



Aplicación para la valoración del riesgo ante amenazas múltiples en proyectos de infraestructura: caso Ruta Nacional 32, Costa Rica, 2024

Diciembre 2024



Euroclima está cofinanciado por:



Agencia implementadora:



Instituciones ejecutoras:



Aplicación para la valoración del riesgo ante amenazas múltiples en proyectos de infraestructura: caso Ruta Nacional 32, Costa Rica, 2024

La formulación del presente documento fue liderada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la Fundación de la Universidad de Costa Rica, y la Acción Proyectiva, con el apoyo de diferentes entidades públicas y organizaciones del sector privado y de la sociedad civil, a quienes se les agradece profundamente por su colaboración.

Estos estudios forman parte de la Acción Proyectiva: Fortalecimiento de capacidades para la utilización de información climática para robustecer los procesos de toma de decisiones, cuya finalidad es aportar a la ejecución de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) a partir de capacidades mejoradas de diferentes actores en el nivel subnacional con el fin de robustecer la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Los fondos para la implementación de dicha Acción provienen de EUROCLIMA, programa de cooperación regional financiado por la Unión Europea que busca promover el desarrollo ambientalmente sostenible y resiliente al clima en América Latina.

El equipo profesional encargado de la elaboración de este documento fue coordinado por el consorcio Consultores+DLZ+SismoCon y fue integrado por:

- Dr. Sergio Mora Castro, líder del equipo; ingeniero geólogo, especialista en gestión del riesgo.
- Dr. José Pablo Porras Velásquez, ingeniero civil especialista en hidráulica e hidrología.
- M.H. Gerardo Javier Soto Bonilla, Geólogo, especialista en evaluación de amenazas naturales y vulcanología.
- M.Sc. Pio Miranda Jenkins, ingeniero civil, especialista en Ingeniería sísmica y planificación.
- M.Sc. Oscar Jiménez, ingeniero civil, especialista en hidráulica.
- Dr. Paulo Ruiz Cubillo, geólogo, especialista en evaluación de amenazas naturales y vulcanología.

Equipos encargados de guiar y revisar el documento:

Por AECID

- Dra. Christine Follana

Por IMN

- MSc. Nazareth Rojas
- Lic. Ana Rita Chacón

Por Acción Proyectiva

- Dr. Javier Saborío Bejarano
- MSc. Cristina de San Román Aguilar
- MSc. Mariana Soto Ugarte

Diagramador

- Lic. Christian Mc Koy Carrillo

Forma de citar el documento:

Consortio Consultores+DLZ+SismoCon -Proyectiva-Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2024. Aplicación para la valoración del riesgo ante amenazas múltiples en proyectos de infraestructura: caso Ruta Nacional 32.

La presente publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva del Instituto Meteorológico Nacional y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

Resumen ejecutivo

Esta aplicación se presenta como un instrumento clave para la integración del análisis del riesgo en proyectos de infraestructura pública vial, con un enfoque integral en la resiliencia frente a amenazas naturales y climáticas, conforme a los lineamientos establecidos por el Decreto Ejecutivo N.º 42465 - MOPT-MINAE-MIVAH (2020) “Lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia en infraestructura pública”. El documento desarrolla un proceso estructurado de evaluación del riesgo aplicable a corredores viales. Como ejemplo de aplicación, se considera en este caso particular, la Ruta Nacional 32 de Costa Rica, altamente expuesta a amenazas como la inestabilidad de laderas, la actividad sísmica, los lahares y las avenidas fluviales.

El análisis considera una metodología multicriterio para identificar y priorizar amenazas, cuantificar la vulnerabilidad e indicar las orientaciones para luego definir las medidas de mitigación y adaptación correspondientes, para mejorar la resiliencia de la infraestructura vial. Entre las herramientas utilizadas se destacan las metodologías Hazus (Natural Hazard Risk Assessment Program) y CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) para la evaluación de las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo asociados con la sismicidad y de los procesos hidrometeorológicos y climáticos, complementadas con datos de modelos geotécnicos y geológicos. Además, se integran los posibles efectos del cambio climático, en particular de su componente más influyente: el calentamiento global antropogénico (CGA). Este último, aparte de la variabilidad climática (VC, en el corto plazo) es el que interactúa más directamente con las amenazas hidrometeorológicas (avenidas fluviales) y de la geodinámica externa (inestabilidad de laderas, lahares) identificadas, sobre todo en el mediano y largo plazo.

La Guía también incluye una segunda parte, cuyo contenido incorpora un ejemplo práctico, mediante la aplicación de un análisis piloto acerca de la amenaza de la inestabilidad de laderas en el sector montañoso, de los lahares sobre el puente de Río Sucio, de las amenazas sísmica y de las avenidas fluviales sobre una selección de puentes ubicados sobre la Ruta Nacional 32 (RN-32) de Costa Rica.

En la medida de lo posible, de la información y datos disponibles y confiables, así como del software accesible, fue realizado el análisis respectivo y preliminar de las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo de esos elementos expuestos de la RN-32. Los resultados han permitido estimar el orden de magnitud de las probabilidades de los daños y pérdidas. La dificultad de aplicar modelos de elevación digital precisos, información geológica, datos acerca de las lluvias y caudales y aceleraciones sísmicas precisas, no ha permitido ofrecer una mejor resolución de los resultados, por lo que la tarea queda pendiente para ser refinada cuando hayan mejorado esos insumos y sea posible reducir las incertidumbres epistémicas.

A partir de esto, se podrán establecer las recomendaciones del caso para incorporar las estrategias de adaptación y mitigación correspondientes, con el fin de fortalecer la resiliencia de las infraestructuras ante eventos intensos y, eventualmente, extremos.

En conclusión, la Guía no solo aporta un marco para apoyar el proceso de toma de decisiones informadas sobre la planificación y operación de la infraestructura vial en áreas expuestas a las amenazas naturales, sino que también ofrece un proceso metodológico replicable para otras líneas vitales en Costa Rica. DE esta manera, se pretende reforzar la capacidad de los actores involucrados para gestionar el riesgo y adaptar las infraestructuras frente a los desafíos hidrometeorológicos, climáticos, sísmicos y geodinámicos presentes y futuros.

Tabla de contenidos

Contenido de figuras	7
Contenido de tablas	16
Acrónimos y siglas	20
1. Identificación y priorización preliminar de las amenazas	23
1.1 Descripción de la Ruta	23
1.2 Identificación de amenazas	23
1.3 Cálculo del Índice de Prioridad Calculada del Riesgo (CPRI)	24
1.4 Desarrollo del proyecto	25
2. Macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas: km 20+000 a 40+000, RN-32	25
2.1 Marco geológico regional del macizo volcánico del volcán Barva	25
2.2 Marco geológico del tramo de montaña de la RN-32 entre el túnel Zurquí y el río Sucio	29
2.2.1 Unidad lavas río Sucio	29
2.2.2 Unidad de flujos piroclásticos	30
2.2.3 Unidad Lavas Molinete	31
2.2.4 Unidad lavas olivínicas	31
2.2.5 Unidad de brechas	32
2.3 Tectónica local	33
2.3.1 Fallamiento tectónico y neotectónico	33
2.3.2 Sismicidad en el área de estudio	35
2.4 La amenaza de la inestabilidad de laderas (Ad) en el tramo analizado de la RN-32	36
2.4.1 Estimación de la amenaza	36
2.4.2 Susceptibilidad derivada del relieve	37
2.4.3 Factor del relieve (pendientes; Sp)	37
2.4.4 Factor de susceptibilidad litológica (Sl)	40
2.4.5 Factor de humedad (Sh)	41
2.4.6 Factor de disparo derivado de la intensidad de lluvia (Dp)	42
2.4.7 Factor de disparo derivado de sismicidad (Ds)	44
2.4.8 Amenaza de la inestabilidad de laderas asociada a los sismos intensos, durante la estación seca (As)	46
2.4.9 Amenaza de la inestabilidad de laderas asociada a las lluvias intensas, sin sismo (Ap)	47
2.4.10 Amenaza "total" de la inestabilidad de laderas (Ad)	48
2.4.11 Amenaza "total" de la inestabilidad de laderas (Ad), representada de manera semafórica	48
2.4.12 Posible influencia del CGA en la amenaza de la inestabilidad de laderas	49
2.5 Apreciaciones y comentarios sobre el riesgo derivado de la inestabilidad de laderas en el tramo de la RN-23	52

2.5.1 Antecedentes	52
2.5.2 La RN-32 y las repercusiones sociales y ambientales del riesgo derivado de la inestabilidad de laderas	53
2.6 Conclusiones y recomendaciones acerca de la amenaza de inestabilidad de laderas en la RN-32	53
2.6.1 Conclusiones	53
2.6.2 Recomendaciones	55
3. La amenaza de los lahares sobre el puente del río Sucio	55
3.1 Casos de estudio aplicación de la metodología propuesta para lahares en río Sucio RN-32	55
3.2 Selección del volcán y la amenaza a evaluar	56
3.3 Modelo numérico del terreno (MNT) y mapas temáticos para la caracterización y el modelado	63
3.4 Caracterización geológica, geomorfológica y de la amenaza de los lahares	64
3.4.1 Geomorfología	65
3.4.2 Geología	67
3.4.2.1 Datación de los lahares	67
3.4.2.2 Estudio de la historia eruptiva y la generación de lahares primarios y secundarios	68
3.4.2.3 Historia sísmica en los edificios volcánicos: Relación con la generación de lahares secundarios	68
3.5 Modelación de la amenaza de lahares	69
3.5.1 Principios básicos de modelación	69
3.5.2 Modelación de los lahares con LAHARZ	71
3.6 Valoración del daño y determinación del impacto	75
3.7 Análisis de la intensidad de la amenaza	76
3.8 Análisis del período de recurrencia de los lahares	78
3.9 Caracterización del Puente sobre el río Sucio	80
3.10 Análisis de indicadores de vulnerabilidad para el puente de río Sucio.	81
3.11 Ponderación del riesgo y selección de las medidas de mitigación y adaptación	82
3.12 Conclusiones sobre caso de estudio	84
3.13 Indicaciones acerca de LAHARZ	84
4. Análisis de la amenaza de las avenidas fluviales (crecientes) en algunos puentes de la RN-32	85
4.1 Generalidades	85
4.2 Inventario de infraestructura	86
4.3 Amenaza de las avenidas fluviales	88
4.3.1 Aspectos hidrológicos	88
4.3.2 Aspectos hidráulicos	90
4.4 Análisis de la amenaza de la socavación	95
4.5 Aspectos de la vulnerabilidad y de la exposición	99
4.5.1 Generalidades	99
4.5.2 Asignación de índice de socavación y probabilidades de falla	100
4.5.3 Estimación de las pérdidas económicas	102
4.6 Conclusiones y recomendaciones	102
4.7 Limitaciones y estudios posteriores recomendados	103

5. Análisis del riesgo sísmico de los puentes de la RN-32	104
5.1 Ejemplo práctico para la evaluación del riesgo derivado de la sismicidad en 11 puentes de la RN-32	104
5.2 Análisis de la amenaza sísmica	105
5.2.1 Caracterización de la demanda sísmica para los puentes evaluados en la RN-32	105
5.2.2 Análisis de los factores de exposición a las amenazas	106
5.2.3 Descripción y clasificación estructural de los puentes evaluados sobre la Ruta 32	106
5.2.4 Costos de construcción de los puentes evaluados	109
5.3 Análisis de la vulnerabilidad de los puentes evaluados sobre la Ruta Nacional 32	109
5.3.1 Estimación de los parámetros para la construcción de las curvas de fragilidad	109
5.3.2 Estimación de los costos de reposición para cada estado del daño	113
5.3.3 Estimación de la pérdida máxima probable y de la pérdida anual esperada	114
5.4 Efectos del CGA sobre la fragilidad sísmica de los puentes evaluados en la RN-32	115
5.4.1 Estimación de los parámetros para la construcción de las curvas de fragilidad con efectos del CGA	115
5.4.2 Estimación de los costos de reposición para cada estado del daño	118
5.5 Presentación de todas las curvas de fragilidad obtenidas para el análisis del riesgo	120
5.5.1 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes nuevos – PR 1033 años	120
5.5.2 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 1033 años	121
5.5.3 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes nuevos – PR 2475 años	122
5.5.4 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 2475 años	123
5.5.5 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes nuevos – PR 1033 años	124
5.5.6 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 1033 años	125
5.5.7 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes nuevos – PR 2475 años	126
5.5.8 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 2475 años	128
5.6 Presentación de todas las curvas de excedencia y PAE obtenidas	129
5.6.1 Gráficos de las curvas de excedencia y pérdida anual esperada ° para puentes rehabilitados	129
5.6.2 Gráficos de las curvas de excedencia y pérdida anual esperada para puentes rehabilitados	130

5.7 Comentarios acerca de los resultados del riesgo sísmico	131
6. Conclusiones y recomendaciones generales	132
6.1 Conclusiones	132
6.2 Recomendaciones	133
6.3 Integración del Riesgo	134

Contenido de figuras

<i>Figura 1.</i> Mapa geológico del macizo volcánico del Barva y ubicación del tramo de la RN32 (amarillo) con los dos puntos extremos: en el portal caribe del Túnel Zurquí (STZ) y el Puente del Río Sucio (PRS). Reformado de Solano & Soto (2020).	7
<i>Figura 2.</i> Fallas tectónicas en los macizos volcánicos del Barva e Irazú en su sector Caribe, en un radio ("buffer") de 15 km alrededor del tramo estudiado de la RN-32. El fondo topográfico de sombras fue construido a partir de GeoMapApp, . Las fallas han sido trazadas a partir de Denyer et al. (2003, 2009), Linkimer (2003), Fernández (2013), Montero et al. (2013) y Rodríguez (2017). 1: Prolongación San Miguel (Soto, 1999); 2: Río Sucio; 3: Guápiles; 4, 5, 6: Ramificaciones del sistema Río Sucio; 7: Alto Grande; 8: Río Blanco; 9: Ramificación Blanquito; 10: Blanquito; 11: Río Hondura; 12: Río Patria; 13, 14: Lara y asociada; 15: Cipreses borde norte.	28
<i>Figura 3.</i> Tramo de la RN32 en donde se analizó la amenaza de la inestabilidad de laderas. Ver el Anexo 1.	29
<i>Figura 4.</i> Mapa geológico del corredor vial estudiado, en la RN-32.	30
<i>Figura 5.</i> Portal caribe del Túnel Zurquí, km 20,6, con brechas predominantes. B: Brechas de posibles flujos de bloques y cenizas de andesitas basálticas en la base del cerro Zurquí, río Tranqueras (495373E-1111565N). C: Dique de andesitas basálticas (color gris), corta las brechas tobáceas (color café) en el río Lajas (495723E-1111465N). D: Deslizamiento menor sobre la margen derecha (sentido SJO-LIM) con lavas muy fracturadas (Unidad Lavas Molinete) y brechas asociadas (502864E-1118318N). E: Lavas de la Unidad Río Sucio (ProtoBarva) sobre la margen izquierda del río Hondura, cerca de la confluencia con el río Sucio, cerca del bastión del puente.	32
<i>Figura 6.</i> Mapa de intensidades (IMM) de los terremotos de: a) Fraijanes, 30 de diciembre de 1888, b) Cinchona, 8 de enero de 2009 (derecha) (Linkimer & Vargas, 2015), y c) Patillos, 30 de diciembre de 1952 (Montero & Alvarado, 1995; modificado por Linkimer & Vargas, 2015).	36
<i>Figura 7.</i> Modelo numérico del terreno, representado en los rangos de sus pisos altitudinales.	37
<i>Figura 8.</i> Relación entre la pendiente del terreno expresada en grados y el factor Sp.	38
<i>Figura 9.</i> Relación de grados pendientes y porcentajes.	38
<i>Figura 10.</i> Pendientes, expresadas en grados y sus rangos respectivos, según la tonalidad del color asignado.	39
<i>Figura 11.</i> Factor de pendientes (Sp) en función de pendientes.	39
<i>Figura 12.</i> Mapa geológico del área estudiada. Fue agregado un buffer de 200m sobre su traza cartografiada, para tomarlo en cuenta el posible efecto de degradación de las propiedades geomecánicas del terreno (e.g. fracturas, alteración hidrotermal, presencia de agua, etc.) dentro del análisis para asignar los valores correspondientes del factor de susceptibilidad litológica Sl.	40
<i>Figura 13.</i> Factor litológico (Sl) del área de estudio.	42

Figura 14. Factor de humedad (Sh) del área de interés.	42
Figura 15. Relación entre la precipitación para 24 horas, con el período de recurrencia $Tr=100$ años y los rangos del factor de disparo derivado de la intensidad de lluvia D_p , según la metodología Mora-Vahrson (1994)	43
Figura 16. Distribución espacial de la precipitación máxima, para 24 horas y $Tr=100$ años, en el área del corredor vial estudiado de la RN-32 y sus alrededores.	44
Figura 17. Distribución del factor de disparo de la lluvia D_p , obtenido mediante la aplicación de la ecuación cuadrática D_p vs. $X=PPT_{24,100}$	44
Figura 18. Factor de disparo por lluvia, con $Tr=100$ años (D_p), en el área estudiada y sus alrededores. El valor de D_p fue restringido a un valor máximo de 5, de acuerdo con la metodología Mora-Vahrson (1994)	44
Figura 19. Factor de disparo derivado de la intensidad sísmica (D_s), a lo largo de la RN-32.	46
Figura 20. Amenaza de la inestabilidad de laderas asociada a los sismos intensos (A_s), sin lluvias. Los símbolos de estrellas representan los incidentes registrados en los archivos de COSEVI.	47
Figura 21. Amenaza de la inestabilidad de laderas disparada por las lluvias intensas (A_p), sin sismo. Los símbolos de estrellas representan los incidentes registrados en los archivos de COSEVI.	47
Figura 22. Amenaza "total" (i.e. combinada) de la inestabilidad de laderas (A_d). Los símbolos de estrellas representan los incidentes registrados en los archivos de COSEVI.	49
Figura 23. Amenaza "total" de la inestabilidad de laderas (representada de manera semafórica).	49
Figura 24. Ejercicio para la definición de un escenario hipotético que permita visualizar la influencia de un incremento posible de la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones pluviales en el tramo de la RN-32 estudiado. Para el ejercicio, fue escogido un incremento del 10%, el cual influye en los factores de la humedad prevalente (Sh) y del disparo pluviométrico (D_p) definidos por la metodología Mora Vahrson (1994).	50
Figura 25. Comparación de los escenarios de la amenaza de la inestabilidad de laderas "total" en el segmento estudiado de la RN-32. En la Figura 21, se aprecia un "zoom" de los segmentos señalados, para efectos de comparación visual.	50
Figura 26. Acercamiento ("zoom") de los mapas de dos segmentos de la RN-32, para comparar visualmente el cambio (incremento) sutil, pero efectivo, de la amenaza de la inestabilidad de laderas total (A_d) al incrementar un 10 % en los parámetros Sh (humedad prevalente del terreno) y D_p (disparo pluviométrico).	51
Figura 27. Comparación de los histogramas (ArcGis) de distribución de los valores de los rangos de la amenaza "total" de la inestabilidad de laderas (Mora-Vahrson, 1994), según los escenarios con y sin la posible influencia del CGA sobre la configuración de la relación IDF: un incremento de Sh (humedad prevalente del terreno) y D_p (disparador pluviométrico).	51

Figura 28. Flujograma general de la metodología planteada para la evaluación de amenazas volcánicas. La numeración presentada en el flujograma de la figura 1 va asociada al proceso respectivo que se describe más adelante.	56
Figura 29. Mapa geológico de Costa Rica (Denyer & Alvarado 2007) y su relación con la Red Vial Nacional, se indican las tres regiones volcánicas del país y las áreas definidas para los diferentes productos volcánicos.	57
Figura 30. Diagrama de flujo que muestra los primeros pasos de la metodología aplicados para el análisis de las amenazas volcánicas, al volcán Irazú y en particular la asociada con los lahares.	60
Figura 31. Imagen satelital del año 2023, tomada de Google Earth donde se observa la cabecera de la cuenca del río Sucio en el sector oeste del volcán Irazú y el deslizamiento de las torres de telecomunicación, así como la zona inestable del sector noroeste del cráter principal.	61
Figura 32. Deslizamiento en el sector de las torres de telecomunicaciones en el Irazú (Ruiz et al., 2021).	61
Figura 33. Comparación de imágenes satelitales de Google Earth de 2011 (antes de que iniciara el deslizamiento de las Torres en el volcán Irazú) y 2023.	62
Figura 34. Fotografías aéreas oblicuas; sector del puente sobre el río Sucio.	62
Figura 35. Mapa de ubicación de la Ruta Nacional 32 y su relación con el volcán Irazú.	62
Figura 36. Flujograma sobre la generación del MSD y los mapas que pueden salir a partir de ese modelo como insumos en las siguientes fases.	63
Figura 37. Modelo digital de superficie de Costa Rica con la Red Vial Nacional sobrepuesta junto con los principales volcanes de cada cordillera.	63
Figura 38. Mapa de pendientes del sector noroeste de volcán Irazú y su relación con la Ruta Nacional 32.	64
Figura 39. Flujograma explicativo del proceso de caracterización en el caso de estudio de los lahares en la cuenca de río Sucio.	65
Figura 40. Relación entre la altura del volcán (H) y la distancia horizontal y perpendicular desde la cima al piedemonte (L). La zona que define esta relación se conoce como la "proximal" de la amenaza de lahares. Después del piedemonte y hasta donde llegue el abanico aluvial, se define la zona "distal" de la amenaza. (Modificado de Iverson et al, 1998).	66
Figura 41. Fotografías del impacto causado por los lahares de 1963 en la zona distal en el sector de Taras Cartago. A la izquierda se observa el abanico dejado por los lahares y a la derecha la fábrica Kativo.	67
Figura 42. Mapa geomorfológico del volcán Irazú y su relación con la ruta nacional 32.	69
Figura 43. Mapa geológico del sector Noroeste del volcán Irazú y su relación con la Ruta Nacional 32.	69
Figura 44. Perfil de un lahar típico y como los que se ha supuesto para la metodología propuesta. Modificado de Vallance & Iverson (2015).	70
Figura 45. Proporciones de las alturas H a las que podría llegar un lahar e impactar un puente. Se supone que el tirante del lahar modelado se relaciona con la posibilidad de impacto destructivo en la infraestructura.	71

Figura 46. En la imagen de la izquierda, se muestran el área de disparo del lahar, los límites laterales de la sección transversal (A) y el área de inundación planimétrica. En la figura de la derecha, se muestra un ejemplo del funcionamiento de LAHARZ en el volcán Monte Reiner en Estados Unidos, modificado de Iverson et al. (1998).	72
Figura 47. Flujograma de la modelación de lahares mediante LAHARZ y su análisis de impacto en la estructura evaluada.	72
Figura 48. Mapas con los resultados de los escenarios del alcance, río abajo, de las trayectorias de los lahares modelados en la cuenca y cauce del Río Sucio.	73
Figura 49. Perfiles topográficos, tirantes estimados de los lahares y altura del puente; las líneas señalan la altura del lahar con respecto a la altura del puente de río Sucio.	74
Figura 50. Resultados de modelación de lahar de 2 millones de m ³ . Se puede ver como este evento pasaría aguas abajo del puente y según su tirante llegaría a un 55 % de la altura a la que se encuentra la superestructura.	74
Figura 51. Clasificación de la intensidad de la vulnerabilidad vs el número equivalente del valor % de reposición del puente.	78
Figura 52. Frecuencia de eventos vs. nivel de daños esperados. Mientras más frecuente es el evento, mayor el número equivalente (QF) y menor es el nivel de los daños probables. Los lahares con mayor nivel de daños son menos frecuentes.	79
Figura 53. Flujograma que indica los subprocesos para el análisis de la exposición y vulnerabilidad de la estructura estudiada. En este caso los puentes.	80
Figura 54. Perfil de la cuenca utilizado para el análisis de la posición del puente, su vulnerabilidad y grado de exposición (ubicación) ante la amenaza de lahares. DT=Descarga total, DS=Descarga de sedimentos y DA=Descarga de agua.	81
Figura 55. Ubicación de los 5 puentes del tramo km 114 a km 128.	86
Figura 56. Cuencas hidrográficas de los ríos sobre los que se encuentran los cinco puentes estudiados, en el tramo km 114 a km 128 de la RN-32	88
Figura 57. Resumen de resultados hidráulicos (HEC-RAS 1D) para la quebrada Calderón.	91
Figura 58. Resumen de resultados hidráulicos (HEC-RAS 1D) para el río Aguas Claras.	92
Figura 59. Resumen de resultados hidráulicos (HEC-RAS 1D) para el río San Miguel.	92
Figura 60. Elevaciones del agua (en msnm) para el caudal con período de recurrencia de 500 años, en el sector del puente del río Chirripó.	93
Figura 61. Profundidades del agua (en m) para el caudal con período de recurrencia de 500 años, en el sector del puente del río Chirripó.	93
Figura 62. Sección transversal en el puente, utilizada para el caudal con período de recurrencia de 500 años en el río Chirripó.	94
Figura 63. Velocidades del agua (en m/s) para el caudal, con período de recurrencia de 500 años, en el sector del puente sobre el río Chirripó.	94
Figura 64. Sección transversal de velocidades en la sección del puente, para el caudal con período de recurrencia de 500 años en el río Chirripó.	94
Figura 65. Resumen de los resultados del análisis de la socavación en la quebrada Calderón.	96
Figura 66. Resumen de los resultados del análisis de la socavación en el río Aguas Claras.	96
Figura 67. Resumen de resultados del análisis de la socavación en el río San Miguel.	97

Figura 68. Escolleras de protección en las pilas del puente sobre el río Chirripó (abril, 2024).	99
Figura 69. Esquema metodológico para evaluar la amenaza de la socavación, según CIRIA (Sasidharan et al., 2023).	100
Figura 70. Mapa con la localización de los puentes estudiados sobre la RN-32	105
Figura 71. Curvas de fragilidad desarrolladas para el puente sobre el Río Sucio, según el período de recurrencia de 1033 años (Clase HWB21)	111
Figura 72. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 1033 años	112
Figura 73. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto en los puentes rehabilitados, para un período de recurrencia de 1033 años	112
Figura 74. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto, en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 2475 años	112
Figura 75. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto, en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 2475 años	112
Figura 76. Curva de excedencia y pérdida anual esperada obtenida para el puente sobre Río Sucio	114
Figura 77. Comparación de las curvas de fragilidad para el puente sobre el Río Sucio, para distintos niveles de daño, con y sin los efectos del CGA, para un período de recurrencia de 1033 años	116
Figura 78. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 1033 años	117
Figura 79. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes rehabilitados, para un período de recurrencia de 1033 años	117
Figura 80. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 2475 años	117
Figura 81. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes rehabilitados, para un período de recurrencia de 2475 años	117
Figura 82. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río Barbilla - Nuevo (Clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años	120
Figura 83. Curvas de fragilidad para el puente sobre Quebrada Calderón - Nuevo (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años	120

Figura 84. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río Aguas Claras - Nuevo (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años	120
Figura 85. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río San Miguel - Nuevo (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años	120
Figura 86. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río Chirripó - Nuevo (Clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años	120
Figura 87. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 1033 años	121
Figura 88. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años	121
Figura 89. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años	121
Figura 90. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río San Miguel - rehabilitado (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años	121
Figura 91. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años	121
Figura 92. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - rehabilitado (clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 1033 años.	121
Figura 93. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años.	122
Figura 94. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años.	122
Figura 95. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años	122
Figura 96. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años.	122
Figura 97. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años.	122
Figura 98. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 2475 años.	123

Figura 99. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años.	123
Figura 100. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años.	123
Figura 101. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años.	123
Figura 102. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años.	123
Figura 103. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - rehabilitado (clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 2475 años.	123
Figura 104. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	124
Figura 105. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	124
Figura 106. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	124
Figura 107. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	124
Figura 108. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	125
Figura 109. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	125

Figura 110. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	125
Figura 111. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	125
Figura 112. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	126
Figura 113. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	126
Figura 114. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - rehabilitado (clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	126
Figura 115. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	126
Figura 116. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	127
Figura 117. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	127

Figura 118. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	127
Figura 119. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	127
Figura 120. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	128
Figura 121. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	128
Figura 122. Curvas de fragilidad para el puente sobre Quebrada Calderón - rehabilitado (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	128
Figura 123. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río Aguas Claras - rehabilitado (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	128
Figura 124. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río San Miguel - rehabilitado (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	129
Figura 125. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río Chirripó - rehabilitado (Clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.	129
Figura 126. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Barbilla - nuevo	129

Figura 127. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Quebrada Calderón - nuevo.	129
Figura 128. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Aguas Claras - nuevo.	130
Figura 129. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río San Miguel - nuevo	130
Figura 130. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Chirripó - nuevo	130
Figura 131. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Sucio	130
Figura 132. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Barbilla - rehabilitado	130
Figura 133. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Quebrada Calderón - rehabilitado	131
Figura 134. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Aguas Claras - rehabilitado	131
Figura 135. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río San Miguel - nuevo	131
Figura 136. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Chirripó - nuevo	131

Contenido de tablas

Tabla 1. CPRI aplicado a la totalidad de la ruta 32	24
Tabla 2. Resumen de las descripciones de las unidades litológicas principales que afloran a lo largo del corredor vial estudiado de la RN-32.	34
Tabla 3. Rangos del factor de pendientes (S_r) en grados y porcentajes.	38
Tabla 4. Calificación del SI de las unidades descritas acorde con las observaciones de campo.	41
Tabla 5. Relación de la lluvia máxima en 24 horas (o menos tiempo), con el factor de disparo D_p , según la metodología Mora-Vahrson (1994)	42
Tabla 6. Sitios analizados, en la RN-32 y características básicas de los puentes, definidos para el estudio amenaza sísmica de la RN-32, con los valores de las aceleraciones sísmicas pico (PGA) asignadas, y a partir de las cuales se define el disparador sísmico (D_s), de acuerdo con la metodología Mora-Vahrson (1994) y Mora, Saborío, Soto (2020).	44
Tabla 7. Factor de disparo (D_s), derivado de la aceleración pico del terreno (PGA) y la calificación correspondiente de sus rangos. Fue incluida, también la relación entre la intensidad de Mercalli Modificada (IMM) y PGA, pues en ocasiones es el único tipo de información disponible.	45

Tabla 8. Clasificación de los rangos de los valores paramétricos de la amenaza de la inestabilidad de laderas, disparada solamente por la sismicidad (As; i.e. sismo intenso, durante la estación seca).	46
Tabla 9. Clasificación de la amenaza (Ap) de la inestabilidad de laderas causada por la susceptibilidad intrínseca del terreno (SUSC), disparada por lluvias intensas (estación de lluvias, sin sismo).	47
Tabla 10. Rangos de los valores de la amenaza "total" (i.e. combinada) de la inestabilidad de laderas, en condición crítica (sismo intenso durante la estación de lluvias o simultáneamente con una lluvia intensa).	48
Tabla 11. Reclasificación aplicada a los valores del parámetro Ad (representación semafórica).	49
Tabla 12. Regiones volcánicas de Costa Rica y sus volcanes y características básicas (modificado de Alvarado, 2009). Se mencionan los nombres de los volcanes con sus focos principales adosados en los macizos, pues también podrían generar lahares.	57
Tabla 13. Volcanes de Costa Rica y su clasificación, según los índices especificados. Estos datos fueron tomados del Auker et al., (2015), los datos específicos, para Costa Rica, se encuentran en Brown et al., (2015).	59
Tabla 14. Relaciones entre el tamaño del lahar, modelado según su tirante y el % con respecto a la altura del puente específico, según su capacidad destructiva.	75
Tabla 15. Definición y descripción de los niveles de daños posibles causados por lahares en puentes, según la propuesta metodológica.	76
Tabla 16. Clasificación de la intensidad de la amenaza de lahares, su descripción asociada y un número equivalente del valor, según la proporción del costo de reposición del puente y las implicaciones en el servicio que brinda.	77
Tabla 17. Períodos de recurrencia estimados para diferentes rangos de volúmenes de lahares basados en datos recopilados por Iverson et al. (1998).	78
Tabla 18. Períodos de recurrencia de los lahares y su capacidad destructiva.	79
Tabla 19. Resultados del análisis de vulnerabilidad del puente sobre río Sucio Ruta Nacional 32.	81
Tabla 20. Matriz de correlación entre la intensidad de la amenaza (EI) vs. su frecuencia, en el caso de los puentes expuestos a la amenaza de los lahares.	82
Tabla 21. Escenarios y valores utilizados para estimar el riesgo, de acuerdo con la intensidad y frecuencia de los lahares y con los datos provenientes de las Tablas 14 y 16.	82
Tabla 22. Recomendaciones de acción y mitigación que se podrían implementar en puentes según el riesgo obtenido.	83

Tabla 23. Puentes analizados sobre la RN-32.	86
Tabla 24. Inventario de puentes analizados en la Ruta Nacional 32.	87
Tabla 25. Costos de construcción de los puentes analizados en la Ruta Nacional 32.	87
Tabla 26. Áreas de drenaje de las cuencas hidrográficas asociadas a los ríos de los 5 puentes en estudio.	89
Tabla 27. Caudales máximos instantáneos estimados para los ríos Barbilla y Chirripó.	89
Tabla 28. Caudales máximos estimados para la quebrada Calderón, el río Aguas Claras y el río San Miguel.	90
Tabla 29. Datos utilizados para los cálculos de la socavación en el puente sobre el río Chirripó (Tr=500 años).	97
Tabla 30. Resultados de los cálculos de socavación para el río Chirripó (TR=500 años).	98
Tabla 31. Asignación del índice de socavación y las probabilidades de falla y de funcionalidad, según HAZUS (FEMA, 2022).	101
Tabla 32. Costo de reposición de los puentes analizados (Tr = 1000 años)	102
Tabla 33. Nombre, localización y año de diseño de los puentes evaluados en este estudio.	104
Tabla 34. Aceleración pico efectiva (PGA) y aceleraciones espectrales Sa(0,3s) y Sa(1,0s) obtenidas de los estudios de amenaza sísmica realizados en cada puente evaluado, para los períodos de recurrencia Tr de 1033 y 2475 años	106
Tabla 35. Nombre, tipo, ubicación y año de diseño de los puentes evaluados	108
Tabla 36. Características estructurales de los puentes nuevos evaluados sobre la RN-32	108
Tabla 37. Características estructurales de los puentes rehabilitados evaluados sobre la RN-32	108
Tabla 38. Costos de reposición de los puentes evaluados en el estudio de riesgo	109
Tabla 39. Medianas de aceleración espectral para la aplicación de las curvas de fragilidad en puentes	110
Tabla 40. Factores de modificación, calculados para las clases de puentes evaluadas	110
Tabla 41. Medianas corregidas para la construcción de las curvas de fragilidad para un período de recurrencia de 1035 años	111
Tabla 42. Medianas corregidas para la construcción de las curvas de fragilidad para un período de recurrencia de 2475 años	111
Tabla 43. Probabilidades del daño físico, para los puentes evaluados, según el período de recurrencia de 1033 años	113

Tabla 44. Probabilidades del daño físico, para los puentes evaluados, para el período de recurrencia de 2475 años	113
Tabla 45. Pérdidas económicas estimadas para los diferentes grados del daño, en cada puente	114
Tabla 46. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes nuevos	115
Tabla 47. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes rehabilitados	115
Tabla 48. Medianas de aceleración espectral para la aplicación de las curvas de fragilidad en puentes.	116
Tabla 49. Probabilidades del daño físico en los puentes evaluados, bajo el efecto del CGA, según el período de recurrencia de 1.033 años.	118
Tabla 50. Probabilidades del daño físico, para los puentes evaluados, bajo el efecto de CGA, para el período de recurrencia de 2.475 años	118
Tabla 51. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes nuevos	119
Tabla 52. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes rehabilitados	119

Acrónimos y siglas

A continuación, se presenta una lista de acrónimos utilizados en este documento, junto con sus significados. Esta referencia facilitará la comprensión y permitirá a los lectores seguir el contenido de manera más efectiva.

