

# METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL NACIONAL

*Diego Alberto Cordero Carballo*

*William Vargas Monge*

*José Francisco Garro Mora*

## Resumen

Se resumen las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura vial nacional ante amenazas naturales. Se detallan metodologías para el análisis de la vulnerabilidad de alcantarillas ante caudales extremos, la vulnerabilidad de puentes ante amenaza sísmica, la susceptibilidad de licuación por vibración sísmica, la susceptibilidad ante flujo de lodos y detritos y la susceptibilidad a deslizamientos en taludes de corte y relleno, las cuales fueron desarrolladas, aplicadas y calibradas para Costa Rica por el Subprograma de Investigación en Gestión de Riesgos Naturales de la Infraestructura Vial del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica (UCR) y están siendo actualmente aplicadas por la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional del LanammeUCR.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de estas metodologías permiten enfocar la toma de decisiones hacia las rutas nacionales más vulnerables, convirtiéndose en una herramienta útil a nivel técnico y político para la atención de la red vial nacional.

**Palabras claves:** evaluación, gestión, riesgo, amenaza, vulnerabilidad, infraestructura vial.

## Abstract

This paper summarizes different methodologies for the evaluation of the vulnerability to natural hazards in Costa Rican national road infrastructure. Methodologies are presented for the analysis of the vulnerability of culverts to flood events, the vulnerability of bridge structures to seismic hazard, the susceptibility of liquefaction due to seismic vibration, the susceptibility of debris flow and the susceptibility of landslides in cut slopes and embankments; methodologies which were developed, applied and calibrated for Costa Rica first by the Subprograma de Investigación en Gestión de Riesgos Naturales de la Infraestructura Vial (Road Infrastructure Natural Risk Management Research Subprogram) of the Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (National Laboratory of Materials and Structural Models) (LanammeUCR) of the Universidad de Costa Rica (University of Costa Rica) (UCR) and are now being applied by the Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional (National Road Network Evaluation Unit) of LanammeUCR.

The results obtained from the application of these methodologies allow focusing the decision making towards the most vulnerable national routes, becoming a useful tool, at a technical and political level, for the management of the national road infrastructure.

**Keywords:** evaluation, management, risk, hazard, vulnerability, road infrastructure.

**Recibido:** 23 de noviembre del 2009 • **Aprobado:** 8 de junio del 2010

## 1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto fundamental de la calidad y la seguridad de una vía terrestre es su vulnerabilidad ante los eventos naturales destructivos, porque de esta dependerá no solamente la capacidad de atender emergencias causadas por los eventos en las comunidades y/o sectores productivos, sino

también la rapidez de recuperación posterior a la emergencia. Los daños que sufre la infraestructura vial como resultado de los eventos destructivos genera pérdidas económicas directas y afectan no solamente a los pavimentos, sino a todas las obras que componen la carretera, incluidos taludes de corte, rellenos, obras de drenaje menores (e.g., cunetas, subdrenajes), intermedias (e.g.,

alcantarillas) y mayores (e.g., puentes). También los daños generan pérdidas indirectas a corto, mediano y hasta a largo plazo debido a la interrupción del flujo de tránsito. Por lo anterior, es evidente la importancia de evaluar la vulnerabilidad de las carreteras nacionales de manera oportuna y generar acciones para reducirla.

El Subprograma de Investigación en Gestión de Riesgos Naturales de la Infraestructura Vial del LanammeUCR desarrolló, aplicó y calibró metodologías de evaluación de las amenazas naturales y las vulnerabilidades que afectan a la infraestructura vial nacional. En la actualidad, la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional es la encargada de evaluar la vulnerabilidad de la red vial nacional ante amenazas naturales.

Las metodologías empleadas para la evaluación se focalizan en la susceptibilidad a ocurrencia de amenazas naturales en las zonas de influencia de las carreteras y de la vulnerabilidad de sus componentes. Por ende, los proyectos de evaluación del riesgo de la red vial nacional evidencian la necesidad de actualizar y ampliar la base de datos, retroalimentando los modelos existentes o en su defecto, generándolos.

Las amenazas naturales más importantes para la infraestructura vial nacional son las de origen climático o hidrometeorológico, tales como las inundaciones, los deslizamientos de tierra y los flujos de lodo y detritos, que tienen un gran potencial para producir daños severos a los pavimentos, taludes, terraplenes, alcantarillas y puentes. Se ha determinado que la infraestructura vial que comunica el centro del país con los principales puertos de nuestro país es vulnerable a los efectos de las lluvias intensas tanto en las zonas montañosas por la ocurrencia de deslizamientos y flujos, como en las zonas bajas costeras por la ocurrencia de inundaciones, lo cual genera pérdidas cuantiosas en reparaciones e interrupciones. Dentro de un nivel de importancia similar en cuanto a los efectos, pero con una frecuencia menor, se encuentra la amenaza sísmica, particularmente los deslizamientos de tierra y la licuación de suelos que son disparados por eventos fuertes. En un tercer nivel de importancia se ubica la amenaza volcánica, dada la baja frecuencia de eventos destructivos provocados por eventos volcánicos.

En aquellos casos donde la vulnerabilidad de tramos de la carretera presente desastres consumados, la información que se deriva del evento muestra variaciones que permiten corroborar la validez de los modelos empleados, o la calibración estos. En su defecto, la falta de estudios genera la necesidad de estudios iniciales para una ruta o zona afectada.

## **2. PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL RIESGO DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL**

Para evaluar el riesgo existente en el sector transporte, es necesario seguir un procedimiento que tenga al menos los siguientes objetivos:

- Establecer las características de la estructura y funcionamiento del sector y sus componentes, así como su importancia para la economía.
- Determinar cuáles fenómenos naturales representan amenazas potenciales para el corredor vial bajo estudio.
- Evaluar las amenazas más significativas dentro del área geográfica bajo estudio.
- Analizar individualmente las vulnerabilidades de los componentes ante las amenazas predominantes.
- Estimar la vulnerabilidad global del corredor vial bajo estudio.

Estos objetivos definen un procedimiento analítico con los tres pasos generales siguientes:

- Evaluación de las amenazas: Determinación de la ubicación, la severidad y la frecuencia de las amenazas naturales significativas, así como también las descripciones cuantitativas y cualitativas de los impactos esperados.
- Evaluación de vulnerabilidad: Determinación del nivel de exposición del corredor vial a fenómenos naturales potencialmente peligrosos y estimación del grado de pérdidas o el daño que resultaría de la ocurrencia de un acontecimiento natural de una severidad dada.
- Análisis del corredor vial: Determinaciones de las características técnicas, físicas, espaciales y

económicas que definen el corredor vial y sus componentes.

Estos tres pasos se pueden usar para valorar la vulnerabilidad de los corredores viales ante riesgos naturales. Para el caso de evaluaciones, se emplean principalmente las primeras dos categorías, con el fin de permitir calificar y cuantificar las zonas y algunos de los componentes de la vulnerabilidad/susceptibilidad, generando los insumos básicos por emplear en estrategias de mitigación del riesgo.

