recomendada por Talbot para un coeficiente “C” igual a 1,

correspondiente a terrenos montañosos y escarpados (Rodríguez, 1989), como el predominante en el tramo analizado de la Ruta Nacional 141.

7.2.4. Evaluación de la calidad de diseño, construcción y mantenimiento de las obra de drenaje menores evaluadas

Desde un punto de vista de diseño y/o construcción se constató el faltante de aletones de entrada y salida en muchas de las obras de drenaje evaluadas. El uso de estructuras de entrada, como pueden ser muros de cabecera con aleros o conductores achaflanados permite mejorar la capacidad de la tubería, reducir al mínimo la erosión del relleno y controlar el nivel de entrada de agua. No se observó en las salidas de algunas de las obras de drenaje, tal como se muestra en la Figura 13, el uso de disipadores de energía como zampeados o camas de revestimiento, muros o gabachas con dientes, los cuales se usan para prevenir la socavación a la salida de las tuberías.



Figura 13. Alcantarilla sin estructura de protección a la salida en Est. 42+230.
Estado de la estructura al 3 de febrero de 2012.

De igual manera se pudo observar el uso de alcantarillas dobles o alcantarillas tipo cajón con diafragma las cuales presentan el inconveniente que, aunque puedan cumplir con la sección hidráulica requerida, su estructuración permite el taponamiento de las mismas por el arrastre de arbustos, troncos, ramas o piedras. Como opción a estas situaciones se recomienda el utilizar una alcantarilla de mayor diámetro o puentes que si bien por su costo

en algunos casos pueden ser soluciones prohibitivas, no deben ser descartadas solamente por el aspecto económico, sino que debe analizarse aspectos de funcionabilidad, mantenimiento, entre otros.

Se observó que algunas cunetas y alcantarillas presentan señales de depositación de sedimento y crecimiento de vegetación, provocando que estén obstruidas parcialmente, lo cual si no es atendido puede resultar en la obstrucción total o la colmatación de las mismas. La figuras 14 y 15 muestran ejemplos de las condiciones anteriormente descritas.



Figura 14. Alcantarillas con sedimentos, vegetación y basura.
Estado de la estructura al 3 de febrero de 2012.



Figura 15. Alcantarilla con socavación a la salida en Est. 21+640.

Estado de la estructura al 3 de febrero de 2012.

De igual manera se constató el uso de obras de drenaje, de diferentes tamaños, para el paso de ductos y tuberías que sirven a otros servicios (e.g., tuberías de agua) que presentan para las obras de drenaje una disminución del área efectiva y en consecuencia de su capacidad hidráulica. Estos ductos y tuberías que atraviesan las obras de drenaje, a su vez, se vuelven elementos vulnerables de sufrir daños por el arrastre de rocas, troncos de árboles u otros que sean conducidos a las obras de drenaje. La Figura 16 muestra ejemplos de estas situaciones.



Figura 16. Alcantarillas con tuberías que las atraviesan.

Estado de la estructura al 3 de febrero de 2012.

7.3. Susceptibilidad a flujos de lodos y detritus

Para evaluar la susceptibilidad a flujos de lodos y detritus se utilizó la metodología propuesta por Kanji (2001), la cual considera varios aspectos como inclinación y altura de la ladera, la longitud del canal de drenaje, la vegetación, la geología y el factor lluvia. Para el cálculo de la inclinación de la ladera (S) se dibujó una línea para identificar la pendiente típica desde el punto más alto de la cuenca hasta el cauce principal, utilizando esta misma línea para determinar el valor de altura de la ladera (H).

La longitud del canal de drenaje (D) se calculó utilizando el cauce de mayor orden en la cuenca, desde el punto más alejado hasta el punto de corte en la carretera, que cumpla con la condición que la ladera típica drene hacia él. La vegetación (V) se obtuvo a partir del mapa de uso del suelo de la zona.

Los geoindicadores (G) se consideraron a partir de la descripción de la unidad geológica de la zona de estudio en comparación con las indicadas por Kanji (2001). En el Cuadro 11 se muestra la clasificación para cada geología de la zona de estudio.

Cuadro 11. Geoindicador para la geología de la zona de estudio.

Geología	Geoindicador
$\alpha 9^{\text{II}}$ & $\alpha 9^{\text{IV}}$ (Vulcanismo del Pleistoceno (lavas, tefras, <i>debris avalanches</i> , <i>debris flow</i>))	G1
$\alpha 3$ (Vulcanismo Mioceno)	G1
$\alpha 8$ (Ignimbritas y tobas del Pleistoceno)	G1
Q (Sedimentos continentales y de transición marina-costera del Cuaternario)	G1

Para evaluar el factor lluvia (R) se tomó como base el mapa “Intensidades para una lluvia con una duración de 60 minutos y un periodo de retorno de 10 años” generado por el ingeniero Erick Orozco (2007), el cual fue adaptado para pasar la duración a 15 minutos para el mismo periodo de retorno. Para el factor lluvia y para todas las cuencas se obtuvieron valores mayores a 80 mm/h. El Cuadro 12 muestra el grado final y su correspondiente nivel de susceptibilidad, los factores y grados parciales (GP) asignados para cada cuenca se muestran en los Anexos.

Cuadro 12. Grado final y nivel de susceptibilidad de cuencas a flujos y lodos de detritus, considerando el factor lluvia.

Cuenca	Grado final	Vulnerabilidad
3	55,0	Media
5	63,3	Alta
8	61,6	Alta
10	58,3	Media
11	65,0	Alta
12	58,3	Media
16	55,0	Media
18	65,0	Alta
20	55,0	Media
22	56,7	Media

En esta metodología, el factor más relevante es la lluvia por ser el agente disparador de los flujos, para todas las cuencas este factor presenta un valor mayor que el límite propuesto por Kanji ($R > 80$ mm/h). Por esta razón, se realizó un análisis de sensibilidad mediante la eliminación del factor lluvia, provocando una modificación de los pesos para cada factor, los cuales se indican en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Modificación de los pesos al no considerar el factor lluvia.

Factor	Peso
Inclinación de ladera	3,6
Inclinación del canal de drenaje	0,7
Área de cuenca	1,4
Altura de ladera	1,4
Vegetación	0,7
Aspectos geológicos	2,2

Fuente: Navarro, 2004

El Cuadro 14 muestra grado final y su correspondiente nivel de vulnerabilidad sin considerar el factor lluvia, los factores y grados parciales (GP) asignados para cada cuenca se muestran en los Anexos.

Cuadro 14. Grado final y nivel de susceptibilidad de cuencas a flujos y lodos de detritus, sin considerar el factor lluvia.

Cuenca	Grado final	Vulnerabilidad
3	36,0	Baja
5	47,62	Media
8	45,24	Media
10	40,62	Media
11	49,93	Media
12	40,62	Media
16	36,0	Baja
18	50,0	Media
20	36,0	Baja
22	38,31	Baja

El resultado de aplicar la metodología se muestra en las figuras 17 y 18.

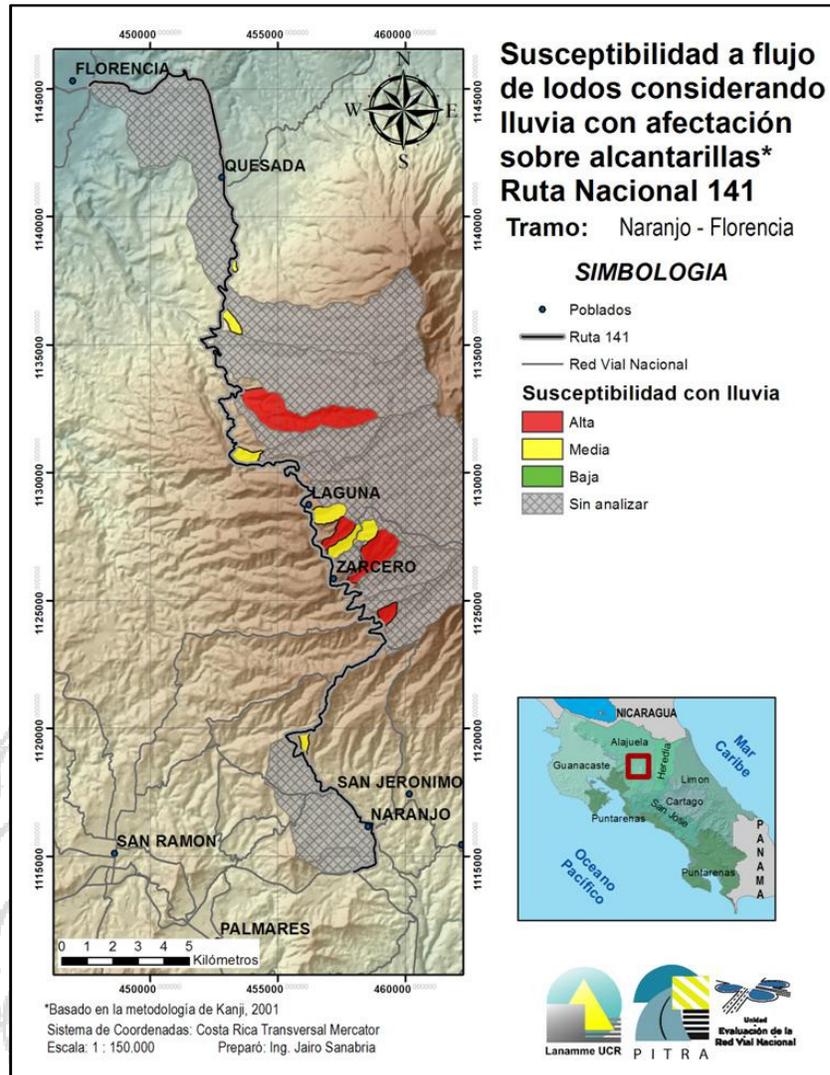


Figura 17. Susceptibilidad ante flujos de lodos/detritus considerando el factor lluvia.