ACI	Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute)
ACI-CR	Capítulo Costarricense del Instituto Americano del Concreto
CGA	Calentamiento Global Antropogénico
CC	Cambio climático
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica
CIRIA	Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción
CPRI	Índice de Prioridad Calculada del Riesgo, por sus siglas en inglés
DP	Factor de disparo pluviométrico
FEMA	Agencia Federal de Manejo de Emergencias, por sus siglas en inglés
FHWA	Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos
GVP-EI	Gases, vapores y partículas a efecto invernadero
HAZUS	Herramienta para Análisis de Pérdidas y Amenazas, por sus siglas en inglés
HEC-RAS	Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidráulica
IBER	<i>Software</i> para Modelización de Flujo Bidimensional
IDF	Intensidad, duración y frecuencia
ILWIS	Sistema Integrado de Información Geográfica y Análisis de Imágenes, por sus siglas en inglés
IMN	Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica
INDECOPI	Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, por sus siglas en inglés
ISO	Organización Internacional de Normalización
LANAMME	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Acrónimos y siglas

Esta es la continuación de la lista de acrónimos y siglas relevantes para la comprensión clara del documento.

MERCI-CR

Metodología de Evaluación del Riesgo Climático para Infraestructura en Costa Rica

MNT

Modelo numérico del terreno

NEHRP

Programa Nacional de Reducción de Peligros Sísmicos de Estados Unidos

PGA

Aceleración pico del terreno, por sus siglas en inglés

PMP

Pérdida máxima probable

PSA

Pseudoaceleraciones espectrales

RN-32

Ruta Nacional 32

SEPSA

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria

SIG

Sistema de Información Geográfica

SNIT

Sistema Nacional de Información Territorial

USACE

Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

USGS

Servicio Geológico de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés

Organización del documento

El documento está organizado en dos secciones principales: una conceptual y metodológica y la otra con los resultados del estudio sobre la Ruta Nacional 32 (RN-32).

En la primera sección se exploran los conceptos teóricos básicos relacionados con el análisis de las amenazas naturales a las que está expuesta la infraestructura vial y que fueron escogidos para estudiar el corredor vial de la RN-32. Se abordan los temas de la inestabilidad de laderas, sismicidad, lahares y avenidas de los ríos principales que atraviesa la carretera y sus puentes respectivos. Se analizan, también, algunos de los aspectos básicos de los grados de fragilidad y valor económico que intervienen en el análisis de su vulnerabilidad y el estudio del riesgo correspondiente.

La segunda sección contiene los resultados específicos del estudio piloto, realizado para el caso de la RN-32, dentro de los cuales se destacan los elementos fundamentales que deben calcularse y ser tomados en cuenta para la gestión del riesgo, los cuales no deben escapar a los proyectistas, diseñadores, constructores y operadores del corredor vial.

Equipo profesional

El equipo profesional fue coordinado por el consorcio Consultores+DLZ+SismoCon y fue integrado por

- Dr. Sergio Mora Castro, líder del equipo; ingeniero geólogo, especialista en gestión del riesgo.
- Dr. José Pablo Porras Velásquez, ingeniero civil especialista en hidráulica e hidrología.
- M.H. Gerardo Javier Soto Bonilla, geólogo, especialista en evaluación de amenazas naturales y vulcanología.
- M.Sc. Pio Miranda Jenkins, ingeniero civil, especialista en ingeniería sísmica y planificación.
- M.Sc. Oscar Jiménez, ingeniero civil, especialista en hidráulica.
- Dr. Paulo Ruiz Cubillo, geólogo, especialista en evaluación de amenazas naturales y vulcanología.

1. Identificación y priorización preliminar de las amenazas

1.1 Descripción de la ruta

La Ruta Nacional 32 de Costa Rica tiene aproximadamente 127 km de longitud y conecta la ciudad de San José con el puerto de Limón en el Caribe. Fue construida entre 1978 y 1987. Desde su inauguración, la Ruta 32 enfrenta diversos riesgos naturales debido a su ubicación geográfica y condiciones ambientales. Este trayecto atraviesa el Parque Nacional Braulio Carrillo, una zona montañosa y boscosa, lo que la expone a deslizamientos de tierra, especialmente en épocas de lluvias intensas. La alta pluviosidad y la densa vegetación de la región contribuyen al desprendimiento de rocas y sedimentos, lo que afecta la estabilidad de la carretera. En la zona de llanura, la cercanía de esta vía a ríos y quebradas incrementa el riesgo de inundaciones en ciertos tramos, lo cual puede interrumpir el tránsito y deteriorar la infraestructura. La ruta 32 también experimenta variaciones climáticas considerables a lo largo de su extensión, desde el clima húmedo del Valle Central hasta el ambiente más tropical de Limón. Esta diversidad climática intensifica el desgaste de la carretera y las estructuras viales. En términos de riesgo sísmico, Costa Rica se encuentra en una zona de alta actividad tectónica, lo que implica que las estructuras, incluidos los puentes de la ruta 32, deben diseñarse y mantenerse conforme a estrictas normas sismorresistentes. Esta carretera se encuentra cerca de los volcanes Irazú y Turrialba, ambos activos, lo que representa una amenaza adicional. Las erupciones volcánicas pueden generar lahares, que son flujos de lodo, roca y material volcánico que descienden rápidamente por las laderas de los volcanes y, a menudo, terminan en los cauces de los ríos, afectando así los puentes, las zonas aledañas y los tramos viales cercanos.

La empresa China Harbour Engineering Company (CHEC) está actualmente a cargo de la expansión de la ruta 32 en el tramo que va desde el cruce con la ruta 4 en el Río Frío hasta el centro del distrito de Puerto Limón. Este proyecto, iniciado en abril de 2018, tiene como objetivo ampliar la carretera de dos a cuatro carriles en una extensión de 107 km. Entre las obras contempladas en este proyecto se incluye la reconstrucción completa de nueve de los treinta y dos puentes existentes y el refuerzo sísmico de los demás, la construcción de un puente nuevo en cada sitio de puente para la ampliación de la carretera, la construcción de trece nuevos intercambios, veinticuatro puentes peatonales y cinco intersecciones en puntos clave como el Río Frío, Guápiles, Siquirres, Moín y la conexión con la ruta 257 que enlaza con la Terminal de Contenedores de Moín (TCM). Sin embargo, ha enfrentado múltiples retrasos debido a expropiaciones, falta de planes ambientales para la tala de árboles, diseños incompletos al inicio, reubicación de tuberías de servicios públicos y estudios arqueológicos en cinco ubicaciones.

1.2 Identificación de amenazas

Es claro que la ruta 32 requiere una gestión continua y cuidadosa para mitigar los riesgos de deslizamientos, inundaciones y actividad sísmica. Los fenómenos naturales, como las lluvias intensas y los sismos, presentan desafíos significativos para la seguridad y durabilidad de esta importante vía de comunicación en Costa Rica. A partir del historial de atención de emergencias, los mapas de amenaza de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), la experiencia local y el criterio de experto, se han identificado todas las amenazas naturales que podrían afectar los distintos tramos de la ruta. Se consideraron amenazas naturales por disposición de los Términos de Referencia que gobiernan esta contratación, pero en proyectos de aplicación real, conviene analizar también las amenazas socionaturales y antropogénicas.

1.3 Cálculo del índice de prioridad calculada del riesgo (CPRI)

Para cada una de las amenazas naturales identificadas en la Ruta, se aplican los siguientes índices:

Probabilidad de Ocurrencia	Altamente probable	4	Magnitud / Severidad	Catastrófico	4
	Probable	3		Crítico	3
	Posible	2		Limitado	2
	Poco probable	1		Despreciable	1
Tiempo de Alerta	Menos de 6 horas	4	Duración	Más de 1 semana	4
	Entre 6 y 12 horas	3		Menos de 1 semana	3
	Entre 12 y 24 horas	2		Menos de 1 día	2
	Más de 24 horas	1		Menos de 6 horas	1

Además, se consideran los factores de ponderación asociados a cada uno de los componentes de la amenaza de esta forma: $\gamma_P = 0,45$; $\gamma_M = 0,30$; $\gamma_W = 0,15$; $\gamma_D = 0,10$

La Tabla 1 muestra el resultado de identificación y priorización preliminar de amenazas con base en el CPRI.

Tabla 1. CPRI aplicado a la totalidad de la ruta 32

Índice de Prioridad de Riesgo Calculado (CPRI)										Implicaciones para Análisis de Riesgo							
Clase	Grupo	Amenaza Tipo	Probabilidad		+	Magnitud / Severidad		+	Tiempo de Alerta		+	Duración		=	Índice de Prioridad CPRI	Se incluirá?	Comentarios / Fundamentos
			P	$\times \gamma_P$		M	$\times \gamma_M$		W	$\times \gamma_W$		D	$\times \gamma_D$				
NATURALES	Geodinámicas	Sismicidad	3	$\times 0,45$	+	4	$\times 0,30$	+	4	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	3,25	SI	• alto impacto en infraestructura • disparador de otras amenazas
		Tsunami	1	$\times 0,45$	+	2	$\times 0,30$	+	4	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	1,75	NO	
		Erupción volcánica (ceniza, bloques, lava)	1	$\times 0,45$	+	3	$\times 0,30$	+	4	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	2,05	NO	• bajo impacto en infraestructura
		Inestabilidad de laderas	4	$\times 0,45$	+	3	$\times 0,30$	+	4	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	3,4	SI	• alto impacto en infraestructura
		Licuefacción	2	$\times 0,45$	+	3	$\times 0,30$	+	4	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	2,5	COND	• alto impacto en infraestructura • información y tiempo insuficientes
		Lahares torrenciales	2	$\times 0,45$	+	3	$\times 0,30$	+	4	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	2,5	SI	• alto impacto en infraestructura
		Impacto de asteroide	1	$\times 0,45$	+	1	$\times 0,30$	+	1	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	1	NO	
	Hidrometeorológicas	Tormenta geomagnética	1	$\times 0,45$	+	1	$\times 0,30$	+	1	$\times 0,15$	+	2	$\times 0,10$	=	1,1	NO	
		Tormenta eléctrica	4	$\times 0,45$	+	1	$\times 0,30$	+	2	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	2,5	NO	• bajo impacto en infraestructura
		Alta precipitación	4	$\times 0,45$	+	2	$\times 0,30$	+	2	$\times 0,15$	+	2	$\times 0,10$	=	2,9	SI	• alto impacto en infraestructura • disparador de otras amenazas
		Fuertes vientos	3	$\times 0,45$	+	1	$\times 0,30$	+	2	$\times 0,15$	+	2	$\times 0,10$	=	2,15	NO	• bajo impacto en infraestructura
		Huracán	1	$\times 0,45$	+	1	$\times 0,30$	+	1	$\times 0,15$	+	3	$\times 0,10$	=	1,2	NO	
		Tornado	2	$\times 0,45$	+	2	$\times 0,30$	+	2	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	1,9	NO	
		Inundación	4	$\times 0,45$	+	3	$\times 0,30$	+	3	$\times 0,15$	+	3	$\times 0,10$	=	3,45	SI	• alto impacto en infraestructura • disparador de otras amenazas
		Socavación en estructuras	3	$\times 0,45$	+	3	$\times 0,30$	+	4	$\times 0,15$	+	2	$\times 0,10$	=	3,05	SI	• alto impacto en infraestructura
Climáticas	Temperatura extrema - calor	1	$\times 0,45$	+	2	$\times 0,30$	+	1	$\times 0,15$	+	3	$\times 0,10$	=	1,5	NO		
	Sequía	2	$\times 0,45$	+	2	$\times 0,30$	+	1	$\times 0,15$	+	4	$\times 0,10$	=	2,05	NO	• bajo impacto en infraestructura	
	Temperatura extrema - frío	1	$\times 0,45$	+	2	$\times 0,30$	+	1	$\times 0,15$	+	3	$\times 0,10$	=	1,5	NO		
	Granizo/Hielo	1	$\times 0,45$	+	1	$\times 0,30$	+	1	$\times 0,15$	+	1	$\times 0,10$	=	1	NO		

Para este caso específico de la ruta 32, se obtiene que las amenazas prioritarias por considerar son la inestabilidad de laderas, la alta precipitación, las inundaciones, la socavación de estructuras y la sismicidad intensa. Los lahares torrenciales se incluyeron, debido a que pueden generar un impacto muy alto.

1.4 Desarrollo del proyecto

A partir de los resultados del CPRI y considerando la calidad y cantidad de información disponible, se realiza una selección de las amenazas a las que están expuestos los elementos de la infraestructura vial, de acuerdo con su vulnerabilidad respectiva. Esta será la base para el análisis del riesgo del estudio piloto de la ruta 32.

A) Amenaza de inestabilidad de laderas y cortes. Sector montañoso de la Ruta Nacional 32 (Braulio Carrillo) (km 20+000 al km 40+000). Metodología para la Macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas: Mora-Vahrson (1994); Mora-Vahrson-Saborío-Soto (2020).

B) Amenaza de inundaciones fluviales y lahares. Sector del piedemonte y llanura de la vertiente Caribe (km 114+000 al km 128+000). Metodología para inundaciones fluviales: Hazus (FEMA, 2022) y CIRIA (2015).

C) Ambos tramos. Complementados con un análisis de la amenaza sísmica prevalente y el riesgo sísmico asociado a los puentes de carretera: Metodología HAZUS (FEMA, 2020).

D) Ambos tramos. Consideraciones acerca de la influencia del cambio climático sobre las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo (en la medida en que la información y los datos disponibles lo permitan).

2. Macrozonificación de la amenaza de la inestabilidad de laderas: km 20+000 a 40+000, RN-32

2.1 Marco geológico regional del macizo volcánico del volcán Barva

El macizo volcánico del volcán Barva es uno de los cinco edificios que componen la cordillera Volcánica Central de Costa Rica. Una síntesis de la geología y evolución de su geología ha sido realizada por Solano & Soto (2020), la cual se muestra en el mapa de la Figura 1. El sector de los cerros Zurquí, Alvarado (1984) los agrupó como "Conjunto Cerros Zurquí" y mencionó coladas de lava superpuestas entre sí, separadas por piroclastos o autobrechas. Estos cerros, situados al sureste del volcán Barva (Chompipe, Delicias, Tibás, Turú, Caricias, Zurquí, Hondura, Tres Marías y Achiotillal) fueron descritos como "focos volcánicos antiguos" por Sapper (1925), como "Volcán Zurquí" por Bohnenberger (1968), y cuya morfología es distintiva de las adyacentes (Madrigal & Rojas, 1980). Luego, fueron mencionadas también, por BGS & SENARA (1985), Ramírez et al. (1988), Denyer et al. (1994) y Alvarado (2000), como una serie heterogénea de rocas, desde basaltos hasta dacitas, con lavas, tobas, brechas, ignimbritas, lahares y diques. La síntesis cartográfica se basa en los datos no cartográficos de Denyer et al. (1994) y Soto (1994), que nombran a este conjunto de cerros como Paleocordillera y la describen como basaltos olivínicos, andesitas basálticas, brechas, aglomerados volcánicos, ignimbritas, tobas y lahares, los cuales se encuentran cortados por numerosos diques basálticos, todo sobreyacido por coluvios, cenizas y depósitos fluvio-volcánicos.

El macizo del Barva se extiende por ~1400 km² y tiene un volumen, sobre la base del Valle Central y la planicie del norte, de ~325 km³. Se levanta sobre una secuencia de sedimentitas y volcanitas neógenas someras deformadas y falladas, en un apilamiento que cubre cerca de 1.2 millones de años (Ma). Gans et al. (2003), Alvarado y Gans (2012) y Solano & Soto (2020) clasifican la historia

eruptiva del volcán Barva en cuatro períodos, basados en dataciones geoquímicas propias y una recopilación de dataciones: el período ProtoBarva (de 1,2 a 0,89 Ma, quizás hasta ~0.7 Ma) poco conocido; el segundo período fue el crecimiento de focos efusivos denominados PaleoBarva (0,57-0,40 Ma), con varios flujos ignimbríticos y, por último, el NeoBarva (0,26 – 0 Ma) que corresponde con el edificio volcánico actual. El grueso de las rocas son andesitas y andesitas basálticas, con algunos basaltos y andesitas ácidas.

Las rocas del ProtoBarva afloran en los extremos este y norte del edificio (ríos Hondura y Puerto Viejo, respectivamente) y en la parte más distal y antigua del Miembro Belén de la Formación Colima (al sur).

La etapa PaleoBarva incluye lavas y en menor medida piroclastitas muy distales (~600-322 ka) del Miembro Belén, aflorantes en el río Virilla; las ignimbritas de Puente de Mulas (con al menos tres depósitos en el rango de ~500±70 ka), que afloran en los ríos Virilla y Sarapiquí, y en los cerros Zurquí; todas las volcanitas de los cerros Zurquí (~400-500 ka); el Miembro Colima Superior (330 ka, lavas fisurales en el flanco SW); finalmente, con la emisión de la ignimbrita de la Formación Tiribí y la formación de la caldera cuspidal del Barva (322 ka).

La etapa NeoBarva incluye las rocas que tradicionalmente se han nominado Formación Barva, desde lavas distales con edades de hasta 270 ka, hasta los últimos períodos explosivos cuspidales de ~500 años. El Miembro Bermúdez (que aflora al sur y al norte del edificio) se divide en inferior (270-250 ka) y superior (200-400 ka), separados por la avalancha Miembro Coyol y gran parte de las epiclastitas distales del Miembro Lalajuela. Un paquete de piroclastitas y epiclastos (Miembro Carbonal, 40-28 ka) cubre diacrónicamente gran parte del edificio. Lo sobreyacen el Miembro Bambinos (inferior ~28 ka; superior, ¿27-10? ka), las piroclastitas de Porrosatí (proximales, cuspidales, <15 ka), el campo de coladas fisurales Los Ángeles (~10? Ka), y siete conos piroclásticos alineados en el flanco sureste. En el flanco norte se destaca el cono compuesto, dos conitos y los campos de coladas asociadas del Cacho Negro. La secuencia superior de Novara cubre gran parte de la caldera cuspada. Otros conos y cráteres de explosión se identifican en el flanco norte, alineados ~N-S. Dos fallas inversas principales cortan los flancos distales-intermedios norte y sur del volcán, probablemente relacionadas con una combinación de dispersión volcánica y la tectónica del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. Otras fallas neotectónicas cortan el macizo viejo en el noreste (Figura 43). Las fallas indicadas en la Figura 43 han sido trazadas a partir de Denyer et al. (2003, 2009), Linkimer (2003), Fernández (2013), Montero et al. (2013), y Rodríguez (2017).

La secuencia de los cerros Zurquí, llamado Miembro Zurquí o Paleovolcán Zurquí, por Soto (2004), son las rocas andesítico basálticas (pl+aug±ol) que afloran en los ríos Lajas y Tranqueras y la parte alta de la quebrada Caricias, hasta los cerros Zurquí, Caricias y Turú, en el inicio del tramo en estudio y en el túnel. Incluyen lavas, brechas y diques (Figura 46), y algunos lahares interdigitados. En la base del cerro Zurquí, las brechas tienen un aspecto de flujos de bloques y cenizas, alcanzan espesores métricos a decamétricos y forman múltiples cañoncitos y cascadas. La "Ignimbrita del Zurquí", que menciona Pérez (2000: p. 64) a 3 km de la salida del túnel Zurquí, estaría interdigitada con lavas y brechas de este miembro (Figura 45), con edades de 0,4-0,5 Ma (Alvarado & Gans, 2012). En macroscopía, son característicos los cristales visibles de olivino, frescos.

Cerca del túnel se inicia una secuencia de lavas, brechas y lahares interdigitados (Figura 4 y 5), de facies medias a distales, atribuibles a la secuencia del PaleoBarva, con edades del orden de 0,44-0,50 ma (Alvarado & Gans, 2012). En el río Hondura, en gran parte de su cauce medio y hasta su confluencia con el río Sucio (Figura 1 y 4), cerca del puente, son principalmente lavas y otras volcanitas también distales, cuya edad es de alrededor de 0,89 Ma (Alvarado & Gans, 2012), aunque podría ser un rango más amplio.

Figura 1. Mapa geológico del macizo volcánico del Barva y ubicación del tramo de la RN32 (amarillo) con los dos puntos extremos: en el portal caribe del Túnel Zurquí (STZ) y el puente del río Sucio (PRS). Reformado de Solano & Soto (2020).

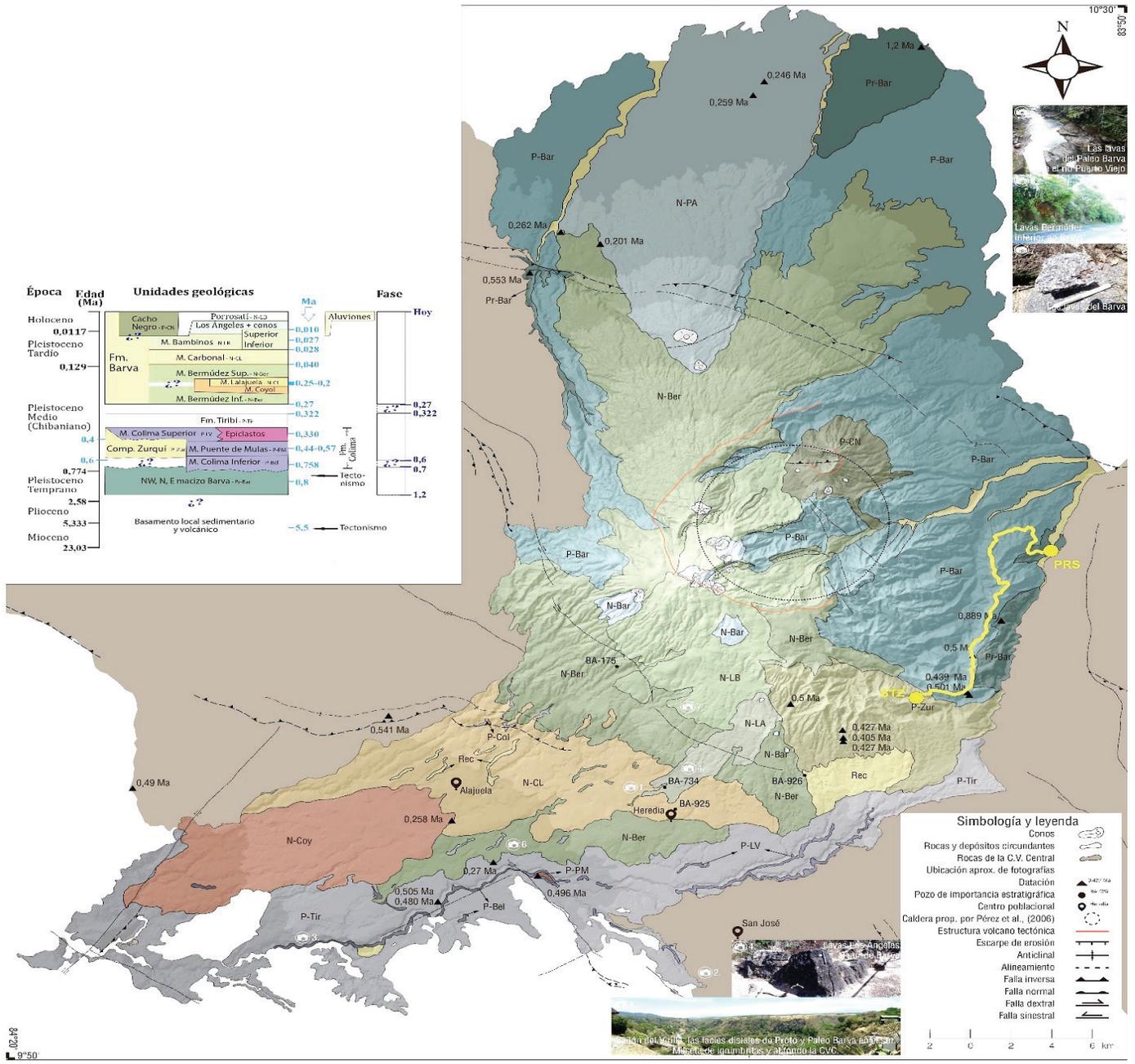
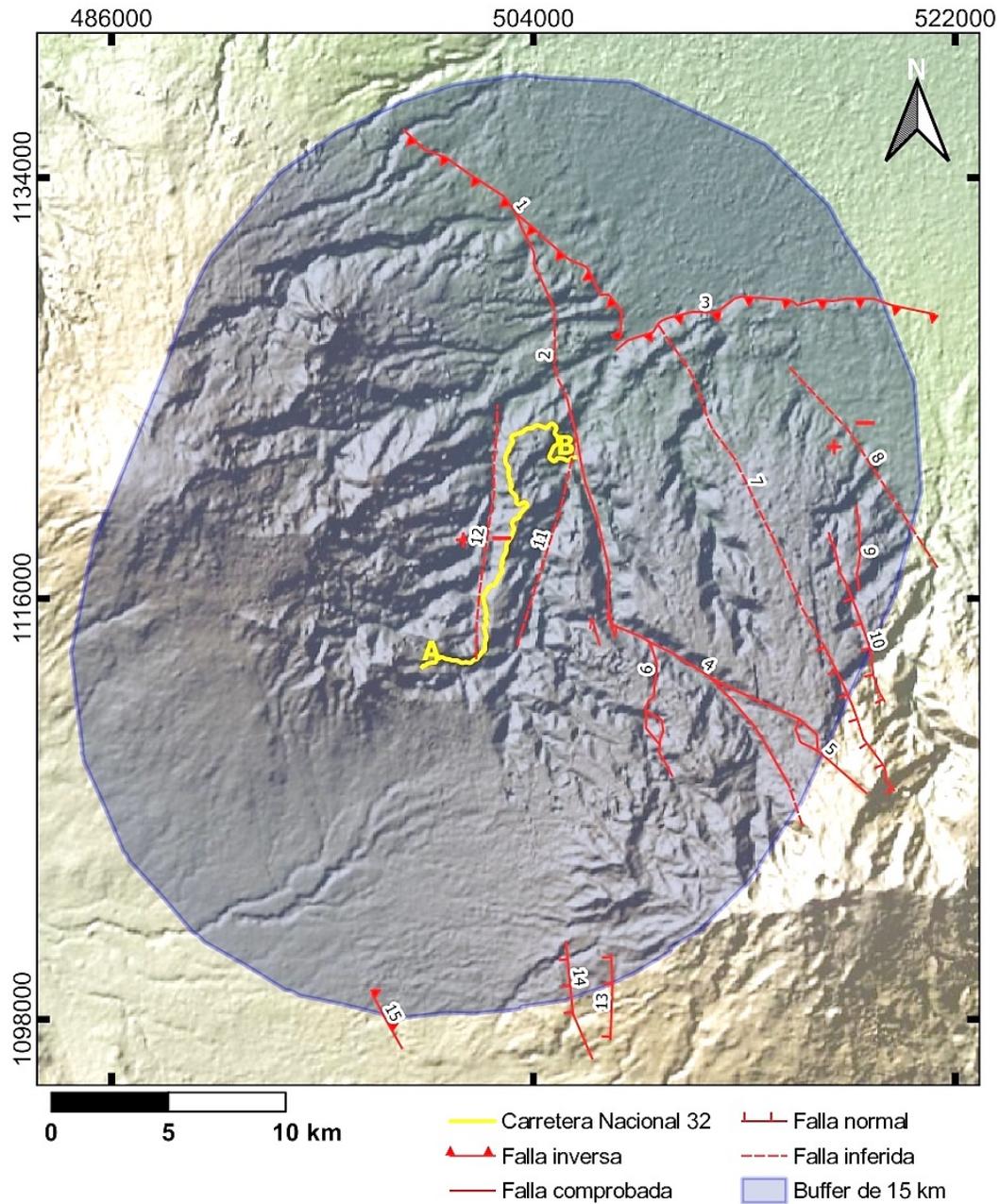


Figura 2. Fallas tectónicas en los macizos volcánicos del Barva e Irazú en su sector Caribe, en un radio ("buffer") de 15 km alrededor del tramo estudiado de la RN-32. El fondo topográfico de sombras fue construido a partir de GeoMapApp. Las fallas han sido trazadas a partir de Denyer et al. (2003, 2009), Linkimer (2003), Fernández (2013), Montero et al. (2013) y Rodríguez (2017). 1: Prolongación San Miguel (Soto, 1999); 2: Río Sucio; 3: Guápiles; 4, 5, 6: Ramificaciones del sistema Río Sucio; 7: Alto Grande; 8: Río Blanco; 9: Ramificación Blanquito; 10: Blanquito; 11: Río Hondura; 12: Río Patria; 13, 14: Lara y asociada; 15: Cipreses borde norte.



2.2 Marco geológico del tramo de montaña de la RN-32 entre el túnel Zurquí y el río Sucio

El marco geológico de este tramo de la RN-32 está ligado al sector norte-caribe de la cordillera Volcánica Central, por lo que –salvo por la presencia de algunos depósitos sedimentarios fluviales, coluviales o coluvio-aluviales de piedemonte, las rocas y depósitos que la componen– son de origen volcánico, asociados al flanco nororiental del macizo volcánico del volcán Barva. El detalle del marco geológico local del tramo de la RN-32 estudiado fue desarrollado por Carballo (2019), complementado con trabajo de campo previo y observaciones geológicas dentro de este proyecto.

Conforme se avanza hacia el norte en los cerros, aparecen facies proximales del Complejo Zurquí y, cerca de los cerros empinados, se encuentran las facies centrales de algunos volcanes erosionados de la fase PaleoBarva, con lavas, piroclastos de caída y flujo proximales, observables cuando son cortados por numerosos diques.

A lo largo del tramo estudiado, las litologías observadas corresponden con basaltos, brechas y flujos piroclásticos, pero más distales, y algunas facies estratigráficamente inferiores que alcanzan la fase ProtoBarva. Los taludes de este tramo presentan ángulos y pendientes elevadas y cobertura vegetal densa, los cuales dificultan el mapeo geológico. Las unidades se han simplificado a partir de las litologías observables predominantes, descritas según su posición estratigráfica (Figura 4).

Las unidades de lavas, visibles en los afloramientos, muestran diaclasamiento denso (Figura 5), el cual varía en cantidad de familias, buzamiento y orientación de los planos predominantes; destacan los que buzaban hacia la carretera (i.e. desfavorables a la estabilidad de los cortes), sobre todo en donde el rumbo de la carretera es N-S y las diaclasas buzaban con direcciones cercanas a E-O, a favor de pendiente. Los detalles sobre las características del factor de susceptibilidad litológica “SI” aplicado para la metodología Mora-Varhson (1994) se presentan en la Tabla 2.

Figura 3. Tramo de la RN-32 donde se analizó la amenaza de la inestabilidad de laderas. Ver el Anexo 1.

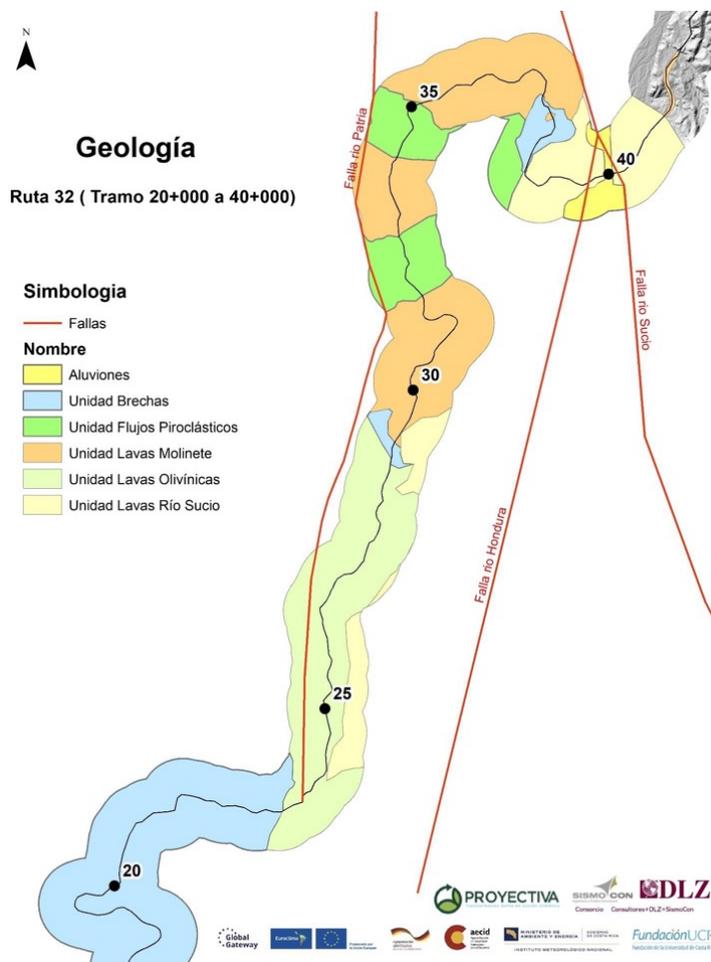


2.2.1 Unidad lavas río Sucio

Esta subunidad se encuentra en los kilómetros cercanos al puente sobre el río Sucio (a ambos lados, en donde forma el macizo rocoso de los bastiones del puente, Figura 5), entre los estacionamientos 38+000 y 40+000, y en el corredor estudiado, bajando hacia el río Hondura (Figura 2 y 4). Corresponden con la secuencia del ProtoBarva, con edades de ~700-900 ka. Subyace a la

unidad general de PaleoBarva, entre los km 24 a 31 al este de la carretera, y en la cercanía del río Sucio. Desde el punto de vista macroscópico, su distintivo son los fenocristales de plagioclasa, de hasta 2 cm de diámetro y pocos piroxenos visibles, en una matriz vítrea (lo que las hace muy susceptibles a la meteorización y conversión del vidrio en arcillas), color gris, que meteorizadas cambian a colores pardos. Son lavas masivas a columnares, en las que predominan las fracturas por lajeamiento y columnar, aleatorio en el tramo de afloramientos, cubierto por vegetación. El nivel freático aparente es somero, en particular en la vecindad del río Sucio. Los suelos húmicos son pobres (<3 m), pero con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m). La granulometría es media, en las facies más porfiríticas de la roca; muestra desarrollo intenso de arcillas a partir de la matriz vítrea, con abundante biomasa cobertora que enmascara la calidad de la roca, sobre todo en tramos fracturados.

Figura 4. Mapa geológico del corredor vial estudiado, en la RN-32.



2.2.2 Unidad de flujos piroclásticos

Afloran a lo largo de la carretera desde el km 29 hasta el 38, particularmente en los estacionamientos 31 a 34 km. Están interdigitados con las Lavas Molinete (Figuras 44 y 45); sobreyacen a las Lavas Río Sucio y subyacen bajo las Brechas, cerca del río Sucio. Corresponden con la secuencia del PaleoBarva, con edades de 440-500 ka (Alvarado & Gans, 2012; Solano & Soto, 2020).

Estos depósitos de flujos piroclásticos presentan heterogeneidad significativa en su composición: matriz cinerítica y porcentaje

muy variable de bloques o clastos juveniles y líticos. Los más comunes presentan bloques decimétricos escoriáceos, de tonalidad oscura cuando están sanos y marrones cuando se meteorizan. También hay flujos soldados con fiammes. La transición entre los distintos flujos varía entre contactos netos y transicionales. Los grados de meteorización son heterogéneos, flujos aparentemente soldados con elevada dureza, al lado de otros más meteorizados y cercanos a un suelo. También hay tobas interestratificadas. El fracturamiento es variable, pseudocolumnar; pero en general son masivos.

El nivel freático aparente es somero. Los suelos húmicos son pobres (<3 m); los regolitos son de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), granulometría media a gruesa debido a la heterogeneidad de los bloques y juveniles que lo conforman, con desarrollo intenso de arcillas formadas a partir de la matriz cinerítica vítrea. Hay una abundante biomasa en la cobertura que enmascara la calidad de la roca.

2.2.3 Unidad Lavas Molinete

Afloran principalmente entre los estacionamientos 28+100 a 29+600 (Figura 3 y 4), con meteorización elevada, en conjunto con las otras unidades de Brechas y Lavas Olivínicas. Subyacen a las brechas y están interestratificadas con la Unidad de Flujos Piroclásticos en el tramo 29 a 37 km. Corresponden con la secuencia del PaleoBarva, con edades de 440-500 ka (Alvarado & Gans, 2012; Solano & Soto, 2020).

Son principalmente andesitas basálticas con piroxenos, lajeadas a masivas. La matriz es mayoritariamente vitrofírica (80 % a 10 %), lo que las hace susceptibles a la meteorización y descomposición del vidrio en arcillas. Predomina el fracturamiento por lajeamiento, aunque es aleatorio en los tramos de afloramiento. El nivel freático aparente es somero. Desarrolla suelos húmicos pobres (<3 m) y con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), granulometría media en las facies más porfiríticas de la roca. Es abundante la biomasa cobertora, la cual enmascara la calidad de la roca, sobre todo en los tramos más fracturados.