### **3. METODOLOGÍA GENERAL DE TRABAJO**

Las actividades realizadas en el desarrollo de metodologías se agrupan en las siguientes fases:

1. Investigación y recopilación bibliográfica de la información básica: Se consultan libros, revistas, proyectos de investigación, tesis, foros de investigación e Internet, en busca de metodologías publicadas.
2. Estudio de los mecanismos de ocurrencia de eventos para determinar los factores principales que intervienen y los parámetros que caracterizan la susceptibilidad de un sitio o la vulnerabilidad de un componente de infraestructura.
3. Simplificación de modelos: Dado que la modelación de eventos de las amenazas puede ser matemáticamente muy compleja, se buscan simplificaciones que permitan la evaluación de la susceptibilidad para aplicación (preliminar) e intermedia.
4. Aplicación de las metodologías simplificadas a la evaluación de amenazas y vulnerabilidad en casos de estudio. Se utiliza una división entre zona de montaña y planicie pluvial, tanto para amenazas como para infraestructura vial. Este paso permite la calibración de los modelos y establece el vínculo entre las actividades de investigación y de evaluación.
5. Incorporación de la información obtenida de las distintas metodologías de zonificación de amenazas y de evaluación de vulnerabilidad. En forma simultánea se debe analizar

la información y clasificarla acorde con la evaluación de amenaza o de vulnerabilidad a la cual pertenece. La realización de las fases anteriores puede ser llevada de forma total, parcial o en su defecto ser omitidos, dependiendo del criterio y la experiencia de los profesionales a cargo de la evaluación y según el objetivo o meta planteada. El principal motivo para evaluar en forma parcial los factores de amenaza o vulnerabilidad presentes se puede deber al nivel de importancia o aporte ponderado de un factor específico para establecer la vulnerabilidad total de una ruta en particular.

En fases posteriores se debe realizar el desarrollo de planes detallados de mitigación, de análisis costo-beneficio, de planes de inversión y de los diseños específicos de obras de mitigación, los cuales permiten a los desarrolladores o ejecutores de proyectos retroalimentar sus bases de datos conformando un insumo para generar los planes de mitigación de vulnerabilidad de la infraestructura vial. Las fases previamente mencionadas quedan fuera del alcance de este documento.

### **4. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS**

A continuación se presentan las metodologías recomendadas para analizar las amenazas que pueden afectar a un corredor vial (e.g., vibraciones sísmicas, flujos de lodo y detritos, caudales extremos, licuación, inestabilidad).

#### **4.1 Vulnerabilidad de alcantarillas (caudales extremos)**

Los caudales extremos son la amenaza más importante para las obras de drenaje de una carretera, como son los puentes y alcantarillas. Las alcantarillas usualmente tienen áreas de cuenca reducidas; para el caso de rutas de montaña estas han sido utilizadas en los estudios en cuencas de hasta 25 km<sup>2</sup>, mientras que para rutas de llanura la cuenca máxima evaluada ha sido de 10 km<sup>2</sup>; usualmente, en cuencas mayores se encuentran puentes y su análisis desde el punto

de vista hidrológico y meteorológico queda fuera del alcance de este documento. La valoración de la vulnerabilidad de caudales extremos en puentes es importante principalmente en zonas de llanura, por donde transitan ríos que presentan mayor amenaza que la de los ríos de montaña por su área de cuenca y características topográficas, principalmente.

Para evaluar los niveles de amenaza sobre las alcantarillas se hace uso de la ecuación racional (1), la cual ha demostrado ser aplicable en cuencas pequeñas.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,62} \quad (1)$$

Donde:

- Q Caudal, m<sup>3</sup>/s  
 C Coeficiente de escorrentía, adimensional  
 i Intensidad de la lluvia, mm/h  
 A Área de la cuenca, km<sup>2</sup>

De estas variables, la intensidad de la lluvia se puede relacionar con un periodo de ocurrencia o retorno (frecuencia del evento); se recomienda utilizar valores de caudales para veinte (Q<sub>20</sub>) y

cien (Q<sub>100</sub>) años de periodo de retorno a fin de evaluar la amenaza.

Por otro lado, la vulnerabilidad hidráulica de las alcantarillas es función del área disponible para el flujo, dado que la velocidad del flujo es función de esta variable. Velocidades altas conducen a la erosión de las obras hidráulicas y la socavación de terraplenes. Una insuficiente área de drenaje lleva a embalsar las aguas generando en los terraplenes empujes hidrodinámicos, saturación de suelos y flujo de agua a través de los mismos terraplenes, aspectos que pueden llevar al deslizamiento, al lavado de finos (tubificación) y a la socavación de la estructura.

El desempeño hidráulico de una alcantarilla se relaciona con el caudal y la altura del flujo de entrada. La Figura 1 muestra una curva de desempeño típica de alcantarillas. En dicha figura se observan cuatro zonas, en las dos primeras la alcantarilla funciona como canal abierto (operación normal y límite de operación normal), en la zona 3 ya se trabaja como una tubería a presión, finalmente, en la cuarta zona el agua pasa sobre la vía.

Con base en las recomendaciones de Rodríguez (1989) y los periodos de retorno mencionados anteriormente, se elabora el criterio de vulnerabilidad mostrado en el Cuadro 1.

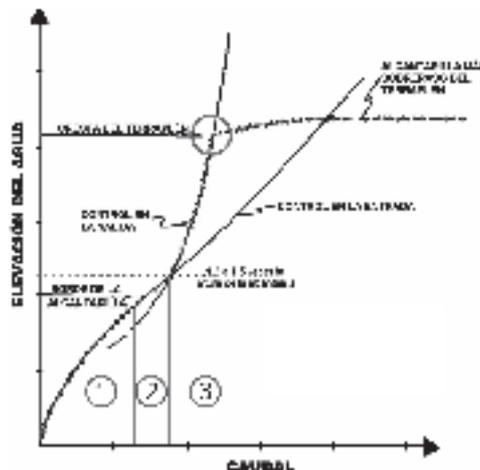


Figura 1. Curva de desempeño hidráulico de una alcantarilla.

Fuente: (Vargas & Garro, 2008).

**Cuadro 1.** Vulnerabilidad de alcantarillas con base en las curvas de desempeño.

Vulnerabilidad	Zona de la curva (según Figura 1)		Color	Funcionamiento de la alcantarilla
	Q20	Q100		
Muy baja	1	1		Alcantarilla sobredimensionada
Baja	1	2		Operacional en cualquier caso
Moderada	2	2		Sensible a cambios de cuenca
Alta	2	3		Insuficiente para eventos extremos
Muy alta	3 o 4	3 o 4		Daños esperables en eventos moderados

Fuente: (Vargas & Garro, 2008).

La configuración del conjunto de alcantarillas es también un factor determinante para evacuar objetos arrastrados por caudales extremos o flujos de detritos (e.g., rocas, troncos). Desde este punto de vista, no se recomienda dividir el área en dos o más conductos que faciliten su obstrucción.

Para evaluar la vulnerabilidad de alcantarillas por falta de capacidad hidráulica se puede emplear la metodología recomendada por Rodríguez (1989), la cual se describe a continuación.