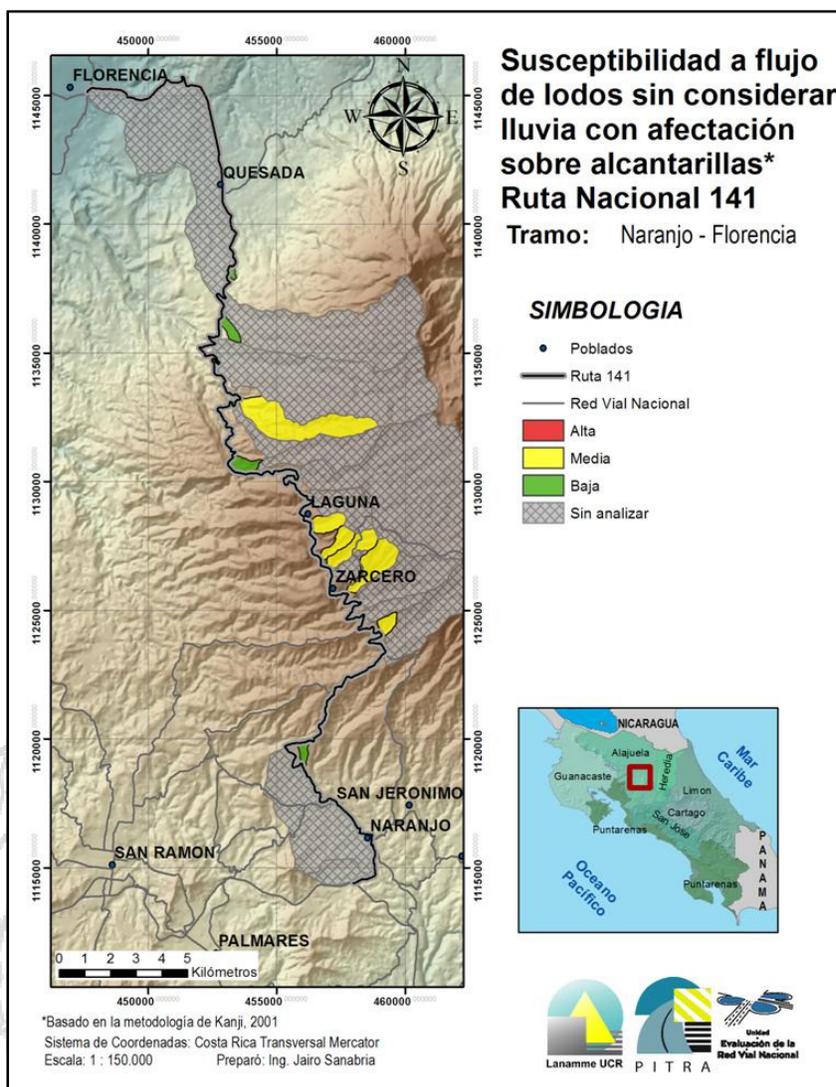


Figura 18. Susceptibilidad ante flujos de lodos/detritus sin considerar el factor lluvia.

7.4. Susceptibilidad a deslizamientos

Para realizar la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos se aplicó la metodología del ángulo crítico desarrollada por el LanammeUCR. El catálogo de deslizamientos fue obtenido a partir de información recolectada en visitas de campo realizadas por profesionales de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Infraestructura Vial Nacional del LanammeUCR. Las figuras 19 a 21 muestran los deslizamientos más importantes en el tramo analizado identificados por profesionales del LanammeUCR entre enero y febrero de 2012.



Figura 19. Deslizamiento en estacionamiento 07+060.
Estado del deslizamiento al 6 de enero de 2012.



Figura 20. Deslizamiento en estacionamiento 21+460.
Estado del deslizamiento al 6 de enero de 2012.



Figura 21. Deslizamiento en estacionamiento 40+870.
Estado del deslizamiento al 6 de enero de 2012.



Figura 22. Deslizamiento en estacionamiento 54+090.
Estado del deslizamiento al 6 de enero de 2012.



Figura 23. Deslizamiento en estacionamiento 54+190.
Estado del deslizamiento al 6 de enero de 2012.

Se muestra en la Figura 24 el análisis de la distribución de la pendiente en la zona ubicada en la geología $\alpha 3$ (Vulcanismo Mioceno).

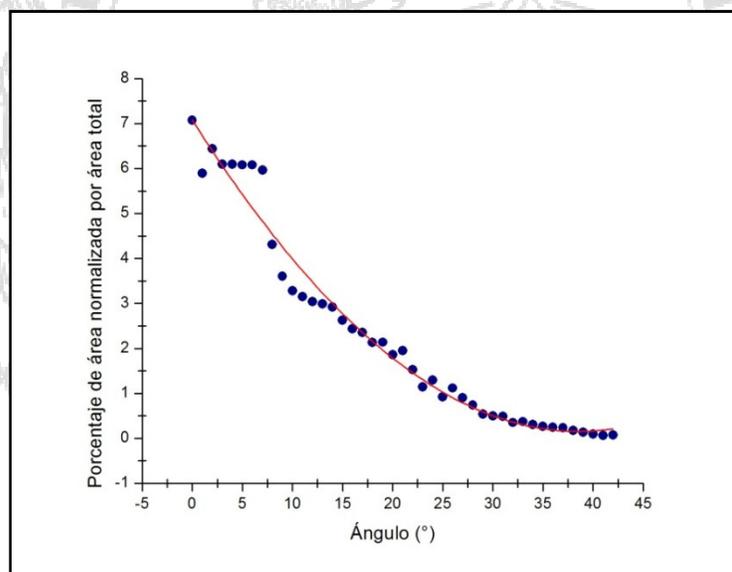


Figura 24. Porcentaje de área deslizada normalizada por área total contra pendiente para la geología $\alpha 3$.

Se muestra en la Figura 25 el análisis de la distribución de la pendiente en la zona ubicada en la geología $\alpha 8$ (Ignimbritas y tobas del Pleistoceno).

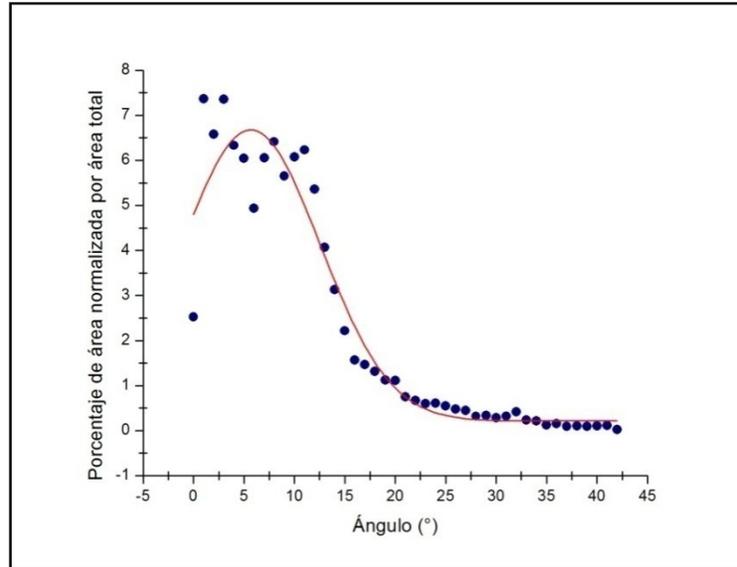


Figura 25. Porcentaje de área deslizada normalizada por área total contra pendiente para la geología $\alpha 8$.

Se muestra en la Figura 26 el análisis de la distribución de la pendiente en la zona ubicada en la geología $\alpha 9^{II}$ (Vulcanismo del Pleistoceno).

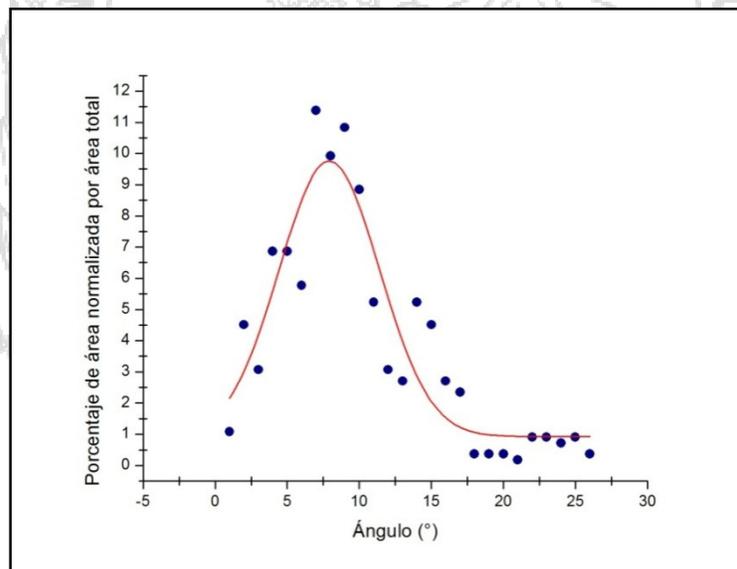


Figura 26. Porcentaje de área deslizada normalizada por área total contra pendiente para la geología $\alpha 9^{II}$

Se muestra en la Figura 27 el análisis de la distribución de la pendiente en la zona ubicada en la geología $\alpha 9^{IV}$ (Vulcanismo del Pleistoceno).