2.2.4 Unidad lavas olivínicas

Afloran en los estacionamientos 23+000 a 28+000 de la carretera; entre 28+100 y 29+600, presentan meteorización elevada, en conjunto con las otras unidades de Brechas y Lavas Molinete; están cortadas por la falla Río Patria en la vecindad del km 23. Subyacen a la Unidad de Brechas y corresponden con la secuencia del PaleoBarva, con edades de 440-500 ka (Alvarado & Gans, 2012; Solano & Soto, 2020). Constituyen la base del cerro Zurquí, y aunque el contacto inferior no es visible, se asume sobre las lavas Molinete y los flujos piroclásticos, y el superior es transicional hacia las facies de brechas (Figura 3 y 4).

Son lavas grises, masivas, con fenocristales de olivino <2 mm (1-14 %), sanas a ligeramente meteorizadas (con excepción de 28+100 y 29+600, en donde es elevada). En macroscopía, son característicos los cristales visibles de olivino, frescos. Predomina el fracturamiento por lajeamiento, pero es aleatorio en los tramos de afloramiento. Buena parte presenta una familia de diaclasas que buzan desfavorablemente a la estabilidad (dirección aproximada de 260°), lo cual la hace más susceptible a deslizamientos o caída de material. El nivel freático aparente es siempre somero. Los suelos húmicos son pobres (<3 m), con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), de granulometría media en las facies más porfiríticas de la roca, y desarrollo de arcillas a partir de la matriz vítrea. Hay abundante biomasa cobertora que enmascara la calidad de la roca, sobre todo en tramos fracturados (Figura 5).

Figura 5. Portal caribe del túnel Zurquí, km 20,6 con brechas predominantes. B: Brechas de posibles flujos de bloques y cenizas de andesitas basálticas en la base del cerro Zurquí, río Tranqueras (495373E-1111565N). C: Dique de andesitas basálticas (color gris), corta las brechas tobáceas (color café) en el río Lajas (495723E-1111465N). D: Deslizamiento menor sobre la margen derecha (sentido SJO-LIM) con lavas muy fracturadas (Unidad Lavas Molinete) y brechas asociadas (502864E-1118318N). E: Lavas de la Unidad Río Sucio (ProtoBarva) sobre la margen izquierda del río Hondura, cerca de la confluencia con el río Sucio, cerca del bastión del puente.



2.2.5 Unidad de brechas

Afloran entre los estacionamientos 17+400 (antes del tramo estudiado) al 22+700, e incluye el tramo del túnel del Zurquí (Figura 5). Los afloramientos son relativamente pequeños y aislados por exposición por erosión cerca de cauces en los km 29 y 38 (Figura 3 y 5). Son brechas heterogéneas en la composición de sus clastos volcánicos, que varían de lavas afíricas y lavas porfiríticas a escorias con tamaños vesiculares milimétricos a centimétricos (< 2 cm). Se presentan sanas en los cortes de los ríos y con

meteorización avanzada, en la mayoría de los tramos con cortes naturales. Algunos puntos con taludes artificiales cortan la roca sana a parcialmente sana.

En el tramo 28+100 a 29+600 presentan meteorización elevada, en conjunto con las otras unidades de Lavas Olivínicas y Molinete. Los porcentajes de clastos en la matriz son más homogéneos, <20 % a excepción de casos muy puntuales como 19+000 (~ 30 %). La angularidad de los clastos es elevada y la redondez leve, por lo que se presume que su depositación fue muy rápida. La cementación es moderada a alta. Presentan buena condición mecánica cuando están sanas. La meteorización varía según su ubicación, las zonas más centrales del área de estudio tienden a presentar estados más sanos mientras que en los extremos, la meteorización es mayor.

El nivel freático aparente es siempre somero, los suelos húmicos son pobres (<3 m) y con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), de granulometría media en la matriz, predominantemente limos y arenas de espesor variable. La biomasa cobradora es abundante. La fracturación es profusa, aunque variable, pero poco densa y de poca continuidad, en general.

En la Tabla 2 se presenta la clasificación de estas unidades litológicas, de acuerdo con el factor SI de susceptibilidad litológica, según la metodología Mora-Vahrson (1994).

2.3 Tectónica local

2.3.1 Fallamiento tectónico y neotectónico

Sobre la vertiente del Caribe de la cordillera Volcánica Central, los macizos volcánicos se encuentran cortados por una serie de fallas tectónicas de distinta índole. Los frentes de montaña corresponden, principalmente, a la expresión morfológica de un sistema de fallas inversas que corre desde el borde norte del volcán Poás (falla San Miguel; Montero et al., 2010), se prolonga como una combadura de pliegue y escarpes cortados y disectados en el flanco norte del volcán Barva, en donde cortan a las secuencias del Paleo y NeoBarva (Soto, 1999; Figura 2 y 5), y alcanzan el borde norte del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, con direcciones de E-O a NO.

En el extremo noreste del macizo del Barva y el flanco norte del macizo del Irazú, se encuentra una secuencia de fallas principalmente transcurrentes, con actividad neotectónica (Figura 2). Las direcciones de las fallas son variables, desde N-S a NNW en el sistema de fallas Río Sucio y las fallas Blanquito y Alto Grande, hasta NW, como los ramales de la falla río Sucio hacia el sureste.

Las fallas Río Hondura, Río Patria y Río Blanco corresponden con estructuras poco conocidas, en un área montañosa de acceso difícil, pero presentan una geomorfología prominente, y una sismicidad conspicua. El potencial sísmico estimado, o calculado, oscila entre 6,0 a 6,3 (Mw), aunque las fallas Río Sucio y Guápiles pueden presentar un potencial mayor, del orden de Mw 6,5.

El detalle de las aceleraciones pico usadas para el análisis de la amenaza sísmica y la amenaza de la inestabilidad de laderas (Mora-Vahrson, 1994) se ofrece en la Tabla 6. Las trazas mostradas en la Figura 2 corresponden con los trabajos publicados por Soto (1999), Denyer et al. (2003, 2009); Linkimer (2003); Fernández (2013); Montero et al. (2013) y Rodríguez (2017).

Tabla 2. Resumen de las descripciones de las unidades litológicas principales que afloran a lo largo del corredor vial estudiado de la RN-32.

Símbolo y litología	Composición y condiciones físico-mecánica e hidrogeológicas	Descripción y espesor del suelo (residual, transportado) y de la biomasa	Factor SI y calificación	Comentarios en tramos	Presencia de afloramientos	Orientación de discontinuidades
Unidad Brechas, Miembro Zurquí (Soto, 2004), Pleistoceno medio, ~400-430 ka	Heterogénea en la composición de clastos volcánicos: lavas afiricas y porfiríticas, escorias con vesículas milimétricas a < 2 cm. Los porcentajes de clastos en la matriz son homogéneos: <20 % a excepción de casos como en 19+000 (~ 30 %). Angularidad elevada y redondez leve de clastos, por lo que se presume su deposición fue rápida. Cementación de moderada a elevada. Buena condición mecánica cuando están sanas. El grado de meteorización varía según su ubicación. En los sectores más centrales del área de estudio tienden a presentar estados más sanos, mientras que, en los extremos, la meteorización es mayor. El nivel freático aparenta ser somero.	Suelos húmicos pobres (<3 m) y con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), granulometría media en la matriz, predominantemente limos y arenas. Abundante biomasa en la cobertura.	<ul style="list-style-type: none"> SI=3,25: Mediana susceptibilidad a la inestabilidad de laderas. Suelos residuales diferenciados: SI=3,75 suprayacentes (cuando >3 m). 	<ul style="list-style-type: none"> Sanas en cortes de ríos; meteorización avanzada en la mayoría de los tramos con laderas naturales. Algunos cortes artificiales alcanzan la roca sana a parcialmente sana. 28+100 a 29+600, elevada meteorización, junto con otras unidades de Lavas Olivínicas y Molinete. 	<ul style="list-style-type: none"> Estacionamiento 17+400 (antes de tramo estudiado) a 22+700, incluye el tramo del túnel del Zurquí Afloramientos relativamente pequeños y aislados por exposición por erosión cerca de cauces en los km 29 y 38. 	<ul style="list-style-type: none"> Profusas y muy variables, pero poco densas y continuas en general
Unidad Lavas Olivínicas, Miembro Zurquí (Soto, 2004), Pleistoceno medio, ~440-500 ka	Lavas grises masivas con fenocristales de olivino <2 mm (1-14 %), sana a ligeramente meteorizada (excepción de 28+100 y 29+600, elevada). Predomina el fracturamiento en lajas, pero aleatorio en el tramo de afloramiento. Nivel freático aparente es somero.	Suelos húmicos delgados (<3 m), con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m); granulometría media en las facies porfiríticas de la roca, desarrollo de arcillas a partir de la matriz vítrea. Abundante biomasa en la cobertura enmascara la calidad de la roca en tramos fracturados.	<ul style="list-style-type: none"> SI=3,0: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas SI=3,5: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en donde es cortada por la falla Río Patria, con 100 m a cada lado de la traza de falla. 	<ul style="list-style-type: none"> Subyacen la Unidad de Brechas. 28+100 a 29+600, meteorizadas, junto con unidades de Brechas y Lavas Molinete Cortadas por falla Río Patria en la vecindad del km 23. 	<ul style="list-style-type: none"> Presente en estacionamientos 23+000 a 28+000. 	<ul style="list-style-type: none"> El diaclasamiento es variado; una parte presenta familias de diaclasas que buzan desfavorable a la estabilidad (dirección aproximada de 260°), lo cual la hace más susceptibles a deslizarse y caer hacia la vía
Unidad Lavas Molinete, Paleo-Barva (Solano & Soto, 2020), Pleistoceno medio, ~440-500 ka	Andesitas basálticas con piroxenos, lajeadas a masivas. La matriz es mayoritariamente vitrofírica (8 0% a 10 %), lo que las hace muy susceptibles a la meteorización y conversión del vidrio en arcillas. Predomina fracturas en lajas, pero es aleatorio en el tramo de afloramiento. Nivel freático aparente es somero.	Suelos húmicos pobres (<3 m) y con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), granulometría media a gruesa debida a la heterogeneidad de los bloques y juveniles que lo conforman; desarrollo intenso de arcillas a partir de la matriz cinerítica vítrea. Abundante biomasa en la cobertura, la cual enmascara la calidad de la roca.	<ul style="list-style-type: none"> SI=3,5: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas SI=4,0: Elevada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en los sectores en donde es cortada por la falla Río Patria, con 100 m a cada lado de la traza de falla. 	<ul style="list-style-type: none"> 28+100 a 29+600, elevada meteorización, en conjunto con las otras unidades de Brechas y Lavas Olivínicas. 	<ul style="list-style-type: none"> Subyacentes a las brechas e interestratificadas con la Unidad de Flujos Piroclásticos en el tramo 29 a 37 km. 	<ul style="list-style-type: none"> Variada, con predominancia de lajas Familia de diaclasas buza hacia la carretera (desfavorable a la estabilidad). Si el rumbo de la carretera es N-S las diaclasas afectan la estabilidad de los taludes cuando buzan con dirección E-W
Unidad Flujos Piroclásticos, Paleo-Barva (Solano & Soto, 2020), Pleistoceno medio, ~440-500 ka	Estos depósitos de corrientes piroclásticas o flujos son de composición heterogénea: matriz cinerítica y porcentaje variable de bloques o clastos juveniles y líticos. Los más comunes, observados, presentan bloques decimétricos escoriáceos de tonalidad oscura cuando están sanos y marrones cuando se meteorizan. Hay también flujos soldados con fiammes. La transición entre los distintos flujos varía de contactos netos a transicionales. Los grados de meteorización son heterogéneos: Hay flujos aparentemente soldados con dureza elevada, al lado de otros más meteorizados y con aspecto de suelo. También hay tobas interestratificadas. Fracturas variables, pseudocolumnar, pero en general son masivos. Nivel freático aparente es somero.	Suelos húmicos delgados (<3 m) y con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), con granulometría media a gruesa debida a la heterogeneidad de los bloques y juveniles que lo conforman; desarrollo intenso de arcillas a partir de la matriz cinerítica vítrea. Abundante biomasa en la cobertura, la cual enmascara la calidad de la roca.	<ul style="list-style-type: none"> SI=3,25: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas SI=3,75: Elevada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en los sectores en donde es cortada por la falla Río Patria, con 100 m a cada lado de la traza de falla, al oeste de los km 31 a 35 	<ul style="list-style-type: none"> En 31+900 los flujos tienen un nivel de meteorización bajo, matriz de ceniza (53 %) con fiammes abundantes y pocos clastos (7 %) que identifican una toba de flujo cristalina soldada 	<ul style="list-style-type: none"> Los flujos o corrientes piroclásticas afloran a lo largo de la carretera, se extienden en las estaciones 31 a 34 km, interestratificadas con las Lavas Molinete, y sobreyacen las Lavas Río Sucio o subyacen las Brechas hacia cerca del río Sucio 	<ul style="list-style-type: none"> Subhorizontales y subverticales poco densas.

Símbolo y litología	Composición y condiciones físico-mecánica e hidrogeológicas	Descripción y espesor del suelo (residual, transportado) y de la biomasa	Factor SI y calificación	Comentarios en tramos	Presencia de afloramientos	Orientación de discontinuidades
Unidad Lavas Río Sucio, ProtoBarva (Solano & Soto, 2020), Pleistoceno inferior, ~800-900 ka.	Lavas masivas a columnares, porfíricas, con plagioclasas de tamaño centimétrico (1-2 cm) y pocos o ningún piroxeno u otros silicatos visibles. La matriz es vitrofírica con tonalidad oscura, lo que las hace muy susceptibles a la meteorización y conversión del vidrio en arcillas. Las rocas son de coloración gris marrón con una pátina superficial de coloración café. Predominan fracturas en lajas y columnas, aleatorias en el tramo de afloramiento, cubierto por vegetación. Nivel freático aparente es somero, en particular en la vecindad del río Sucio.	Suelos húmicos pobres (<3 m) y con regolitos de desarrollo moderado a intenso (3-10 m), granulometría media en las facies más porfíricas de la roca, desarrollo intenso de arcillas a partir de la matriz vítrea Abundante biomasa en la cobertura que enmascara la calidad de la roca, sobre todo en tramos fracturados.	<ul style="list-style-type: none"> SI=3,0: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas SI=3,5: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en los sectores donde es cortada por las fallas Río Hondura y Río Sucio, con 100 m a cada lado de la traza de falla. 	<ul style="list-style-type: none"> Subyace a la unidad general de Paleo-Barva, entre los km 24 a 31 al este de la carretera y en la cercanía del río Sucio, entre las estaciones 38+000 y 40+000, donde forma los apoyos del puente a ambos lados. 	<ul style="list-style-type: none"> Los más visibles son en los apoyos del puente sobre el río Sucio, y aislados en la bajada hacia el puente por la carretera. 	<ul style="list-style-type: none"> Subverticales poco densas (dm a m de separación: columnas), y variadas con predominancia de lajas en otros sectores.
Q-al: Aluvión fluvial, Cuaternario	Cantos, gravas, arenas, limos; pobre a parcialmente consolidados y compactos; resistencia al corte, moderada a baja; nivel freático somero (<2 m), drenaje moderado a elevado. Posibilidad de licuefacción sísmica durante eventos intensos.	Suelos húmicos delgados (<1 m) de desarrollo pobre a moderado. Aguas ácidas producto de disolución de minerales sulfurados. Paso del río Sucio, en medio de los bastiones y la pila central.	<ul style="list-style-type: none"> SI=4,50: Elevada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas. SI=5,00: Cruce de fallas neotectónicas en río Sucio, cerca del puente 	<ul style="list-style-type: none"> Ríos Hondura y Sucio cerca de su confluencia en la periferia del puente sobre el río Sucio. 	<ul style="list-style-type: none"> En el cauce de los ríos Hondura y Sucio, cercanos al puente y paso de la RN 32. 	<ul style="list-style-type: none"> Ninguna.
Cruces con fallas neotectónicas, Pleistoceno-Holoceno	Zonas de fallas neotectónicas activas, con anchos variables. Se castiga la traza en un ancho de 100 m con 0,50 más al valor de las rocas que corta.	Zonas con fracturación profusa y desarrollo de arcillificación en ciertos puntos, con una mayor permeabilidad en general. Desarrollo mayor de suelos en superficie, de hasta varios m.	<ul style="list-style-type: none"> SI=0,50 adicional al valor de la unidad que cruza, en un ancho de 200 m. 	<ul style="list-style-type: none"> Cruces con fallas neotectónicas, Pleistoceno-Holoceno 	<ul style="list-style-type: none"> Zonas de fallas neotectónicas activas, con anchos variables. Se castiga la traza en un ancho de 100 m con 0,50 más alto al valor de las rocas que corta. 	<ul style="list-style-type: none"> Fracturación profusa y desarrollo de arcillas en algunos puntos; con una mayor permeabilidad en general. Desarrollo mayor de suelos en superficie, de 1 a varios m.

2.3.2 Sismicidad en el área de estudio

La sismicidad de la región Central y Caribe de Costa Rica tiene una actividad importante y muchos de los sismos han afectado el área estudiada. Varios sismos de magnitud ($M_w \geq 5,0$) importantes y superficiales se han registrado históricamente en el arco interno. La mayoría de ellos se alinean al sur del Valle Central, pero otros sucedieron al norte, en la cordillera Volcánica Central, principalmente en los macizos de los volcanes Poás, Barva e Irazú.

Los sismos al noroeste de la cordillera Volcánica Central incluyen un sismo sucedido en 1772 ($M_w 6,0$) con origen en la falda suroeste del Barva (IMM de VI-VII en el sector del tramo estudiado en la RN-32 (Figura 6). El terremoto de Fraijanes del 30 de diciembre de 1888, $M_w 6,0$ afectó las ciudades de San José (IMM de VI-VII en el sector del tramo estudiado de la RN-32 (Figura 6), Alajuela, Cartago y Heredia. Hay registros de varios sismos en esta región: Toro Amarillo de 1911, $M_w 6,1$, asociado con la falla Sabanilla (al suroeste del Poás), y Sarchí de 1912, $M_w 6,2$, que causó la muerte a 15 personas. En 1955 sucedió otro, también llamado de Toro Amarillo ($M_w 5,9$), de una fuente sísmica aledaña al de 1911 (Montero et al., 2010). Las intensidades máximas IMM en el sector del tramo estudiado de la RN-32 alcanzaron IV a VI (Figura 6).

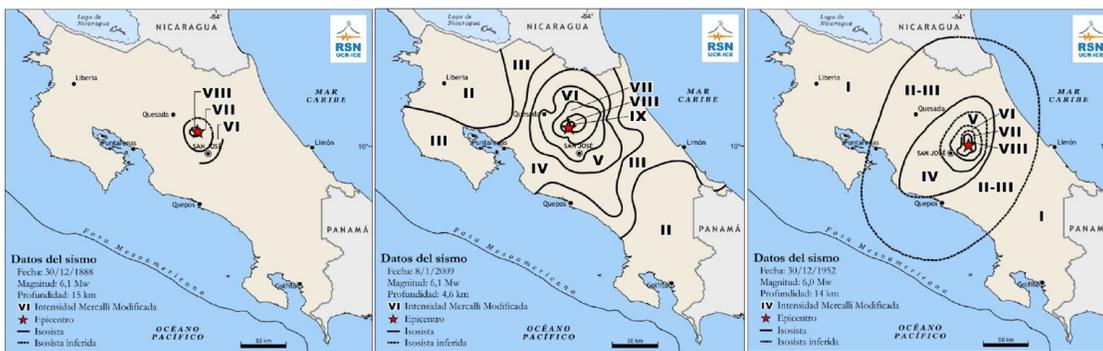
El sismo más reciente, de importancia en esta área, sucedió el 8 de enero del 2009 y fue denominado terremoto de Cinchona ($M_w 6,2$, profundidad 6 km); causó daños importantes en un radio de 10 km alrededor del área epicentral, con saldo de 25 muertos,

5 desaparecidos, 100 heridos, 125.000 afectados y US\$ 485 millones en pérdidas; se sintió con una intensidad VII en el sector estudiado de la RN-32 (Méndez et al., 2009; Montero et al., 2009; Figura 6).

De los sismos mencionados, con magnitud importante, superficiales, con epicentro en el arco volcánico, destaca el terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 (Mw 6,0), sucedido en la falda noroeste del volcán Irazú; es el sismo más importante en el área de estudio. Tuvo una intensidad máxima de VIII en Patillos y de VI-VII, quizás hasta VIII en el tramo estudiado de la RN-32 (Figura 6). Hubo 21 muertos causados por el sepultamiento de casas debido a deslizamientos, de dimensiones considerables. En el sector oeste del volcán Irazú, Patillos, Corralillo, Cabeza de Vaca, Piedra de Tres Filos y Tierras Morenas. Los asentamientos y agrietamientos fueron abundantes en el área epicentral (Montero & Alvarado, 1995).

El sismo más reciente, dentro del arco magmático oriental, se produjo el 30 de noviembre del 2016 cerca de Capellades, en la ladera sur de los volcanes Irazú y Turrialba, con una Mw 5,5, aunque la IMM registrada para el sector este del tramo estudiado de la RN-32 solo alcanzó IMM-III.

Figura 6. Mapa de intensidades (IMM) de los terremotos de: a) Fraijanes, 30 de diciembre de 1888, b) Cinchona, 8 de enero de 2009 (derecha) (Linkimer & Vargas, 2015), y c) Patillos, 30 de diciembre de 1952 (Montero & Alvarado, 1995; modificado por Linkimer & Vargas, 2015).



2.4 La amenaza de la inestabilidad de laderas (Ad) en el tramo analizado de la RN-32

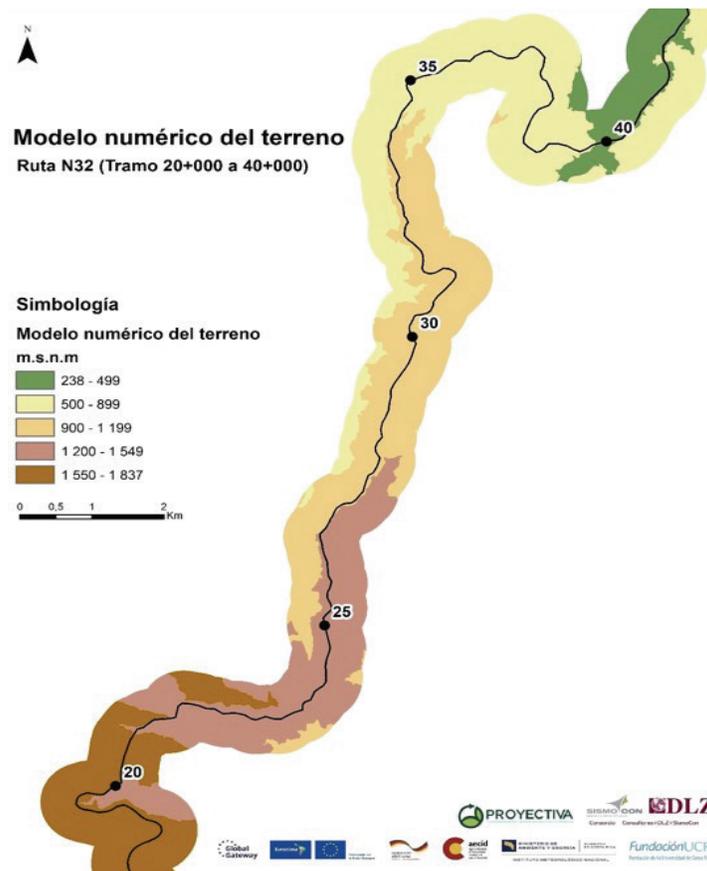
2.4.1 Estimación de la amenaza

Una vez determinados los factores e indicadores correspondientes y antes descritos, así como su distribución espacial y temporal, puede determinarse la amenaza de la inestabilidad de laderas mediante la combinación de los valores paramétricos de la susceptibilidad litológica (Sl), del relieve (Sp) y la humedad prevalente (Sh), y de los disparadores de la intensidad sísmica (Ds) y de las lluvias (Dp), mediante el Sistema de Información Geográfica y aplicando la "calculadora espacial", píxel por píxel. De acuerdo con toda la información recabada, es posible identificar varias áreas, en todos los tramos del corredor vial Carretera, en donde la inestabilidad de laderas puede materializarse por causa de las propiedades geomecánicas intrínsecas del terreno, aparte de las pendientes de la ladera, la humedad prevalente y de la influencia de las lluvias y/o de los sismos intensos. Esto es así porque puede sobrepasarse el umbral que conduce hacia la reducción del factor de seguridad (FS) por debajo del equilibrio límite ($FS < 1$). Esta situación se reconfirmará al observar los mapas de la amenaza "total" y "semafórica" de la inestabilidad de laderas que aparecen en las Figura 23 y Figura 22. Las diferencias sustanciales, más notorias hacia el sureste del corredor vial, en donde coincidentemente se involucran intensidades pluviométricas y sísmicas más elevadas, de acuerdo con los análisis realizados y descritos en los capítulos anteriores, serán explicadas enseguida.

2.4.2 Susceptibilidad derivada del relieve

A partir de las curvas de nivel, a cada 1 metro (proveniente de un levantamiento con tecnología LiDAR) se procedió, en primer lugar, a proyectar los datos al sistema CRTM05, ya que originalmente se habían incorporado dentro de una proyección CR14. A partir de este subproducto, se procedió a calcular el modelo numérico del terreno, con 1 metro de precisión y en el corredor vial, de 500 metros a cada lado de la línea de centro de la Ruta Nacional 32 (RN-32) y a escala 1:50.000. En la Figura 7 se muestra la representación cartográfica del modelo numérico del terreno (MNT) del tramo km 20+00 hasta 40+000. Como se aprecia, las elevaciones sobre el nivel del mar se extienden desde 238 m s.n.m. hasta 1837 m s.n.m. en el corredor vial. Las áreas aledañas, no incluidas en esta representación, se encuentran a elevaciones menores y mayores, respectivamente.

Figura 7. Modelo numérico del terreno, representado en los rangos de sus pisos altitudinales.
Fuente; elaboración propia



Tómese en cuenta que, para construir este mapa, fue necesario ajustar la ruta del corredor vial al modelo LiDAR, normalizada con una escala aproximada de 1:4 000. Esto se realizó dentro del propio modelo LiDAR y aprovechando las imágenes Google EARTH como respaldo para la interpretación geomorfológica. A partir de este modelo, se definió la línea centro de la carretera, la cual provenía de la escala 1:50.000.

2.4.3 Factor del relieve (pendientes; Sp)

El factor Sp de la metodología Mora & Vahrson se define según el indicador del relieve mediante las pendientes de las laderas.

Con el propósito de darle continuidad al factor, se aproximaron los rangos de las pendientes (Tabla 3), en grados, a una función de ajuste obtenida de la hoja Excel y que, en este caso, corresponde a una ecuación cuadrática, la cual se muestra a la Figura 8.

En la Figura 9, se muestra la relación entre las pendientes, en grados y porcentajes, utilizada para definir el límite máximo de inestabilidad de laderas del método Mora & Vahrson, el cual puede variar según la escala del modelo. Las calificaciones de "Elevado" se acotaron a partir de 35 grados. Para las pendientes mayores a 50 grados, la función fue acotada al valor máximo del Factor Sp, es decir 5. En la Figura 10 se incluyen las pendientes en grados, que se presentan entre 0 grados a 77,2 grados, con una media de 25,6 grados.

Tabla 3. Rangos del factor de pendientes (Sr) en grados y porcentajes

Calificación	(°)	(%)
0 + 1 = Nulo a muy bajo	≤ 5	≤ 7
2 = Bajo	> 5 a 20	>7 a 34
3 = Mediano	>20 a 35	>34 a 68
4 = Elevado	>35 a 50	>68 - 121
5 = Muy elevado	> 50	> 121

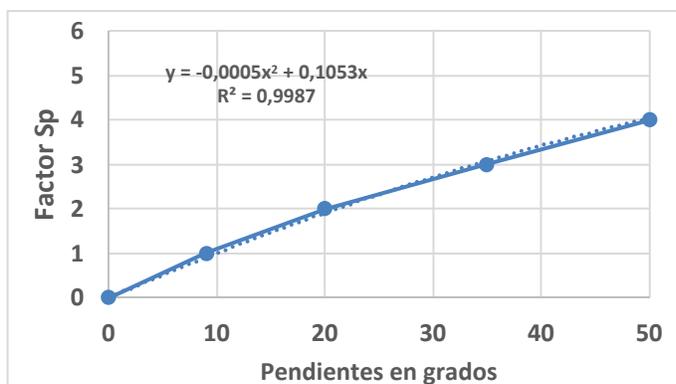


Figura 8. Relación entre la pendiente del terreno expresada en grados y el factor Sp

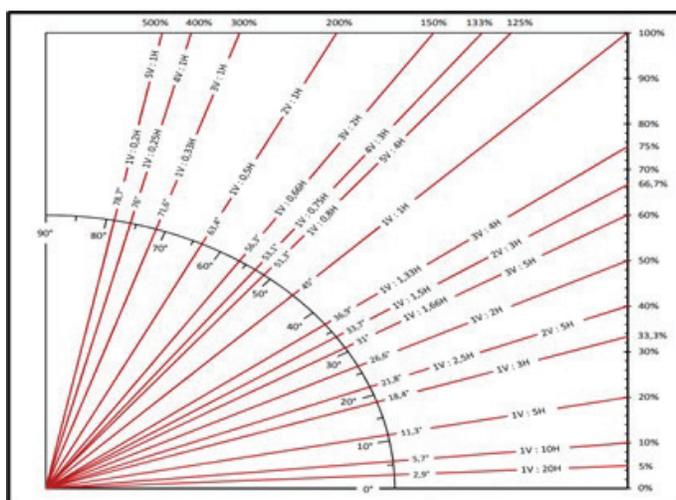


Figura 9. Relación de grados pendientes y porcentajes

La relación entre la pendiente del terreno (expresada en grados) y el factor Sp, se explica mediante la función (Figura 8) cuadrática:

$$y = -0,0005x^2 + 0,1053x$$

... en donde X = Pendiente (expresadas en grados) y Y = Rangos asignados al factor Sp.

Mediante el módulo de álgebra de la calculadora de ráster, se aplicó dicha ecuación y se obtuvo el resultado que se puede visualizar en la Figura 9, cuyos valores oscilan entre 0 y 5,15. Dado que la metodología Mora & Vahrson limita el valor máximo para este factor en 5,0, se procedió a aplicar un condicional del álgebra de mapas ráster, con el fin de ajustar esos valores y de tal forma que a aquellos mayores de 5 se les asigna el valor máximo de 5,0.

En los mapas de las Figura 10 y 11 se muestra el resultado cartográfico de la distribución espacial de los valores de la pendiente y del factor Sp del tramo estudiado en la RN-32. Con esto se demuestra que la carretera atraviesa un segmento de la cordillera Volcánica Central, dentro de un relieve muy abrupto y que desde ya indica la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas por ello.

Figura 10. Pendientes, expresadas en grados y sus rangos respectivos, según la tonalidad del color asignado.

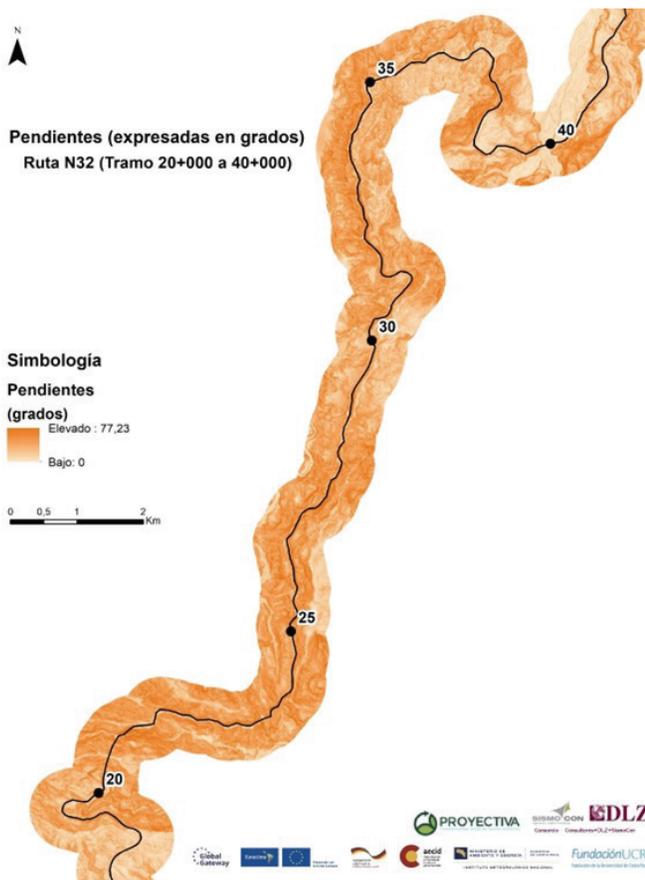
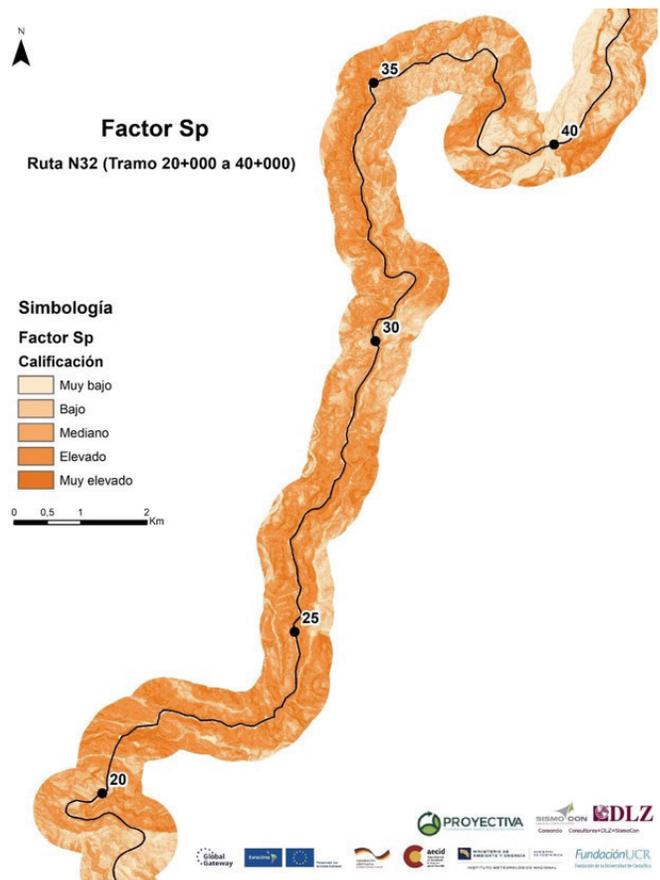


Figura 11. Factor de pendientes (Sp) en función de pendientes.



2.4.4 Factor de susceptibilidad litológica (SI)

Para establecer el factor litológico (SI) y sus rangos y variaciones, se tomó como base el mapa geológico (Figura 7), del cual, y para establecer el contexto apropiado se incluyó la información geológica disponible de las cuencas de los ríos Sucio, Hondura y Patria. Adicionalmente, se identificaron las estructuras (fallas) tectónicas identificadas, para efecto de tomarlas en cuenta en los aspectos de la amenaza sísmica correspondientes y de la calidad geomecánica de los terrenos, agregándoles un buffer de influencia de 200 metros de ancho sobre su traza cartografiada.

El mapa, luego, fue "recortado", según el área del corredor vial analizado y su buffer de 500 metros a cada lado del eje de la RN-32, como se puede ver en la Figura 12 y la Tabla 4. A partir de esto, se realizó el análisis de la susceptibilidad de las unidades estratigráficas, a las cuales se les asignó su factor litológico correspondiente, lo cual se aprecia en el resumen de la Tabla 4. En la Figura 13 se puede visualizar la distribución del factor SI dentro del corredor vial.

Figura 12. Mapa geológico del área estudiada. Fue agregado un buffer de 200m sobre su traza cartografiada, para tomarlo en cuenta el posible efecto de degradación de las propiedades geomecánicas del terreno (e.g. fracturas, alteración hidrotermal, presencia de agua, etc.) dentro del análisis para asignar los valores correspondientes del factor de susceptibilidad litológica SI.