- i. Identificación de los pasos de aguas en el corredor analizado, mediante mapas impresos o en visitas de campo.
- ii. Levantamiento en campo de las características básicas de las alcantarillas:
  - a. Tamaño de la sección transversal
  - b. Geometría de la sección
  - c. Pendiente
  - d. Material
  - e. Ángulo del cabezal
  - f. Altura del relleno en la entrada
  - g. Profundidad del cauce en la salida
  - h. Estado actual
- iii. Delimitación de la cuenca para cada paso de agua en la ruta analizada, utilizando para ello un Sistema de Información Geográfica (SIG).
- iv. Para cada cuenca se obtiene el tiempo de concentración, definido por la ecuación (2).

$$t_c = 56,77 \cdot \frac{L^{1,155}}{h^{0,385}} \tag{2}$$

Donde:

- $t_c$  Tiempo de concentración, min
- L Longitud del cauce más largo, km
- h Diferencia de elevación entre las cotas de inicio y final del cauce más largo, m

- v. Cálculo de la intensidad de lluvia para cada cuenca de acuerdo con sus características.
  - a. Se obtiene el valor de lluvia máxima con una duración de una hora para un periodo de retorno de una hora para cada cuenca a partir del mapa del Servicio Meteorológico Nacional de Costa Rica de 1967.
  - b. El valor de lluvia máxima con duración de una hora con periodo de retorno de una hora se debe convertir a un valor de lluvia máxima con duración de una hora para diferentes periodos de retorno. Para el caso de alcantarillas se utilizan periodos de retorno de veinte años para diseño y cien años para revisión.
  - c. Utilizando las Curvas Estándar de Intensidad-Duración (Rodríguez, 1989) se convierte de lluvia al valor de lluvia con duración igual al tiempo de concentración para cada cuenca.

- vi. Se calcula para cada cuenca el valor del coeficiente de escorrentía  $C$  promedio, a partir del uso de suelo que presente cada una.
- vii. Utilizando la fórmula racional se calcula el caudal en cada cuenca.
- viii. Se realiza la comparación entre el caudal obtenido en el punto anterior con el caudal máximo teórico para cada alcantarilla, este se obtiene de los nomogramas del Federal Highway Administration de Estados Unidos, según las características geométricas de cada alcantarilla (nomogramas disponibles en Rodríguez, 1989).
- ix. Se asigna la vulnerabilidad a cada alcantarilla. Se propone utilizar el criterio de Vargas & Garro (2008).

#### 4.2 Evaluación de susceptibilidad ante flujos de lodos y detritos

Hasta la fecha se han publicado dos metodologías para evaluar la susceptibilidad ante la amenaza de flujo de lodos y detritos (Navarro, 2004; Castro, 2005): la de Kanji (2001) y la de Morton et al. (2003). Ambas metodologías coinciden en analizar factores detonantes en la generación de flujos de lodo y detritos como son la precipitación, la pendiente del terreno y la geología de la zona.

La metodología de Morton et al. (2003) considera un cuarto factor, que es la dirección de la ladera con respecto al frente de la misma. No obstante, la metodología de Morton requiere de ciertos registros para ser calibrado, los cuales no están disponibles en Costa Rica, por lo que se utiliza como alternativa la metodología de Kanji.

##### 4.2.1 Metodología de Kanji

Esta metodología considera la existencia o combinación de los factores que contribuyen a la ocurrencia de los flujos de detritos. Entre los factores que intervienen se considera la lluvia (R) como principal agente disparador, por lo

que se le asigna un peso más elevado que a los otros factores. La inclinación de las laderas es considerada igualmente como otro factor de importancia (S), dado que corresponde a la fuente de material por deslizamientos. La inclinación de los canales de drenaje o lechos de ríos (D) son otra fuente de sedimento grueso, los cuales pueden ser movidos en los flujos y aumentar velocidad de estos. Otro factor es el área de la cuenca (A), responsable de la captación de la lluvia, concentración y amortiguamiento del agua, interviniendo en la generación y dinámica de los flujos de detritos.

La altura de la ladera (H) repercute en la generación del flujo y en su energía potencial. Los geoindicadores (G) por su parte, representan la constitución geológica del área, indicando las condiciones de remoción del material sólido para la generación de los flujos de lodos. La vegetación y uso de suelo (V) corresponde al porcentaje del área ocupada y deforestada, exposición del suelo a la dinámica externa. La Figura 2 ilustra la metodología de análisis según Kanji.

Cada uno de los factores antes indicados están divididos en clases (C), por intervalos de atributos ( $R1...R4$ ,  $S1...S4$ , etc.), cada uno correspondiente a un grado parcial (GP), siendo un valor de 10 el máximo de las clases, para el caso más crítico, y 0 para el caso más desfavorable para la generación del flujo.

El grado final (GF) varía de 0 a 100 y se obtiene sumando los productos de los grados parciales por sus respectivos pesos, según la ecuación (3).

$$GF = \sum (GP \cdot P) \quad (3)$$

Finalmente, los grados finales, en términos de intervalos de valores, se relacionan con un nivel de susceptibilidad según el Cuadro 2.

La Figura 3 muestra la aplicación de la metodología planteada para las cuencas con afectación al tramo San José-Río Sucio, en la Ruta Nacional 32, como salida de un Sistema de Información Geográfica, en este caso ArcView.