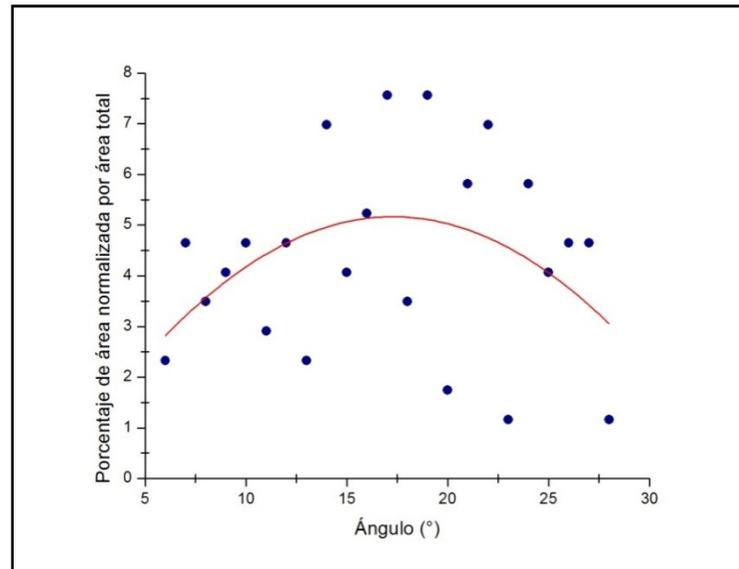


Figura 27. Porcentaje de área deslizada normalizada por área total contra pendiente para la geología $Q9^{IV}$

Se muestra en la Figura 28 el análisis de la distribución de la pendiente en la zona ubicada en la geología Q (Sedimentos continentales y de transición marina-costera del Cuaternario).

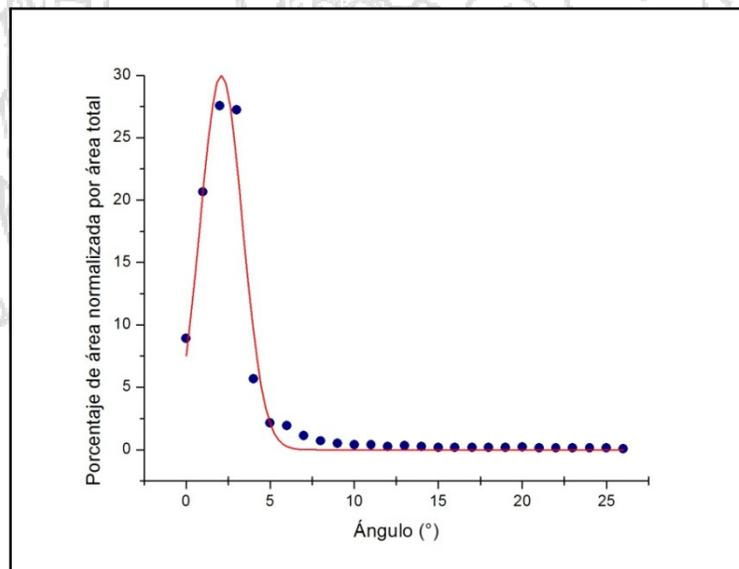


Figura 28. Porcentaje de área deslizada normalizada por área total contra pendiente para la geología Q

Se calculó el valor de ángulo crítico (media) para cada geología, obteniéndose valores considerados como bajos. Lo anterior se puede deber a que la escala de la topografía disponible y utilizada para el análisis (Escala 1:50000, curvas de nivel cada 20 metros) no permite representar de forma adecuada los deslizamientos ubicados en el tramo, ya que estos, en la mayoría de los casos, tienen alturas menores a los 10 metros, y los taludes de corte no se pueden representar de la mejor manera en el análisis. Por tanto, es recomendable poder contar con una topografía de una escala menor para esta zona del país (al menos 1:25000), con el objetivo de poder realizar análisis como este con un mayor grado de precisión, que permita representar de mejor manera las condiciones vistas en campo y obtener valores de ángulo crítico más representativos.

Los valores de ángulo crítico obtenidos para cada geología fueron considerados para estimar la vulnerabilidad de la ruta. Para esto, a la hora de estimar la vulnerabilidad por deslizamientos, además de usar los criterios desarrollados y adaptados en el LanammeUCR en investigaciones y estudios anteriores, se utilizó el criterio de experto para adaptar el nivel de vulnerabilidad lo máximo posible a las condiciones en campo.

Los cuadros 15 a 19 muestran los rangos de susceptibilidad de deslizamientos para las geologías de la zona donde se ubica la ruta analizada.

Cuadro 15. Rangos de susceptibilidad de deslizamiento para la geología $\alpha 3$

Rangos de pendiente (°)	Susceptibilidad
< 9,0	Muy baja
9,0 – 9,7	Baja
9,7 – 10,5	Media
10,5 – 11,3	Alta
> 11,3	Muy Alta

Cuadro 16. Rangos de susceptibilidad de deslizamiento para la geología $\alpha 8$

Rangos de pendiente (°)	Susceptibilidad
< 8,0	Muy baja
8,0 – 8,7	Baja
8,7 – 9,4	Media
9,4 – 10,2	Alta
> 10,2	Muy Alta

Cuadro 17. Rangos de susceptibilidad de deslizamiento para la geología α^{II}

Rangos de pendiente (°)	Susceptibilidad
< 6,5	Muy baja
6,5 – 8,4	Baja
8,4 – 10,2	Media
10,2 – 12,1	Alta
> 12,1	Muy Alta

Cuadro 18. Rangos de susceptibilidad de deslizamiento para la geología α^{IV}

Rangos de pendiente (°)	Susceptibilidad
< 13,5	Muy baja
13,5 – 15,9	Baja
15,9 – 18,3	Media
18,3 – 20,8	Alta
> 20,8	Muy Alta

Cuadro 19. Rangos de susceptibilidad de deslizamiento para la geología Q

Rangos de pendiente (°)	Susceptibilidad
< 1,9	Muy baja
1,9 – 2,5	Baja
2,5 – 3,1	Media
3,1 – 3,7	Alta
> 3,7	Muy Alta

La Figura 29 muestra el mapa de susceptibilidad de deslizamientos, obtenido a partir de la aplicación de la metodología del ángulo crítico.

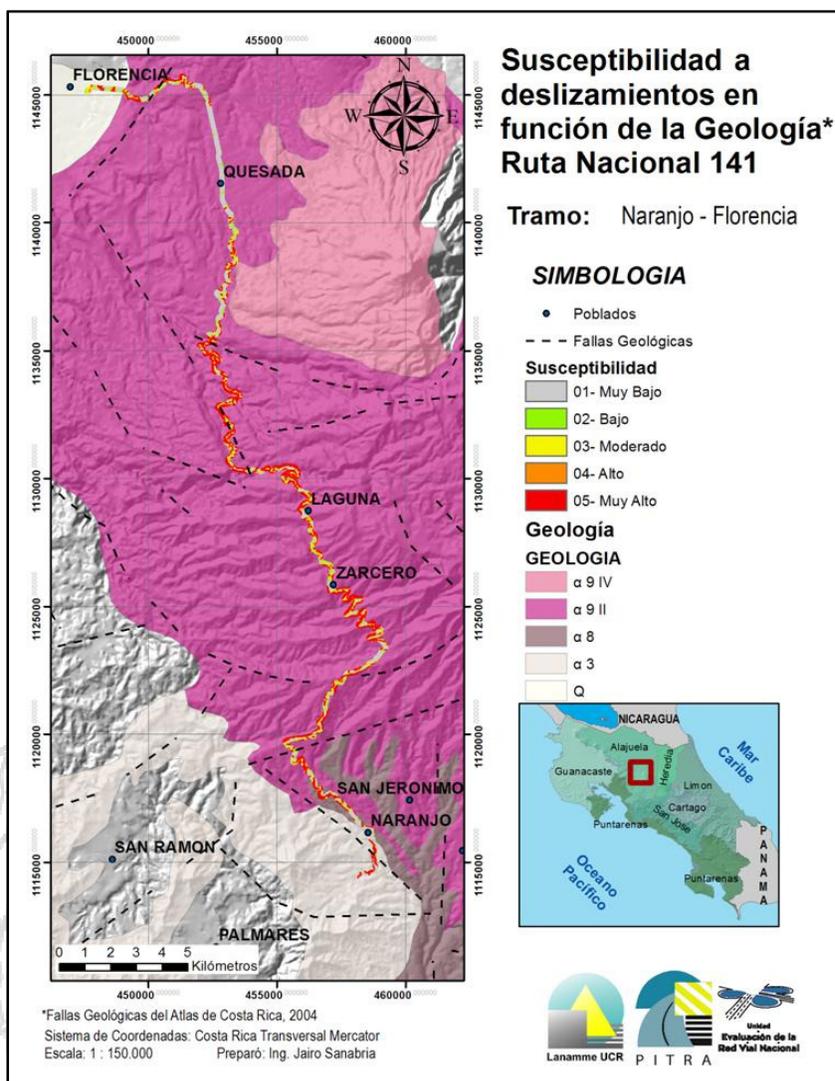


Figura 29. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

7.5. Vulnerabilidad de puentes

En el trazado del tramo evaluado se evaluaron nueve puentes sobre los ríos Pilas, Barranca, Espino, Zarcero, Tapezco, Jilguero, La Vieja, Peje Nuevo y Peje mediante la metodología RMS. Se presenta a continuación los resultados obtenidos.

7.5.1. Puentes sobre el tramo entre los kilómetros 0+000 y 59+000

Los puentes ubicados en la zona de estudio fueron evaluados tomando en consideración sus características estructurales y utilizando mapas de aceleraciones, según la amenaza

Informe LM-PI-UE-003-2012	Fecha de emisión: 18 de julio de 2012	Página 55 de 92
---------------------------	---------------------------------------	-----------------

sísmica, para periodos de retorno de 100 y 500 años, este último valor como revisión según el Código Sísmico de Costa Rica (2002). (Ver Figuras 30 y 31).