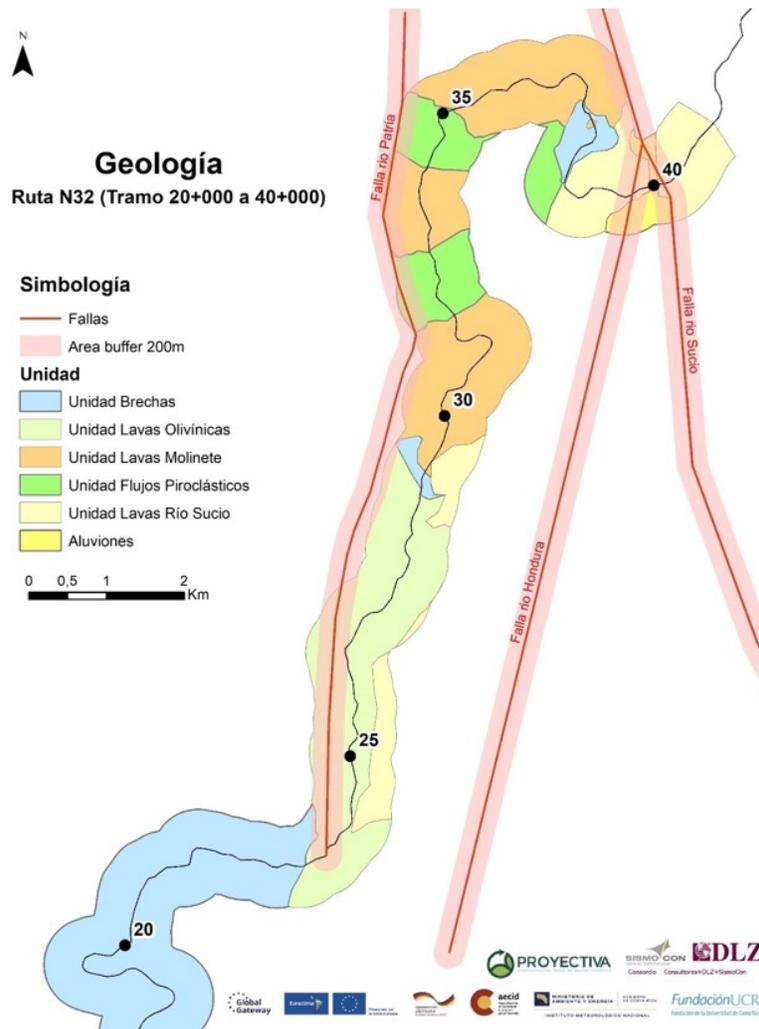


Tabla 4. Calificación del SI de las unidades descritas acorde con las observaciones de campo

Símbolo y litología	Descripción
Unidad Brechas, Miembro Zurquí (Soto, 2004), Pleistoceno medio, ~400-430 ka	SI=3,25: Mediana susceptibilidad a la inestabilidad de laderas. Suelos residuales diferenciados: SI=3,75 suprayacentes (cuando >3 m).
Unidad Lavas Olivínicas, Miembro Zurquí (Soto, 2004), Pleistoceno medio, ~440-500 ka	SI=3,0: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.
Unidad Lavas Molinete, PaleoBarva (Solano & Soto, 2020), Pleistoceno medio, ~440-500 ka	SI=3,5: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en los sectores en donde es cortada por la falla Río Patria, con 100 m a cada lado de la traza de falla. SI=3,5: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.
Unidad Flujos Piroclásticos, PaleoBarva (Solano & Soto, 2020), Pleistoceno medio, ~440-500 ka	SI=4,0: Elevada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en los sectores en donde es cortada por la falla Río Patria, con 100 m a cada lado de la traza de falla. SI=3,25: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.
Unidad Lavas Río Sucio, ProtoBarva (Solano & Soto, 2020), Pleistoceno inferior, ~800-900 ka	SI=3,75: Alta susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en los sectores donde es cortada por la falla Río Patria, con 100 m a cada lado de la traza de falla, al oeste de los km 31 a 35. SI=3,0: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.
Q-al: Aluvión fluvial, Cuaternario	SI=3,5: Moderada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en los sectores donde es cortada por las fallas Río Hondura y Río Sucio, con 100 m a cada lado de la traza de falla. SI=4,50: Elevada susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.
Cruces con fallas neotectónicas, Pleistoceno-Holoceno	SI=5,00: Cruce de fallas neotectónicas en las cuencas de los ríos Sucio y Hondura y en la vecindad del puente sobre el río Sucio. SI=0,50 adicional al valor de la unidad que cruza, en un ancho de 200 m. De oeste a este, son las fallas Río Patria, Río Hondura y Río Sucio.

2.4.5 Factor de humedad (Sh)

En el caso del tramo montañoso de la Ruta Nacional 32, se contó con información de precipitación mensual en las estaciones meteorológicas 69600 Cerro Zurquí, 69604 La Montura, 69626 Quebrada Gonzáles, 69721 Hidroeléctrica General y 69731 Rainforest Braulio Carrillo, operadas las 3 primeras por el Instituto Costarricense de Electricidad y las 2 últimas por el Instituto Meteorológico Nacional. Los períodos de registro son diferentes entre las estaciones, pero abarcan desde el 1999 hasta el 2023, por lo que son representativos del clima de los últimos 25 años.

De acuerdo con los datos de las estaciones meteorológicas disponibles, prácticamente para todos los meses la precipitación media mensual está por encima de los 250 mm, lo cual se traduce en un factor de susceptibilidad a la humedad prevalente en el terreno (Sh) muy elevada, prácticamente constante a todo lo largo del corredor vial estudiado en la RN-32. Esto se puede visualizar en la Figura 14.

Figura 13. Factor litológico (SI) del área de estudio.

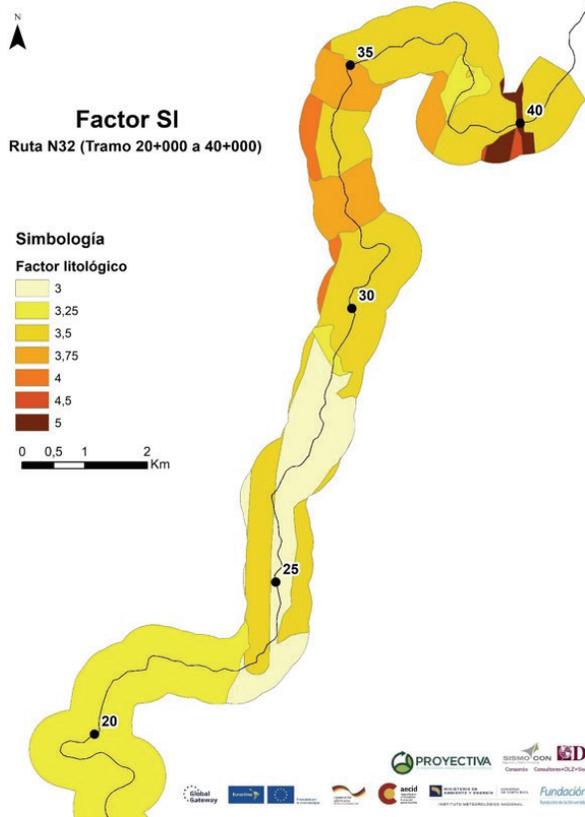
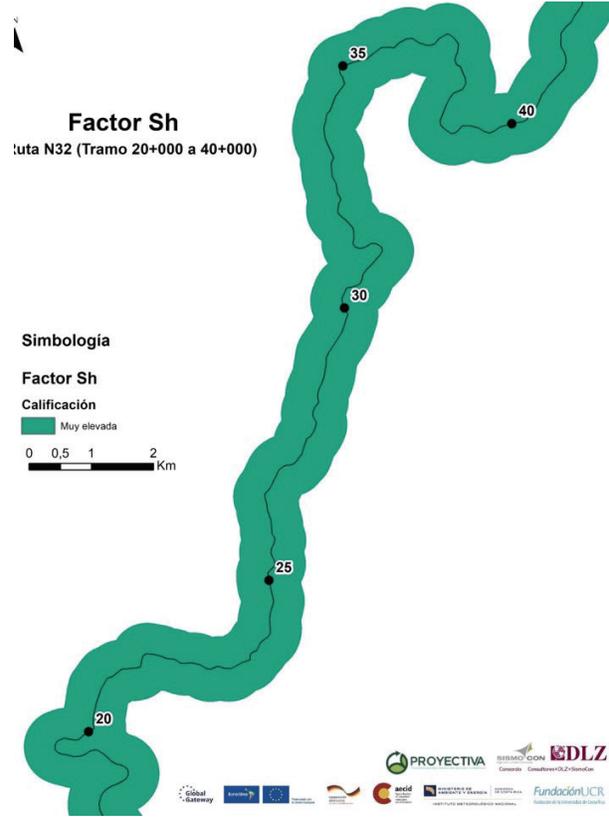


Figura 14. Factor de humedad (Sh) del área de interés.



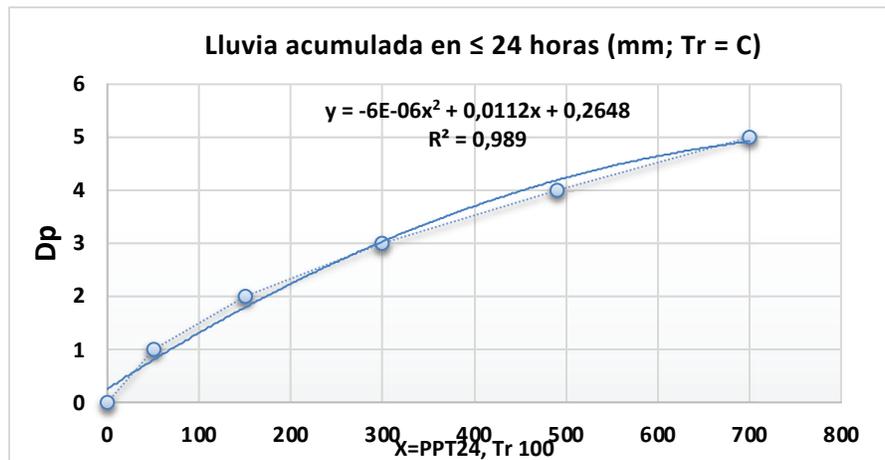
2.4.6 Factor de disparo derivado de la intensidad de lluvia (Dp)

El factor de disparo derivado de la intensidad de lluvia (Dp) se deduce a partir de la información disponible de la lluvia de 24 horas, con los datos registrados en las cinco estaciones pluviométricas mencionadas anteriormente, para un período de recurrencia de 100 años. En el Tabla 5 y en la Figura 15 se representa la relación entre dicha precipitación con el factor de disparo de la pluviosidad (Dp) y su calificación respectiva.

Tabla 5. Relación de la lluvia máxima en 24 horas (o menos tiempo), con el factor de disparo Dp, según la metodología Mora-Vahrson (1994)

Lluvia acumulada en ≤ 24 horas (mm; Tr = 100 años)	Calificación	Factor Dp
≤ 60	Muy bajo	1
61 a 220	Bajo	2
221 a 380	Mediano	3
381 a 540	Elevado	4
≥ 541	Muy elevado	5

Figura 15. Relación entre la precipitación para 24 horas, con el período de recurrencia $Tr=100$ años y los rangos del factor de disparo derivado de la intensidad de lluvia Dp , según la metodología Mora-Vahrson (1994)



Si bien se contó con información de cinco estaciones, finalmente solo se emplearon tres (Cerro Zurquí, La Montura y Quebrada González) debido a la extensión de los registros disponibles y a su proximidad al tramo de carretera en estudio. A los registros de cada una de ellas se les realizó un ajuste probabilístico empleando la distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV, por sus siglas en inglés), obteniéndose estimaciones de la precipitación máxima en 24 horas para el período de recurrencia de 100 años. Los valores estimados fueron de 365 mm/hr para Cerro Zurquí, 560 mm/hr para La Montura y 518 mm/hr para Quebrada González. Es notoria la muy alta pluviosidad de la zona, donde los valores máximos en 24 horas, para el período de recurrencia analizado, son del mismo orden de magnitud de las precipitaciones mensuales, lo que significa que un solo evento de 24 horas de duración puede acumular la lluvia típica de 1 mes.

A partir de la distribución de los valores de la relación de la precipitación máxima de 24 horas, para un período de recurrencia Tr de 100 años, puede definirse el factor de disparo de las lluvias (Dp), según la metodología Mora-Vahrson. Establece una ecuación de correlación, derivada del cálculo obtenido en una hoja Excel, como se aprecia en la Figura 16 y que se expresa de la manera siguiente:

$$Dp = -6E-06x^2 + 0,0112x + 0,2648$$

... en donde $X = PPT_{24,100}$ corresponde con la lluvia máxima en 24 horas, para un período de recurrencia de 100 años.

En la Figura 16 se muestra la distribución espacial de las precipitaciones máximas en 24 horas, con un período de recurrencia de 100 años, obtenida a partir del análisis de los datos de las estaciones pluviométricas disponibles en la región.

Utilizando el módulo de álgebra de mapas de ArcGis para archivos ráster, al aplicar la ecuación anterior, el resultado inicial muestra valores para el factor Dp entre 3,06 y 6,39 indicativos de una muy elevada intensidad de la lluvia, para 24 horas y Tr 100 años en el área estudiada (Figura 12). Dado que el factor de disparo Dp de la metodología Mora & Vahrson indica un rango de 1 a 5, es necesario acotar el resultado. Para esto se utiliza un condicional del álgebra de mapas ráster, con el fin de ajustar los valores de tal forma que aquellos mayores a 5 se les asigna el valor de 5, el resultado del factor Dp en el área de interés se visualiza en la Figura 18.

Figura 16. Distribución espacial de la precipitación máxima, para 24 horas y Tr=100 años, en el área del corredor vial estudiado de la RN-32 y sus alrededores

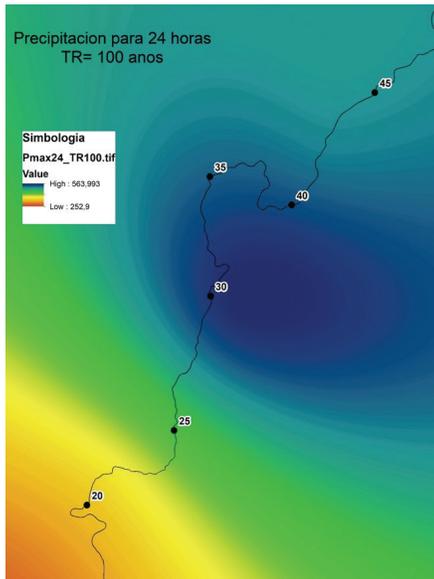


Figura 17. Distribución del factor de disparo de la lluvia Dp, obtenido mediante la aplicación de la ecuación cuadrática Dp vs. X=PPT_{24,100}

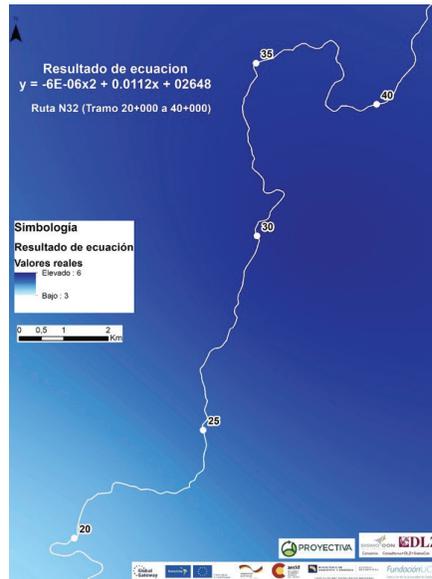
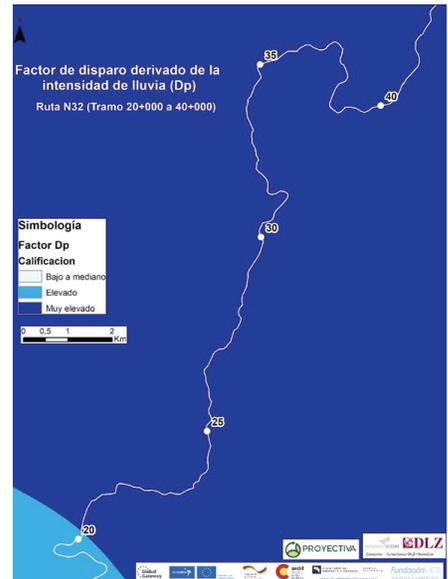


Figura 18. Factor de disparo por lluvia, con Tr=100 años (Dp), en el área estudiada y sus alrededores. El valor de Dp fue restringido a un valor máximo de 5, de acuerdo con la metodología Mora-Vahrson (1994)



2.4.7 Factor de disparo derivado de sismicidad (Ds)

A partir de los datos de la aceleración sísmica pico (PGA) disponibles, fueron recalculados los valores del factor de disparo sísmico (Ds) para 22 puntos a lo largo del corredor vial de la RN-32, con el objeto de incorporarlos dentro del procedimiento de análisis de la metodología Mora-Vahrson y que aparecen en la Tabla 6. El factor de intensidad sísmica proviene de la aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de recurrencia de 475 años (ver Tabla 7), cuyos valores se pueden visualizar en la tabla a continuación. Se procedió a convertir dichos valores en gales, a aplicar una interpolación, a reclasificarlos de acuerdo con los rangos establecidos en la Tabla 7 y cuya distribución espacial se visualiza en la Figura 19.

Tabla 6. Sitios analizados, en la RN-32 y características básicas de los puentes, definidos para el estudio amenaza sísmica de la RN-32, con los valores de las aceleraciones sísmicas pico (PGA) asignadas, y a partir de las cuales se define el disparador sísmico (Ds), de acuerdo con la metodología Mora-Vahrson (1994) y Mora, Saborío, Soto (2020)

ID	Nombre	Estación	Longitud puente (m)	Ancho puente (m)	° N	° W	PGA (g) para Tr = 475 años (en roca)
1	Intercambio 1	49+627			10.2110	-83.8978	0.405
2	Corinto	50+976	70	10.2	10.2117	-83.8859	0.397
3	Blanco W	56+192	70	10.2	10.2128	-83.8405	0.375
4	Toro Amarillo	59+140	270	10.2	10.2033	-83.8160	0.377
5	Intercambio 5	62+895			10.2029	-83.7818	0.368
6	Jiménez	67+336	70	10.2	10.2053	-83.7412	0.354
7	Guácimo	73+752	75	10.2	10.2056	-83.6839	0.333
8	Parismina	78+190	105	10.2	10.1952	-83.6452	0.327
9	Destierro	84+285	105	10.2	10.1626	-83.6009	0.335

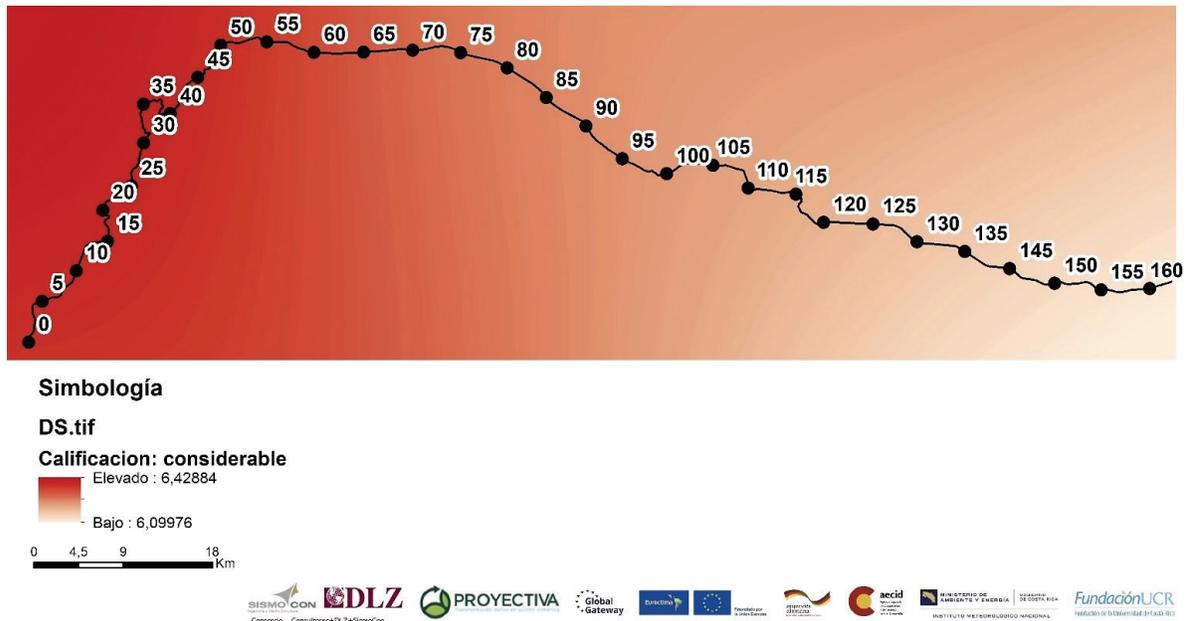
ID	Nombre	Estación	Longitud puente (m)	Ancho puente (m)	° N	° W	PGA (g) para Tr = 475 años (en roca)
10	Reventazón	94+295	355	10.2	10.1062	-83.5312	0.355
11	Siquirres	97+118	80	13.85	10.0938	-83.5090	0.357
12	Pacuare	99+663	315	10.2	10.0928	-83.4866	0.353
13	Cimarrones	106+557	75	10.2	10.0972	-83.4271	0.337
14	Barbilla	115+515	105	10.2	10.0651	-83.3670	0.338
15	Chirripó	125+310	390	10.2	10.0452	-83.2908	0.327
16	Cuba	133+952	60	10.2	10.0224	-83.2182	0.319
17	Toro	135+084	25	10.2	10.0166	-83.2097	0.319
18	Madre	141+287	40	10.2	9.9950	-83.1593	0.319
19	Blanco E	145+156	60	10.2	9.9918	-83.1250	0.311
20	Intercambio 15	149+337			9.9852	-83.0893	0.309
1	Portal Caribe túnel Zurquí				10.0663	-84.0066	0.456
2	Puente sobre Río Sucio				10.1473	-83.9474	0.454

Tabla 7. Factor de disparo (Ds), derivado de la aceleración pico del terreno (PGA) y la calificación correspondiente de sus rangos. Fue incluida también la relación entre la intensidad de Mercalli Modificada (IMM) y PGA, pues en ocasiones es el único tipo de información disponible.

IMM	logPGA	PGA (cm/s ²)	Calificación	Factor Ds
3	0.858	7	Marginal o nulo	1
4	1.282	19	Muy bajo	2
5	1.67	47	Bajo	3
6	2.022	105	Moderado	4
7	2.338	218	Mediano	5
8	2.618	415	Considerable	6
9	2.862	728	Importante	7
10	3.07	1175	Elevado	8
11	3.242	1746	Muy elevado	9
12	3.378	2388	Extremadamente elevado	10

$$\text{Log PGA} = -0.63 + 0.55 * \text{IMM} - 0.018 * \text{MM2}; \text{IMM: Intensidad, escala de Mercalli Modificada}$$

Figura 19. Factor de disparo derivado de la intensidad sísmica (Ds), a lo largo de la RN-32.



2.4.8 Amenaza de la inestabilidad de laderas asociada a los sismos intensos, durante la estación seca (As)

Considerando que existen combinaciones múltiples posibles, tanto con los factores de susceptibilidad como con los detonadores y en particular con la materialización de eventos “discretos” de sismos y lluvias intensas, por separado, se han desarrollado los escenarios y casos específicos e individuales respectivos. En este caso, la amenaza de la inestabilidad de laderas se puede “separar” entre la que es causada solamente por las lluvias intensas (Ap) y aquella que es disparada solamente por los sismos. Para obtener la inestabilidad de laderas asociada a los sismos intensos, durante la estación seca (i.e. sin lluvias intensas recientes), se procedió a aplicar la siguiente relación mediante la aplicación del módulo del álgebra de mapas de ArcGIS:

$$As = (Sp * Sh * SI) * Ds$$

A partir del resultado obtenido, se reclasificaron los valores según los rangos establecidos en la Tabla 8 y cuyos resultados se pueden visualizar en la Figura 20, donde también fueron indicados los sitios en los cuales se han registrado incidentes según los registros de COSEVI. Este escenario no incluye la posibilidad de que se produzcan efectos secundarios (e.g. licuefacción de suelos).

Tabla 8. Clasificación de los rangos de los valores paramétricos de la amenaza de la inestabilidad de laderas, disparada solamente por la sismicidad (As; i.e. sismo intenso, durante la estación seca).

$(Sp * Sh * SI) * Ds$	Clase	Calificación As
25-200	2	Baja
200 – 350	3	Mediana
350 – 500	4	Elevada
>500	5	Muy elevada

2.4.9 Amenaza de la inestabilidad de laderas asociada a las lluvias intensas, sin sismo (Ap)

Para obtener la inestabilidad de laderas asociada a las lluvias intensas (eventos pluviales intensos; estación de lluvias, sin sismo), se procedió a aplicar la siguiente relación mediante la aplicación del módulo del álgebra de mapas de ArcGis:

$$A_p = (S_p * S_h * S_l) * D_p$$

A partir de los resultados obtenidos, se reclasificaron los valores según los rangos establecidos en la Tabla 9, cuyos resultados se pueden visualizar en la Figura 21, donde también fueron indicados los sitios en los cuales se han registrado incidentes según los registros de COSEVI.

Tabla 9. Clasificación de la amenaza (Ap) de la inestabilidad de laderas causada por la susceptibilidad intrínseca del terreno (SUSC), disparada por lluvias intensas (estación de lluvias, sin sismo)

$(S_p * S_h * S_l) * D_p$	Clase	Calificación Ap
<40	1	Muy baja
40-80	2	Baja
80-160	3	Mediana
160-320	4	Elevada
>320	5	Muy elevada

Figura 20. Amenaza de la inestabilidad de laderas asociada a los sismos intensos (As), sin lluvias. Los símbolos de estrellas representan los incidentes registrados en los archivos de COSEVI.

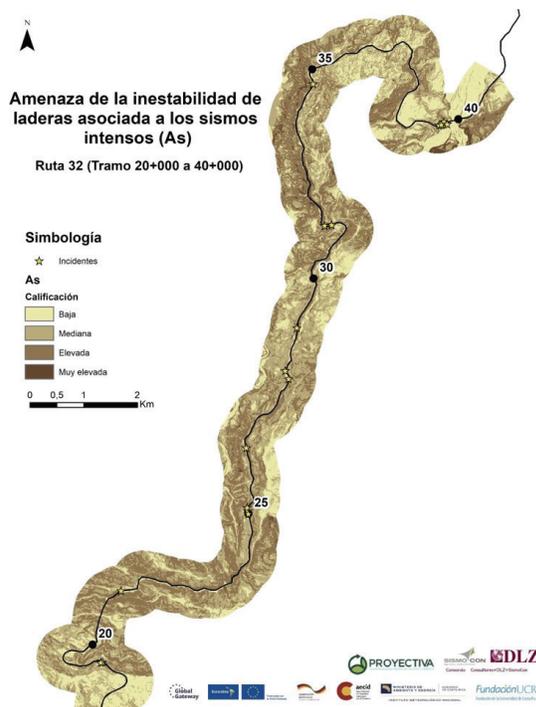
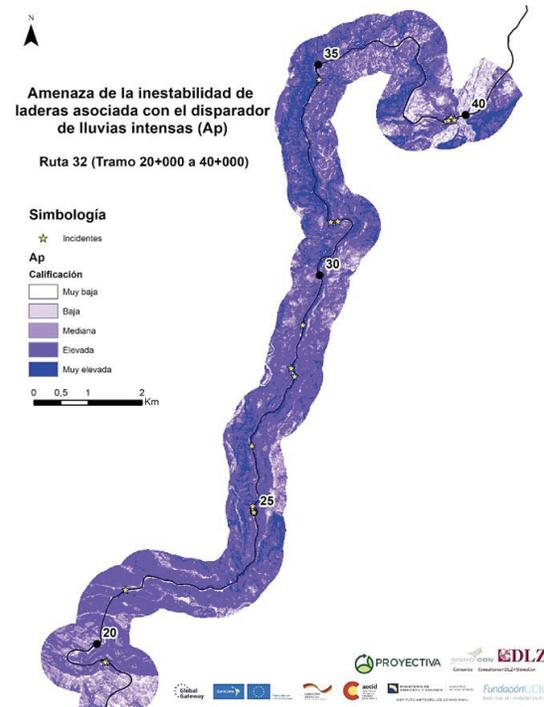


Figura 21. Amenaza de la inestabilidad de laderas disparada por las lluvias intensas (Ap), sin sismo. Los símbolos de estrellas representan los incidentes registrados en los archivos de COSEVI.



2.4.10 Amenaza “total” de la inestabilidad de laderas (Ad)

La amenaza “total” de la inestabilidad de laderas (Ad) representa la zonificación y generalización de la distribución espacial (zonificación) de la amenaza combinada de la susceptibilidad intrínseca a la inestabilidad de laderas, en los casos eventuales de que se produzca un sismo intenso durante la estación de las lluvias más intensas del año. Para analizar lo anterior, se procedió a aplicar el módulo del álgebra de mapas de ArcGis mediante la relación siguiente:

$$Ad = (Sl * Sp * Sh) * (Ds + Dp)$$

Una vez obtenidos los resultados se procedió a agrupar los valores de acuerdo con los rangos indicados en la Tabla 10; su distribución espacial puede observarse en el mapa de la Figura 23, donde también se indica la posición de los incidentes registrados en los archivos de COSEVI.

Como se observa, la amenaza “total” (i.e. combinada) de la inestabilidad de laderas (Ad) se presenta en el corredor vial de la RN-32 de forma muy variable, heterogénea y originada en la multiplicidad de factores que involucran e intervienen en las condiciones y procesos de la susceptibilidad intrínseca de las litologías, su relieve y humedad prevalente, así como por las características propias de las lluvias y sismos intensos. También incide la forma cómo han sido modificadas las laderas naturales por medio de los cortes, drenajes, terraplenes, movimientos de tierra y obras anexas (Figura 23).

Tabla 10. Rangos de los valores de la amenaza “total” (i.e. combinada) de la inestabilidad de laderas, en condición crítica (sismo intenso durante la estación de lluvias o simultáneamente con una lluvia intensa)

Valor de Ad	Calificación	Clase
≤ 100	Nula	1
100-250	Baja	2
250 – 340	Moderada	3
340 – 400	Mediana	4
400-550	Elevada	5
≥550	Muy elevada	6

2.4.11 Amenaza “total” de la inestabilidad de laderas (Ad), representada de manera semafórica

La representación semafórica se obtiene mediante la reclasificación de los valores de Ad, con el objeto de mostrar como un “semáforo” (i.e. tres colores) con mayor contraste las áreas con los niveles de amenaza y los tramos más expuestos del corredor vial. Es una representación útil para los fines de comunicación ante la población y los tomadores de decisiones políticas y empresariales. También y, por ejemplo, este tipo de mapas puede respaldar el desarrollo de un sistema de observación, alerta, alarma, advertencia y respuesta ante las emergencias e incidentes graves.

La Tabla 11 indica los rangos de la reclasificación aplicada y los resultados de los valores del parámetro Ad de la inestabilidad “total”, a la inestabilidad de laderas, de la RN-32, según la reclasificación “semafórica”, la cual se puede visualizar en la Figura 24. Se confirma que en este tramo de la RN-32 la mayor parte del recorrido está expuesto a la amenaza elevada a muy elevada de la inestabilidad de laderas.

Tabla 11. Reclasificación aplicada a los valores del parámetro Ad (representación semafórica)

Valor de Ad	Reclasificación semafórica	Reclasificación semafórica	Clasificación en el mapa de Ad
< 200	1	Nula a baja	Nula a muy baja
200 a 350	2	Mediana	Baja a media
>350	3	Elevada a muy elevada	Elevada a muy elevada

Figura 22. Amenaza "total" (i.e. combinada) de la inestabilidad de laderas (Ad). Los símbolos de estrellas representan los incidentes registrados en los archivos de COSEVI.

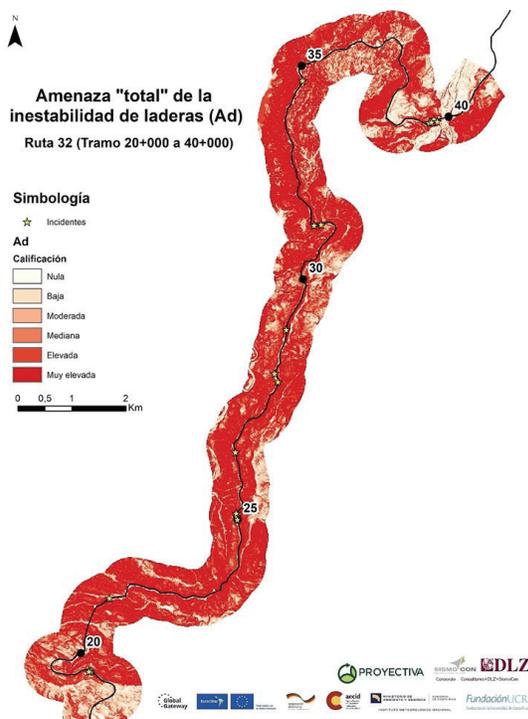
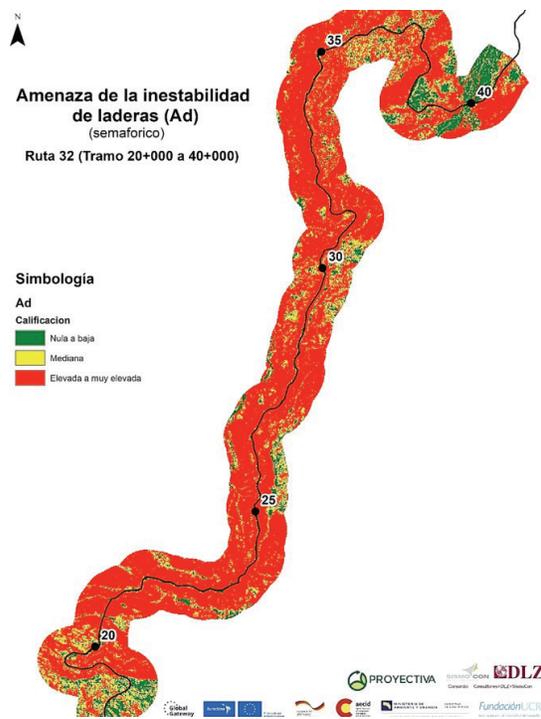


Figura 23. Amenaza "total" de la inestabilidad de laderas (representada de manera semafórica)



2.4.12 Posible influencia del CGA en la amenaza de la inestabilidad de laderas

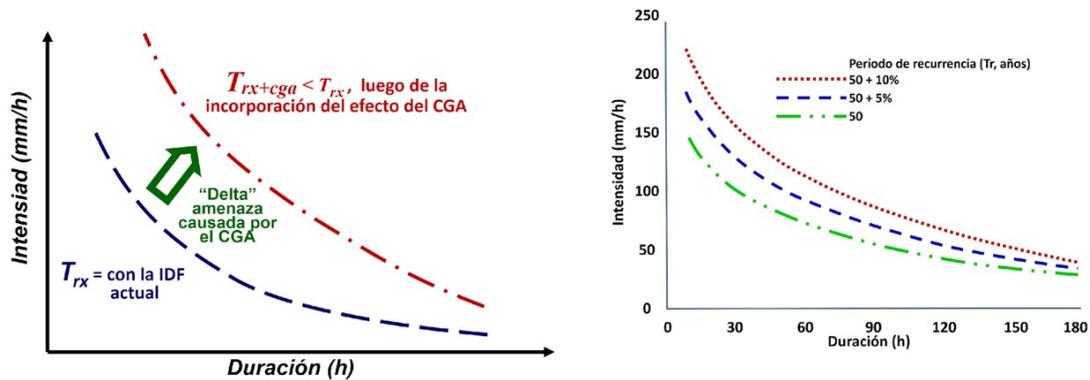
No se dispone todavía de un escenario robusto para determinar con precisión la evolución de las tendencias de la relación intensidad-duración-frecuencia (IDF) ni del volumen de las precipitaciones pluviales en esta parte del territorio costarricense.

Sin embargo, con el propósito de establecer una hipótesis de trabajo, se ha preparado un escenario hipotético en el que se presume que habrá un incremento constante y paulatino en esa relación IDF. Se escogió esta tendencia pues en el caso contrario, es decir, con una reducción de esa relación, la amenaza más bien se reduciría.

Para ello se ha asumido un desplazamiento homogéneo y proporcional de los factores que definen esa relación, como se aprecia

en el diagrama de la Figura 25. Se ha escogido un incremento del 10% y que genera una influencia proporcional sobre los factores Sh (humedad prevalente) y Dp (disparo pluviométrico) en la relación que define la amenaza "total" de la inestabilidad de laderas (Ad) definida por el método Mora-Vahrson (1994).