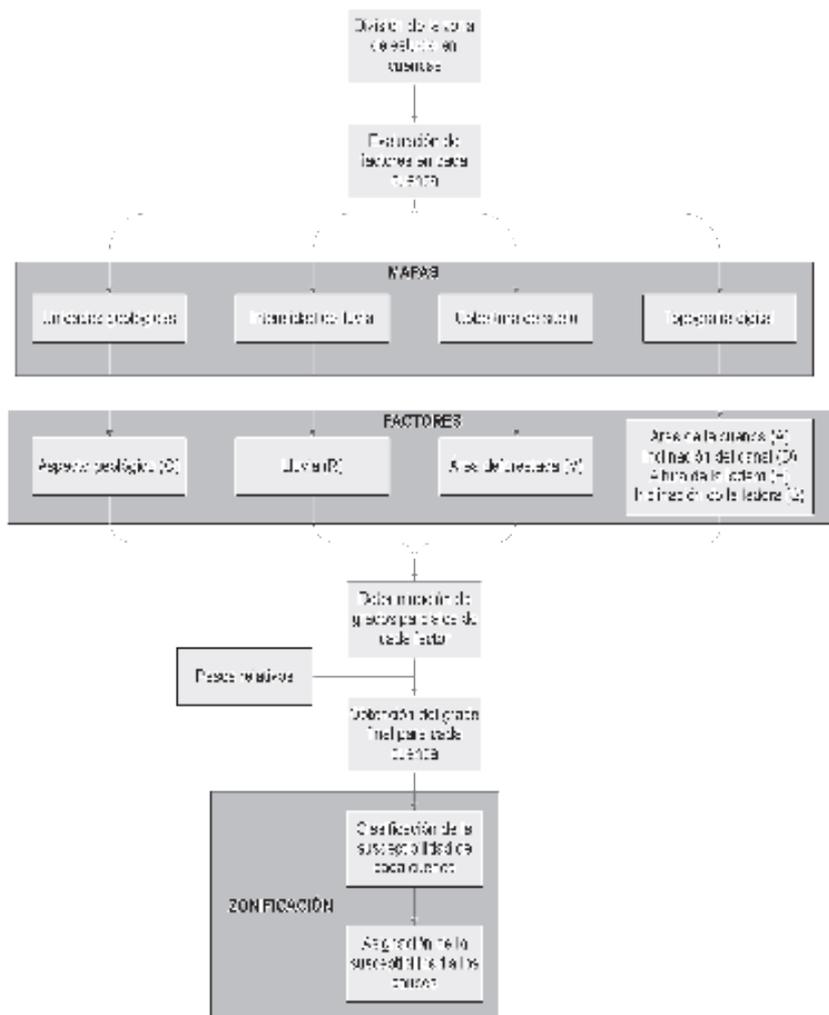
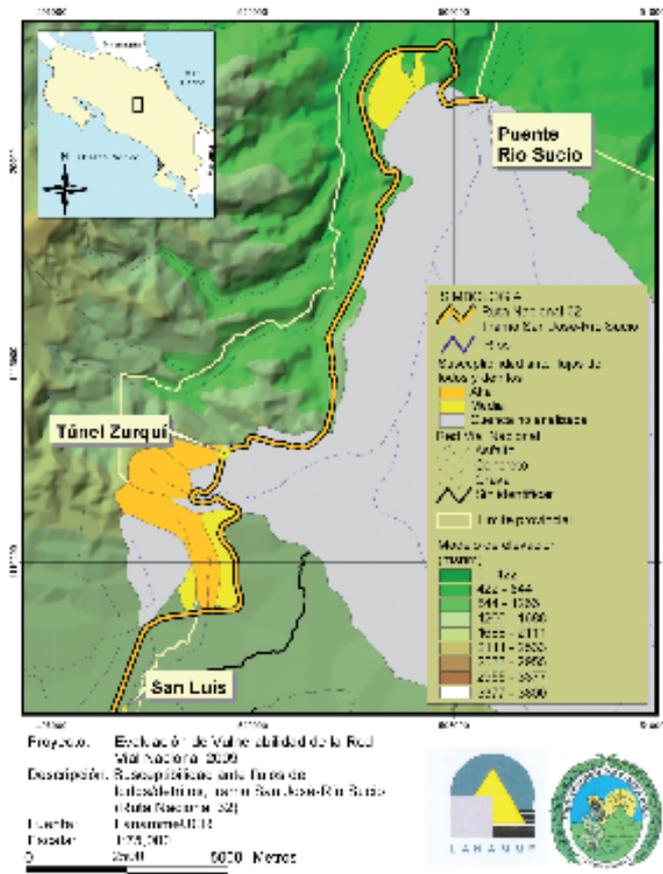


Figura 2. Metodología de zonificación de flujos de lodo basada en Kanji (2001).

Cuadro 2. Nivel de susceptibilidad asociado al grado final para evaluación de susceptibilidad ante flujos de lodos y detritos.

Grado final	Susceptibilidad
80-100	Muy alta
60-80	Alta
40-60	Media
20-40	Baja
0-20	Muy baja

Fuente: (Castro, 2005).



**Figura 3.** Susceptibilidad ante flujos de lodos/detrítos considerando el factor lluvia para tramo San José-Río Sucio, Ruta Nacional 32.

Fuente: (Cordero, Sanabria, Garro, Vargas & Barrantes; 2009).

### 4.3 Taludes de corte y rellenos en carreteras de montaña

Los taludes de corte y relleno han demostrado ser los puntos más vulnerables de la infraestructura vial de montaña. Estos puntos están expuestos a deslizamientos, a socavación y a erosión por ríos y malos manejos de aguas superficiales y subterráneas.

La evaluación de la amenaza al deslizamiento tiene la dificultad de no presentar periodos de retorno claros (frecuencia) dado principalmente a que son disparados por múltiples variables (e.g., sismo, lluvia, erosión), por lo que su valoración se limita a evaluar la susceptibilidad (e.g., pendiente, geología) y su magnitud

(e.g., volumen, velocidad). A partir de la susceptibilidad y el catálogo de deslizamientos disponibles, el LanammeUCR desarrolló la metodología del “ángulo crítico” (Vargas & Garro, 2003), que permite definir niveles de severidad o intensidad probable de amenaza basado en mapas topográficos y geológicos. Esta metodología ha sido ampliamente probada en varios casos de estudio en Costa Rica.

El ángulo crítico se puede definir como el ángulo de la pendiente de las laderas en donde se presente la combinación crítica de espesor de suelo residual, resistencia y pendiente (Vargas & Garro, 2003). El análisis estadístico de las zonas deslizadas permite determinar este valor promedio de ángulo crítico y su

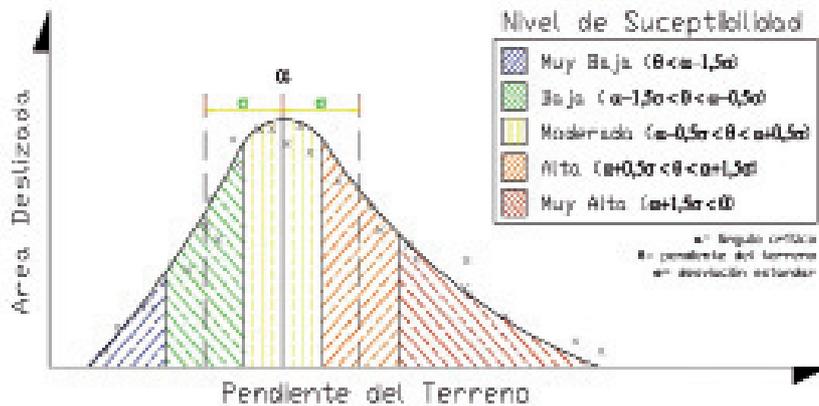


Figura 4. Curva de distribución probabilística de datos para definir susceptibilidad al deslizamiento.

Fuente: (Vargas & Garro, 2008).

desviación estándar, con estos parámetros se definen pendientes que correspondan a distintas probabilidades de falla. Estas probabilidades se asocian a distintos niveles de exposición de amenaza, como se muestra en la Figura 4.

A partir del criterio del ángulo crítico se identifican las áreas de mayor susceptibilidad al deslizamiento en un ancho de al menos 200 m a ambos lados del eje de la vía. En lo que corresponde a las características físicas de los taludes de corte y relleno, se deben diseñar de manera que su inclinación y altura sean adecuadas para evitar la falla por cortante de los materiales. La metodología planteada se describe en la Figura 5.

Según las prácticas usuales de construcción de carreteras, se ha encontrado que los taludes de corte y relleno en Costa Rica son mayormente inestables al largo plazo si se llegaron a saturar, siendo la inclinación de la mayoría de estos taludes mayor que el ángulo de fricción interno del suelo. Tomando en cuenta este aspecto se establece que la altura de corte o relleno es el parámetro más importante para definir la vulnerabilidad física de la vía, ya que tiene un gran peso sobre la magnitud del material deslizado.