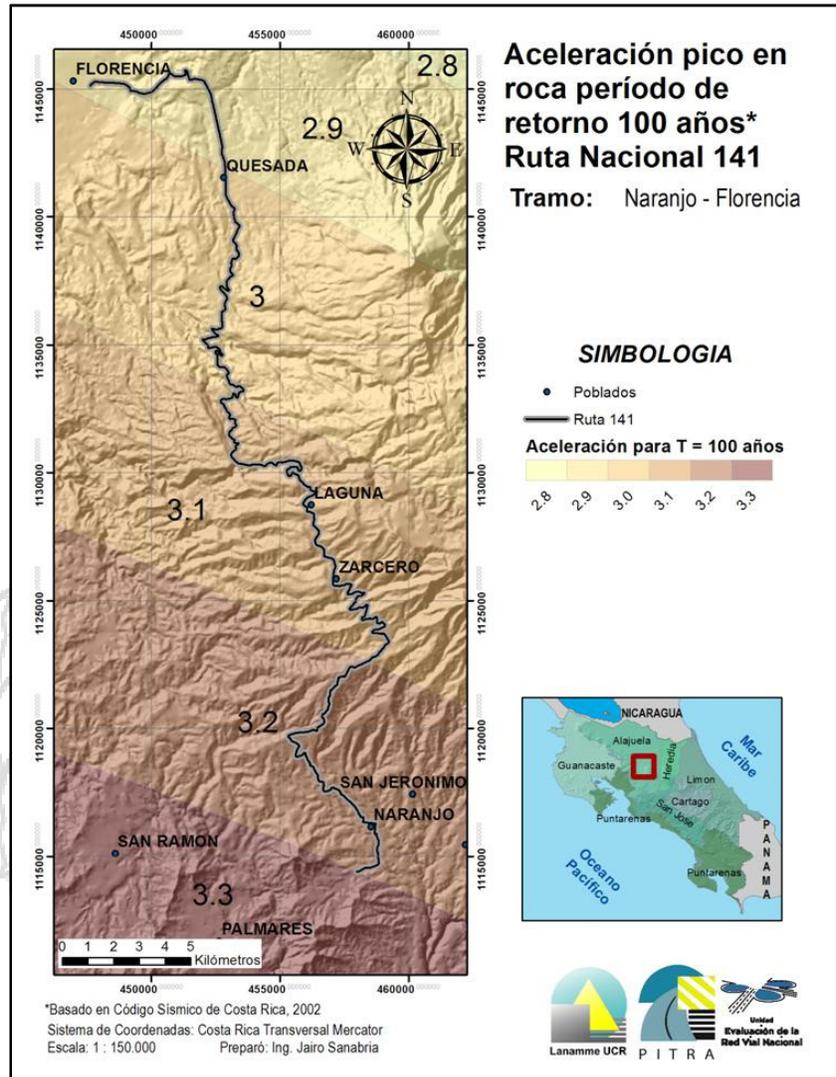


Figura 30. Mapa de aceleración pico en roca para T=100 años.
Valor de aceleración en m/s^2 .

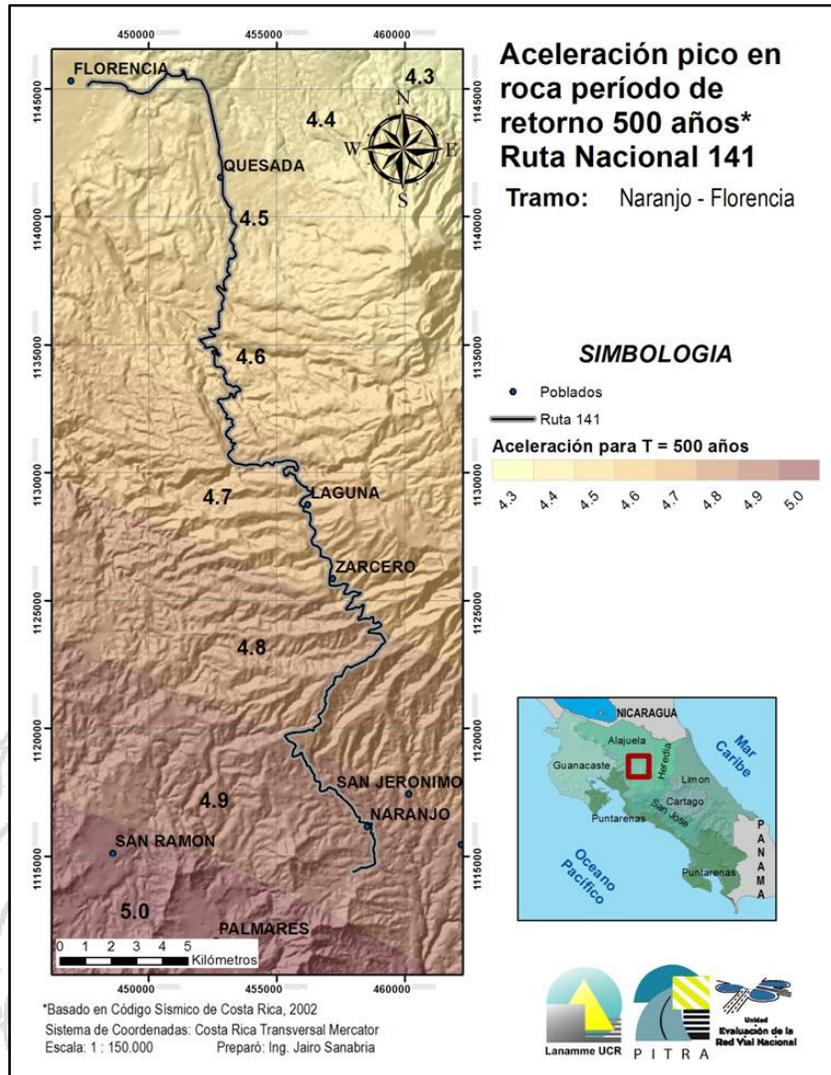


Figura 31. Mapa de aceleración pico en roca para T=500 años.
Valor de aceleración en m/s^2 .

En los cuadros del 20 al 28 se muestran las características utilizadas para evaluar los puentes.

Cuadro 20. Características del puente sobre el río Pilas.

Característica	Puente sobre el río Pilas
Fecha de construcción	1966 - 1970
T.P.D.	3330
Longitud	49,7 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente continuo, con luz menor de 150 metros, monolítico
Diseño	Diseño convencional
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR10



Figura 32. Puente sobre el río Pilas.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 33. Puente sobre el río Pilas.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 21. Características del puente sobre el río Barranca.

Característica	Puente sobre el río Barranca
Fecha de construcción	1936 - 1940
T.P.D.	1700
Longitud	36,3 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente simplemente apoyado, con luces menores de 150 metros y apoyos simples
Diseño	Diseño convencional
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR12



Figura 34. Puente sobre el río Barranca.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 35. Puente sobre el río Barranca.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 22. Características del puente sobre el río Espino.

Característica	Puente sobre el río Espino
Fecha de construcción	1936 - 1940
T.P.D.	1700
Longitud	8,20 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente simplemente apoyado, con luces menores de 150 metros y apoyos simples
Diseño	Diseño convencional
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR12



Figura 36. Puente sobre el río Espino.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 37. Puente sobre el río Espino.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 23. Características del puente sobre el río Zarcero.

Característica	Puente sobre el río Zarcero
Fecha de construcción	1936 - 1940
T.P.D.	1250
Longitud	5,9 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente continuo, con luz menor de 150 metros, monolítico
Diseño	Diseño convencional
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR10



Figura 38. Puentes sobre el río Zarcero.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 39. Puentes sobre el río Zarcero.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 24. Características del puente sobre el río Tapezco.

Característica	Puente sobre el río Tapezco
Fecha de construcción	1994 - 1998
T.P.D.	1700
Longitud	11,6 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente simplemente apoyado, con luces menores de 150 metros y apoyos simples
Diseño	Diseño convencional
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR11



Figura 40. Puente sobre el río Tapezco.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 41. Puente sobre el río Tapezco.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 25. Características del puente sobre el río Jilguero.

Característica	Puente sobre el Río Jilguero
Fecha de construcción	- ²
T.P.D.	1250
Longitud	7,3 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente simplemente apoyado, con luces menores de 150 metros y apoyos simples
Diseño	Diseño convencional
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR12

² Fecha de construcción desconocida, por lo que se supuso para efectos de la metodología que el puente fue construido antes del año 1973 y no cuenta con diseño sísmoresistente.



Figura 42. Puentes sobre el río Jilguero.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 43. Puentes sobre el río Jilguero.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 26. Características del puente sobre el río La Vieja.

Característica	Puente sobre el río La Vieja
Fecha de construcción	1990 - 1994
T.P.D.	1250
Longitud	45,8 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente simplemente apoyado, con luces menores de 150 metros y apoyos simples
Diseño	Diseño sismo-resistente
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR11



Figura 44. Puente sobre el río La Vieja.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 45. Puente sobre el río La Vieja.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 27. Características del puente sobre el río Peje Nuevo.

Característica	Puente sobre el río Peje Nuevo
Fecha de construcción	1986 - 1990
T.P.D.	1300
Longitud	21,7 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente simplemente apoyado, con luces menores de 150 metros y apoyos simples
Diseño	Diseño sismo-resistente
Riesgo	Bajo Riesgo
Clasificación	HBR5



Figura 46. Puente sobre el río Peje Nuevo.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 47. Puente sobre el río Peje Nuevo.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 28. Características del puente sobre el río Peje.

Característica	Puente sobre el Río Peje
Fecha de construcción	1986 - 1990
T.P.D.	990
Longitud	16,2 m
Material	Concreto
Tipo de estructura	Vigas rectangulares
Tipo	Puente simplemente apoyado, con luces menores de 150 metros y apoyos simples
Diseño	Diseño convencional
Riesgo	Alto riesgo
Clasificación	HBR12



Figura 48. Puente sobre el río Peje.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.



Figura 49. Puente sobre el río Peje.
Estado del puente al 6 de enero de 2012.

Cuadro 29. Daño asignado a los puentes y criterio de vulnerabilidad.