Figura 24. Ejercicio para la definición de un escenario hipotético que permita visualizar la influencia de un incremento posible de la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones pluviales en el tramo de la RN-32 estudiado. Para el ejercicio fue escogido un incremento del 10%, el cual influye en los factores de la humedad prevalente (Sh) y del disparo pluviométrico (Dp) definidos por la metodología Mora Vahrson (1994).



Bajo estas premisas fueron preparados los escenarios cartográficos respectivos: el caso de la situación actual y el caso con el escenario "CGA" (+10%). El resultado se aprecia en la Figura 26. Dado que la diferencias en la tonalidad del cambio (incremento) de la amenaza "total", se escogieron dos segmentos representativos en "zoom" de la carretera en donde se aprecia, de manera sutil, algún cambio observable a simple vista sobre los mapas (Figura 27).

Figura 25. Comparación de los escenarios de la amenaza de la inestabilidad de laderas "total" en el segmento estudiado de la RN-32. En la Figura 21, se aprecia un acercamiento a los segmentos señalados para su comparación visual.

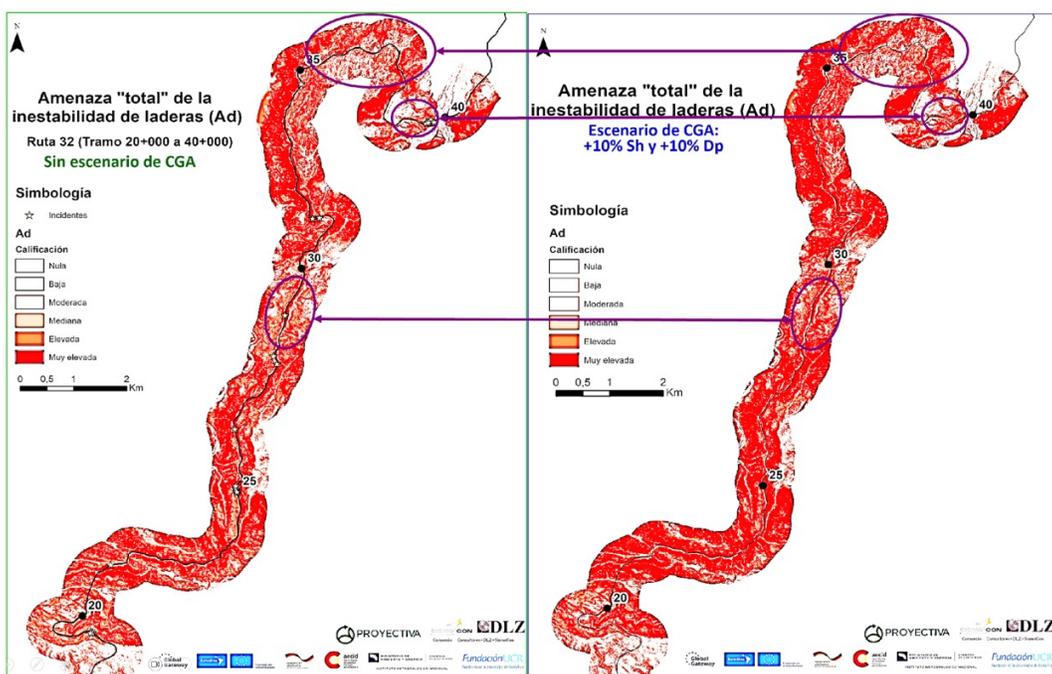
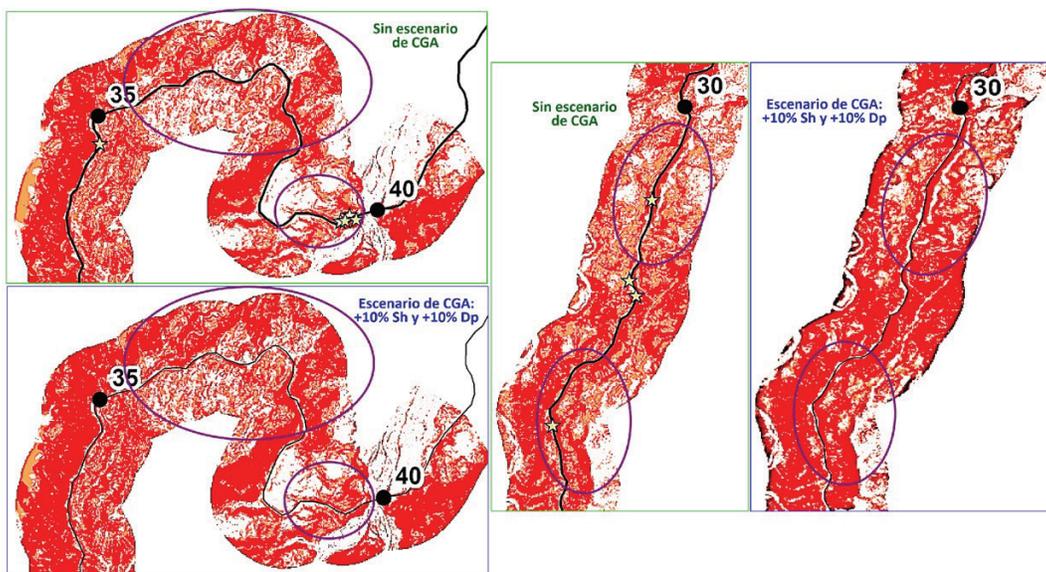
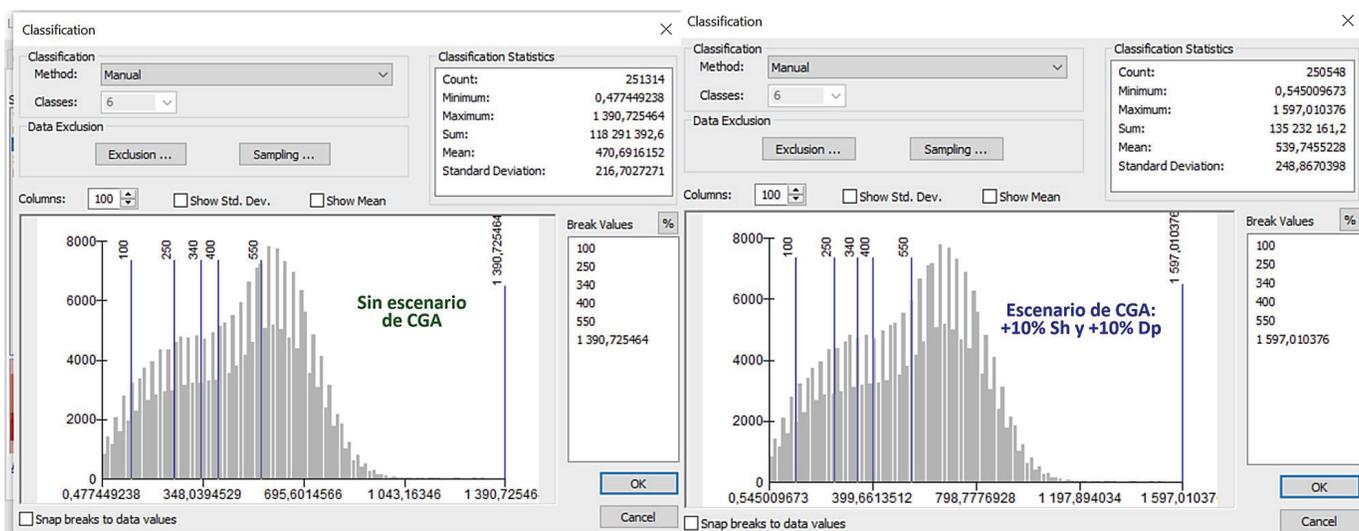


Figura 26. Acercamiento de los mapas de dos segmentos de la RN-32, para comparar visualmente el cambio (incremento) sutil, pero efectivo, de la amenaza de la inestabilidad de laderas total (Ad) al incrementar un 10% en los parámetros Sh (humedad prevalente del terreno) y Dp (disparo pluviométrico).



Adicionalmente, la Figura 28 muestra la comparación de los dos histogramas (ArcGIS) de los escenarios “sin” y “con” la supuesta e hipotética influencia del CGA sobre la distribución espacial de la amenaza “total” de la inestabilidad de laderas en el tramo estudiado de la RN-32. Se aprecia claramente el “desplazamiento hacia la derecha” de la campana del histograma, a causa del incremento de los valores de los rangos de la amenaza. En caso de que el escenario se cumpliera en el futuro, sin duda habría más áreas sometidas a la inestabilidad.

Figura 27. Comparación de los histogramas (ArcGIS) de distribución de los valores de los rangos de la amenaza “total” de la inestabilidad de laderas (Mora-Vahrson, 1994), según los escenarios con y sin la posible influencia del CGA sobre la configuración de la relación IDF: un incremento de Sh (humedad prevalente del terreno) y Dp (disparador pluviométrico)



2.5 Apreciaciones y comentarios sobre el riesgo derivado de la inestabilidad de laderas en el tramo de la RN-23

2.5.1 Antecedentes

Según COSEVI (2024), en la compilación de datos de incidentes causados por la inestabilidad de laderas y los cierres consecuentes de la RN-32 en los períodos del 4 de marzo de 2022 al 20 de febrero de 2024 y del 10 de enero de 2008 al 15 de enero de 2021, de manera discontinua hay registros de 782 incidentes, de los cuales 581 (74,7 %) se produjeron entre los kilómetros 20+600 y 38+000, el cual es el tramo entre el túnel Zurquí y el puente sobre el río Sucio, precisamente analizado en este documento.

La mayoría de los eventos de deslizamiento sucedidos durante estos períodos ha sido de tamaño discreto (decenas a centenas de m³) y ha caído sobre la vía. Solo hay registros de unos pocos casos con miles de m³ que hayan obstruido la vía por varios días, mientras se realizaban los trabajos de limpieza y reacondicionamiento. La mayoría de los eventos ha coincidido con lluvias de varios días (temporales), o bien por lluvias intensas relativamente cortas (algunas horas de duración).

Hasta el momento no se hay registros de daños causados por eventos sísmicos de importancia local o regional, pues estos son menos recurrentes que los eventos meteorológicos. Los heridos y muertos, directamente relacionados con la inestabilidad de laderas, no son numerosos y en cantidades mucho menores que los causados por accidentes de tránsito. Han quedado, sin embargo, muchos vehículos atrapados en los tramos a uno y otro lado de los materiales caídos, de modo que han debido ser evacuados o rescatados por las entidades de primera respuesta (Cruz Roja, Bomberos, Fuerza Pública).

Según las condiciones actuales de la distribución anual de las precipitaciones, el escenario en el que se incrementa el tránsito de personas, bienes y servicios en este tramo de la RN-32 y que coincide con la mayor cantidad de lluvias y eventos de inestabilidad de laderas, se extiende entre junio y noviembre, sobre todo debido a la actividad derivada de la posición de Zona de Convergencia Intertropical, el tránsito de las ondas tropicales y, eventualmente, de los ciclones tropicales. En el pasado, estos son los eventos que han causado la mayor cantidad de precipitación y, por consiguiente, de incidentes de inestabilidad de laderas, con la caída de material, que han requerido de limpieza con maquinaria y cierres parciales de la vía, la mayor cantidad de veces, del orden de algunas horas COSEVI (2024).

El escenario más desfavorable podría ser si se produjera, en este período, por ejemplo, a partir de las 5 p.m., un sismo con Mw 6, en un radio hipocentral de 20 km del tramo en cuestión de la carretera (e.g. km 30), con una aceleración máxima del suelo (PGA) a lo largo de la vía, del orden de 0,40 a 0,45 g (aceleración pico efectiva, APE= 0,32-0,34 g), en el período de mayor pluviosidad. Es posible que se dispare una serie de eventos de inestabilidad de laderas (e.g. 150 a 10.000 m³) a lo largo del 40 % del tramo de la vía. También podrían producirse lahares que afecten el puente sobre el río Sucio.

Debido a la hora, la vía se encontraría operativa y sin cierres temporales nocturnos preventivos. Decenas a centenas de vehículos (automóviles, motocicletas, autobuses, transporte de carga perecedera e impercedera, contenedores) en uno y otro sentido de la carretera quedan atrapados sin poder avanzar o retroceder, sino hasta que la vía sea despejada por la maquinaria. Es de esperar que pudieran producirse víctimas humanas (muertos, heridos) y con consecuencias económicas, sociales y psicológicas.

La suspensión del paso causaría también un desvío importante del transporte por las vías alternas de Turrialba y Varablanca, a condición de que esas carreteras no hayan sido afectadas por la inestabilidad de laderas. El exceso de recorrido generaría un incremento del tiempo, los combustibles y de los costos del transporte.

La reparación de la vía y el restablecimiento del tránsito tomaría un tiempo equivalente y proporcional a los daños causados sobre la vía, siempre y cuando los fondos se encuentren disponibles para financiar la reparación de manera expedita.

2.5.2 La RN-32 y las repercusiones sociales y ambientales del riesgo derivado de la inestabilidad de laderas

El riesgo asociado a la inestabilidad de laderas en las carreteras de montaña involucra una combinación de factores que impactan tanto en la seguridad de los usuarios como en la economía local. Uno de los principales componentes del riesgo se desprende del tiempo de cierre de la vía, el cual provoca la suspensión del tránsito y genera retrasos considerables para los usuarios y afecta directamente la cadena de suministro y transporte de personas, bienes y servicios. Estos retrasos, a su vez, generan repercusiones económicas, las cuales se reflejan en el lucro cesante de las empresas que dependen de la eficiencia del tránsito para optimizar sus costos: salario y cargas sociales de los conductores, combustible, tiempo perdido, deterioro de las cargas de bienes perecederos, etc. Además, los deslizamientos pueden causar daños a los vehículos. En situaciones más graves, puede haber heridos o hasta fallecidos, lo cual eleva significativamente su impacto social.

Asimismo, los costos de limpieza y rehabilitación de la vía, la infraestructura asociada (drenajes, señalamiento vial, pavimento, etc.) incrementa los costos a causa de las reparaciones recurrentes. Representan una carga financiera importante para el administrador de la vía.

Por ejemplo, en el tramo de montaña de la RN-32 estudiado solamente se dispone de datos de conservación vial en CONAVI. Estos confirman que, entre marzo de 2022 y febrero de 2024, hubo un total de 52 derrumbes sobre la carretera. De estos, 45 provocaron el cierre total de la carretera, 4 causaron cierres parciales y en tres casos no fue necesario cerrar el tránsito por la carretera. El volumen total que fue necesario limpiar en este período de dos años fue de 26.000 m³, para un costo estimado de US\$ 650 000, es decir, una pérdida anual estimada de US\$ 325 000.

El tránsito promedio diario (TPD) en este tramo de la carretera es de aproximadamente 9000 vehículos, de los cuales 16.5 % son pesados. Esto quiere decir que diariamente transitan 1485 camiones de carga. A partir de las fechas de los incidentes y las estadísticas de limpieza de CONAVI, se puede calcular que, para los 45 eventos que provocaron el cierre de la carretera, el tiempo promedio de suspensión del tránsito fue de 1,24 días, lo cual indica un cierre total durante esos dos años de 55,8 días. De acuerdo con la composición del TPD, en esos 55,8 días el total de camiones de carga afectados por los cierres fue de 82 863. Se estima que el costo por transporte de cada camión puede incrementar hasta en US\$ 300 por cada día de cierre de la carretera, esto representa una pérdida total de alrededor de US\$ 24 858 900, es decir, una pérdida anual promedio de US\$ 12 429 450.

Debido a esta circunstancia, por el momento no es posible ofrecer un análisis ni comentarios de mayor relevancia. Por ello, es imperativo que en el plazo más corto posible los administradores de la carretera establezcan un procedimiento estadístico preciso, que incorpore todos estos elementos que deben ser considerados en los cálculos del riesgo, para adecuar los procesos financieros y económicos correspondientes y respaldar los indicadores y métricas que permitan realizar cálculos robustos y precisos.

2.6 Conclusiones y recomendaciones acerca de la amenaza de inestabilidad de laderas en la RN-32

2.6.1 Conclusiones

- Las rocas que componen los macizos rocosos, a través de los cuales fue construida la RN-32, se ubican en el extremo noreste del macizo volcánico del Barva y, estratigráficamente, se ubican dentro de sus dos fases más antiguas: el ProtoBarva y el PaleoBarva, con edades entre 900 ka y 400 ka.
- Las rocas predominantes son lavas fracturadas, ya sean olivínicas (basaltos) o andesitas con piroxenos; también aparecen brechas con diferentes grados de cementación, cantidad de matriz y tamaños de clastos; depósitos de flujos o corrientes

piroclásticas con grados diversos de cementación natural y aluviones en la vecindad del cauce del río Sucio, en su confluencia con el Hondura.

- La calidad mecánica de las rocas es en general mediana a pobre (reflejado en SI de 3 a 4; 4,5 en el caso de los aluviones) en tanto se encuentran desde profusamente fracturadas (las lavas con amplio lajeamiento y columnatas), hasta medianamente fracturadas (i.e. flujos piroclásticos), en general de mediana a ampliamente meteorizados y con niveles freáticos muy someros en un ambiente muy húmedo.
- Hay tres fallas neotectónicas principales, activas, que cortan este sector montañoso de la carretera (fallas Río Patria, Río Hondura y Río Sucio) y que han causado grado elevado de fracturamiento y arcillificación en su vecindad, además de sismicidad frecuente, de baja a mediana magnitud.
- En la periferia de 15 km alrededor del tramo estudiado, hay al menos 15 fallas neotectónicas identificadas, que cortan los macizos NE del Barva y NO del Irazú. Una de ellas, la falla Río Sucio, en su tramo dentro del macizo del Irazú, causó un sismo con Mw 6,0 en diciembre de 1952 (terremoto de Patillos), el cual provocó intensidades IMM: VII-VIII (escala de Mercalli Modificada). En general, la amenaza sísmica probabilística para este tramo indica un valor de PGA, para un período de recurrencia de 475 años, en roca, de ~0,45, el cual es relativamente elevado para la zona sísmica en que se encuentra, según se considera en el Código Sísmico vigente.
- No obstante, dado el hecho de que esta carretera tiene menos de 40 años de operación y que ya ha registrado una cantidad elevada y compleja de incidentes de inestabilidad de laderas, causados por las lluvias, es de prever que los eventos peligrosos seguirán sucediendo.
- La tendencia en la RN-32 al desarrollo de procesos de la inestabilidad de las laderas, cortes y terraplenes se ha mantenido a lo largo de su construcción y del período de funcionamiento, desde su inauguración. Dadas las circunstancias y condiciones actuales, es de suponer que esta situación se mantendrá en el mediano plazo y quizás a largo plazo también. La gestión del riesgo deberá ser, por lo tanto, una herramienta imprescindible de la administración de la vía. Igualmente, es necesario indicar que desde su inauguración todavía no se ha presentado un evento sísmico suficientemente intenso como para desestabilizar las laderas y cortes, pero se sobreentiende que la sismicidad intensa tiene períodos de recurrencia mayores que las lluvias intensas con capacidad destructiva semejante.
- La mayoría de los incidentes de inestabilidad de laderas reportados se ubica en las áreas y puntos indicados como expuestos a la amenaza “elevada” a “muy elevada”, según el análisis realizado mediante la aplicación de la metodología Mora-Vahrson. Por el contrario, no aparecen casos de inestabilidad registrados en las áreas señaladas como de amenaza “baja” a “muy baja”.
- A todo lo largo del corredor vial de la RN-32 se encuentran litologías con condiciones naturales desfavorables para la estabilidad de las laderas y cortes. Con excepción de algunos sectores y puntos específicos, puede mencionarse de modo general que el tramo continuo más crítico –desde el punto de vista de la susceptibilidad litológica a la inestabilidad de laderas, considerando todas las otras variables constantes: relieve, humedad, lluvias, sismos, forma y eficiencia de los cortes y sus medidas de estabilización), se presenta aproximadamente entre los 30 a 40 km.
- La combinación de los mayores niveles de susceptibilidad litológica, relieve abrupto y humedad prevalente (por sí solos y sin tomar en cuenta la influencia de los sismos ni las lluvias intensas), son responsables de una cantidad considerable de incidentes de inestabilidad. Obviamente, esta condición se intensifica con la presencia de las lluvias intensas y, eventualmente, en caso de presentarse un sismo importante.
- Para los casos de los eventos de lluvias intensas, cuyas características coincidan con los escenarios analizados y considerando que todos los otros factores se mantuvieran constantes, la mayor influencia de las lluvias sobre la inestabilidad de laderas podría materializarse al menos alrededor de los 30 a 35 km. Evidentemente, esta influencia podría cambiar sustancialmente si varía la ubicación y desplazamiento de los núcleos de mayor intensidad y volumen pluviométrico de los eventos pluviales

(i.e. variabilidad climática, calentamiento global antropogénico), su duración y las características del relieve, la litología, las condiciones de humedad prevalente en el suelo; o si el evento sucede de manera aislada o luego de una sucesión de varios eventos, de la eventualidad de un sismo y del grado de estabilidad de los cortes artificiales de la carretera.

- De manera proporcional a la longitud total de la carretera, las longitudes de los sectores inestables (i.e. con amenaza “elevada” y “muy elevada”), por causa de las lluvias intensas (tomando en cuenta la susceptibilidad general: relieve, litología y humedad prevalente; sin tomar en cuenta la sismicidad), son relativamente extensas y se ubican entre los km 25 a 40. Bastaría entonces con unos pocos segmentos desestabilizados para que se generen movimientos simultáneos de masas grandes y entonces la RN-32 quede obstruida y su tránsito paralizado.
- De acuerdo con la información disponible y los análisis realizados, considerando el resto de los factores como constantes, la mayor influencia de la sismicidad, sobre la inestabilidad de laderas, se materializaría en los alrededores de los km 25 a 40. Si se toma en cuenta la susceptibilidad general (litología, relieve y humedad), la amenaza sísmica (sin influencia de las lluvias intensas) alcanza su nivel mayor aproximadamente entre los kilómetros 25 a 40.
- Si se produce un sismo durante la estación lluviosa o inmediatamente luego de un evento de lluvia intensa, la carretera quedaría expuesta a la amenaza de la inestabilidad de laderas de nivel mediano a elevado y muy elevado en el sector comprendido entre los km 25 a 40. Obviamente existen, al igual que en todos los escenarios antes mencionados, otros sectores menores que también muestran exposición significativa a la inestabilidad de laderas, por lo que debe considerarse todo este tramo de la carretera como parte de un sistema integrado para la gestión del riesgo.

2.6.2 Recomendaciones

- Es recomendable la aplicación de metodologías de análisis diferencial de las nubes de puntos (e.g. interferometría LiDAR, etc.) de sitios específicos, mediante la comparación de las coordenadas y elevación de los puntos de la red topográfica (i.e. modelo de elevación digital) levantados en diferentes fechas, para efectos de determinar deformaciones en el terreno que delaten desplazamientos de materiales en una ladera o a su pie (i.e. eliminación por erosión o deslizamientos; acumulación por sedimentación), a lo largo del tiempo y sobre todo en sitios con situaciones críticas de inestabilidad potencial o actual.
- Como derivación del punto anterior, también es recomendable establecer y mantener permanentemente en sitios específicos la aplicación de modelos de equilibrio límite, fundamentados para analizar la distribución espacial del factor de seguridad y la determinación de puntos críticos (estabilidad-inestabilidad) en 3D, de las laderas, cortes y terraplenes. La idea es determinar, de la manera más cuantitativa y rápida posible, la ubicación de los sectores con indicios de inestabilidad, inmediata o en el corto plazo, y así orientar las previsiones del caso para su estabilización y para la aplicación del sistema de vigilancia, advertencia, alarma, respuesta y continuidad operativa y funcional.

3. La amenaza de los lahares sobre el puente del Río Sucio

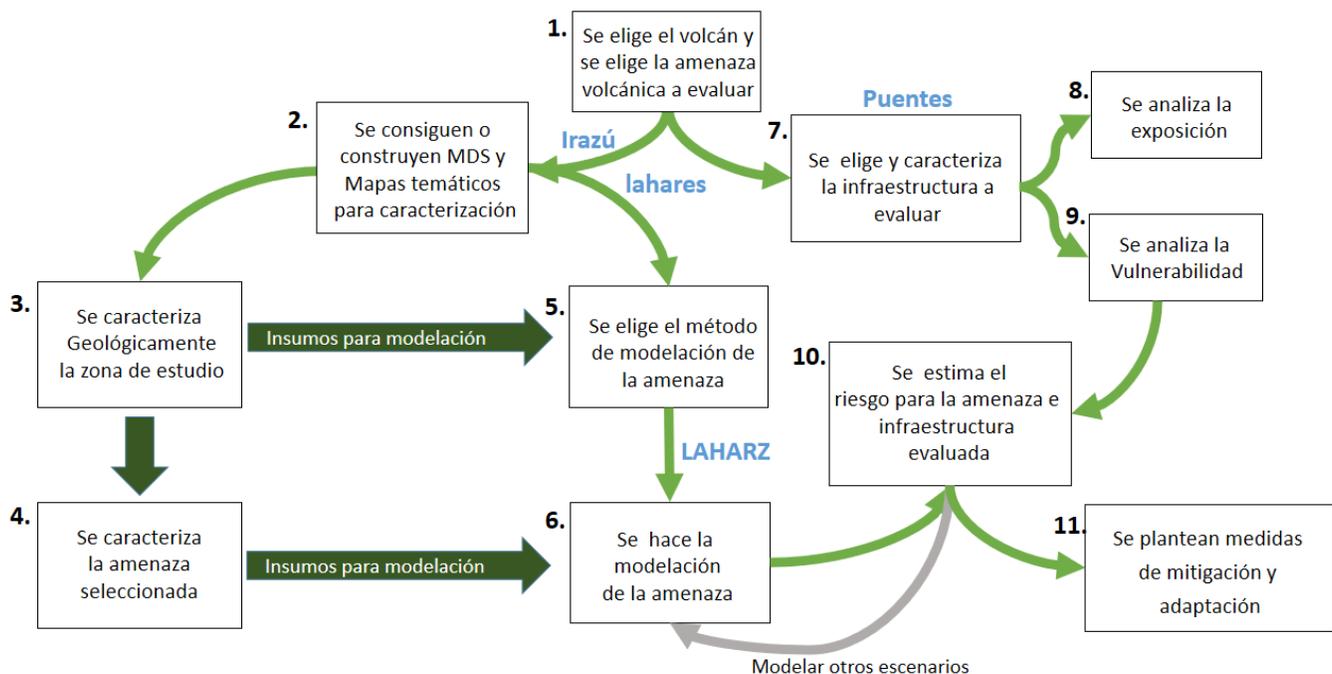
3.1 Casos de estudio aplicación de la metodología propuesta para lahares en río Sucio RN-32

Las evaluaciones del riesgo derivado de los lahares son cruciales por las características de sus procesos y potencial destructivo, especialmente en las áreas con elementos expuestos y vulnerables en los alrededores de los volcanes. Estas permiten identificar los elementos expuestos y vulnerables para así, planificar las medidas de mitigación, respuesta, protección de vidas humanas y de

los bienes materiales, para reducir el impacto de estos eventos peligrosos. Las evaluaciones pueden ser cualitativas (descriptivas) o cuantitativas (datos medibles) o una combinación de ambas, según la naturaleza de los datos disponibles y el propósito de la evaluación (Janda et al., 1996). Aquí se define la metodología y los pasos planteados en este trabajo. Esta metodología se podría complementar con las de otras amenazas volcánicas e infraestructura, siempre y cuando existan los datos suficientes y los programas necesarios para la modelación.

La metodología planteada, en adelante, sigue los pasos del esquema de Figura 29; se explicarán con detalle los pasos y subprocessos respectivos aplicados al análisis de la amenaza de los lahares en el río Sucio y su intersección con la Ruta Nacional 32.

Figura 28. Flujograma general de la metodología planteada para la evaluación de amenazas volcánicas. La numeración presentada en el flujograma de la figura 1 va asociada al proceso respectivo que se describe más adelante.



3.2 Selección del volcán y la amenaza por evaluar

Conocer e identificar dentro del territorio nacional el edificio volcánico que genera la amenaza por evaluar es la primera etapa recomendada para ubicarse geográficamente y dilucidar el contexto geológico en el que se van a realizar los pasos siguientes. Los volcanes activos y recientemente activos de Costa Rica se encuentran en tres regiones del territorio nacional. 1. Cordillera Volcánica de Guanacaste 2. Cordillera de Tilarán, y 3. Cordillera Volcánica Central (Figura 30).

Como se estableció previamente en el análisis del índice de prioridad calculada del riesgo (CPRI), en este proyecto se analizará exclusivamente la amenaza de los lahares, debido a su elevado impacto potencial en la infraestructura vial de la RN-32 y su frecuencia.

Para otros proyectos se podrían elegir otros tipos de amenaza. En la Tabla 12 se presentan algunos de los datos y características de las regiones volcánicas de Costa Rica. No todos los volcanes de la Tabla 12 han presentado lahares históricos conocidos, sin embargo, todos tienen el potencial de presentar este tipo de amenaza volcánica. Por lo tanto, sus territorios y la infraestructura asociada a ese espacio deben igualmente ser considerados para análisis de este tipo, en el futuro.

Figura 29. Mapa geológico de Costa Rica (Denyer & Alvarado, 2007) y su relación con la red vial nacional. Se indican las tres regiones volcánicas del país y las áreas definidas para los diferentes productos volcánicos.

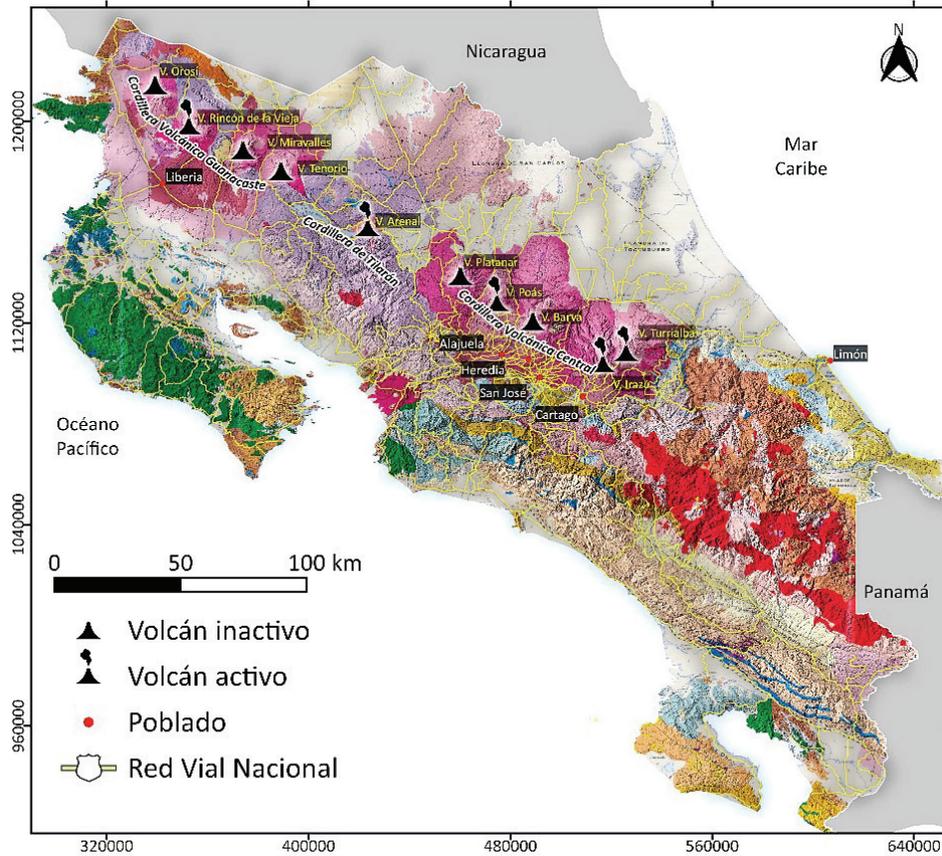


Tabla 12. Regiones volcánicas de Costa Rica y sus volcanes y características básicas (modificado de Alvarado, 2009). Se mencionan los nombres de los volcanes con sus focos principales adosados en los macizos, pues también podrían generar lahares.

Ubicación – cordillera – características

Cordillera Volcánica de Guanacaste

Cadena volcánica de estratovolcanes andesíticos, menos de 600 000 años, orientada NO-SE. El Rincón de la Vieja y el Miravalles son los dos volcanes más grandes de esta cordillera; ambos han presentado lahares históricos. Del Orosí y Tenorio no hay registros de eventos históricos observados, aunque sí se aprecian abanicos de depósitos laháricos en sus faldas.

Volcanes y focos volcánicos adosados

Orosí–Orosillito-Pedregal-Cacao; Rincón de la Vieja-Santa María; Miravalles-Paleo Miravalles; Montezuma-Tenorio

Ubicación – cordillera – características

Cordillera de Tilarán

Los estratovolcanes Los Perdidos (extinto y erosionado), Chato (dormido o quizás extinto) y Arenal (edad 7 mil años, aproximadamente) son pequeños conos andesíticos que están aislados entre las cordilleras de Guanacaste y Central.

Cordillera Volcánica Central

Constituida por estratovolcanes y volcanes en escudo, andesíticos, con menos de 1,2 Ma de edad y orientada NO-SE. Entre los volcanes Barva e Irazú se podrían incluir los edificios del Complejo Zurquí, cerros de origen volcánico con edades asociadas a la fase temporal Proto y Paleo (1,2 millón a 400 mil años) de la cordillera Volcánica Central. El volcán Barva es el más grande del país y América Central (~1500 km² de área y ~255 km³ de volumen, mientras que el volcán Irazú es el de mayor altitud del país (3432 m s.n.m.). Los volcanes Irazú, Poás y Platanar – Porvenir han generado lahares históricos importantes. En el ciclo eruptivo entre 2010 y 2016, el volcán Turrialba generó eventos menores en la cuenca alta de la quebrada Paredes, del Río Toro Amarillo.

Volcanes y focos volcánicos adosados

Arenal, Chato, Los Perdidos

Platanar–Porvenir; Poás–Von Frantzius-Congo; Barva–Cacho Negro-Zurquí; Irazú; Turrialba–Dos Novillos

En el ámbito mundial se han propuesto varias metodologías para asistir la gestión del riesgo derivado de la amenaza volcánica (Aspinall et al., 2011). Estas utilizan diferentes indicadores para caracterizar el comportamiento de los volcanes. El primer índice conocido es el de la explosividad y se relaciona con qué tan grandes han sido las erupciones registradas durante el Holoceno: el Índice de Explosividad Volcánica (Volcanic Explosivity Index, VEI, en inglés). Este índice de 0 a 8, relaciona el volumen del material arrojado, la explosividad de la erupción y altura de la columna eruptiva, entre otras. Mientras más grande el número, más explosiva, voluminosa y menos recurrente la erupción. Según los datos de GVP-VOTW4.0, 2013 los volcanes de Costa Rica, con estudios suficientes a los que se les ha podido asociar este índice son los siguientes: el Rincón de la Vieja, Arenal, Barva y Turrialba, todos con un valor de 4. El volcán Irazú tiene un valor asignado de 3, el volcán Poás ha presentado erupciones clasificadas con 2 y volcán Miravalles con valor de 1. El Platanar, Tenorio y Orosí no tienen suficientes estudios de procesos recientes, por lo tanto, no se les han podido determinar erupciones confirmadas en el Holoceno.

Otro indicador que puede ayudar en la caracterización es conocido como el Índice de Población Expuesta (PEI, en inglés Population Exposure Index; Brown et al., 2015a). El PEI proporciona un indicador, no solo de la población sino también del peligro para los medios de subsistencia, infraestructura y activos económicos. Este índice no toma en cuenta las muertes indirectas por hambruna y enfermedad, ni las pérdidas en las industrias de aviación y agricultura causadas por la ceniza, gases y aerosoles. El PEI varía

entre 1 y 7, y se determina dentro de un radio de 100 km, ponderado por el área del círculo y la incidencia de muertes dentro de radios de 10, 30 y 100 km. Los valores máximos, de 7, se presentan en volcanes de Filipinas y Guatemala. En Costa Rica todos los volcanes de la Cordillera Volcánica Central presentan un valor de PEI de 5. Los volcanes Miravalles, Tenorio y Arenal tienen un valor 4, mientras que Rincón de la Vieja y Orosí presentan un valor de 3.