#### 4.4 Evaluación de vibración sísmica

La amenaza sísmica se puede determinar haciendo uso de una metodología probabilística de aceptación común en ingeniería y aplicada

por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica a la investigación *Amenaza Sísmica de la zona Central de Costa Rica* (Schmidt & Linkimer, 2002).

El esquema de la metodología para zonificación de amenaza sísmica se presenta en la Figura 6. Esta metodología se basa en el modelo de probabilidad de Poisson, que supone que las sacudidas principales son aleatorias e independientes, es decir, los tiempos de origen, las coordenadas de los focos y las magnitudes son mutuamente independientes, por lo que se puede suponer que la probabilidad de que dos eventos ocurran en el mismo lugar al mismo tiempo es nula (Sauter, 1989).

La recurrencia sísmica se puede definir como el comportamiento cíclico o repetitivo de los terremotos a través del tiempo. Para calcularla se usa la siguiente fórmula propuesta por Gutenberg & Richter en 1954 (Castro, 2005), que expresa la relación entre las frecuencias de ocurrencia de sismos y sus magnitudes mediante la ecuación (4).

$$\log N = a - b \cdot M \tag{4}$$

Donde:

N Número acumulativo de eventos por unidad de tiempo con magnitud mayor o igual a M.

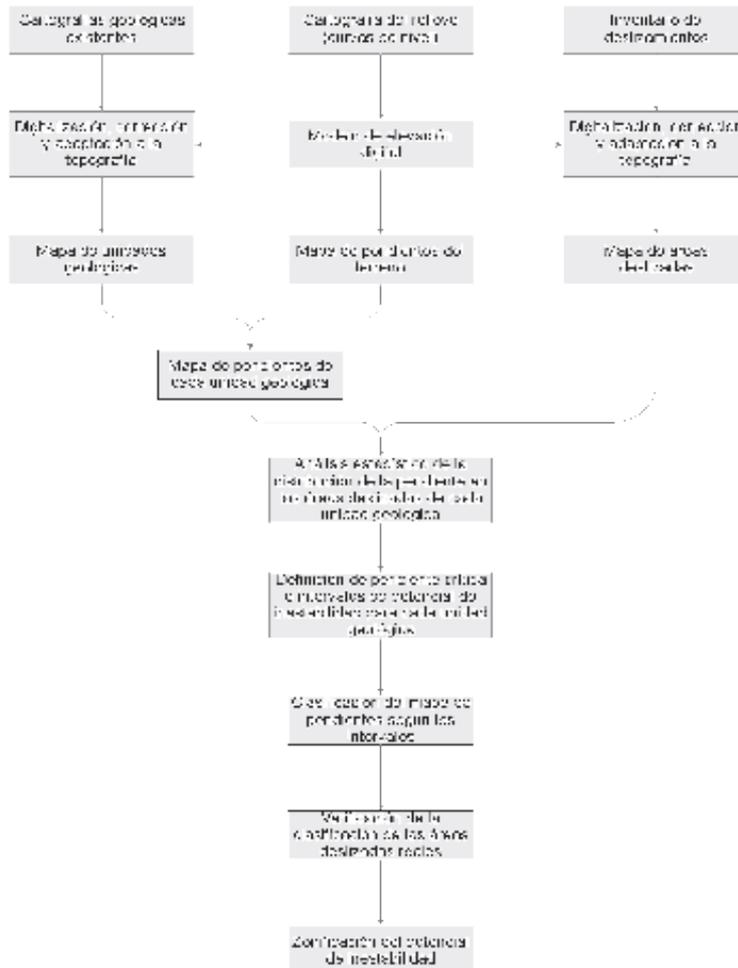
- a Constante relativa a la actividad sísmica que varía de acuerdo con el periodo de tiempo utilizado
- b Constante que caracteriza la distribución de magnitudes, también llamada *índice de sismicidad*

La ecuación (4) permite cuantificar y caracterizar la actividad de cada fuente sísmica, estimando la frecuencia con que esta fuente va a generar sismos de diferentes tamaños. La recurrencia sísmica se obtiene a través de datos de la historia sismológica de un lugar.

Al ocurrir un sismo desde una fuente determinada, el efecto que la señal sísmica pueda tener sobre un sitio o una estructura en particular es obtenido por medio de la relación de atenuación sísmica, la cual describe la forma de propagación de la energía de un sismo en una región dada, de acuerdo con la distancia y el tamaño del evento.

La expresión matemática mostrada en la ecuación (5), propuesta por Schmidt & Linkimer (2002), se utiliza para la atenuación sísmica.

$$\ln A = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot \ln r + c_4 \cdot r \quad (5)$$



**Figura 5.** Metodología de ángulo crítico para zonificación del potencial de inestabilidad y deslizamientos. Fuente: (Navarro, 2004).

Donde:

- A Aceleración horizontal máxima del suelo según frecuencia obtenida a partir de cada registro acelerográfico, (m/s<sup>2</sup>)
- M Magnitud momento del sismo
- r Distancia hipocentral (o epicentral según se decida)
- c<sub>1</sub> Coeficiente
- c<sub>2</sub> Coeficiente
- c<sub>3</sub> Coeficiente
- c<sub>4</sub> Coeficiente

Con estos valores se puede determinar el valor de aceleración para un punto determinado conociendo sus distancias al epicentro, las características del suelo y la magnitud del sismo.

Para la evaluación de la amenaza sísmica se puede utilizar el software CRISIS99 desarrollado por (Ordaz, Aguilar y Arboleda, 1999); (Castro, 2005) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este programa calcula la amenaza sísmica utilizando un modelo probabilístico. Considera la ocurrencia y distribución de terremotos en diferentes fuentes

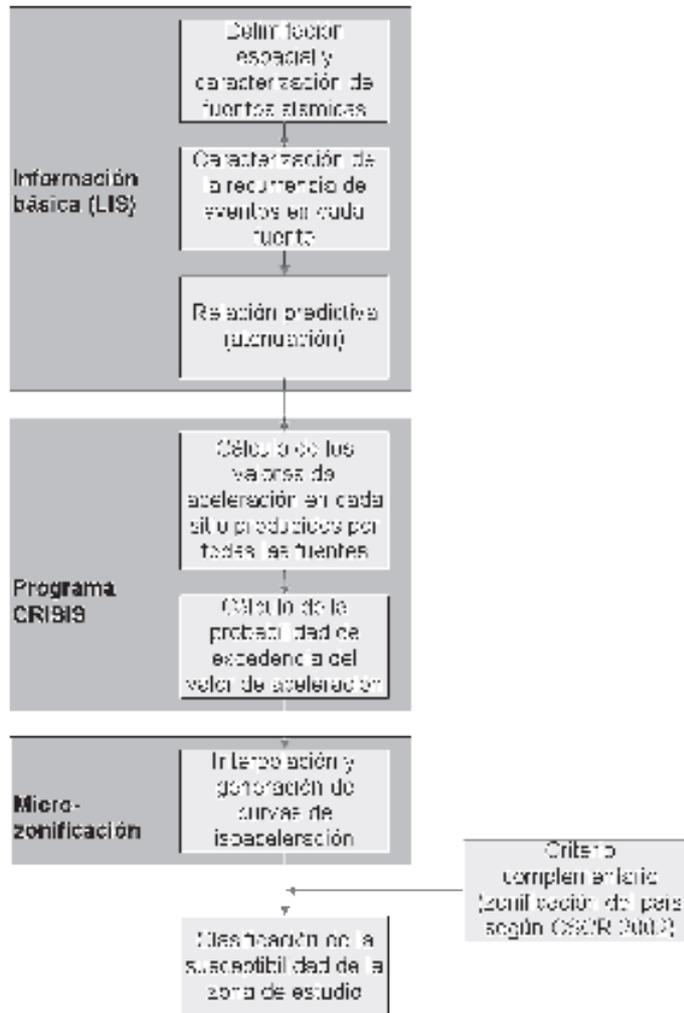


Figura 6. Metodología zonificación de amenaza sísmica (vibración).