Puente	Clasificación	Daño asignado (T=100 años)	Daño asignado (T=500 años)	Vulnerabilidad
Pilas	HBR10	Moderado	Generalizado	Alta
Barranca	HBT12	Generalizado	Generalizado	Muy alta
Espino	HBR12	Generalizado	Generalizado	Muy alta
Zarcero	HBR10	Moderado	Generalizado	Alta
Tapezco	HBR11	Generalizado	Generalizado	Muy alta
Jilguero	HBR12	Generalizado	Generalizado	Muy alta
La Vieja	HBR11	Moderado	Generalizado	Alta
Peje Nuevo	HBR5	Menor	Generalizado	Alta
Peje	HBR12	Generalizado	Generalizado	Muy alta

Según los criterios del Cuadro 29 y con base en los resultados del análisis de amenaza sísmica, a los puentes sobre los ríos Pilas, Zarcero, La Vieja y Peje Nuevo se les asignó una vulnerabilidad alta, mientras que a los puentes sobre los ríos Barranca, Espino, Tapezco, Jilguero y Peje se les asignó una vulnerabilidad muy alta.



8. PERFILES DE VULNERABILIDAD

La información recopilada de las evaluaciones realizadas se resume en este capítulo con el fin de generar los perfiles de vulnerabilidad total del proyecto.

Según estudios realizados en el LanammeUCR, se recomienda dividir las rutas analizadas en segmentos de máximo 200 metros para generar los perfiles. En este caso se utilizó una segmentación de 200 metros, asignándoles a cada segmento un nivel de vulnerabilidad dado en función de la ubicación de las obras y del valor máximo de la amenaza en el segmento, para un total de 295 tramos en una longitud de 59 kilómetros. Para cada segmento se recopiló la información sobre las amenazas naturales evaluadas que lo afectan y se asignó una vulnerabilidad global, la cual fue revisada mediante una visita de campo en la que se observó la correspondencia del resultado con la realidad. De este modo se identifican zonas prioritarias para la inversión en obras que permitan reducir la vulnerabilidad.

Para el caso de vulnerabilidad por deslizamientos, tal y como se menciona en el apartado 7.4, los valores de ángulo crítico obtenidos para cada geología fueron considerados para estimar la vulnerabilidad de la ruta. Para esto, además de usar los criterios desarrollados y adaptados en el LanammeUCR en investigaciones y estudios anteriores, se utilizó el criterio de experto para adaptar el nivel de vulnerabilidad lo máximo posible a las condiciones en campo. Para eso se realizaron giras de campo para determinar que los resultados obtenidos con la metodología de ángulo crítico (susceptibilidad a deslizamientos) y las metodologías para estimar la vulnerabilidad de la ruta por deslizamientos (a partir de la susceptibilidad a deslizamientos) fuera lo más representativas y ajustadas a lo visto en campo.

8.1. Perfiles de susceptibilidad ante amenazas y vulnerabilidad

Las amenazas consideradas en el presente estudio fueron la vibración sísmica, el potencial de inestabilidad, los caudales extremos y los flujos de lodos y detritus. Para generar el perfil de vulnerabilidad de la carretera es necesario clasificar las amenazas mencionadas previamente en una escala de intensidad o severidad relativa, intrínseca a cada fenómeno y que permita obtener una percepción de su magnitud (Ver Cuadro 30).

Informe LM-PI-UE-003-2012	Fecha de emisión: 18 de julio de 2012	Página 72 de 92
---------------------------	---------------------------------------	-----------------

Cuadro 30. Niveles cualitativos de severidad de amenazas naturales y equivalencias numéricas para la zonificación aplicada a la infraestructura vial.

Tipo de escala	Nivel de intensidad				
Cualitativa	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Cromática	Blanco	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
Numérica (0 a 10)	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10
Porcentual	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100

Fuente: Vargas, 2003; en Castro, 2005.

Se presentan en la Figura 50 el perfil de vulnerabilidad ante amenazas del tramo analizado la Ruta Nacional 141. El detalle de los tramos con vulnerabilidad media a alta se muestra en los Anexos en forma tabular.

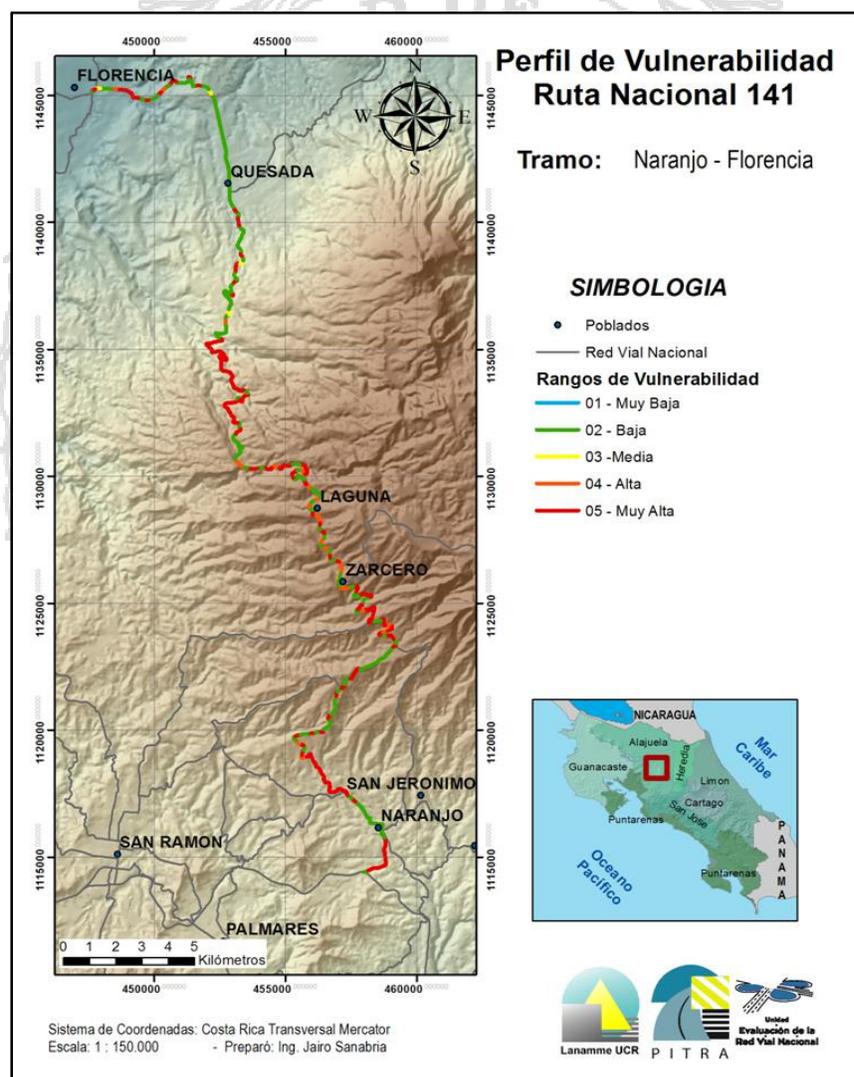


Figura 50. Perfil de vulnerabilidad



9. CONCLUSIONES

1. Por medio de la información levantada por el LanammeUCR se constató que las principales amenazas que afecta el corredor son los caudales extremos, los flujos de lodo y la vibración sísmica.
2. La vulnerabilidad de los sistemas de drenaje menores fue definida con base en su capacidad hidráulica, considerando sus secciones transversales y el caudal máximo correspondiente a las cuencas que sirven. Según la metodología usada, de las diez obras de drenaje menores principales evaluadas, seis presentan vulnerabilidad muy alta, lo que refleja que las secciones transversales son insuficientes para evacuar el caudal calculado para los diferentes periodos de retorno analizados (i.e, 20 y 100 años) y hace recomendable, por parte de la Administración, la modificación de su sección transversal.
3. La susceptibilidad a la ocurrencia potencial de flujos de lodos y detritus para las 10 cuencas analizadas fue evaluada por medio de la Metodología de Kanji (2001), considerando la lluvia como principal agente disparador de flujos y luego sin considerarla. Se puede concluir que las cuencas analizadas, asociadas a obras de drenaje menores principales y que presentan una vulnerabilidad muy alta por falta de capacidad hidráulica (cuencas 3, 8, 10, 11, 12 y 18), presentan una susceptibilidad a flujos de lodos y detritus de media a alta, lo cual hace necesario revisar, bajo ambas premisas (vulnerabilidad ante caudales extremos y ante flujos de lodos y detritus), la capacidad y configuración de las obras de drenaje.
4. La evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos fue realizada siguiendo la metodología del ángulo crítico. La zonificación realizada indica que existen multiples sectores propensos (susceptibilidad alta o muy alta) a deslizamientos. La ubicación de estos sectores se muestra en los Anexos.



5. La evaluación de vulnerabilidad de puentes ante la amenaza sísmica fue realizada por medio de la metodología RMS de “Risk Management Solutions, Inc.”. Según el resultado obtenido, a los puentes sobre los ríos Pilas, Zarcero, La Vieja y Peje Nuevo se les asignó una vulnerabilidad alta, mientras que a los puentes sobre los ríos Barranca, Espino, Tapezco, Jilguero y Peje se les asignó una vulnerabilidad muy alta.
6. Los puntos anteriores permiten concluir que la ruta analizada requiere, por parte de la Administración, de atención en aspectos de capacidad hidráulica de las alcantarillas que se ubican a lo largo de la ruta y de revisión del diseño sismoresistente de los puentes, aspectos a los que debe ponérsele atención a la mayor brevedad posible para disminuir la vulnerabilidad de la infraestructura.
7. Con respecto a los taludes de corte y rellenos, se requiere contar con una topografía de menor escala (e.g., 1:25000 o 1:10000) que permita realizar de forma más precisa un nuevo análisis para poder representar, de forma más realista, las condiciones en campo. No obstante, por lo observado durante las giras de campo, se considera que los taludes de corte presentan una pendiente muy alta, que bajo condiciones de lluvia intensa o sismo, pueden resultar en deslizamientos que pueden obstruir de forma parcial o total la carretera.



10. RECOMENDACIONES

En esta sección se presentan recomendaciones generales, así como recomendaciones específicas para mejorar las condiciones de operación y la reducción de la vulnerabilidad de los componentes del tramo analizado de la Ruta Nacional 141 ante las diferentes amenazas consideradas.