El tercero es el Índice de Amenaza Volcánica (Volcanic Hazard Index, VHI); se obtiene a partir de puntuaciones para las diferentes amenazas volcánicas (coladas de lava, lahares, corrientes piroclásticas, etc.) y su impacto, según evidenciado durante el Holoceno. Este valor puede variar entre I y III (Auker et al., 2015). Los datos de estos índices y sus cruces, en las matrices generadas por Brown et al., 2015b, para los volcanes de Costa Rica, representan adecuadamente el comportamiento de los volcanes del país y el impacto que pueden tener sobre la población y la infraestructura. En este trabajo se hizo una revisión de la matriz original de Brown et al., 2015b, específicamente para el dato de VHI en el volcán Miravalles, ya que no había sido clasificado anteriormente; debido a los lahares destructivos sucedidos en 2016 (i.e. Huracán Otto), podría ser clasificado, con un VHI de I.

En la Tabla 13 se muestra un resumen de las características de los índices VEI, PEI y VHI de los volcanes principales de Costa Rica (Brown et al., 2015b). Esta clasificación permite definir al volcán en el que se encuentra el proyecto y ofrece una idea preliminar acerca del nivel del estudio con el que se cuenta.

Tabla 13. Volcanes de Costa Rica y su clasificación, según los índices especificados. Estos datos fueron tomados del Auker et al. (2015), los datos específicos para Costa Rica se encuentran en Brown et al. (2015b).

Clasificado	Riesgo III					Irazú; VEI 3		
	Riesgo II			Rincón de la Vieja; VEI 4	Arenal; VEI 4			
	Riesgo I				Miravalles; VEI 1	Poás; VEI 2		
Sin clasificar	U-HHR							
	U-HR					Barva; VEI 4		
	U-NHHR			Orosí (sin erupciones confirmadas)	Tenorio (sin erupciones registradas)	Platanar (sin erupciones registradas)		
		PEI 1	PEI 2	PEI 3	PEI 4	PEI 5	PEI 6	PEI 7

El término riesgo utilizado en esta matriz incluye la incorporación de un análisis preliminar de la vulnerabilidad de la población aledaña, actividades productivas e infraestructura de cada volcán evaluado.

U-NHHR: Sin clasificar según el VHI, no hay erupciones históricas confirmadas durante el Holoceno (Volcanes Orosí, Tenorio y Platanar).

U-HR: Sin clasificar según el VHI, aún no hay datos de erupciones históricas, pero sí de erupciones durante el Holoceno (Barva).

U-HHR: Sin clasificar según el VHI, con registros de actividad histórica y durante el Holoceno (En la tabla original se encontraba el Miravalles, en este trabajo, se reclasificó con VHI de I).

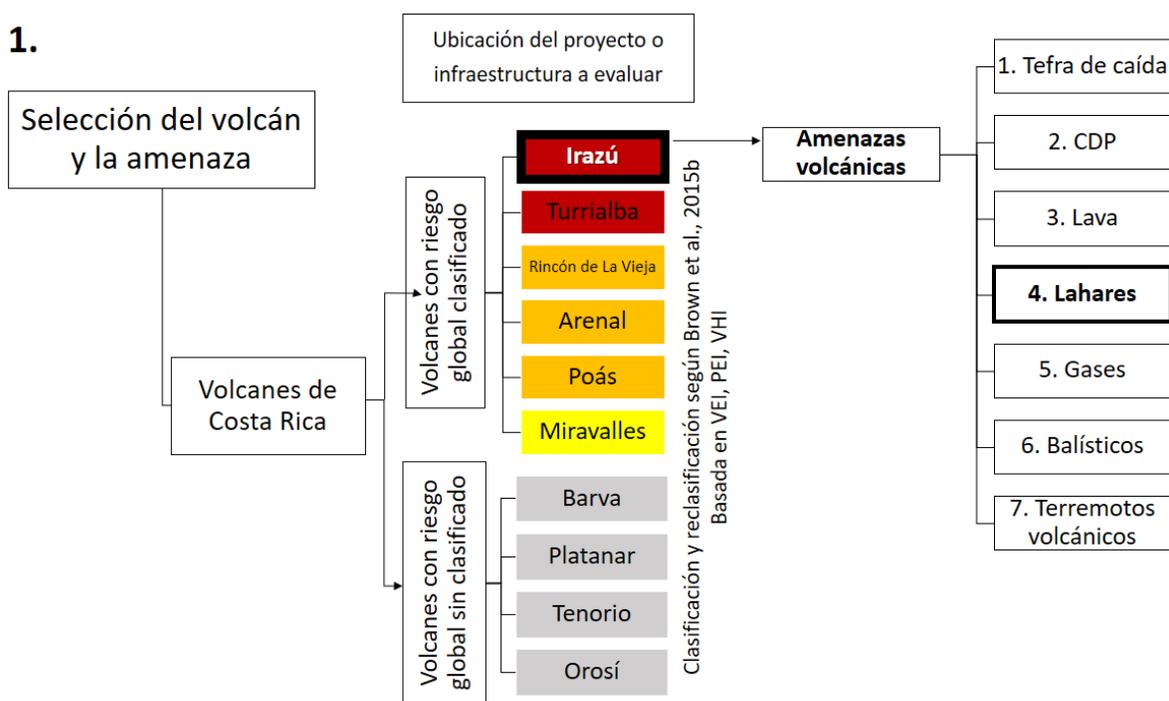
El Platanar, no clasificado, ha manifestado indicios de actividad volcánica no superficial durante los últimos 100 años.

El Barva tiene registros de al menos una erupción $VEI \geq 4$ en el Holoceno y un PEI 5, por lo que es un volcán potencialmente muy peligroso, pero no tiene estudios detallados sobre sus amenazas e impactos posibles sobre la población; su VHI no ha sido clasificado y por esa razón no aparece más arriba en la tabla.

Hasta este punto y con la información disponible, es posible clasificar un volcán en alguna de las categorías indicadas en la Tabla 13, según los registros de su comportamiento, explosividad, actividad durante el Holoceno o erupciones históricas y su posible efecto sobre la población e infraestructura expuesta. A partir de este proceso y para efectos del estudio en curso, se ha elegido la amenaza de los lahares y entonces se procede a la siguiente fase de la caracterización. Si el proyecto por evaluar se encuentra dentro de los límites o dentro de sus abanicos aluviales, en el piedemonte del volcán en cuestión, será necesario invertir recursos y tiempo en estudios geológicos, vulcanológicos, climáticos, sismológicos y geomorfológicos detallados, para ampliar la información básica acerca de la amenaza.

En la Figura 31, se muestra el flujograma utilizado para la selección del volcán y la amenaza. Esta estructura se podría replicar para cualquiera de los volcanes de Costa Rica y las diferentes amenazas de origen volcánico que puedan presentar. En este caso se utilizó para trabajar en el volcán Irazú y la determinación del riesgo derivado de la amenaza de lahares. El sitio de aplicación es en el tramo de montaña de la Ruta Nacional 32 (RN-32) específicamente en el puente sobre el río Sucio, estación PK 37+829 y en la cuenca media del río Sucio, ubicada en el flanco noroeste del volcán Irazú.

Figura 30. Diagrama de flujo que muestra los primeros pasos de la metodología aplicados para el análisis de las amenazas volcánicas, al volcán Irazú y en particular la asociada con los lahares.



En este sitio seleccionado convergen el río Hondura y el río Sucio. Se puede visualizar la diferencia en el color de las aguas, más "limpias" las del primero y amarillentas las del segundo. Esta diferencia se debe principalmente a que en la cabecera de la cuenca del río Sucio hay una serie de depósitos hidrotermales y, además, existe un deslizamiento activo de dimensiones considerables, el de las Torres de Telecomunicaciones, en los flancos oeste y suroeste del volcán Irazú. Desde 2014, cuando se inició este deslizamiento, se han desplazado aguas abajo y ha acumulado gran cantidad de bloques métricos a lo largo del cauce del río Sucio, con lo que se ha colmatado su cauce el cañón, con cambios frecuentes de su dinámica fluvial (Figuras 33, 34, 35 y 36).

Figura 31. Imagen satelital del año 2023, tomada de Google Earth. Se observa la cabecera de la cuenca del río Sucio en el sector oeste del volcán Irazú y el deslizamiento de las torres de telecomunicación, así como la zona inestable del sector noroeste del cráter principal.



Figura 32. Deslizamiento en el sector de las torres de telecomunicaciones en el Irazú (Ruiz et al., 2021)



Figura 33. Comparación de imágenes satelitales de Google Earth de 2011 (antes de que iniciara el deslizamiento de las Torres en el volcán Irazú) y 2023

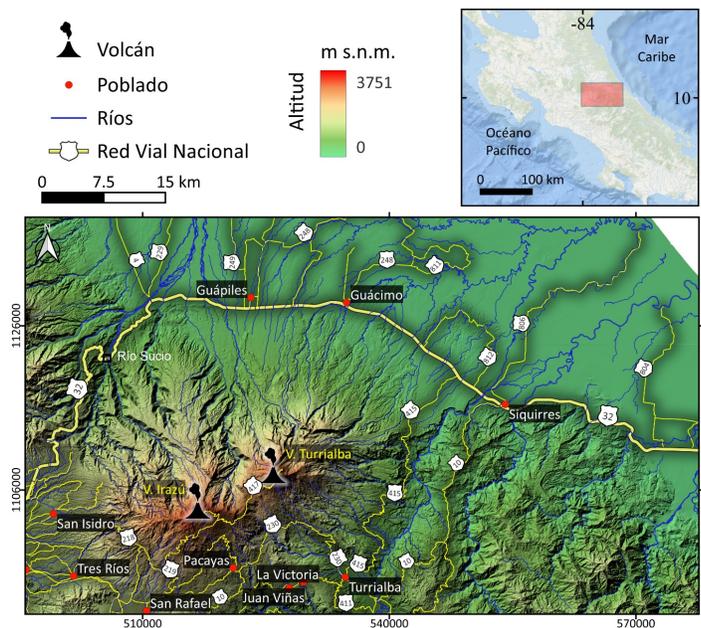


Figura 34. Fotografías aéreas oblicuas; sector del puente sobre el río Sucio



Figura 35. Mapa de ubicación de la Ruta Nacional 32 y su relación con el volcán Irazú

La Ruta Nacional 32 está directamente relacionada con dos de los volcanes activos más peligrosos de Costa Rica, según Brown et al. (2015b): Irazú y Turrialba, debido a su actividad durante el Holoceno y por los registros históricos y evidencias de sus amenazas e impacto posibles a la población, además de sus valores del VIE, PEI y VHI. Por su ubicación, altitud y sistemas de drenaje con respecto al trazo de la carretera (Figura 35) tanto el volcán Turrialba como el Irazú tienen potencial y características para generar lahares que impacten la RN-32. Sin embargo, para el caso específico del análisis del puente sobre río Sucio, la caracterización se limitará al Irazú, ya que su cuenca se encuentra ubicada en el flanco oeste de este volcán; el Turrialba no tiene influencia directa en ese sector.



3.3 Modelo numérico del terreno (MNT) y mapas temáticos para la caracterización y el modelado

En la Figura 37 se muestra el flujograma con los subprocesos y mapas generados y obtenidos a partir del modelo digital de superficie. Posteriormente se hizo una revisión mediante el uso de sensores remotos y el trabajo de campo. Todos estos productos son insumos para la modelación de la amenaza y caracterización de la amenaza volcánica. El MSD utilizado para este trabajo (Figura 38) está disponible para ser utilizado en otras partes del país.

Figura 36. Flujograma sobre la generación del MSD y los mapas que pueden salir a partir de ese modelo como insumos en las siguientes fases.

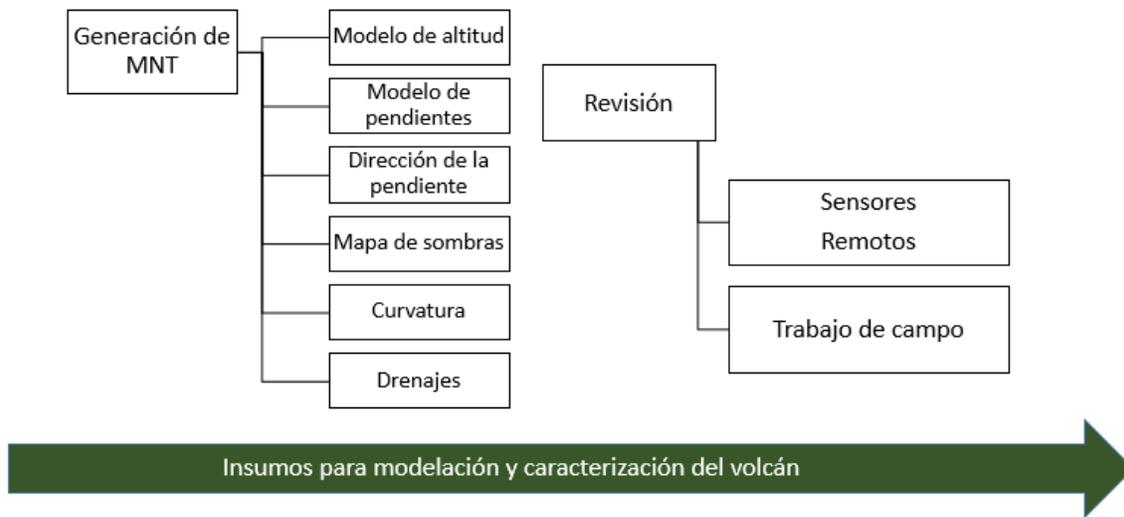
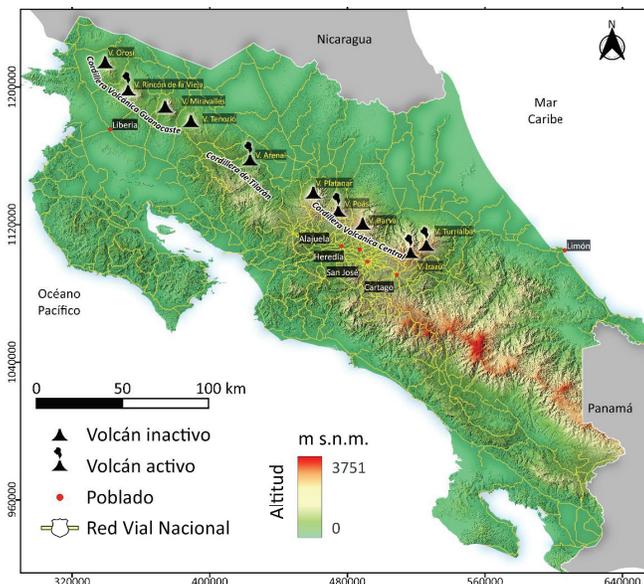


Figura 37. Modelo digital de superficie de Costa Rica con la red vial nacional sobrepuesta junto con los principales volcanes de cada cordillera

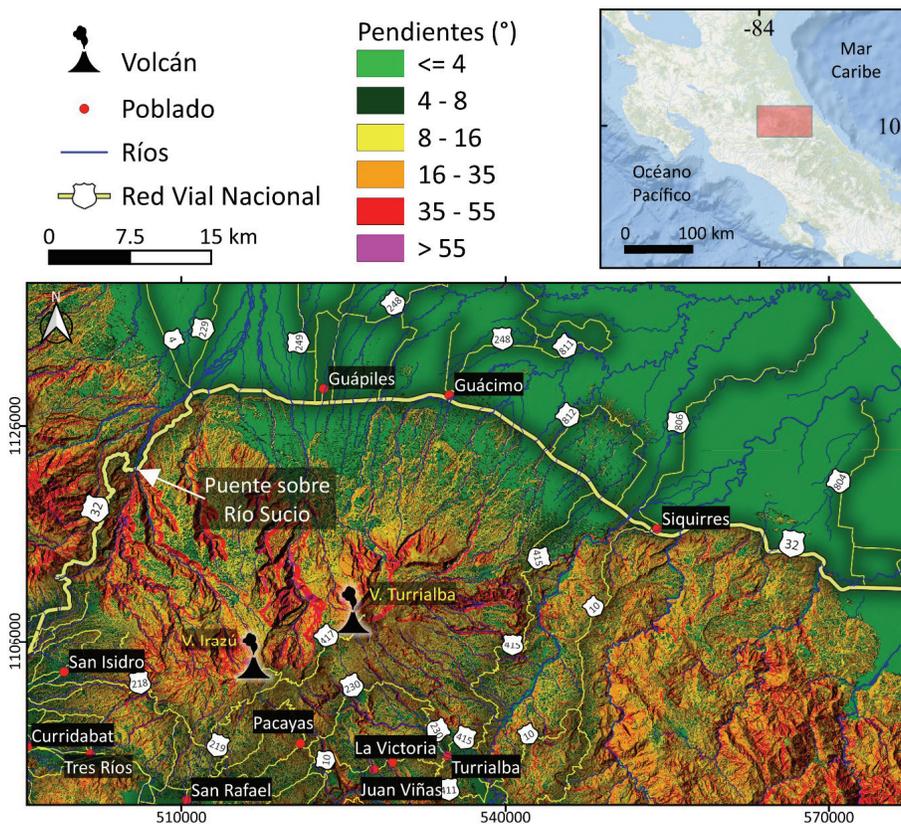


Es necesario hacer un estudio del terreno para parametrizar sus características. Esto permitirá la caracterización geomorfológica del área de estudio. Para esto se recomienda utilizar un modelo numérico del terreno (MNT) de alta resolución, que permita generar varias capas de mapas (pendientes, dirección de las laderas, sombras, curvaturas/segunda derivada, red de drenaje y su densidad comparativa, etc.). Estas facilitan la identificación de las diferentes unidades geomorfológicas. Posteriormente, estas unidades deberán ser verificadas mediante sensores remotos, como imágenes satelitales obtenidas de sitios como [SentinelHub](#) o [Google Earth](#), fotografías aéreas del [SNIT](#), o capturas tomadas con drones. Finalmente, toda la información generada será revisada directamente en el sitio. Con los datos recopilados, se puede realizar un mapa geomorfológico. En el caso de estudio del macizo del volcán Irazú, la cuenca del río Sucio y sus posibles impactos sobre la Ruta Nacional 32, se realizó un MNT generado para todo el país (Figura 38) por Ruiz et al. (2020).

Este modelo permite discernir características naturales y construidas en la superficie terrestre y medir los valores de elevación de la superficie sobre el suelo. Se construyó utilizando la información disponible del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). Los datos de elevación tienen una resolución espacial de 10 m y cubren el 84 % del área terrestre del país, disponibles en forma vectorial, de curvas de nivel. Los datos de elevación fueron compilados mediante métodos fotogramétricos digitales basados en fotografías aéreas tomadas en 2017. Las brechas en los datos de elevación, especialmente en el noroeste del país, fueron rellenadas con datos del proyecto japonés Advance Land Observing Satellite (ALOS) –DSM-AW3D30, con una resolución horizontal de aproximadamente 30 m. Estos datos también fueron convertidos a curvas de nivel, fusionados y corregidos manualmente para compatibilizarlos con los del SNIT. Finalmente, se realizó una interpolación para crear un MNT hidrológicamente corregido que permitiera el flujo de los lahares por los cauces. Como se mostrará más adelante, el MNT fue efectivo para modelar los lahares con el programa LAHARZ del USGS (2014), por lo que se pone a disposición en los entregables de este proyecto para futuros usuarios de esta metodología en otros volcanes del país. Si en el futuro se logran obtener mejores MNT, es recomendable utilizarlos.

En la Figura 39 se presenta el modelo de pendientes del sector estudiado y su relación con la RN-32. Este tipo de mapas ofrece una idea más clara de dónde podrían producirse los procesos de inestabilidad debida a la pendiente del terreno.

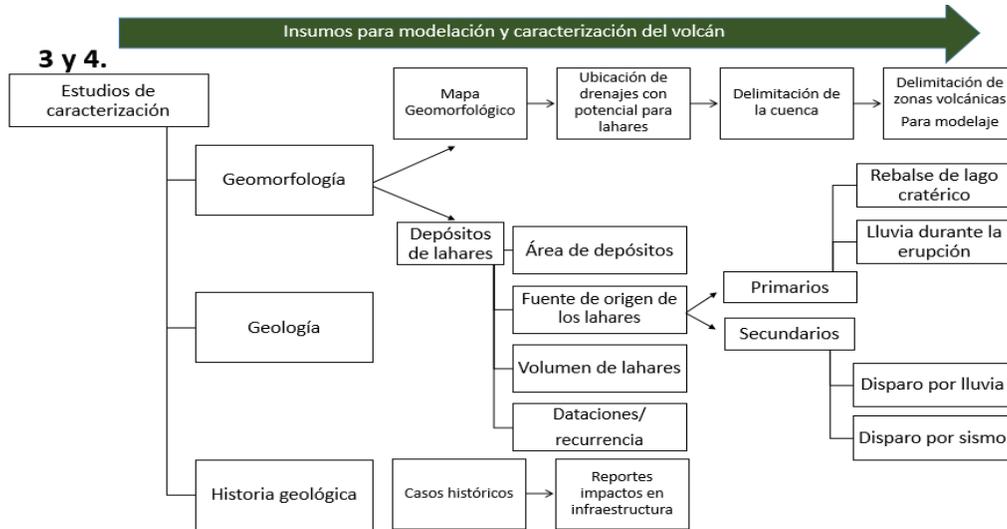
Figura 38. Mapa de pendientes del sector noroeste de volcán Irazú y su relación con la Ruta Nacional 32.



3.4 Caracterización geológica, geomorfológica y de la amenaza de los lahares

La Figura 40 muestra el proceso de caracterización geomorfológica, geológica y de estudios detallados de la amenaza de lahares. Todos estos productos son insumos que fueron considerados y utilizados para modelar los lahares en la cuenca del río Sucio.

Figura 39. Flujograma explicativo del proceso de caracterización en el caso de estudio de los lahares en la cuenca del río Sucio.

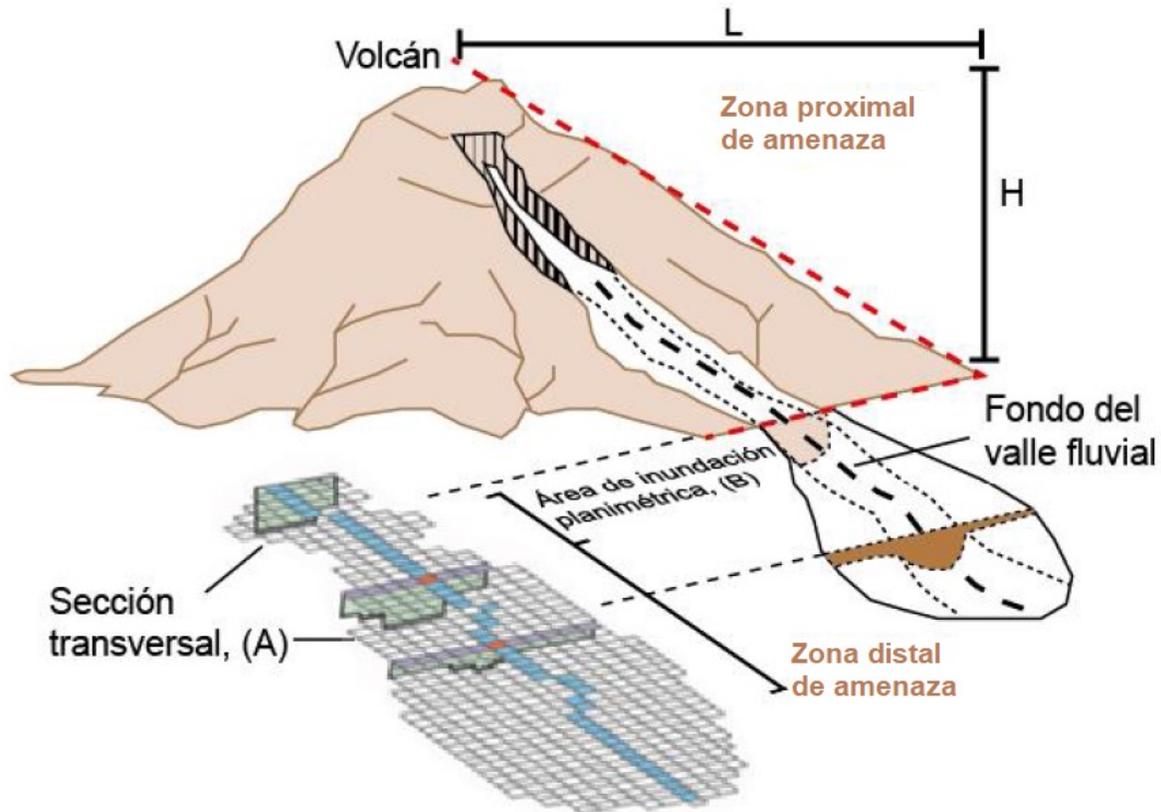


3.4.1 Geomorfología

Se sugiere que la definición de las unidades geomorfológicas se haga a partir de una aproximación morfogenética y el terreno sea clasificado en unidades y grupos que permitan distinguir los procesos endógenos (geodinámica interna) y las formas originadas a partir de procesos exógenos (geodinámica externa) existen referencias que pueden ayudar en esta caracterización (Mora, 2022). Las morfologías asociadas a los lahares estarían agrupadas en este segundo grupo. El mapa geomorfológico es un insumo fundamental para mostrar las relaciones que podrían existir entre la forma del terreno, la incidencia de los lahares alrededor del volcán en estudio, definir las áreas más propensas a su generación y depositación. En la fase de modelación de la amenaza de los lahares, el mapa geomorfológico es necesario para la selección de los sitios de disparo y de impacto.

La movilización de algunos procesos volcánicos, como las coladas de lava y los lahares, dependen sobre todo de la topografía, pendiente del terreno y obstáculos que puedan frenar o cambiar su dirección de tránsito. Usualmente se originan en los terrenos con mayor altitud y se trasladan hasta donde la pendiente decrece y la energía cinética se reduce. Su estudio comienza con el análisis de la relación entre la altura desde la cima del volcán hasta el piedemonte (H) y la distancia horizontal (L), perpendicular, desde el punto más alto hasta el piedemonte, como se muestra en la Figura 41. La zona definida por estas variables se conoce como “zona proximal” de la amenaza. Por otra parte, las corrientes piroclásticas, aunque son más complejas, igualmente dependen de la topografía y pendientes del terreno. Su mecánica turbulenta, diferencias de densidad y temperaturas hacen que su trayectoria sea más difícil de definir y modelar su dispersión, alcance y características de tránsito.

Figura 40. Relación entre la altura del volcán (H) y la distancia horizontal y perpendicular desde la cima al piedemonte (L). La zona que define esta relación se conoce como la "proximal" de la amenaza de lahares. Después del piedemonte y hasta donde llegue el abanico aluvial, se define la zona "distal" de la amenaza. (Modificado de Iverson et al, 1998).



En la zona proximal de la amenaza se producen los procesos generadores de los lahares. Además, en estas áreas también alcanzan las mayores velocidades, debido a las pendientes pronunciadas; además, allí tienen la capacidad de incrementar su volumen como resultado de su capacidad erosiva.

En la zona proximal, los lahares presentan un tirante elevado debido a que todo su volumen permanece confinado en el cauce fluvial, el cual suele ser angosto. Esto hace que concentren su potencial destructivo en los puentes, como sucedió en la parte alta del volcán Poás durante los lahares generados por el terremoto de Cinchona (Alvarado, 2010). La delimitación de las cuencas e identificación de los cauces con potencial para el tránsito de lahares constituyen aspectos importantes del análisis geomorfológico. Para ello, se recomienda trabajar con la base de datos de los ríos de los mapas de Instituto Geográfico Nacional, escala 1: 50.000, ya que los nombres de los ríos y quebradas se pueden asociar directamente con las carreteras y puentes que los atraviesan.

El alcance que tengan los abanicos aluviales generados por lahares en la zona posterior al piedemonte determina la zona distal de la amenaza de lahares. En esta zona, las pendientes bajas del terreno y la colmatación del fondo de los valles fluviales generan inundaciones en el abanico aluvial y un impacto mayor sobre la infraestructura, como ocurrió en los lahares del volcán Irazú en Taras 1963-1965 (Figura 42) (Mora, 1993).

Figura 41. Fotografías del impacto causado por los lahares de 1963 en la zona distal en el sector de Taras, Cartago. A la izquierda se observa el abanico dejado por los lahares y a la derecha la fábrica Kativo.



3.4.2 Geología

Los mapas geológicos son fundamentales para comprender el área volcánica y evaluar la amenaza en estudio. Debe determinarse el tipo de evento o eventos que los han originado y, además, determinar su extensión, para dimensionar su volumen y modelar la amenaza. Para ello, es necesario caracterizar geológicamente las unidades morfológicas identificadas, su tránsito y depósitos.

Esta caracterización debe determinar aspectos como las características de las fuentes de los materiales en las cuencas altas, las áreas con potencialidad de deslizarse, cantidad de eventos (lahares), espesor y variaciones de los depósitos, determinación planimétrica del área de inundación, extensión lateral y frontal del abanico, las características físicas de los depósitos, tipos de rocas y de la matriz (tamaños máximos, promedio), los volúmenes y si es posible estimar la velocidad de los flujos. Esta información debería ser presentada en mapas y perfiles geológicos. Idealmente se debería determinar las edades absolutas o relativas de los lahares.

En zonas tropicales como Costa Rica es muy complicado hacer este tipo de análisis cuando los eventos no son recientes, debido a la vegetación espesa que cubre el territorio rápidamente. Por ejemplo, en el distrito de Taras, Cartago, los lahares del volcán Irazú sucedidos entre 1963 y 1965 ya están cubiertos por vegetación y su estudio es actualmente muy complicado. También en el sector del cauce bajo el río Sucio, cerca de la RN-32, no fue posible identificar los depósitos que correspondan a los lahares recientes, originados con los materiales generados por el deslizamiento de las Torres en la cima del volcán Irazú, aunque sí se aprecia la agradación del cauce bajo el puente a partir de 2014 (Ruiz et al., 2021).

3.4.2.1 Datación de los lahares

La datación de los lahares es relevante, especialmente en términos de los intervalos entre erupciones y para determinar su recurrencia. Sin embargo, es importante notar que en las regiones tropicales solo los eventos más grandes suelen preservarse, pues los depósitos más pequeños se erosionan rápidamente. Esto debe tomarse en cuenta para no subestimar la frecuencia de la actividad volcánica

3.4.2.2 Estudio de la historia eruptiva y la generación de lahares primarios y secundarios

El conocimiento de la historia eruptiva de un volcán es fundamental para caracterizar su dinámica y comprender su comportamiento, su evolución con el tiempo y los peligros asociados. La historia eruptiva puede establecerse combinando estudios geológicos de campo y dataciones, con los registros históricos disponibles. Los estudios de campo permiten caracterizar los depósitos volcánicos en términos de su dispersión, origen, estratigrafía (i.e. eventos que forman el depósito) y las fases de los componentes del volcán. Las erupciones pasadas, por lo tanto, pueden estimarse en términos de su dinámica, estilo de erupción y sus parámetros físicos (e.g. altura de la columna, volumen eruptado, tasa de erupción y duración de la erupción). Estas estimaciones, por supuesto, contienen un grado de incertidumbre que depende de la exposición y el estado de preservación de los depósitos. Los registros históricos pueden reducir esta incertidumbre y pueden contener la descripción de erupciones, cuyos depósitos ya no se conservan y, por lo tanto, representan el único medio para probar la existencia de erupciones pasadas relativamente pequeñas. Este tipo de estudios puede aportar insumos para definir los depósitos y volúmenes, para la modelar los lahares. Para el caso del río Sucio y el volcán Irazú, se asume que la probabilidad mayor reside en los eventos laháricos secundarios generados por lluvias, sismos y deslizamientos.

3.4.2.3 Historia sísmica en los edificios volcánicos: Relación con la generación de lahares secundarios

El conocimiento de la historia sísmica, dentro de los edificios volcánicos, y sus efectos, es crucial porque los sismos pueden desencadenar lahares secundarios. Estos terremotos son usualmente de magnitudes intermedias $M_w < 6,5$, poca profundidad y con intensidades elevadas ($IMM < IX$), las cuales se atenúan en un área relativamente pequeña. Esto hace que estos sismos tengan la capacidad de desestabilizar depósitos de materiales volcánicos poco consolidados en las laderas, disparen deslizamientos que transporten materiales hacia los sistemas de drenaje y luego se conviertan en lahares. La inestabilidad, generada por un sismo de este tipo, puede propiciar las condiciones desfavorables para que incluso meses o años después de sucedidos, continúen generando deslizamientos y, posteriormente, lahares disparados por lluvias. De esta manera, se pueden agregar factores para la modelación y selección de los sitios de origen (Alvarado, 2010; Peraldo & Montero, 1999; Ruiz et al., 2019; Ruiz et al., 2020). En el caso de este estudio, los datos del evento del terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 ($M_s 5,9$) (Montero & Alvarado, 1995; Bommer Rodríguez, 2002 y Climent et al., 2009) son fundamentales. Actualmente el volcán Irazú presenta poca actividad volcánica y, en los últimos años, han sido más comunes y frecuentes los procesos de geodinámica externa, como el actual deslizamiento de las Torres (Mora y Piruli 2017, Ruiz et al., 2021). Por esta razón, en este estudio se tomó como sitio de disparo del lahar la cuenca alta del río Sucio y se asocia con la caída súbita de materiales de la pared oeste del volcán, donde se ubican las torres y antenas de telecomunicaciones.

Entre los mapas generados en esta fase está el mapa geomorfológico general (Figura 43), en el cual se identificaron los abanicos laháricos y las áreas con potencial de generar los disparos de los lahares en la cuenca alta del río Sucio. Nótese que el puente sobre el río Sucio no se ubica dentro del abanico lahárico. En el sector donde está ubicado, el río aun presenta un valle fluvial donde el ancho es cercano a los 95 m y la diferencia de altura entre el cauce y la parte superior es cercana a los 25 m. El fondo del cauce presenta pendientes que son suficientes para que el río continúe con un transporte importante de rocas de gran tamaño. Otro de los mapas generados para la caracterización es el mapa geológico (Figura 44). En este tipo de mapas queda claro el ambiente volcánico del territorio y de las edades relativas de su actividad eruptiva.

Figura 42. Mapa geomorfológico del volcán Irazú y su relación con la Ruta Nacional 32.

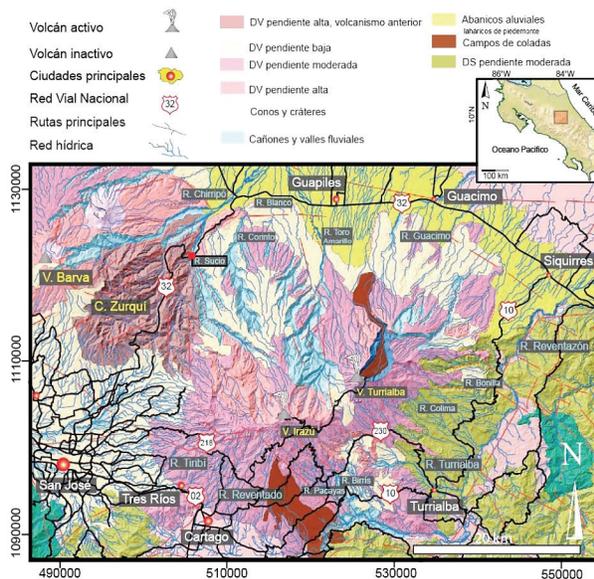
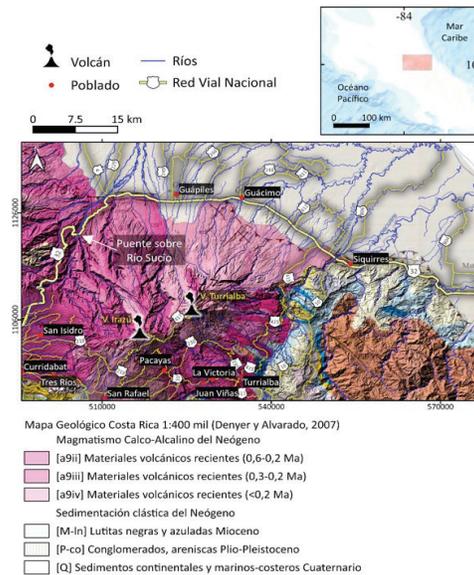


Figura 43. Mapa geológico del sector noroeste del volcán Irazú y su relación con la Ruta Nacional 32.