Fuente: (Navarro, 2004).

**Cuadro 3.** Porción del mapa susceptible a la licuación.

Susceptibilidad relativa	Porcentaje del mapa con probabilidad de licuación
Muy alto	25
Alto	20
Moderado	10
Bajo	5
Muy bajo	2
Ninguno	0

Fuente: (Hazuz, 1997; LanammeUCR, 2000).

generadoras, así como las leyes de atenuación del movimiento del suelo desde la fuente hasta el sitio de observación (Schmidt & Linkimer, 2002; Castro, 2005). Como resultado, el programa CRISIS99 arroja una sobreposición de los valores de aceleración pico horizontales provenientes de las fuentes sísmicas, considerando su atenuación y dejando el mayor valor de la aceleración para un punto.

#### 4.5 Evaluación de amenazas por licuación de suelos

La licuación es un fenómeno por medio del cual los depósitos no arcillosos, principalmente arenas y limos, pierden temporalmente su resistencia y se comportan más como un líquido viscoso que como un sólido. La licuación se genera en un suelo cuando las ondas sísmicas, principalmente las de corte, distorsionan la estructura del suelo al pasar por él, causando el colapso de los paquetes de granos y aumentando la presión de poros hasta anular las tensiones efectivas.

Las deformaciones de la estructura del suelo generan una transferencia de la carga de los contactos grano a grano en el suelo al agua intersticial. Esta transferencia de la carga

incrementa la presión de poros y si el drenaje está restringido, ocurre un incremento transitorio, la presión de poros puede aumentar hasta niveles que se aproximan a la sobrecarga. Con esto, los esfuerzos intergranulares se aproximan a cero y la capa granular se comporta temporalmente como un líquido viscoso, desarrollándose el fenómeno de licuación.

La licuación ocurre en depósitos recientes de arenas y limos en áreas donde existen altos niveles de agua. Generalmente conforme los sedimentos son más jóvenes y sueltos y más alto el nivel freático, el suelo es más susceptible a la licuación. Dentro de los materiales más susceptibles a la licuación se incluyen los materiales deltaicos con menos de diez mil años, depósitos de río, llanuras de inundación, depósitos eólicos, zonas costeras y rellenos mal compactados.

Al momento de realizar una evaluación de amenaza de licuación de una región se debe iniciar por conocer las condiciones geológicas del sitio en consideración. Esta caracterización se efectúa por medio de mapas geológicos y con el sistema propuesto por (Youd & Perkins, 1978; LanammeUCR, 2000). Con los rasgos presentados en los mapas geológicos, se establece para cada tipo de suelo un rango de susceptibilidad de licuación.

$$K_m = 0,0027 \cdot M^3 - 0,0267 \cdot M^2 - 0,2055 \cdot M + 2,9188 \quad (7)$$

**Cuadro 4.** Relaciones de probabilidad de licuación para cada categoría de susceptibilidad.

Categoría susceptibilidad	P[licuación PGA=a]
Muy alto	9,09 a -0,82
Alto	7,67 a -0,92
Moderado	6,67 a -1,0
Bajo	5,57 a -1,18
Muy bajo	4,16 a 1,08
Ninguno	0,00

Fuente: (Hazuz, 1997; LanammeUCR, 2000).

#### 4.5.1. Probabilidad de licuación

La probabilidad de que una zona experimente licuación se ve influenciada por la susceptibilidad del suelo, la amplitud y duración del movimiento del terreno y por la profundidad del nivel freático. Existen sitios geológicos que no son susceptibles a la licuación, por lo que deben ser considerados en la evaluación de la probabilidad de licuación por medio de un factor que determina la susceptibilidad relativa de la zona. Conociendo la porción del mapa susceptible a la licuación se conoce la susceptibilidad relativa mediante el Cuadro 3. Los valores presentados en del Cuadro 3 reflejan resultados basados en investigaciones preliminares de propiedades de suelos tomados de estudios de regiones con licuación.

La probabilidad de licuación está influenciada significativamente por la amplitud del movimiento del terreno (aceleración pico del terreno, PGA), la duración del movimiento reflejada por la magnitud del sismo (M) y la profundidad del nivel freático. Dicha probabilidad se puede determinar con la ecuación (6).

$$P[licuación] = \frac{P[licuación | PGA = a] \cdot 100\%}{K_m \cdot K_w} \tag{6}$$

Donde:

P[licuación] Probabilidad de ocurrencia de licuación, expresada en términos de porcentaje.

P[licuación|PGA=a] Condición de probabilidad de licuación para cada categoría de susceptibilidad de acuerdo con el valor de la aceleración pico horizontal.

$K_m$  Factor de corrección para la magnitud del sismo.

$K_w$  Factor de corrección para el nivel freático.

Las relaciones existentes entre la probabilidad de licuación y la aceleración pico horizontal del terreno varían según la categoría de la susceptibilidad y se muestran en el Cuadro 4. Estas relaciones se definieron basadas en procedimientos empíricos y estadísticos desarrollados por (LanammeUCR, 2000) que representan las características de resistencia a la penetración en suelos dentro de cada categoría de susceptibilidad.

Donde:

a Aceleración pico horizontal en términos de porcentaje de g  
 g Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )  
 P[licuación|PGA=a] Expresada como fracción de la unidad

Las relaciones de probabilidad de licuación fueron desarrolladas para una magnitud momento de  $M=7,5$  y asumiendo una profundidad del nivel

freático de 1,5 m por lo que para otros valores de magnitud momento y profundidad del nivel freático se deben aplicar factores de corrección  $K_m$  y  $K_w$ .

$$K_w = 0,022 \cdot d_w + 0,93 \quad (8)$$

Donde:

M Magnitud momento del evento sísmico  
 $d_w$  Profundidad del nivel freático, ft

#### 4.6 Evaluación de vulnerabilidad de puentes

Para predecir los daños que provocaría un terremoto se utilizan curvas de fragilidad, las cuales indican la probabilidad de que un determinado estado de daños sea excedido para una aceleración pico del terreno, en función de las características estructurales del puente. Esta metodología se basa en estudios estadísticos del comportamiento de los puentes ante sismos ocurridos en el pasado, y es una práctica muy utilizada en la actualidad debido al desarrollo de un gran número de curvas de fragilidad para distintos tipos de estructuras.