Como recomendaciones generales se plantea:

1. Establecer, por parte de la Administración, un nuevo tipo de gestión de la infraestructura vial hacia una cultura de prevención en obras nuevas y rehabilitación para obras existentes, para pasar a soluciones bien planteadas respaldadas por una planificación, estudios preliminares y diseños realizados por un profesional con experiencia en la materia. Dentro de las medidas a tomar se recomienda integrar, por parte de la Administración (CONAVI), un grupo de profesionales en ingeniería de carreteras, ingeniería geotécnica, hidrología y otras áreas de la ingeniería civil, para atender y llevar a cabo obras que permitan mitigar el riesgo existente.
2. Establecer por parte de las diferentes instituciones encargadas de la atención de emergencias (e.g., Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), Cruz Rojas, Cuerpo de Bomberos, Fuerza Pública) las medidas preventivas necesarias para la atención de las emergencias que se puedan dar ante amenazas naturales, con la meta de minimizar el impacto que estos fenómenos puedan tener sobre la infraestructura vial nacional y la población que hace uso de ella.

Para disminuir la vulnerabilidad de alcantarillas y pasos de agua en el tramo evaluado se plantea la necesidad de que la Administración realice de forma oportuna al menos las siguientes recomendaciones:

1. Realizar para aquellas obras de drenaje con un nivel de vulnerabilidad muy alto, un análisis hidrológico e hidráulico detallado que permita determinar el área y la sección



geométrica optima de estructura requerida, según las características particulares de la cuenca a la que sirve; así como realizar un análisis económico para priorizar y determinar el procedimiento óptimo de mejora o reconstrucción de las estructuras con problemas.

2. Desarrollar programas de mantenimiento continuo de limpieza de cunetas, contracunetas, pasos de agua, alcantarillas y otras obras de drenaje, para asegurar una eficiente evacuación de agua llovida proveniente de la carretera y de la escorrentía superficial de las cuencas hidrográficas a las que sirven, así como para evitar la saturación de terraplenes. Es importante resaltar que los materiales y escombros que resulten de las labores de limpieza deben ser desechados apropiadamente y no ser depositados en zonas no adecuadas, haciendo que se traslade el riesgo de una zona a otra.

Para mitigar el riesgo ante flujo de lodos y detritus en el tramo evaluado se plantea la necesidad de que la Administración realice de forma oportuna al menos las siguientes recomendaciones:

1. Realizar para aquellas obras de drenaje con un nivel de vulnerabilidad medio y alto, un análisis hidrológico e hidráulico detallado que permita determinar el área y la sección geométrica optima de estructura requerida, según las características particulares de la cuenca a la que sirve, considerando la amenaza potencial de los flujos de lodo y detritus, dado que la falta de capacidad hidráulica es una problemática potencial adicional para los conductos, ya que los flujos con sedimentos pueden exceder los caudales máximos usados para la evaluación de capacidad de las alcantarillas.

Para mitigar el riesgo ante deslizamientos en el tramo evaluado se plantea la necesidad de que la Administración realice de forma oportuna al menos las siguientes recomendaciones:

1. Habilitar, en los lugares que así lo ameriten, un sistema de captación y control de aguas subterráneas y superficiales, para evitar la saturación de los suelos en taludes y terraplenes y evitar que estos se deterioren y provoquen deslizamientos.



2. Establecer por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, a través de la Dirección General de Ingeniería de Tránsito, y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias un sistema de vigilancia y control de tránsito para la ruta en estudio, el cual permita identificar desplazamientos de material de taludes que pueda ocurrir o que ocurra con el fin de alertar a los usuarios de la vía y tomar las acciones de cierre temporal, parcial o total de la ruta, según corresponda.

De realizarse cierres temporales o totales es importante considerar los vehículos que pudieran encontrarse dentro del área cerrada para que sean reubicados en zonas seguras, y no al pie de taludes que puedan representar un riesgo a su seguridad.

3. Conocer en detalle las condiciones del terreno para definir los lugares donde se puede construir contracunetas (estructuras que se ubican en la parte superior del talud para evacuar el agua de escorrentía). Asimismo, se debe considerar el uso de subdrenajes (perforaciones en la parte baja del talud) para manejar el efecto de las aguas subterráneas.

Como recomendaciones para disminuir la vulnerabilidad de los puentes se plantea la necesidad de que la Administración realice de forma oportuna al menos las siguientes recomendaciones:

1. Evaluar por parte de la Administración activa la necesidad de modificar o adecuar los puentes para que puedan resistir las fuerzas sísmicas a las que puedan estar sometidos, según la amenaza sísmica de la zona.
2. Como parte de los programas de mantenimiento de los puentes se debe implementar un programa de limpieza de basura y desechos en la subestructura, con especial atención sobre la pila del puente, con la meta de mitigar y prevenir cualquier proceso de socavación.



11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C & Vásquez, A. (2002). *Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos*. San José, Costa Rica.
2. Castro, K. (2005). *Vulnerabilidad física de la infraestructura vial en las Rutas 130, 712, 146, 120 y 126 Tramo Alajuela-Fraijanes-Vara Blanca-San Miguel de Sarapiquí*. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
3. Comisión Terra. (1998). *Fotografías aéreas Proyecto Terra*. San José, Costa Rica: Ministerio de Ambiente, Energía y Minas.
4. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. (2010). *Plan Nacional para la Gestión del Riesgo*. San José, Costa Rica: el autor.
5. Comité Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica, Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2002). *Código Sísmico de Costa Rica 2002*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
6. Decreto N° 36721-MP-PLAN. *Publicado en La Gaceta N° 159 del viernes 19 de agosto de 2011*.
7. Denyer, P. & Alvarado, G. (2007). *Mapa Geológico de Costa Rica 2007*. San José, Costa Rica: Librería Francesa.
8. Denyer, P., Arias, O., Soto, G., Obando, L., & Salazar, G. (1993). *Mapa Geológico de la Gran Área Metropolitana*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Geología.
9. Denyer, P. & Kussmaul, S. (1994). *Atlas Geológico Gran Área Metropolitana*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
10. Kanji, M. (2001). *Metodología para estimar la vulnerabilidad del terreno con relación a flujo de detritus*. 1er Simposio Internacional de Movimientos en Masa. Ecuador.
11. Keller, G., Bauer, G. & Aldana, M. (1995). *Caminos rurales con impactos mínimos: Un manual de capacitación con énfasis sobre planificación ambiental, drenajes,*



estabilización de taludes y control de erosión. Ciudad de Guatemala, Guatemala:
USAID, US, Programa de Caminos Rurales D.G.C.

12. Navarro, E. (2004). *Susceptibilidad ante amenazas naturales de la subcuenca del Río General, Pérez Zeledón, Costa Rica.* Informe final de proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.
13. Orozco, E. (2007). *Zonificación climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial.* Informe de Proyecto de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.
14. Rodríguez, E. (1989). *Revisión de métodos de diseño hidrológico e hidráulico de alcantarillas para carreteras.* Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.
15. Vargas, W. & Garro, J. (2003). *Gestión de riesgos naturales en infraestructura vial.* San José, Costa Rica: LanammeUCR.
16. Vargas, W. & Garro, J. (2005). *El ángulo crítico de la pendiente y la susceptibilidad a deslizamientos de laderas naturales.* San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica.
17. Villón, M. (2004). *Hidrología.* Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

12. ANEXOS

12.1. Valores para el cálculo de caudal (m^3/s) para cada cuenca.

Cuadro A.1. Valores de caudales máximos (m^3/s) para cuencas principales.

Cuenca	Área (km^2)	Coeficiente de escorrentía (c)	Intensidad de lluvia (mm/h)		Caudal (m^3/s)	
			T _{20 años}	T _{100 años}	Q _{20 años}	Q _{100 años}
3	0,28	0,35	125	182	3,45	5,02
5	0,45	0,30	135	197	4,62	6,73
8	1,88	0,30	133	212	41,70	60,88
10	1,25	0,36	130	190	16,60	24,22
11	0,74	0,70	130	190	18,99	27,71
12	0,84	0,32	130	190	9,93	14,49
16	0,61	0,30	130	190	6,82	9,96
18	4,61	0,30	130	190	205,70	299,64
20	0,38	0,30	130	190	3,95	5,75
22	0,10	0,30	130	190	1,00	1,45

Cuadro A.2. Valores de caudales máximos (m^3/s) para cuencas secundarias.

Cuenca	Área (km^2)	Coeficiente de escorrentía (c)	Intensidad de lluvia (mm/h)		Caudal (m^3/s)	
			T _{20 años}	T _{100 años}	Q _{20 años}	Q _{100 años}
24	0,0019	0,85	125	182	0,06	0,08
25	0,0063	0,85	125	182	0,19	0,27
26	0,0051	0,85	125	182	0,15	0,22
27	0,0053	0,85	125	182	0,16	0,23
28	0,0043	0,85	125	182	0,13	0,18
29	0,0041	0,85	125	182	0,12	0,18
30	0,0018	0,85	125	182	0,05	0,08
31	0,0013	0,85	125	182	0,04	0,06
32	0,0088	0,85	125	182	0,26	0,38
33	0,0039	0,85	125	182	0,11	0,17
34	0,0040	0,85	125	182	0,12	0,17
35	0,0012	0,85	125	182	0,04	0,05
36	0,0042	0,85	125	182	0,12	0,18
37	0,0022	0,85	125	182	0,06	0,09
38	0,0027	0,85	125	182	0,08	0,11

Cuadro A.2 (cont.). Valores de caudales máximos (m³/s) para cuencas secundarias.