3.5 Modelación de la amenaza de lahares

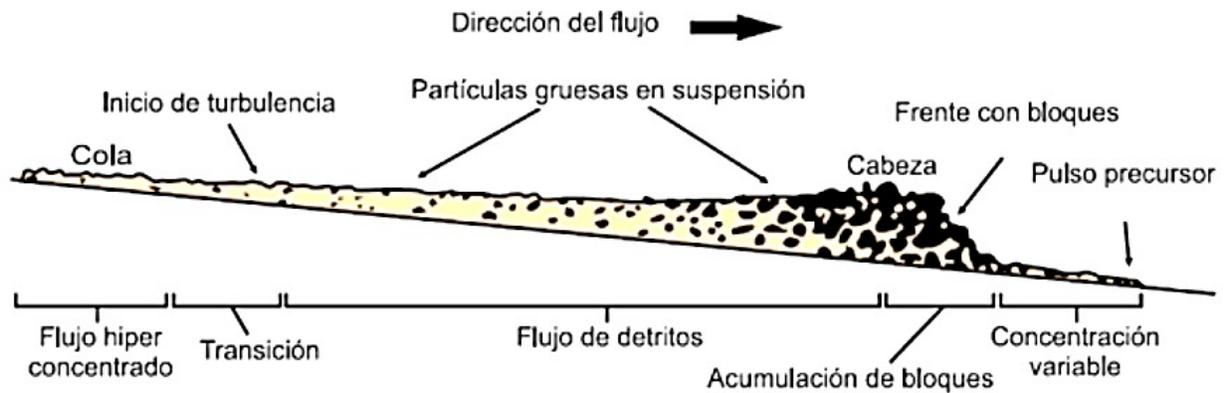
3.5.1 Principios básicos de modelación

Las amenazas volcánicas son complejas de modelar y no siempre es posible tener todos datos de los lahares históricos. Por ello, el comportamiento de los lahares es complicado de predecir con precisión y es poco usual disponer de todos los factores necesarios en un modelo, por lo que es necesario los vacíos de datos mediante opiniones de experto razonables.

Para la gestión del riesgo es necesario modelar varios escenarios plausibles, desde los más optimistas hasta los más pesimistas. Los supuestos permiten crear escenarios mediante análisis de sensibilidad paramétrica para observar cuáles son los casos más realistas del comportamiento del lahar y su impacto sobre los puentes, siempre y cuando sean adecuados, razonables y que no distorsionan los resultados del modelo. Algunos supuestos son dependientes del software de modelación (e.g. LAHARZ), por lo que si se aplican otras herramientas (e.g. Titan 2F), es posible que se requieran otros condicionantes y supuestos. A continuación, se enumeran los aspectos principales que deben tomarse en cuenta al modelar la amenaza de los lahares, según el contexto de este estudio:

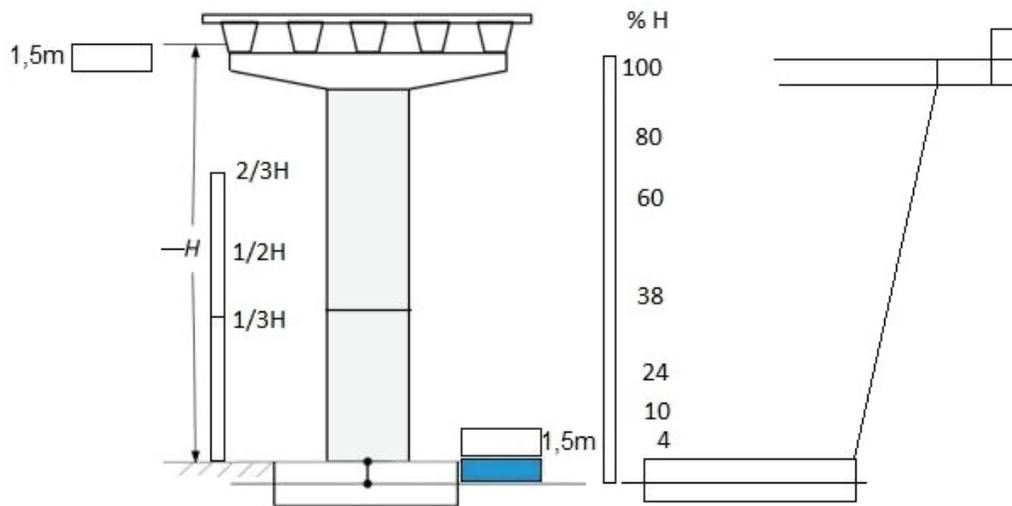
- Dado que los lahares, en Costa Rica, se pueden generar por varias razones, es necesario considerar, al menos, tres escenarios de disparo posibles: 1. Un sismo que genere deslizamientos y flujos de detritos en la parte alta de la cuenca; los materiales de estos deslizamientos alcanzan el sistema de drenaje y fluyen como lahares, como por ejemplo lo que sucedió en el río Sucio por causa del Terremoto de Patillos en 1952. 2. Deslizamiento súbito y voluminoso en la ladera volcánica, como el que sucedió en 1991 en el volcán Irazú y 3. Erupción que genere la acumulación de ceniza, en la parte alta de la cuenca y que sean erosionadas por las lluvias, como en 1963 en el río Reventado, en Taras.
- El tipo de lahar que se va a suponer, para cada uno de estos escenarios, puede ser morfológicamente similar al de la Figura 45. En el frente del flujo se acumulan bloques de tamaño métrico transportados en suspensión, a causa de la elevada densidad del lahar. Estos bloques, frecuentemente de composición andesítica, tienen una gran capacidad destructiva de la infraestructura, por su energía cinética, velocidad de transporte e impacto.

Figura 44. Perfil de un lahar típico y como los que se ha supuesto para la metodología propuesta. Modificado de Vallance & Iverson (2015).



- Cuando la modelación de los lahares se realiza con el programa LAHARZ, los datos de salida ilustran el alcance del lahar a lo largo del río, el área de inundación y la altura del lahar sobre el cauce. Es posible suponer que, si el lahar alcanza el sitio del puente y su tirante es igual a la altura de la superestructura, incluida la losa de tránsito, el puente colapsaría por la energía de empuje y el impacto de los bloques. Si la altura del lahar es inferior a la altura de la losa o viga -1,5 m, la estabilidad del puente podría quedar comprometida
- Dado que no es posible predecir las dimensiones del próximo lahar (Iverson et al, 1998), deberá estimarse su granulometría, volumen y características hidráulicas y reológicas dentro del tramo seleccionado.
- Los datos de los lahares pasados pueden suministrar la información para considerar los escenarios futuros posibles. Sin embargo, debido a la dificultad de tener acceso a esos datos, los volúmenes utilizados en estas de modelaciones pueden provenir de tres escenarios posibles:
 1. Peor escenario, volumen de 5 millones de m³
 2. Escenario intermedio 1, volumen de 3 millones m³
 3. Escenario intermedio 2, volumen de 2 millones de m³
 4. Mejor escenario, volumen de 1 millón de m³
- Tómese en cuenta que los lahares más voluminosos son menos frecuentes que los de volumen menor.
- El volumen de los lahares controla la extensión de su alcance río abajo.
- Se considera que si el lahar modelado alcanza el sitio en donde se ubica el puente y la altura de este en el cauce supera 1,5 m sobre el nivel del cauce, el evento tiene potencial de empezar a afectar los pilares del puente, las rampas de aproximaciones y los bastiones (Marzocchi et al., 2009). Cuanto mayor sea la altura del tirante del lahar, mayor es la posibilidad de daños en el puente, hasta llegar a la superestructura (Figura 46).
- Si se trata de un puente con viga simple, sin pilares, se toma como supuesto el mismo efecto destructivo de la altura del lahar, excepto en lo que concierne los pilares, bastiones y rampas de aproximación del puente.

Figura 45. Proporciones de las alturas H a las que podría llegar un lahar e impactar un puente. Se supone que el tirante del lahar modelado se relaciona con la posibilidad de impacto destructivo en la infraestructura.



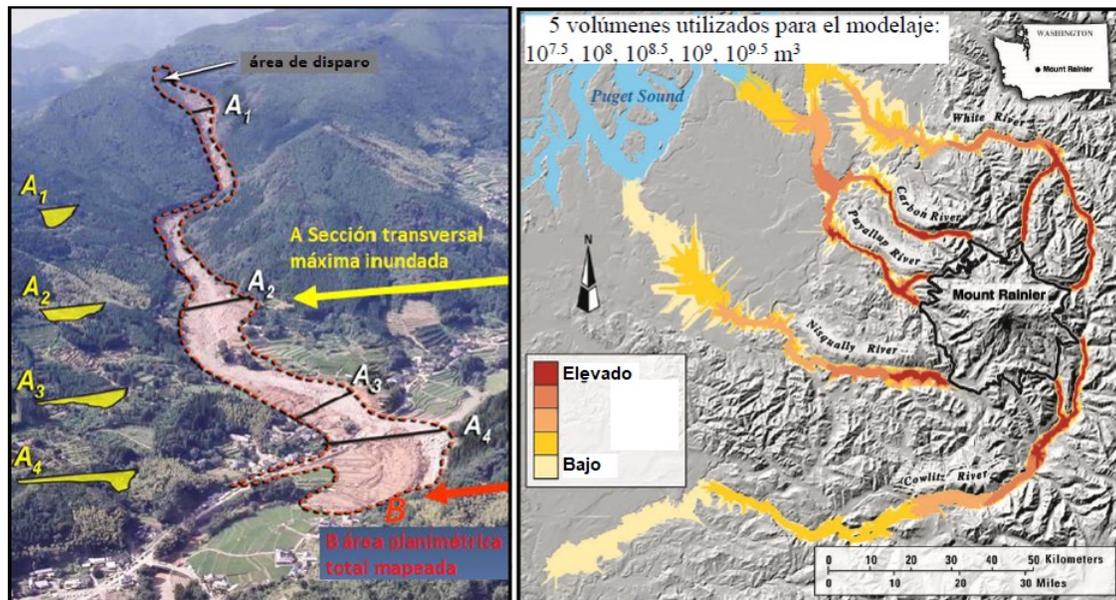
3.5.2 Modelación de los lahares con LAHARZ

La modelación de los lahares puede realizarse mediante el software LAHARZ, plataforma de un modelo empírico desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para delimitar, objetivamente, las áreas de amenaza de lahares. Muestra, de manera cualitativa y determinística el área de inundación de un lahar, sobre los modelos de elevación digital. La metodología fue desarrollada para que, mediante un sistema de información geográfica (SIG) se reproduzcan los resultados, tomando en cuenta los volúmenes de los lahares y el MNT. La aplicación del modelo LAHARZ sobre la plataforma ARC-GIS, utiliza ecuaciones derivadas estadísticamente de los datos del flujo de los lahares históricos en diferentes lugares del mundo (Schilling, S. P., 2014). Permite calcular un área de amenaza proximal y, mediante un modelo de elevación digital, permite estimar las áreas con fuentes de amenaza distales y los volúmenes asignados.

Para modelar los flujos con LAHARZ se derivarán, estadísticamente, las ecuaciones que relacionan el volumen del lahar con el área inundable, en sección transversal, y con el área inundable planimétrica (Iverson et al, 1998). Dichas fórmulas permiten al LAHARZ controlar los límites laterales de la sección transversal (A) y determinar el área de inundación planimétrica (B) (Figura 47). Mediante la relación del desplazamiento vertical neto con la distancia horizontal H/L, se definen las fronteras de las zonas proximal y distal de la amenaza, en donde los valores de H/L están en el rango de 0,1 a 0,3, según el tamaño y tipo del evento proximal (Iverson et al, 1998).

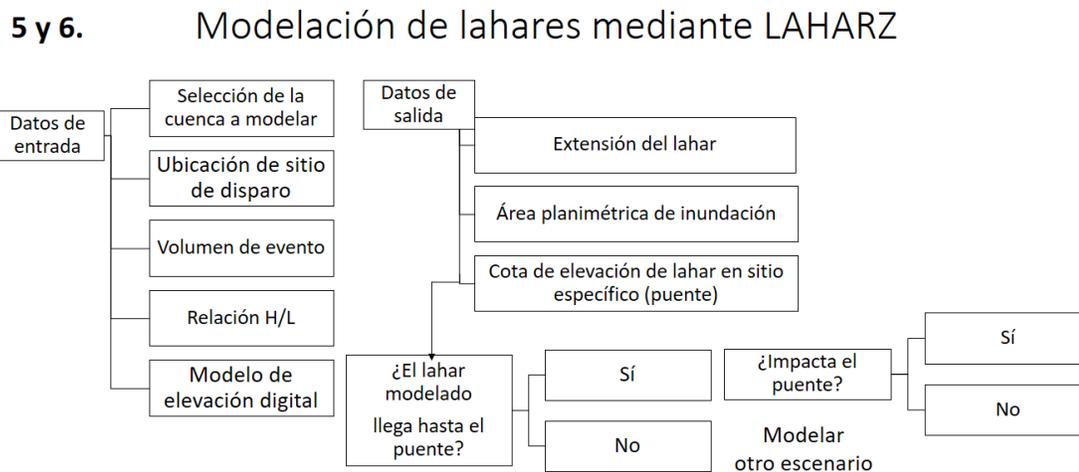
Para su funcionamiento, el LAHARZ requiere de cinco insumos o datos de entrada: 1. La selección de la cuenca en donde se ubica el sitio de disparo. 2. La ubicación del sitio de disparo, dentro del cauce (o el modelo no funciona), a partir de la cual se ejecutará el cálculo del flujo. 3. Los volúmenes del lahar, 4. La relación H/L para el volcán estudiado, y 5. El modelo de elevación digital sobre el que corre el modelo (MNT). En la sección última se presenta un detalle de las instrucciones del uso de LAHARZ.

Figura 46. En la imagen de la izquierda, se muestran el área de disparo del lahar, los límites laterales de la sección transversal (A) y el área de inundación planimétrica. En la figura de la derecha, se muestra un ejemplo del funcionamiento de LAHARZ en el volcán Monte Reiner en Estados Unidos, modificado de Iverson et al. (1998).



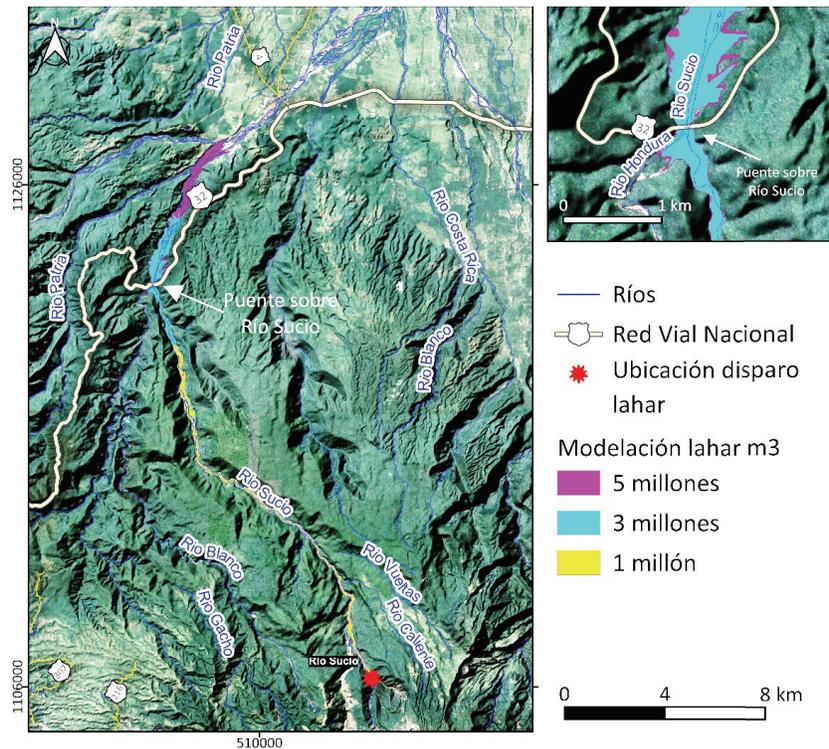
En este caso se eligió el software LAHARZ. Para la modelación, se siguen los pasos indicados en el flujograma de la Figura 48, los datos de entrada se toman del análisis de la fase anterior.

Figura 47. Flujoograma de la modelación de lahares mediante LAHARZ y su análisis de impacto en la estructura evaluada.



Para la modelación realizada en el río Sucio se utilizaron 4 volúmenes de referencia y se definieron los siguientes escenarios: 1. Peor escenario, volumen de 5 millones de m³; 2. Escenario intermedio 1, volumen de 3 millones m³; 3. Escenario intermedio 2, volumen de 2 millones m³ y 4. Mejor Escenario, volumen de 1 millón de m³. Se considera que los lahares muy voluminosos se producen con menor frecuencia que los de volumen menor. Además, hay que considerar los supuestos mencionados en la sección 5.9.1. Los resultados de la modelación de tres de los escenarios (5, 3 y 1 millones de m³) descritos anteriormente se muestran en las Figuras 49 y 50. El resultado del escenario de 2 millones de m³ se muestra en la Figura 51.

Figura 48. Mapas con los resultados de los escenarios del alcance, río abajo, de las trayectorias de los lahares modelados en la cuenca y cauce del río Sucio.

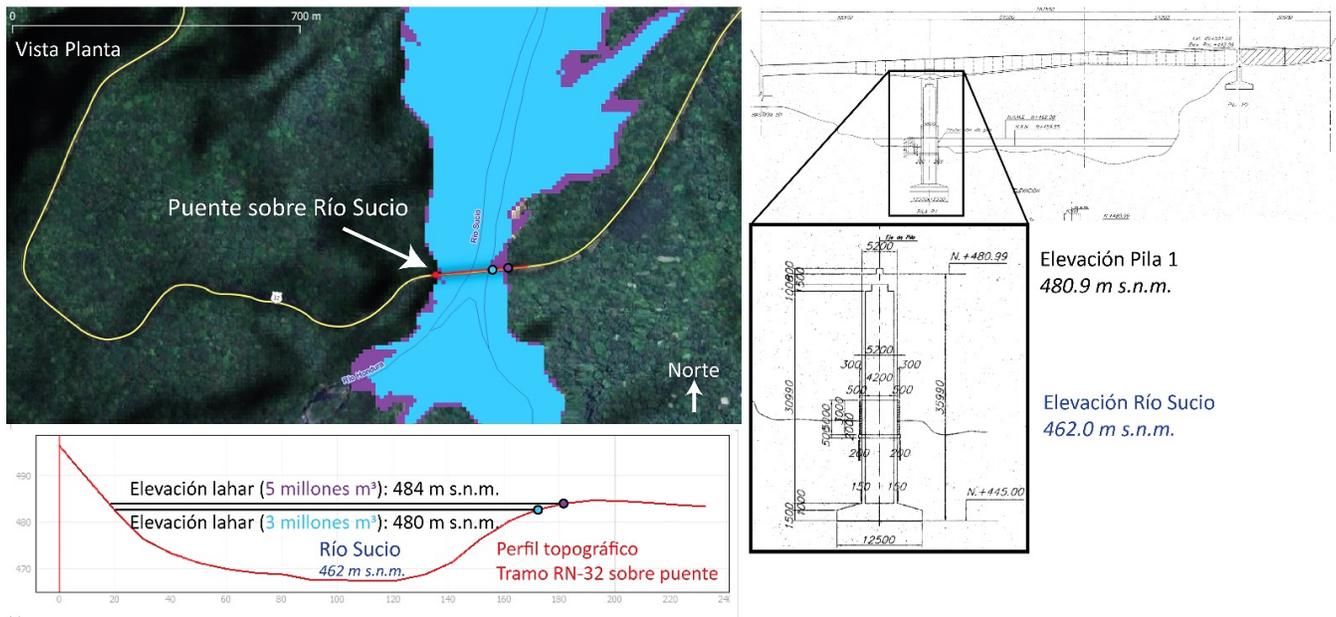


Según los resultados obtenidos en la modelación de lahares, el evento de 1 millón de m³ no alcanzaría el sitio del puente, y su volumen se distribuiría en el cauce y márgenes fluviales antes de llegar al sitio de estudio. Posteriormente y con el tiempo, los sedimentos serían acarreados por el río y podrían generar una agradación del fondo del cauce. En el caso de los escenarios intermedio 1 (3 millones de m³), intermedio 2 (2 millones de m³) y peor escenario (5 millones de m³), modelados en el río Sucio, los alcances de las trayectorias de cada uno de estos eventos llegan y pasan el sitio donde se ubica el puente de la RN-32 (Figuras 49 y 51).

En las Figuras 50 y 51 se muestran los tirantes de los lahares modelados en el perfil del río en el sitio donde se ubica el puente del río Sucio de la RN-32. En ese sector el valle fluvial presenta una morfología similar a la de trapecio invertido, con paredes a los costados que tienen alturas superiores a los 25 m y un ancho del cauce de 95 m, esto favorece que el tirante de los lahares muy voluminosos tenga la posibilidad de crecer hasta casi alcanzar la superestructura del puente. Habrá que prestar atención detallada y precaución ante estos escenarios.

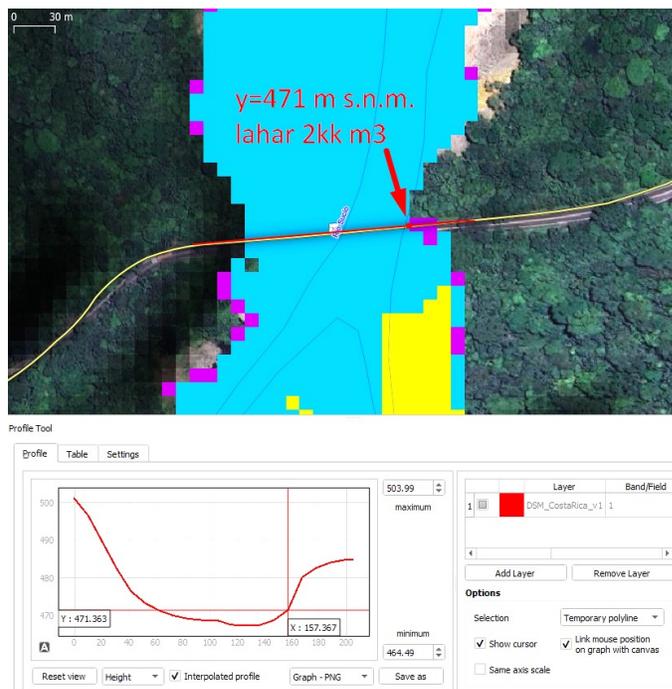
Según los planos del puente obtenidos del SAEP, la elevación máxima de la pila es de 480.9 m s.n.m. Los resultados muestran que el lahar de 5 millones de m³, sobrepasa la elevación de la pila por 3 m, impactando la superestructura con el frente de bloques según el supuesto planteado en la sección 6.6.1 de la guía metodológica. Mientras que el lahar de 3 millones de m³ queda 0,9 m por debajo de la altura de la pila y por ende debajo de la superestructura, sin llegar a impactarla. Sin embargo, sí supera el diseño hidráulico que plantea que el nivel del flujo no debería estar a menos de 1,5 de la superestructura por lo que este evento sigue siendo potencialmente muy peligroso.

Figura 49. Perfiles topográficos, tirantes estimados de los lahares y altura del puente. Las líneas señalan la altura del lahar con respecto a la altura del puente de río Sucio.



El resultado del escenario intermedio 2, con un volumen de 2 millones de m³ muestra que el tirante del lahar llega a la cota 471,3 m s.n.m. es decir, equivalente a un 55 % de la altura de la pila del puente (Figura 51). A este tipo de eventos también se les debe de prestar atención y precaución por su capacidad abrasiva y de impacto de los bloques rocosos grandes.

Figura 50. Resultados de modelación de lahar de 2 millones de m³. Se puede ver cómo este evento pasaría aguas abajo del puente y según su tirante llegaría a un 55 % de la altura a la que se encuentra la superestructura.



3.6 Valoración del daño y determinación del impacto

El siguiente paso consiste en la estimación del daño que estos eventos podrían generar en el puente, según la altura de sus tirantes calculados y de los supuestos definidos en la sección 3.5.1.

La valoración del daño, aplicada en esta metodología, se determina a partir de los escenarios modelados y para los casos en los que el lahar alcanza el sitio en donde se ubica el puente; luego se analiza si el tirante del lahar supera 1,5 m sobre el nivel base y se define si el evento tiene potencial de afectar partes del puente, como por ejemplo sus pilas, si es que los presenta, tramos de aproximación y sus bastiones. En la Tabla 12, se define que, a diferentes porcentaje de la altura podrá generarse un impacto mayor en el puente, hasta llegar a la superestructura, en cuyo caso podría destruirse por completo. Los resultados de los escenarios de 5 y 3 millones de m³ indican en ambos casos tirantes muy cerca de la superestructura con niveles daño nivel 4 que implica destrucción total del puente según la Tabla 14.

Para el escenario intermedio 2 con volumen de 2 millones de m³, para un lahar con 55 % del tirante del espacio, la Tabla 14 indica un nivel de daño 3.

En este caso los daños estructurales serían severos, que podrían generar la socavación profunda de los cimientos, desplazamiento de la pila, fisuras significativas. La funcionalidad del puente podría quedar seriamente comprometida y podría ser necesario restringir el acceso o cerrar el puente temporalmente. En la Tabla 14 se muestran los % de altura, o tirante, del lahar en el sitio en donde se ubica el puente, y los niveles de destrucción definidos para cada caso. En negrita se marcan los rangos alcanzados en los diferentes escenarios modelados. La descripción de los daños asociados a cada uno de los niveles de destrucción propuestos se muestra en la Tabla 15.

Tabla 14. Relaciones entre el tamaño del lahar, modelado según su tirante y el % con respecto a la altura del puente específico, según su capacidad destructiva.

Tamaño de lahar (Rango del volumen - Tirante % de espacio)	Nivel de daños	Capacidad destructiva	Capacidad destructiva con variabilidad climática. Definido por la relación IDF
80-100^(1y2)	Nivel 4 - Destrucción total	7	9
60-80	Nivel 4 - Destrucción total	6	8
38-60⁽³⁾	Nivel 3 - Daños severos	5	7
24-38	Nivel 3 - Daños severos	4	5
10-24	Nivel 2 - Daños moderados	3	3,6
4-10	Nivel 2 - Daños moderados	2	2,4
1-4	Nivel 1 - Daños menores	1	1,2
0⁽⁴⁾	Nivel 0 - Sin daños	0	0

1. Peor escenario, volumen de 5 millones de m³; 2. Escenario intermedio 1, volumen de 3 millones m³; 3. Escenario intermedio 2, volumen de 2 millones m³ y 4. Mejor escenario, volumen de 1 millón de m³. IDF: Intensidad-Duración-Frecuencia actual.

Tabla 15. Definición y descripción de los niveles de daños posibles causados por lahares en puentes, según la propuesta metodológica.

Nivel de daños	Descripción de daños
Nivel 4 - Destrucción total Nivel 4 - Destrucción total	El puente ha colapsado o ha sido arrasado por el lahar. Los daños son irreparables, con pérdida total de la estructura. La reconstrucción completa del puente es necesaria.
Nivel 3 - Daños severos Nivel 3 - Daños severos	El puente presenta daños estructurales graves, como la socavación profunda de los cimientos, desplazamiento de pilas o estribos, fisuras significativas en elementos estructurales o deformaciones importantes en la estructura. La funcionalidad del puente está seriamente comprometida y puede ser necesario restringir el acceso o cerrar el puente temporalmente.
Nivel 2 - Daños moderados Nivel 2 - Daños moderados	Daños más significativos que pueden incluir erosión considerable en los estribos o pilas, asentamientos diferenciales menores, socavación parcial de los cimientos, o acumulación de grandes cantidades de sedimentos y escombros. El puente aún es funcional, pero se requiere reparación para evitar daños mayores.
Nivel 1 - Daños menores	Daños superficiales o leves en el puente: erosión menor en los estribos o pilas, aproximaciones. Pequeños depósitos de sedimentos o escombros, o daños en barandas y otros elementos no estructurales. La funcionalidad del puente no se ve comprometida.
Nivel 0 - Sin daños	El puente no presenta daños visibles. El lahar no ha impactado la estructura de manera significativa y no se observan signos de desgaste, erosión o acumulación de sedimentos.

3.7 Análisis de la intensidad de la amenaza

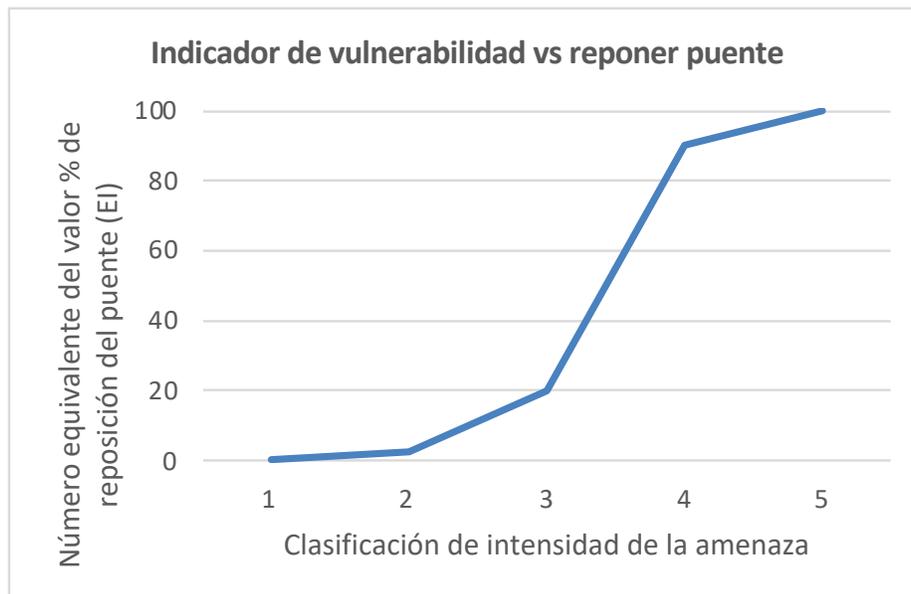
Este análisis se basa en la forma cómo impactan los lahares y las repercusiones estructurales (costos de los daños y financieros de reposición o reparación eventuales de la estructura). El procedimiento permite identificar el “peor daño” en la infraestructura analizada. Los daños físicos que podría provocar el lahar en la estructura del puente podría ligarse con las consecuencias en el servicio que brinda el puente al corredor vial que pertenece. Esto estaría relacionado con la importancia del puente, redundancia y existencia de vías alternas. Entonces, en el caso de un lahar en el que no hay daños o son menores y el puente puede seguir brindando el servicio, la intensidad del efecto es baja. Mientras que, por el contrario, si hay daños estructurales, el servicio se interrumpe (intensidad elevada). Para traducir este juicio cualitativo en un equivalente numérico, se puede utilizar un análisis del costo de los daños y el valor financiero de reponer o reparar la estructura. Por ejemplo, en la Tabla 16 la descomposición del valor se basa en una encuesta y criterios de experto sobre los costos relativos globales de los daños en puentes, incluido el valor financiero, según su proporción con respecto al costo de la rehabilitación o reposición total respectivo.

Tabla 16. Clasificación de la intensidad de la amenaza de lahares, su descripción asociada y un número equivalente del valor, según la proporción del costo de reposición del puente y las implicaciones en el servicio que brinda.

Calificación del impacto, según la intensidad de la amenaza	Grado de daños en la estructura y del servicio que brinda (Referencia, con respecto a la destrucción completa de la estructura)	No. equivalente del valor, % de reposición, del puente (EI)
1: Nula a baja (Nivel 0)	Sigue prestando servicio sin problemas, la estructura es estable. No hay daños estructurales, ni en sus sistemas de seguridad vial; podría requerir limpieza y mantenimiento menor; hay redundancia o vías alternas	0,5
2: Baja (Nivel 1)	Sigue prestando servicio, pero con problemas de seguridad vial. Presenta algunos daños menores en elementos no estructurales, requiere intervención para mejorar su funcionamiento seguro. Hay vías alternas. El costo de reparaciones puede ser de hasta 2,5 % del valor total del puente.	2,5
3: Moderada (Nivel 2)	Hay daños no-estructurales moderados; se requiere paso regulado y modificación del servicio. Necesita intervención para volver al funcionamiento normal y seguro. Hay vías alternas. Las reparaciones podrían llegar a costar hasta un 20% del valor total del puente.	20
4: Elevada (Nivel 3)	Se suspende el servicio hasta que se realice la intervención. Presenta daños estructurales severos; podría quedar fuera de servicio permanentemente. Inseguridad vial para los usuarios. Hay vías alternas. *Si no hubiera vías alternas la calificación de la intensidad pasa a muy elevada. Los costos de reparación podrían llegar a 90 % del valor total del puente; en algunos casos podría ser mejor construir un puente nuevo. Dependiendo de la ubicación del puente, la reposición financiera del puente implicaría un presupuesto por un decreto de emergencia o financiamiento internacional.	90
5: Muy elevada (Nivel 4)	No se puede brindar servicio hasta construir puente nuevo; la reposición es del 100 % de su valor. Destrucción total del puente. No hay vías alternas, por lo que el servicio está completamente detenido e implica pérdidas económicas para el país. Dependiendo de la ubicación del puente, la reposición financiera implicaría el uso de un presupuesto por decreto de emergencias o financiamiento internacional.	100

En negrita se marcan la calificación obtenida para los escenarios modelados aquí para el puente sobre el río Sucio de la RN-32

Figura 51. Clasificación de la intensidad de la vulnerabilidad vs. el número equivalente del valor % de reposición del puente.



3.8 Análisis del período de recurrencia de los lahares

Los períodos de recurrencia de los lahares dependen de múltiples factores como la actividad volcánica, la geología del terreno, las condiciones climáticas y el tamaño del evento disparador. Existen pocas referencias en literatura sobre el volumen y la recurrencia de estos eventos. Sin embargo, a partir de los datos presentados por Iverson et al. (1998), se pueden estimar las siguientes tasas de recurrencia según el volumen de los eventos (Tabla 17).

Tabla 17. Períodos de recurrencia estimados para diferentes rangos de volúmenes de lahares basados en datos recopilados por Iverson et al. (1998)

Período de recurrencia	Rango de volúmenes estimados de lahares
5.000 a 10.000 años	$> 1000 \times 10^6 \text{ m}^3$
1.000 a 5.000 años	$100 - 1000 \times 10^6 \text{ m}^3$
500 a 1000 años	$10 - 100 \times 10^6 \text{ m}^3$
100 a 500 años	$2 - 10 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Escenarios 1 y 2)
50 a 100 años	$1 - 2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Escenarios 3 y 4)
10 a 50 años	$< 1 \times 10^5 \text{ m}^3$

Para el caso de los escenarios modelados en el río Sucio, los eventos de 5, 3 y 2 millones de m^3 llegan donde se ubica el puente y continúan su desplazamiento aguas abajo. Estos tres escenarios tienen potencial de generar daños severos en el puente y son eventos que de acuerdo con su tamaño se consideran intermedios a grandes para el contexto geológico del volcán Irazú; en otros contextos y lugares serían lahares pequeños. Según el registro geológico, eventos así de voluminosos descienden con mucha energía cinética y poder erosivo, aunque tienen frecuencia moderada. En el escenario de 1 millón de m^3 el lahar llega al puente y

ese volumen se decanta en el cauce y valle fluvial, aguas arriba, antes de llegar al sitio del puente. Los eventos de este tipo tienen una frecuencia muy elevada.

En la Tabla 18 se muestra la relación entre la capacidad destructiva de los lahares. Se establece un equivalente numérico Qf, calculando el inverso del período de recurrencia máximo, para cada clase: $Qf = 1/T_{max}$. Para una mejor visibilidad del resultado, Qf puede multiplicarse por 100 y obtener QF.