Para la evaluación de la vulnerabilidad de puentes ante amenaza sísmica se puede utilizar el método de Risk Management Solutions Inc. (RMS). El método, publicado en 1997, considera el comportamiento diferenciado de los tipos estructurales de puentes. Este método consiste en la utilización de curvas de fragilidad para puentes, las cuales permiten conocer el estado de daños de un puente a partir de sus características estructurales y el valor de la aceleración pico del terreno con niveles de confianza dados. La aceleración para el análisis fue calculada mediante la utilización de la metodología de vibración sísmica.

Para realizar el análisis, los puentes deben ser agrupados de acuerdo con sus características estructurales, posteriormente se relacionan con la aceleración pico del terreno por medio de funciones de daño, que analizan el efecto de la solicitación sísmica sobre cada uno de los componentes del puente.

La metodología se detalla a continuación:

1. Clasificación de puentes: El daño causado a un puente por las solicitaciones sísmicas está directamente relacionado con las propiedades estructurales del puente, el cual puede ser clasificado usando tres criterios: tipo, diseño sismorresistente y características de alto riesgo.

##### Tipos

- a. Puentes de gran tamaño, aquellos con al menos una luz de 150 m.
- b. Puentes continuos, aquellos con luces menores de 150 m, continuos y monolíticos.
- c. Puentes simplemente apoyados, aquellos con una o varias luces menores de 150 m y apoyos simples.

##### Diseño sismorresistente

- a. Puentes con diseño sismorresistente, aquellos diseñados con los criterios sismor-resistentes de los códigos modernos, o reforzados para cumplir con tales características.
- b. Puentes con diseño convencional: Aquellos diseñados sin tomar en cuenta los criterios de diseño sismorresistente.

##### Características de alto riesgo

- a. Superestructura con forma irregular, ya sea forma curvada o sesgada respecto al eje del río (se consideran sesgos mayores a 45° y las curvas mayores a 90°).
- b. Puentes construidos con códigos anteriores al AASHTO de 1973 deben ser considerados de alto riesgo.
- c. Número de luces, puentes simplemente apoyados con más de una luz deben ser considerados de alto riesgo, debido al pobre comportamiento de las pilas centrales.

De los criterios anteriores se obtienen doce categorías de clasificación de puentes, los cuales se muestran en el Cuadro 5.

2. Definición de los estados de daño; se definen cinco niveles de daño.
  - a. Ningún daño ( $ds_1$ ), el puente no presenta daño.

- b. Daño menor ( $ds_2$ ), agrietamiento menor y descascaramiento de los bastiones, así como agrietamiento menor en las columnas.
  - c. Daño moderado ( $ds_3$ ), las columnas experimentan un agrietamiento moderado y descascaramiento, pero la columna es estructuralmente funcional. Se presenta asentamiento de los accesos y en las conexiones se agrietan las llaves de cortante y se tuercen los pernos.
  - d. Daño generalizado ( $ds_4$ ), las columnas se degradan sin colapsar (columnas estructuralmente inseguras), las conexiones pierden parcialmente su capacidad soportante y se da un asentamiento mayor en los accesos.
  - e. Daño total ( $ds_5$ ), las columnas colapsan y las conexiones pierden toda su capacidad soportante, lo que implica un inminente colapso de la losa de sitio.
3. Funciones de daños de puentes, para las categorías principales de puente, los estados

de daño son identificados y descritos con referencia al tipo de daño que ocurre en los subcomponentes, tales como bastiones, losa de piso, accesos y conexiones. Las curvas de fragilidad de puentes clasificados como de alto riesgo son ajustadas para reflejar el comportamiento desfavorable que se espera de estas estructuras. En la Figura 7 se muestran curvas de fragilidad de los componentes que se adicionan para obtener la curva correspondiente al puente.

Las curvas de fragilidad son la presentación gráfica de las funciones de daño mostradas en el Cuadro 6 de acuerdo con la clasificación de los puentes y en función de la aceleración pico del terreno.

La Figura 8 muestra la aplicación de la metodología para el puente sobre el Río Sucio, en la Ruta Nacional 32, como salida de un Sistema de Información Geográfica, en este caso ArcView.

**Cuadro 5.** Clasificación de puentes

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
HBR1	Puente de gran tamaño – diseño sismorresistente
HBR2	Puente de gran tamaño – diseño convencional
HBR3	Puente continuo – diseño sismorresistente
HBR4	Puente continuo – diseño convencional
HBR5	Puente simplemente apoyado – diseño sismorresistente
HBR6	Puente simplemente apoyado – diseño convencional
HBR7	Puente de gran tamaño – diseño sismo rresistente de alto riesgo
HBR8	Puente de gran tamaño – diseño convencional –de alto riesgo
HBR9	Puente continuo – diseño sismorresistente – de alto riesgo
HBR10	Puente continuo – diseño convencional – de alto riesgo
HBR11	Puente simplemente apoyado – diseño sismorresistente – de alto riesgo
HBR12	Puente simplemente apoyado – diseño convencional – de alto riesgo

Fuente: (Hazuz, 1997; LanammeUCR, 2000).