Cuenca	Área (km ²)	Coeficiente de escorrentía (c)	Intensidad de lluvia (mm/h)		Caudal (m ³ /s)	
			T _{20 años}	T _{100 años}	Q _{20 años}	Q _{100 años}
39	0,0017	0,85	125	182	0,05	0,07
40	0,0016	0,85	125	182	0,05	0,07
41	0,0057	0,85	125	182	0,17	0,24
42	0,0026	0,85	125	182	0,08	0,11
43	0,0020	0,85	130	212	0,06	0,10
44	0,0021	0,85	132	212	0,06	0,10
45	0,0046	0,85	135	197	0,14	0,21
46	0,0025	0,85	135	197	0,08	0,11
47	0,0023	0,85	135	197	0,07	0,11
48	0,0046	0,85	135	197	0,15	0,21
49	0,0020	0,85	135	197	0,06	0,09
50	0,0017	0,85	135	197	0,06	0,08
51	0,0014	0,85	135	197	0,04	0,06
52	0,0053	0,85	135	197	0,17	0,25
53	0,0014	0,85	135	197	0,04	0,06
54	0,0029	0,85	133	212	0,09	0,14
55	0,0028	0,85	133	212	0,09	0,14
56	0,0023	0,85	132	212	0,07	0,11
57	0,0035	0,85	130	190	0,11	0,15
58	0,0021	0,85	130	190	0,06	0,09
59	0,0055	0,85	130	190	0,17	0,25
60	0,0028	0,85	130	190	0,09	0,13
61	0,0063	0,85	130	190	0,19	0,28
62	0,0010	0,85	130	190	0,03	0,05
63	0,0029	0,85	130	190	0,09	0,13
64	0,0011	0,85	130	190	0,03	0,05
65	0,0056	0,85	130	190	0,17	0,25
66	0,0023	0,85	130	190	0,07	0,10
67	0,0087	0,85	130	190	0,27	0,39
68	0,0098	0,85	130	190	0,30	0,44
69	0,0048	0,85	130	190	0,15	0,21
70	0,0023	0,85	130	190	0,07	0,10
71	0,0062	0,85	130	190	0,19	0,27

Cuadro A.2 (cont.). Valores de caudales máximos (m³/s) para cuencas secundarias.

Cuenca	Área (m ²)	Coeficiente de escorrentía (c)	Intensidad de lluvia (mm/h)		Caudal (m ³ /s)	
			T _{20 años}	T _{100 años}	Q _{20 años}	Q _{100 años}
72	0,0013	0,85	130	190	0,04	0,06
73	0,0026	0,85	130	190	0,08	0,11
74	0,0089	0,85	130	190	0,27	0,40
75	0,0056	0,85	130	190	0,17	0,25
76	0,0033	0,85	130	190	0,10	0,15
77	0,0052	0,85	130	190	0,16	0,23
78	0,0051	0,85	130	190	0,15	0,23
79	0,0150	0,85	130	190	0,46	0,67
80	0,0080	0,85	130	190	0,24	0,36
81	0,0132	0,85	130	190	0,40	0,59
82	0,0085	0,85	130	190	0,26	0,38

12.2. Factores, grados parciales, grado final y nivel de susceptibilidad a flujos de lodos y detritus

Cuadro A.3. Factores, grados parciales, grado final y nivel de susceptibilidad de cada cuenca a flujos y lodos de detritus, considerando el factor lluvia.

Cuenca	Lluvia (mm/h)	Grado parcial	Inclinación de ladera (°)	Grado parcial	Inclinación de canal de drenaje (°)	Grado parcial	Área de la cuenca (km ²)	Grado parcial
3	>80	10	8,9	0	9,1	0,0	0,28	10
5	>80	10	11,0	0	8,5	0,0	0,45	10
8	>80	10	10,9	0	9,4	0,0	1,88	10
10	>80	10	10,0	0	7,9	0,0	1,25	10
11	>80	10	12,8	0	12,3	3,3	0,74	10
12	>80	10	11,7	0	7,2	0,0	0,84	10
16	>80	10	6,5	0	3,7	0,0	0,61	10
18	>80	10	8,8	0	7,1	0,0	4,61	10
20	>80	10	7,9	0	5,1	0,0	0,38	10
22	>80	10	9,7	0	10,6	3,3	0,10	10

Cuadro A.4. Factores, grados parciales, grado final y nivel de susceptibilidad de cada cuenca a flujos y lodos de detritus, considerando el factor lluvia.

Cuenca	Altura de la ladera (m)	Grado parcial	% del área deforestada	Grado parcial	Geología	Grado parcial	Grado final	Vulnerabilidad
3	180	0,0	0	0	G1	10	55,0	Media
5	200	3,3	100	10	G1	10	63,3	Alta
8	530	6,6	0	0	G1	10	61,6	Alta
10	420	3,3	15	0	G1	10	58,3	Media
11	380	3,3	98	10	G1	10	65,0	Alta
12	300	3,3	5	0	G1	10	58,3	Media
16	170	0,0	0	0	G1	10	55,0	Media
18	930	10,0	0	0	G1	10	65,0	Alta
20	170	0,0	0	0	G1	10	55,0	Media
22	100	0,0	0	0	G1	10	56,7	Media

Cuadro A.5. Factores, grados parciales, grado final y nivel de susceptibilidad de cada cuenca a flujos y lodos de detritus, sin considerar el factor lluvia.

Cuenca	Inclinación de ladera (°)	Grado parcial	Inclinación de canal de drenaje (°)	Grado parcial	Área de la cuenca (km ²)	Grado parcial
3	8,9	0	9,1	0,0	0,28	10
5	11,0	0	8,5	0,0	0,45	10
8	10,9	0	9,4	0,0	1,88	10
10	10,0	0	7,9	0,0	1,25	10
11	12,8	0	12,3	3,3	0,74	10
12	11,7	0	7,2	0,0	0,84	10
16	6,5	0	3,7	0,0	0,61	10
18	8,8	0	7,1	0,0	4,61	10
20	7,9	0	5,1	0,0	0,38	10
22	9,7	0	10,6	3,3	0,10	10

Cuadro A.6. Factores, grados parciales, grado final y nivel de susceptibilidad de cada cuenca a flujos y lodos de detritus, sin considerar el factor lluvia.

Cuenca	Altura de la ladera (m)	Grado parcial	% del área deforestada	Grado parcial	Geología	Grado parcial	Grado final	Vulnerabilidad
3	180	0,0	0	0	G1	10	36,0	Baja
5	200	3,3	100	10	G1	10	47,6	Media
8	530	6,6	0	0	G1	10	45,2	Media
10	420	3,3	15	0	G1	10	40,6	Media
11	380	3,3	98	10	G1	10	49,9	Media
12	300	3,3	5	0	G1	10	40,6	Media
16	170	0,0	0	0	G1	10	36,0	Baja
18	930	10,0	0	0	G1	10	50,0	Media
20	170	0,0	0	0	G1	10	36,0	Baja
22	100	0,0	0	0	G1	10	38,3	Baja

12.3. Perfil de vulnerabilidad.

Cuadro A.7. Perfil de vulnerabilidad ante amenazas.

Estacionamiento	Nivel de vulnerabilidad	Amenazas	Componentes afectados
0+200 a 0+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
0+400 a 0+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
0+600 a 0+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
0+800 a 1+000	Muy alto	Amenaza sísmica, deslizamientos	Puente Río Pilas, taludes de corte
1+000 a 1+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
1+200 a 1+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
1+400 a 1+600	Muy alto	Falla geológica, deslizamientos	Taludes de corte
1+600 a 1+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
1+800 a 2+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
4+200 a 4+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
4+600 a 4+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
4+800 a 5+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
5+000 a 5+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
5+200 a 5+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
5+400 a 5+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
5+600 a 5+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
5+800 a 6+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
6+000 a 6+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
6+200 a 6+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
6+400 a 6+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
6+600 a 6+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte



Cuadro A.7. (cont.) Perfil de vulnerabilidad ante amenazas.

Estacionamiento	Nivel de vulnerabilidad	Amenazas	Componentes afectados
7+000 a 7+200	Medio	Caudales extremos, flujo de lodos, deslizamientos	Alcantarillas, taludes de corte
7+200 a 7+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
7+400 a 7+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
7+600 a 7+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
7+800 a 8+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
8+200 a 8+400	Muy alto	Falla geológica, deslizamientos	Taludes de corte
8+400 a 8+600	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
8+800 a 9+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
9+400 a 9+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
9+800 a 10+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
10+600 a 10+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
11+600 a 11+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
12+000 a 12+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
12+600 a 12+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
12+800 a 13+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
13+000 a 13+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
14+800 a 15+000	Muy alto	Amenaza sísmica	Puente Río Barranca
15+200 a 15+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
15+400 a 15+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
15+800 a 16+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
16+000 a 16+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
16+200 a 16+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
16+400 a 16+600	Muy alto	Flujo de lodos, deslizamientos	Alcantarilla, taludes de corte
16+600 a 16+800	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
16+800 a 17+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
17+000 a 17+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
17+600 a 17+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
17+800 a 18+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
18+000 a 18+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
18+200 a 18+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
18+400 a 18+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
18+600 a 18+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
18+800 a 19+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
19+200 a 19+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
19+400 a 19+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
20+000 a 20+200	Muy alto	Amenaza sísmica, deslizamientos	Puente Río Espino, taludes de corte

Cuadro A.7. (cont.) Perfil de vulnerabilidad ante amenazas.

Estacionamiento	Nivel de vulnerabilidad	Amenazas	Componentes afectados
20+200 a 20+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
20+400 a 20+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
21+000 a 21+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
21+200 a 21+400	Muy alto	Caudales extremos, flujos de lodo	Alcantarilla
21+600 a 21+800	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
21+800 a 22+000	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
22+600 a 22+800	Alto	Amenaza sísmica	Puente Río Zarcero
22+800 a 23+000	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
23+000 a 23+200	Muy alto	Caudales extremos, flujos de lodo	Alcantarilla
23+400 a 23+600	Medio	Caudales extremos, flujos de lodos, deslizamientos	Alcantarilla, taludes de corte
23+800 a 24+000	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
24+200 a 24+400	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
24+600 a 24+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
25+000 a 25+200	Medio	Caudales extremos, flujo de lodos, deslizamientos	Alcantarillas, taludes de corte
25+200 a 25+400	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
25+400 a 25+600	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
25+600 a 25+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
26+000 a 26+200	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
27+400 a 27+600	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
27+600 a 27+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
28+400 a 28+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
28+600 a 28+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
29+000 a 29+200	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
29+200 a 29+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
29+400 a 29+600	Muy alto	Amenaza sísmica, deslizamientos	Puente Río Tapezco, taludes de corte
29+600 a 29+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
30+200 a 30+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
30+400 a 30+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
30+600 a 30+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
30+800 a 31+000	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte



Cuadro A.7. (cont.) Perfil de vulnerabilidad ante amenazas.

Estacionamiento	Nivel de vulnerabilidad	Amenazas	Componentes afectados
31+000 a 31+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
31+200 a 31+400	Muy alto	Amenaza sísmica, deslizamientos	Puente Río Jilguero, taludes de corte
31+600 a 31+800	Muy alto	Falla geológica	
31+800 a 32+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
32+200 a 32+400	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
32+400 a 32+600	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
34+000 a 34+200	Muy alto	Falla geológica, deslizamientos	Taludes de corte
34+200 a 34+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
34+600 a 34+800	Muy alto	Falla geológica	
34+800 a 35+000	Muy alto	Falla geológica	
35+000 a 35+200	Muy alto	Falla geológica, deslizamientos	Taludes de corte
35+200 a 35+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
35+400 a 35+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
35+600 a 35+800	Muy alto	Falla geológica, caudales extremos	Alcantarilla
35+800 a 36+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
36+000 a 36+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
36+400 a 36+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
36+600 a 36+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
36+800 a 37+000	Muy alto	Flujo de lodos, deslizamientos	Alcantarilla, taludes de corte
37+200 a 37+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
37+400 a 37+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
37+600 a 37+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
37+800 a 38+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
38+000 a 38+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
38+200 a 38+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
38+400 a 38+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
38+600 a 38+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
38+800 a 39+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
39+000 a 39+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
39+200 a 39+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
39+400 a 39+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
39+600 a 39+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
40+000 a 40+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
40+200 a 40+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
40+400 a 40+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
40+800 a 41+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte

Cuadro A.7. (cont.) Perfil de vulnerabilidad ante amenazas.

Estacionamiento	Nivel de vulnerabilidad	Amenazas	Componentes afectados
41+000 a 41+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
41+200 a 41+400	Muy alto	Falla geológica	
41+400 a 41+600	Muy alto	Amenaza sísmica, deslizamientos	Puente Río La Vieja, taludes de corte
42+600 a 42+800	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
43+000 a 43+200	Medio	Flujo de lodos	Alcantarilla
44+000 a 44+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
44+400 a 44+600	Alto	Amenaza sísmica	Puente Peje Nuevo
45+000 a 45+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
45+600 a 45+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
45+800 a 46+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
46+000 a 46+200	Medio	Flujo de lodos	Alcantarilla
46+400 a 46+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
47+800 a 48+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
48+000 a 48+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
48+400 a 48+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
53+200 a 53+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
53+800 a 54+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
54+200 a 54+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
54+400 a 54+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
55+200 a 55+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
55+400 a 55+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
55+800 a 56+000	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
56+000 a 56+200	Muy alto	Falla geológica, deslizamientos	Taludes de corte
56+600 a 56+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
57+000 a 57+200	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
57+200 a 57+400	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
57+400 a 57+600	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
57+600 a 57+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
57+800 a 58+000	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
58+000 a 58+200	Alto	Deslizamientos	Taludes de corte
58+600 a 58+800	Medio	Deslizamientos	Taludes de corte
58+800 a 59+000	Muy alto	Amenaza sísmica	Puente Río Peje

12.4. Ejemplo de cálculo de caudal máximo utilizando nomogramas de la Federal Highway Administration de los Estados Unidos

Para la determinación del caudal que puede descargar una alcantarilla dado su tipo, tamaño del conducto y profundidad de remanso, se pueden utilizar los nomogramas propuestos por la Federal Highway Administration de los Estados Unidos. La Figura A-1 muestra uno de estos nomogramas, para alcantarillas de tubos circulares de metal corrugado. Nomogramas adicionales, para otras configuraciones geométricas y materiales de alcantarilla, se encuentran disponibles en Keller, Bauer & Aldana (1995).

Para el cálculo del caudal máximo teórico se deben seguir los siguientes tres pasos:

1. Se calcula la relación H_e/D para las condiciones dadas.
2. Se ubica el valor de H_e/D en la escala correspondientes al tipo de entrada. Si el tipo de entrada corresponde a las escalas 2 o 3 se debe prolongar horizontalmente el valor de H_e/D a la escala 1.
3. Se une este último punto de la escala 1 con el diámetro o altura D en la escala de la izquierda. Se lee el valor de Q sobre la escala de caudal.

Para este caso, H_e representa la profundidad de remanso en metros, D el diámetro de la alcantarilla en metros y Q el caudal en metros cúbicos por segundo.

En la Figura A-1 se muestran tres ejemplos de cálculo para diferentes condiciones de entrada para alcantarillas de tubos circulares de metal corrugado. Por ejemplo, para un diámetro de alcantarilla de 0,90 metros, con una profundidad de remanso de 1,98 metros y un tipo de entrada de tubo prolongado fuera del terraplén, se tiene que:

$$\frac{H_e}{D} = \frac{1,98\text{metros}}{0,90\text{metros}} = 2,2$$



Se marca el valor de 0,90 metros en la escala de la izquierda y el valor de He/D de 2,2 en la escala de la derecha correspondiente al tipo de entrada de tubo prolongado fuera del terraplén. Se prolonga el valor de He/D en la escala izquierda del tipo de entrada 3 al 1 y se une con una línea con el valor de la escala izquierda. La línea corta la escala de caudal en el valor de $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde al caudal máximo teórico para ese diámetro de alcantarilla, profundidad de remanso y tipo de entrada.



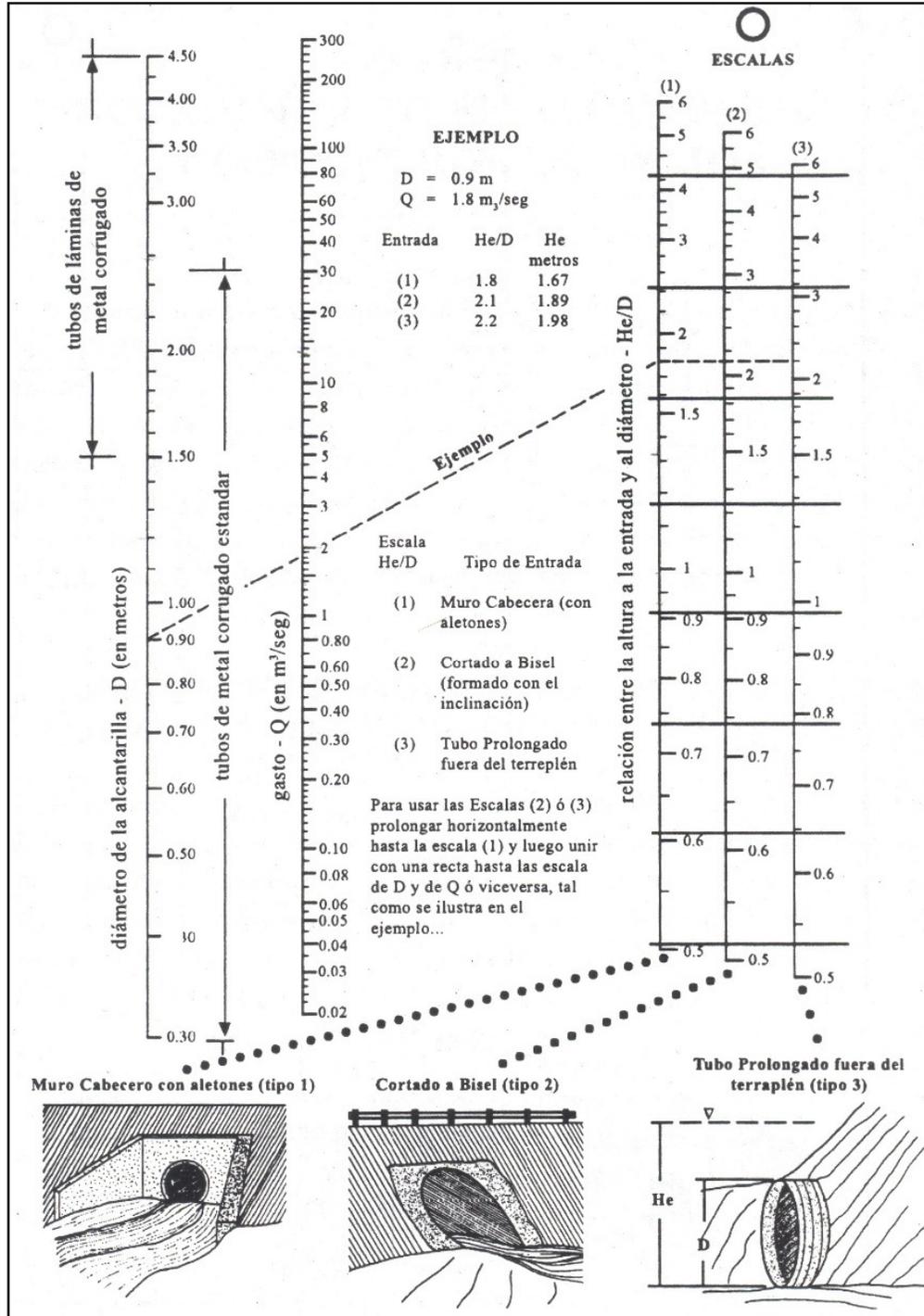


Figura A.1. Altura a la entrada para alcantarillas de tubos circulares de metal corrugado con control de entrada.

Fuente: Keller, Bauer & Aldana, 1995.