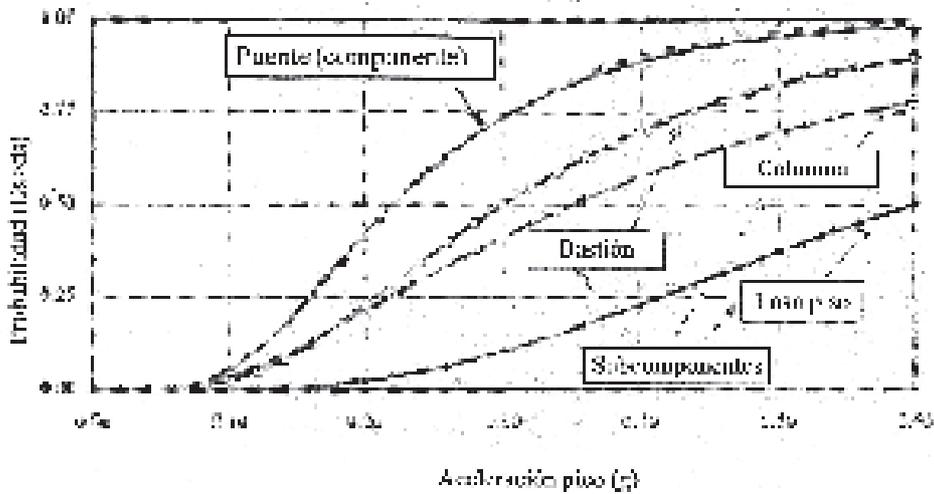


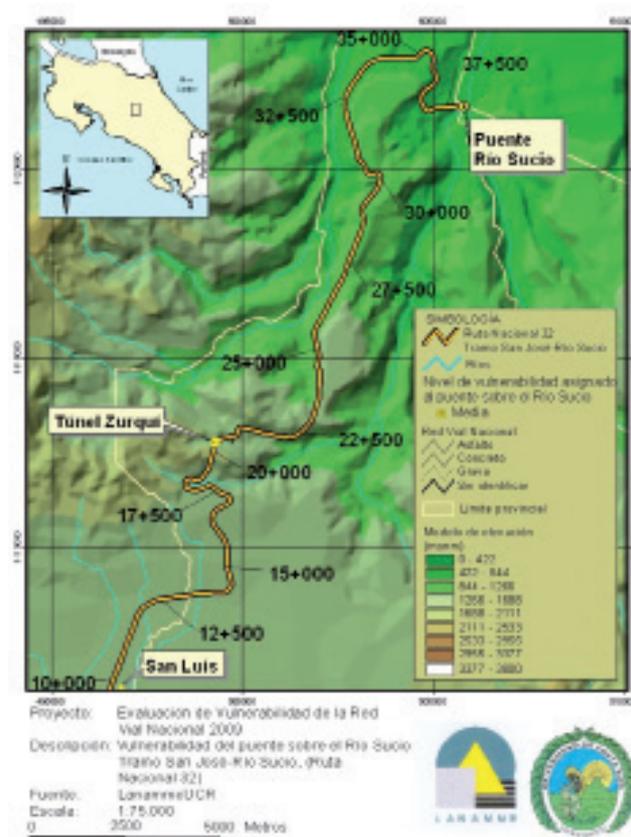
Figura 7. Relación entre la curva de fragilidad de un puente y las de sus componentes.

Fuente: (Bravo y Calvo, 1997; Castro, 2005).

Cuadro 6. Valor medio de aceleración pico como función de los daños en los puentes.

Daño Calibración	Mediana de la aceleración pico del terreno (fracción de g)			
	Daño menor (ds2)	Daño moderado (ds3)	Daño generalizado (ds4)	Daño total (ds5)
HBR1	0,38	0,46	0,64	1,50
HBR2	0,32	0,43	0,55	1,25
HBR3	0,28	0,42	0,55	1,20
HBR4	0,18	0,37	0,48	0,90
HBR5	0,22	0,34	0,39	0,85
HBR6	0,11	0,22	0,26	0,60
HBR7	0,30	0,37	0,50	1,20
HBR8	0,26	0,34	0,44	1,00
HBR9	0,22	0,34	0,44	0,96
HBR10	0,14	0,30	0,38	0,72
HBR11	0,18	0,27	0,31	0,68
HBR12	0,09	0,18	0,21	0,48

Fuente: (Castro, 2005).



**Figura 8.** Vulnerabilidad ante amenaza sísmica del puente sobre el Río Sucio, Ruta Nacional 32.

Fuente: (Cordero, Sanabria, Garro, Vargas & Jiménez, 2009).

## CONCLUSIONES

1. La aplicación de las metodologías presentadas permite identificar a cuáles amenazas naturales está expuesta la red vial nacional según su ubicación geográfica, condiciones topográficas, entre otros, y la asignación de niveles de vulnerabilidad de los componentes de la infraestructura vial o la susceptibilidad a que se generen eventos (e.g., deslizamientos).
2. En aquellos casos donde la vulnerabilidad de tramos de la carretera presente desastres ya consumados, la información que se deriva del evento puede mostrar variaciones que sirven de insumo para corroborar la validez de los modelos empleados, o en su defecto, ser usados para la calibración de estos.
3. La definición de aquellos tramos críticos para la infraestructura vial que se reconocen como secciones vulnerables ante amenazas naturales, obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías de análisis de vulnerabilidad de la red vial, permiten enfocar la toma de decisiones a nivel técnico y político hacia las rutas nacionales más vulnerables, convirtiéndose en una herramienta útil para la priorización de la atención e inversión en la red vial nacional, permitiendo identificar elementos que requieran de atención inmediata.
4. Se hace evidente, por lo tanto, la importancia de evaluar la vulnerabilidad de las carreteras nacionales y generar de manera oportuna acciones para reducirla, ya que

de esta dependerá la capacidad de atender emergencias causadas por los eventos en comunidades y/o sectores productivos influenciados tanto por la infraestructura vial afectada como por la rapidez de recuperación del país posterior a emergencias.

Metodologías de análisis de vulnerabilidad de corredores viales ante sismos y lluvias intensas. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bravo, A. & Calvo, M. (1997). *Evaluación del impacto sobre la red vial de un terremoto en la Península de Nicoya*. Informe final de proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

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.

Cordero, D., Sanabria, J., Garro, J., Vargas, W. & Barrantes, R. (2009). *Evaluación de la vulnerabilidad ante amenazas naturales, Ruta Nacional 32, tramo San José-Río Sucio*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Hazuz. (1997). *Hazards U.S.* Estados Unidos: Federal Emergency Management Agency & National Institute of Building Science.

Kanji, M. (2001). *Metodología para estimar la vulnerabilidad del terreno con relación a flujos de detritos*. I Simposio Internacional de Movimientos en Masa. Cuenca, Ecuador.

LanammeUCR. (2000). *Metodologías para la evaluación del riesgo asociado con eventos sísmicos*. Memorias de taller:

Morton, D., Alvarez, R. & Campbell, R. (2003). *Preliminary soil-slip susceptibility maps, Southwestern, California*. Estados Unidos: USGS.

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: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J. (1999). *CRISIS 1999, Program for Computing Seismic Hazard*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

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: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Sauter, F. (1989). *Fundamentos de Ingeniería Sísmica 1: Introducción a la sismología*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Schmidt, V. & Linkimer, L. (2002). *Amenaza Sísmica de la Zona Central de Costa Rica, en coordinación con el Instituto Nacional de Seguros*. San José, Costa Rica: Instituto de Investigaciones en Ingeniería.

Vargas, W. & Garro, J. (2003). *Gestión de riesgos naturales en infraestructura vial*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos

Estructurales LanammeUCR, Universidad de Costa Rica.

Vargas, W. & Garro, J. (2008). *Relación entre las características geométricas y la vulnerabilidad de algunas rutas de montaña de Costa Rica*. Costa Rica: I Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial (I CISEV).

Youd, T & Perkins, D. (1978). Mapping liquefaction-induced ground failure potential. Estados Unidos: Journal of the Geotechnical Engineering Division.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR  
Teléfono: 2511-4011  
Correo electrónico: diego.cordero@ucr.ac.cr

#### **William Vargas Monge**

Ingeniero Geotecnista, Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil de la UCR e investigador del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR  
Doctor en Ingeniería (Ph. D.)  
Teléfono: 2511-2510  
Correo electrónico: william.vargasmonge@ucr.ac.cr

### **SOBRE LOS AUTORES**

#### **Diego Alberto Cordero Carballo**

Ingeniero Civil  
Licenciado en Ingeniería Civil; estudiante egresado de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia de la Universidad de Costa Rica

#### **José Francisco Garro Mora**

Ingeniero Civil  
Licenciado en Ingeniería Civil  
Investigador del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR  
Teléfono: 2511-4011  
Correo electrónico: jfgarro@lanamme.ucr.ac.cr