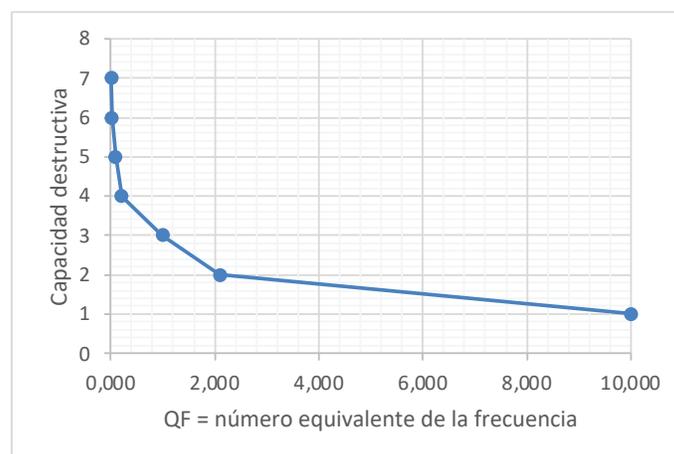
Tabla 18. Períodos de recurrencia de los lahares y su capacidad destructiva

Nivel de daños	Frecuencia y calificación del evento	Período de recurrencia para el tipo de actividad o proceso volcánico (lahares; orden de magnitud)	Cuantificación de la frecuencia del proceso volcánico (lahares) (Qf)	Número equivalente QF=(100*Qf)
4	F0 - Extremadamente baja	5.000 a 10.000 años	0,0001	0,01
4	F1 - Muy baja	1.000 a 5.000 años	0,0002	0,02
4	F2 - Baja	500 a 1000 años	0,001	0,10
3 y 4	F3 - Moderada	100 a 500 años	0,002	0,2
1 y 2	F4 - Elevada	50 a 100 años	0,01	1
0 y 1	F5 - Muy Elevada	10 a 50 años	0,02	2
0	F5 - Casi permanente	1 a 10 años	1	10

Con los datos de la altura del tirante del lahar, el nivel de los daños y, a partir de una línea base común de frecuencia para todos los lahares (tabla 43), se propone estimar la probabilidad de que sucedan (frecuencia, período de recurrencia estimado (Tr) de los eventos con las mismas características y en un sector específico. Estos datos pueden provenir de los registros históricos, evidencias geológicas y juicio de expertos. Para ello, se establece un equivalente numérico Qf, calculando el inverso del período de recurrencia máximo, para cada clase: $Qf = 1/T_{max}$. Para una mejor visibilidad del resultado, Qf puede multiplicarse por 100 y obtener QF. Al graficar los datos de QF vs. los daños generados por los lahares, se puede observar cómo los lahares más voluminosos se producen con menor frecuencia que los de menor volumen.

Con estos datos se puede generar un gráfico de la frecuencia de eventos y los daños que se pueden asociar a eventos muy grandes o pequeños. Los eventos más grandes y más destructivos se producen pocas veces (Figura 53).

Figura 52. Frecuencia de eventos vs. nivel de daños esperados. Mientras más frecuente es el evento, mayor el número equivalente (QF) y menor es el nivel de los daños probables. Los lahares con mayor nivel de daños son menos frecuentes.

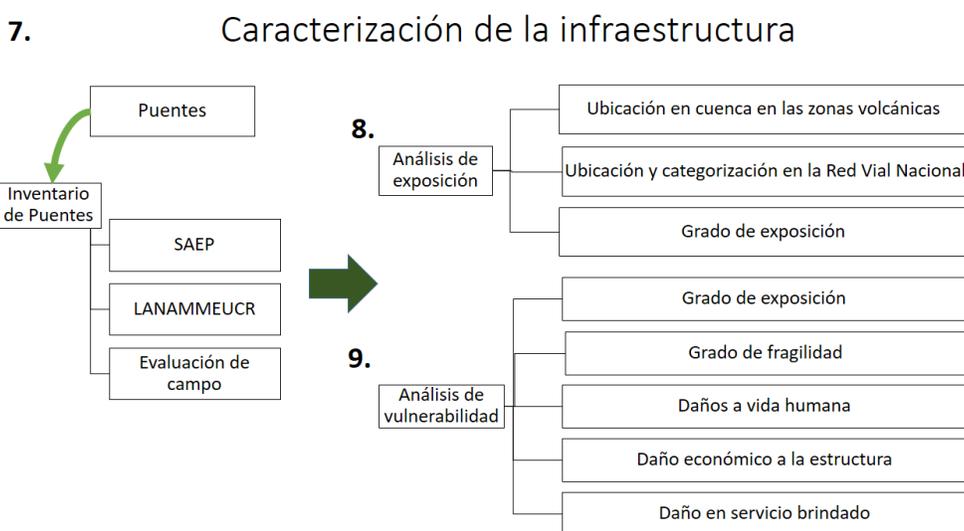


3.9 Caracterización del puente sobre el río Sucio

Para caracterizar la infraestructura en este caso puentes, se consultan los inventarios de puentes del COSEVI-SAEP y el visor cartográfico de puentes de Lanamme UCR. Si falta información en esas bases de datos, se puede hacer una evaluación de campo. La accesibilidad a estas bases de datos es clave. En el caso del ejemplo práctico con el puente del río Sucio, se utilizó la base de datos del SAEP como invitado, sin necesidad de abrir una cuenta en la plataforma, lo que facilitó el acceso a la información. El visor de puentes de Lanamme UCR también es de acceso libre.

En la Figura 54 se muestra el flujograma con los pasos para analizar la exposición y la vulnerabilidad de los puentes. Los datos para la caracterización provienen de ubicar la estructura en el contexto geográfico y volcánico de la zona de estudio, y su categorización en la red vial nacional.

Figura 53. Flujograma que indica los subprocesos para el análisis de la exposición y vulnerabilidad de la estructura estudiada. En este caso los puentes.

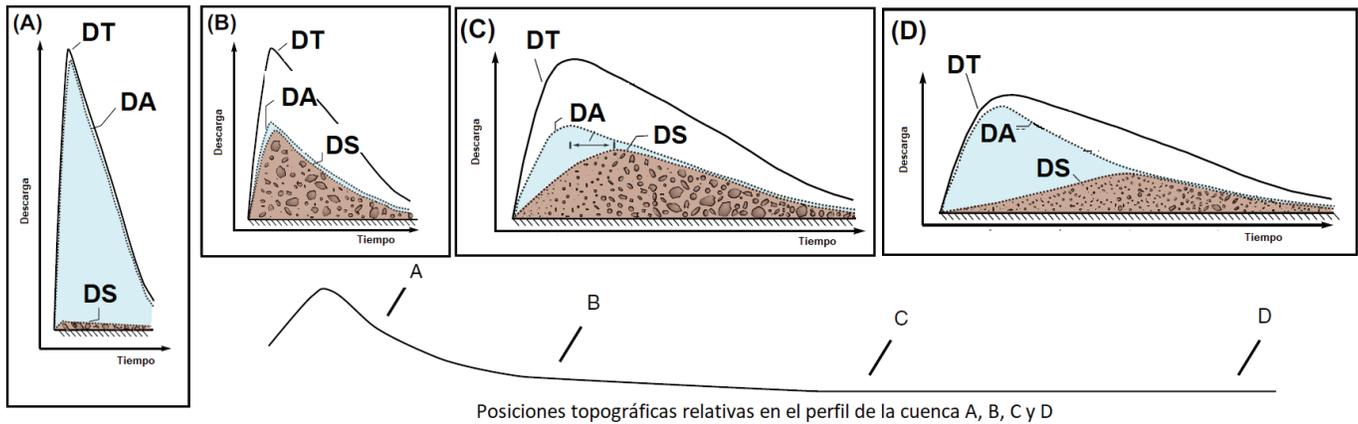


El análisis de la exposición del puente se hace mediante la valoración de su posición con respecto al perfil de la cuenca y el edificio volcánico. Además, se incluyen datos de tránsito promedio diario (TPD), tipo de red vial a la que pertenece entre otras. Estos datos se pueden consultar en el visor de puentes de Lanamme UCR.

En el caso de estudio tenemos que este puente sobre el río Sucio está ubicado dentro del edificio del volcán Irazú, en la sección de la cuenca del río Sucio donde un lahar en su valle fluvial tiene potencial de aumentar su tirante y tener energía de impacto destructiva. El puente pertenece a la Red Vial Nacional de categoría Distribuidores Regionales, la segunda categoría por debajo de la Red Vial de Alta Capacidad. Es un puente de tipo bidireccional, con un carril en cada sentido, con TPD = 9000 vehículos de los cuales unos 1476 corresponden tráileres que viajan hacia los puertos del Caribe.

Para evaluar el grado de fragilidad de la vulnerabilidad del puente evaluado se utilizó una matriz de 10 indicadores generada con criterios de expertos en este tipo de estructuras. Los parámetros evaluados han sido divididos en cuatro grupos: 1. estructurales, 2. funcionalidad del puente 3. ubicación del puente a lo largo de la cuenca y 4. su relación con el impacto económico y financiero en caso de daño, su reposición y reparación (Tabla 19), y con esto puede continuar la modelación de la amenaza. Cuando la clasificación de la vulnerabilidad es media, elevada y muy elevada se justifican modelaciones más precisas y detalladas. Para la ubicación del puente en la cuenca se puede guiar por la Figura 55.

Figura 54. Perfil de la cuenca utilizado para el análisis de la posición del puente, su vulnerabilidad y grado de exposición (ubicación) ante la amenaza de lahares. DT=Descarga total, DS=Descarga de sedimentos y DA=Descarga de agua



3.10 Análisis de indicadores de vulnerabilidad para el puente de río Sucio

Se presentan los resultados del análisis de vulnerabilidad del puente sobre el río Sucio en la RN-32. En la hoja electrónica entregada se encuentra la descripción de cada nivel para cada indicador según sea el caso.

Tabla 19. Resultados del análisis de vulnerabilidad del puente sobre río Sucio Ruta Nacional 32

Indicadores	Tipo	Valor	Vulnerabilidad	Clasificación
1. Tipo de superestructura del puente	Viga cajón de una celda	0,3	0,0225	
2. Tipo de material del puente	Concreto preesforzado	0,4	0,05	
3. Condición de estado del puente	Alarmante	1	0,1	
4. Intervalo de longitud	Mayor que 100 m	1	0,1	
5. Presencia de pilas	Sí - Tramo Continuo	0,8	0,08	
6. Redundancia	Sí. Puentes a lo largo de rutas primarias con rutas alternas similares	0,5	0,025	
7. Importancia	Crítico	1	0,15	
8. Exposición - Geográfica	B	0,5	0,05	
9. Características de las aproximaciones del puente	Protección regular reduce la SH	0,5	0,05	
10. Económica - Financiera	Muy elevado	1	0,1	
			0,73	Elevada

El análisis realizado y las condiciones actuales del puente sobre el río Sucio de la RN-32 indican que esta estructura tiene una fragilidad de la vulnerabilidad total alta para la amenaza de lahares.

3.11 Ponderación del riesgo y selección de las medidas de mitigación y adaptación

Para complementar los análisis realizados hasta aquí, se propone generar una matriz del riesgo (Tabla 20) para el puente evaluado y para la amenaza de lahares. Esta matriz se obtiene al cruzar las líneas de base de la intensidad (expresada como el número equivalente del valor de reposición del puente (EI), Tabla 16) y la frecuencia (expresada como el equivalente numérico QF (Tabla 18). Los rangos obtenidos pueden utilizarse para definir las clases probabilidad de excedencia del riesgo, así como acciones de mitigación y reducción (Tabla 20). Los resultados para los cuatro escenarios analizados en este trabajo se presentan en la Tabla 21.

Tabla 20. Matriz de correlación entre la intensidad de la amenaza (EI) vs. su frecuencia, en el caso de los puentes expuestos a la amenaza de los lahares

		Intensidad de la amenaza (EI)				
		0,5	2,5	20	90	100
Frecuencia (QF)	0,01	0,005	0,025	0,2	0,9	1
	0,02	0,01	0,05	0,4	1,8	2
	0,1	0,6	0,25	2	9	10
	0,2	0,1	0,5	4	18	20
	1	0,5	2,5	20	90	100
	2	1	5	40	180	200
	10	5	25	200	900	1000

Tabla 21. Escenarios y valores utilizados para estimar el riesgo, de acuerdo con la intensidad y frecuencia de los lahares y con los datos provenientes de las Tablas 14 y 16.

Escenario	Volumen	Intensidad (EI)	Frecuencia (QF)	Riesgo
1	$5 \times 10^6 \text{ m}^3$	100	0,2	20 -Elevado
2	$3 \times 10^6 \text{ m}^3$	100	0,2	20 – Elevado
3	$2 \times 10^6 \text{ m}^3$	90	1	90 - Elevado
4	$1 \times 10^6 \text{ m}^3$	0,5	1	0,5 - Bajo

De esta matriz se deduce que los eventos extremos son aquellos que generarían la “pérdida máxima probable”, por lo tanto, se asocian a una recurrencia muy baja, pero a daños y pérdidas elevados, es decir, a una magnitud elevada del riesgo. Si la frecuencia (recurrencia) es baja, es porque corresponde con eventos muy intensos. La probabilidad de excedencia de que se produzcan daños con estos eventos es muy elevada, por lo que el riesgo es igualmente elevado.

Los valores obtenidos en la Tabla 21 para los cuatro escenarios realizados en este trabajo indican un riesgo más elevado para los eventos más voluminosos y más bajo para el evento de menor volumen. Estos niveles de riesgo pueden referirse directamente a las recomendaciones para los puentes expuestos, según la Tabla 22.

Tabla 22. Recomendaciones de acción y mitigación que se podrían implementar en puentes según el riesgo obtenido

Nivel del riesgo	Umbral	Acciones de mitigación, reducción de la vulnerabilidad y reducción de la exposición que podrían ejecutarse, según el nivel del riesgo
Riesgo nulo a bajo	< 0,1	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento de rutina básico de la infraestructura, para asegurar su durabilidad y capacidad de respuesta ante eventos extremos. • Vigilancia técnica periódica, inspecciones técnicas para identificar posibles signos de desgaste o daño. • Supervisión y actualización de los planes de emergencia, simulacros periódicos para asegurar una respuesta efectiva en caso de un evento intenso. • Desarrollo de infraestructura adicional de protección, en caso de que las condiciones geológicas cambien y el riesgo aumente.
Riesgo bajo	0,1 – 2	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento planificado; calendario de inspecciones y reparaciones para asegurar que las estructuras permanezcan en buen estado. • Protección adicional mediante revestimiento, en áreas críticas, para reducir la degradación derivada del impacto de los lahares. • Monitoreo constante del entorno; condiciones que puedan dar lugar a lahares, para actuar de manera preventiva. • Educación y concienciación: Desarrollar programas educativos para las comunidades y usuarios de la vía sobre el riesgo y las medidas de precaución a tomar.
Riesgo moderado	2,1 – 17,9	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoras en el drenaje y canalización, para que sea capaz de manejar el flujo intenso de los lahares y reducir la amenaza de la erosión. • Protección y refuerzo de los pilares, bases y aproximaciones con materiales y diseños que resistan el impacto directo y presión ejercida por los lahares. • Aplicación de medidas de gestión del tránsito, particularmente del pesado, durante la temporada de lluvias, cuando los lahares son más probables. • Reforestación y estabilización de laderas aguas arriba para reducir la cantidad de material suelto disponible para los lahares.
Riesgo elevado	18 – 100	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento preventivo intensivo, inspecciones frecuentes y preventivas para identificar y reparar daños menores antes de que se conviertan en problemas. • Elevación de los puentes en donde sea factible, para que queden por encima de la altura máxima prevista del lahar. • Implantación de sistemas de observación, vigilancia y alarma para suspender el tránsito antes de que los lahares lleguen a los puentes. • Adaptar el tipo de puente para que puedan resistir mejor los lahares.
Riesgo muy elevado	>100	<ul style="list-style-type: none"> • Refuerzo estructural mediante técnicas avanzadas de ingeniería para reforzar los puentes, como por ejemplo la instalación de estructuras de refuerzo que aumenten la resistencia al impacto de lahares. • Uso de materiales resistentes a la abrasión y corrosión, que ofrezcan una mayor resistencia a los efectos erosivos y corrosivos de los lahares. • Diseño adaptativo para que tengan un perfil que minimice la acumulación de sedimentos y amortigüe el flujo de lahares. • Construcción de desviadores o diques de contención: Instalar estructuras que desvíen el flujo de lahares lejos de los puentes. • Restricción del tráfico en momentos críticos: Implementar cierres temporales de los puentes en períodos de alta probabilidad de lahares. • Establecimiento de rutas alternas, diseñadas y señalizadas, para desviar el tráfico en caso de un lahar.

La aplicación de la matriz de intensidad de los daños posibles, causados por los lahares, acompañada de recomendaciones específicas para reducir la vulnerabilidad y exposición, permite gestionar de manera eficiente el riesgo en la infraestructura vial. Esta herramienta facilita la priorización de las intervenciones, enfoca los recursos en las áreas de mayor exposición para aplicar medidas más robustas, mientras que en otras con menor exposición se aplican acciones más sencillas y menos costosas. Además, mejora la seguridad y resiliencia de las estructuras, al anticipar y mitigar los impactos de los lahares y asegura que la infraestructura se mantenga operativa y resistente a largo plazo. Al mismo tiempo, esta metodología permite adaptar las estrategias, según las condiciones geológicas, geotécnicas y climáticas cambiantes, lo que promueve una planificación informada y flexible que refuerza la durabilidad y funcionalidad de la red vial. En este trabajo se utilizó LAHARZ por la facilidad de uso, por no necesitar de parámetros geotécnicos que podrían ser complicados de conseguir y por la disponibilidad que podrían contar los usuarios de esta metodología. En una siguiente fase de estudios se sugiere utilizar una nueva generación de programas como podrían ser TITAN2F, FLOW-R entre otros.

3.12 Conclusiones sobre caso de estudio

El sector de la cuenca alta del río Sucio tiene características que propician la generación de lahares de tipo primario por erupción volcánica y secundario por sismos o lluvia. Actualmente, el deslizamiento de la Torres del Irazú y todos los deslizamientos asociados a este en la cuenca alta del río Sucio representan una gran zona de inestabilidad que podría generar lahares que lleguen hasta el puente del río Sucio en la Ruta Nacional 32. Desde el 2014 se ha notado una colmatación del valle fluvial con material que ha bajado del sector superior, reduciendo la capacidad hidráulica y aumentando la vulnerabilidad de la estructura.

Es recomendable implementar un sistema de monitoreo para darle seguimiento a los cambios y colmatación del cauce. Realizar inspecciones periódicas después de lluvias intensas para evaluar daños o acumulación de material que pueda incrementar la vulnerabilidad de erosión en futuros eventos. Además, se sugiere la implementación de sistemas que puedan detectar lahares bajando por el cauce como acelerógrafos y un sistema de aviso a los usuarios de la vía.

Aunque en este momento no se observa socavación y, por el contrario, hay colmatación del cauce, en caso de que se empiece a dar socavación en la pila del puente, se podría pensar en hacer obras en el cauce que desvíen el flujo de la pila reduciendo el impacto directo sobre ese componente.

Los eventos laháricos de mayor volumen como los modelados en la cuenca del río Sucio en la ruta 32 tienen más capacidad de llegar hasta donde se ubica el puente, además de rellenar el valle fluvial, superando incluso la altura máxima de la pila del puente, lo que podría comprometer tanto la superestructura como la estabilidad general del puente.

La concatenación de eventos como lluvias intensas o por periodos largos de tiempo con un movimiento sísmico o una erupción volcánica podrían generar lahares en el río Sucio que tengan la capacidad de impactar el puente de la RN-32. Se recomienda implementar sistemas de monitoreo en tiempo real para la actividad sísmica y volcánica, así como la identificación de flujos en el cauce principal de esta cuenca.

3.13 Indicaciones acerca de LAHARZ

Uso del LAHARZ, caso de estudio aplicado en ruta 32.

LAHAR Z (Schilling S.P., 2014) - <https://dx.doi.org/10.3133/ofr20141073>

- Disponer de un DEM, del área a estudiar, en ArcMap y las coordenadas del sitio de disparo (514454,1106366)
- Ajustar "Procesamiento paralelo" a 0. Pestaña Geoprocesamiento -> Configuración del entorno

- Ajustar Símbolo decimal a punto (.), y miles a coma (,). Panel Control -> Cambiar formatos fecha, hora, núm. -> botón "Config. adicional..."
- Instalar LaharZ ArcMAP. ArcToolbox -> clic der Agregar caja herramientas -> directorio con Laharz_py.tbx

Sobre el DEM del área a estudiar:

- Aplicar Relleno (fill). ArcTollbox -> Herr. Spatial Analyst -> Hidrologia -> Relleno (elegir DEM y el resto por defecto)
- ArcToolbox -> Laharz_py -> Create Surface Hydrology Rasters:

Curr. Workingsp.: C:\laharz\1\laharz_py_example

Input_DEM: DEM_relleno

Prefix String: mrp

Stream Threshold: 3000

(Verificar que se generaron los archivos mrpdir, mrpfill, mrpflac, mrpstr3000)

- ArcToolbox -> Laharz distal zones:

Curr. Workings.: C:\laharz\1\laharz_py_example

Filled DEM: C:\laharz\1\laharz_py_example\mrpfill

Drainage prefix: mrp

Volume File: C:\laharz\1\laharz_py_example\laharz_textfiles\volumes.txt (con volúmenes de 1000000, 3000000, 5000000)

Starting Coord. File: C:\laharz\1\laharz_py_example\laharz_textfiles\PuntoInicial.txt (hacer archivo y dentro solo x, y como "514454,1106366")

Type of Flow: Lahar, ...

- Resultados en: \laharz_py_example\ -> mrp1

4. Análisis de la amenaza de las avenidas fluviales (crecientes) en algunos puentes de la RN-32

4.1 Generalidades

Se presenta en este apartado el análisis del riesgo asociado a las avenidas fluviales de un tramo de la RN-32 entre los kilómetros 114 y 128, específicamente entre los poblados de Barbilla y Zent, en el cantón de Matina. En este tramo se ubican cinco puentes

sobre los ríos Barbilla, quebrada Calderón, Aguas Claras, San Miguel y Chirripó. La ubicación geográfica y las características de los puentes se aprecian en la Figura 56 y la Tabla 23. En la actualidad y en realidad, en cada sitio hay dos puentes paralelos, uno en el eje de la carretera original y otro al lado, luego de la ampliación a cuatro carriles de la vía.

Figura 55. Ubicación de los cinco puentes del tramo km 114 a km 128

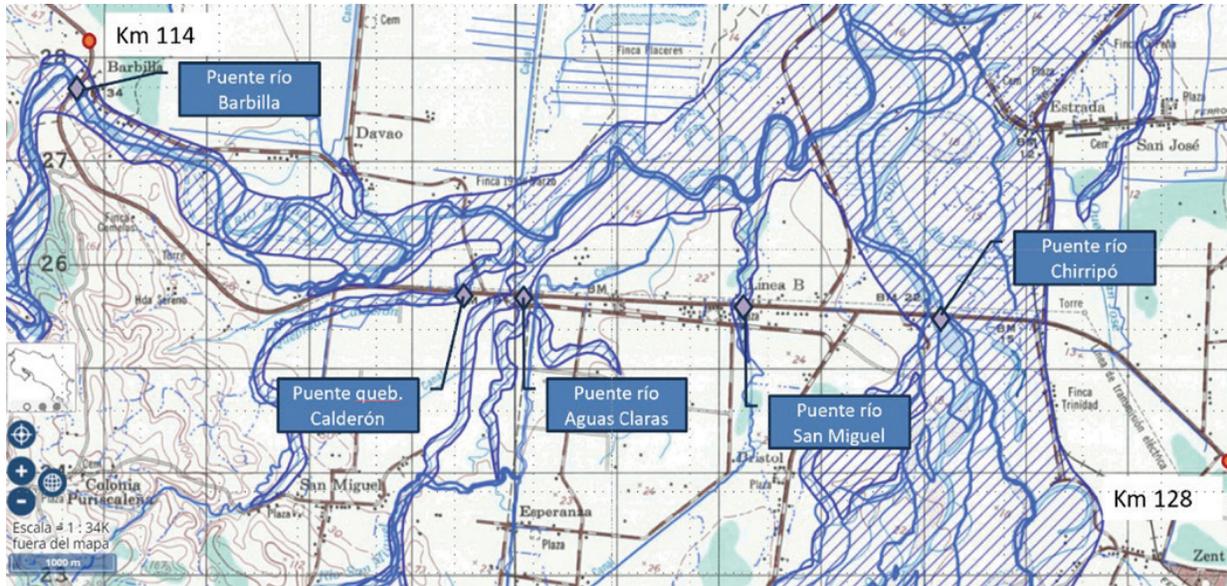


Tabla 23. Puentes analizados sobre la RN-32

No.	Estación RN-32	Puente	Tipo
1	115+510	Río Barbilla	Vanos continuos
2	120+602	Quebrada Calderón	Un vano
3	121+455	Río Aguas Claras	Un vano
4	123+446	Río San Miguel	Un vano
5	125+317	Río Chirripó	Vanos continuos

4.2 Inventario de infraestructura

La infraestructura analizada, en este tramo, está compuesta de un corredor vial a cuatro carriles (la ampliación se encuentra aún en construcción, en el momento de este estudio), con carpeta asfáltica y una medianera que separa los dos sentidos de circulación, con una longitud total de 14 km. La vía cruza cinco cauces fluviales mayores, sobre los cuales se ubican los puentes cuyas características se muestran en la Tabla 24, de acuerdo con los criterios del inventario propuesto por la plataforma Hazus.

Tabla 24. Inventario de puentes analizados en la Ruta Nacional 32

No.	Estación RN-32	Puente	Número de vanos	Superestructura	Pilas	Bastiones	Continuidad	Longitud total (m)
1	115+510	Río Barbilla	3	Concreto presforzado	Muro con martillo (viejo) / 2 pilas circulares (nuevo)	Muro sobre pilotes	Continuo	105
2	120+602	Quebrada Calderón	1	Concreto presforzado	N.A.	Muro sobre pilotes	Vano simplemente apoyado	25
3	121+455	Río Aguas Claras	1	Concreto presforzado	N.A.	Muro sobre pilotes	Vano simplemente apoyado	25
4	123+446	Río San Miguel	1	Concreto presforzado	N.A.	Muro sobre pilotes	Vano simplemente apoyado	25
5	125+317	Río Chirripó	8 (viejo) / 13 (nuevo)	Vigas de acero (viejo) / concreto presforzado (nuevo)	Muro con martillo (viejo) / 2 pilas circulares (nuevo)	Muro sobre pilotes	Continuo	436

Como parte del inventario, se incluye la información de los costos de construcción de cada una de las estructuras, obtenidos de UNOPS, supervisor del contrato de construcción y los cuales se resumen en la Tabla 25.

Tabla 25. Costos de construcción de los puentes analizados en la Ruta Nacional 32

No.	Estación RN-32	Puente	Costo de construcción (USD)
1	115+510	Río Barbilla	\$ 3 060 205 (obra nueva) \$ 1 246 197 (rehabilitado)
2	120+602	Quebrada Calderón	\$ 582 896 (obra nueva) \$ 314 696 (rehabilitado)
3	121+455	Río Aguas Claras	\$ 757 765 (obra nueva) \$ 314 696 (rehabilitado)
4	123+446	Río San Miguel	\$ 582 896 (obra nueva) \$ 314 696 (rehabilitado)
5	125+317	Río Chirripó	\$ 12 240 819 (obra nueva) \$ 5 424 106 (rehabilitado)

4.3 Amenaza de las avenidas fluviales

4.3.1 Aspectos hidrológicos

El primer paso del proceso fue la delimitación y caracterización de las cuencas hidrográficas de los ríos sobre los cuales fueron construidos los cinco puentes (Figura 57). Los dos ríos mayores, Barbilla y Chirripó, tienen áreas de drenaje de 212 y 1.040 km² respectivamente, mientras que las cuencas de los otros tres ríos tienen áreas de drenaje conjunta cercana a los 42 km² (Tabla 26). La disparidad en esas áreas hace que los métodos hidrológicos de estimación de caudales deban ser diferentes. Los dos ríos mayores cuentan con estaciones hidrológicas con registros más o menos extensos, lo cual permiten realizar estimaciones por medio de métodos probabilísticos y de traslado. Mientras tanto para los tres ríos menores fue necesario aplicar métodos de transformación precipitación-escorrentía para estimar los caudales máximos y para diferentes períodos de recurrencia.

Figura 56. Cuencas hidrográficas de los ríos sobre los que se encuentran los cinco puentes estudiados, en el tramo km 114 a km 128 de la RN- 32

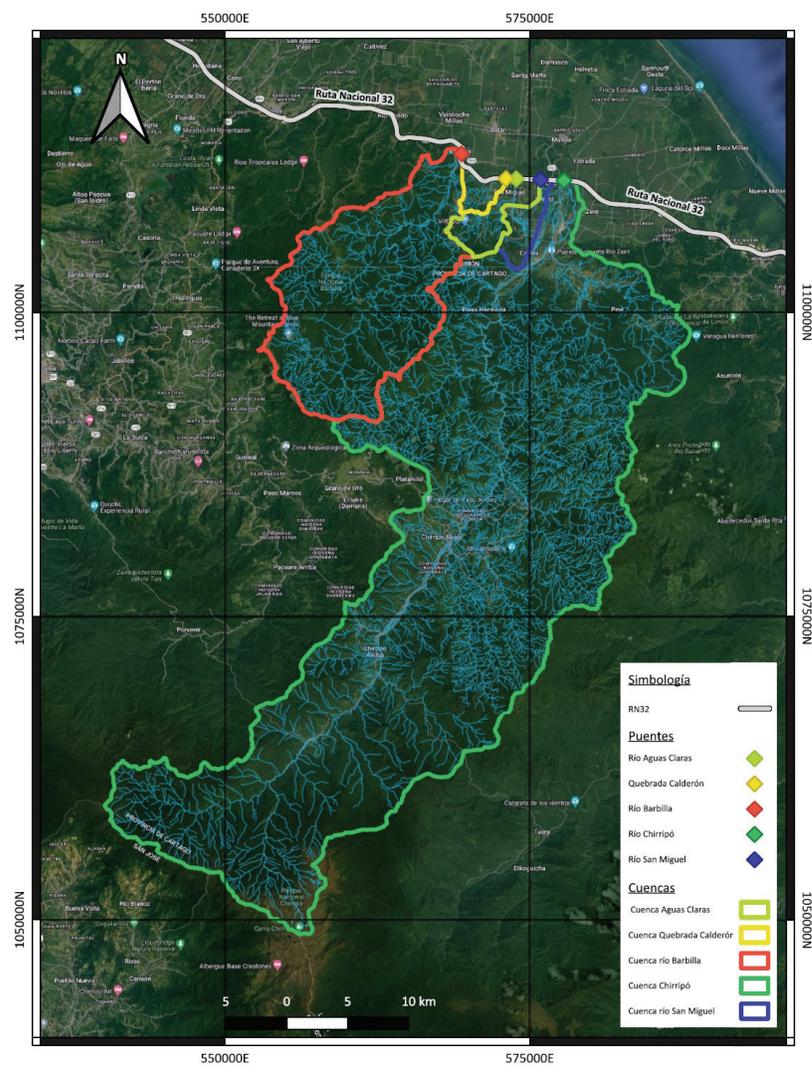


Tabla 26. Áreas de drenaje de las cuencas hidrográficas asociadas a los ríos de los cinco puentes en estudio

No.	Puente	Área de la cuenca (km ²)
1	Río Barbilla	212,0
2	Quebrada Calderón	6,7
3	Río Aguas Claras	29,3
4	Río San Miguel	5,7
5	Río Chirripó	1.040,0

Se contó con los registros de caudal de las estaciones 790602 Barbilla (río Barbilla) con un período de 21 años, entre 1977 y 1997 y 790603 Playa Hermosa (río Chirripó) para el período de 9 años entre 1982 y 1991. A partir de estos datos se llevaron a cabo ajustes probabilísticos para estimar los caudales instantáneos máximos para diferentes períodos de recurrencia. Ambas series de datos son relativamente cortas, por lo que cuando se extrapolan los resultados hacia períodos de recurrencia elevados, los niveles de la incertidumbre se incrementan considerablemente.

Una vez que se dispuso de las series anuales de los caudales instantáneos máximos, se procedió a aplicar la metodología de los factores de frecuencia (Chow et. al., 1994). En este caso, la ecuación con los factores de frecuencia para cada caudal se puede escribir como:

$$Q_{m\acute{a}x}(TR) = \underline{Q_{m\acute{a}x}} + K(TR) * S_{Q_{m\acute{a}x}}$$

...en donde $Q_{m\acute{a}x}(Tr)$ es el caudal máximo instantáneo para un período de recurrencia Tr ; ($\underline{Q_{m\acute{a}x}}$) es el promedio de los valores de la serie anual de caudal máximo instantáneo; $S_{Q_{m\acute{a}x}}$ es la desviación estándar de los valores de la serie anual del caudal instantáneo máximo; $K(TR)$ es el factor de frecuencia para el período de recurrencia Tr , para una distribución de probabilidad determinada. Con esta metodología se pueden evaluar distribuciones de probabilidad diferentes, como por ejemplo Gumbel, Pearson III, log-Pearson III, log-normal, entre otras, con el fin de encontrar las magnitudes de caudal máximo para diferentes períodos de recurrencia. El resultado final de la aplicación de esta metodología se resume en la Tabla 27, donde se presentan caudales para diferentes períodos de recurrencia para los sitios de los puentes sobre los ríos Barbilla y Chirripó.

Tabla 27. Caudales máximos instantáneos estimados para los ríos Barbilla y Chirripó

Período de recurrencia (Tr, años)	Caudal máximo instantáneo (m ³ /s)	
	Puente río Barbilla	Puente río Chirripó
2	421	592
5	621	1043
10	760	1420
25	944	1843
50	1086	2487
100	1231	3050
500	1588	4657

Por su parte, para los ríos quebrada Calderón, Aguas Claras y San Miguel se llevaron a cabo simulaciones hidrológicas mediante la plataforma HEC-HMS, utilizando lluvias máximas de 24 horas para diferentes períodos de recurrencia, las cuales se obtuvieron de las estaciones meteorológicas representativas en la región, en donde se ubican las 3 cuencas estudiadas. Los resultados de este proceso se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Caudales máximos estimados para la quebrada Calderón, el río Aguas Claras y el río San Miguel

Período de recurrencia (Tr, años)	P _{24,máx} (mm)	Caudal máximo instantáneo (m ³ /s)		
		Puente quebrada Calderón	Puente río Aguas Claras	Puente río San Miguel
10	320,4	59,5	156,6	32,9
25	389,3	80,2	229,3	46,6
50	440,4	92,8	276,1	55,1
100	491,3	105,4	323,4	63,5
500	608,6	138,3	439,7	81,6

4.3.2 Aspectos hidráulicos

Una vez obtenidos los resultados hidrológicos de caudal, se procede con los cálculos hidráulicos para estimar los niveles y condiciones de flujo en los sectores de los puentes. El nivel de detalle y complejidad de los modelos hidráulicos depende de la disponibilidad de información topográfica y batimétrica, lo cual puede convertirse en la mayor limitación para la aplicación de la metodología planteada en este documento. Ya se ha mencionado la preferencia por los modelos bidimensionales de flujo, sobre todo para los ríos mayores con un lecho de ancho importante y con geometrías, en planta, que suponen la presencia de una red de cauces múltiples y en llanuras de inundación. Sin embargo, dado que se requiere de una base topográfica detallada para su aplicación, se hace necesario recurrir a modelos o formulaciones hidráulicas más sencillas. Tomando en cuenta lo anterior, para el río Chirripó se contó con levantamientos topográficos suficientes para realizar simulaciones bidimensionales, en este caso mediante el programa IBER. Por su parte, para los tres ríos menores (quebrada Calderón, el río Aguas Claras y el río San Miguel) se elaboraron modelos hidráulicos computacionales unidimensionales en HEC-RAS (versión 4.1).

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, River Analysis System; Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos) es un modelo unidimensional basado en el cálculo de Flujo Gradualmente Variado (FGV) y mediante la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Considera las pérdidas de energía producidas por la fricción a lo largo del cauce y del proceso de expansión y contracción del flujo. Para los casos del flujo rápidamente variado (FRV), como por ejemplo en saltos hidráulicos, confluencias y flujo bajo los puentes, el modelo incorpora la solución de la ecuación del momentum del flujo. Las características específicas del modelo, su fundamento hidráulico y las formulaciones numéricas y métodos de solución, son tratados ampliamente en USACE (2010), cuyo documento puede utilizarse como la referencia hidráulica del modelo.

El modelo HEC-RAS requiere la inclusión de la geometría de las secciones transversales a partir de las cuales se obtienen los parámetros hidráulicos de las secciones para el cálculo de las condiciones de flujo analizadas. Para lograr una aplicación correcta del modelo unidimensional, se utilizaron secciones transversales detalladas y se definieron tramos de análisis y separación de las secciones adecuadas para la variación esperada del gradiente de energía, en condición de crecientes.

La resistencia al flujo se modela mediante el coeficiente "n" de Manning, el cual puede variar a lo ancho de la sección transversal y a lo largo del tramo analizado. El modelo también requiere de la fijación de condiciones de frontera, las cuales se pueden especificar

como condiciones de profundidad crítica o profundidad normal, como un nivel de agua conocido o como una curva de descarga, tanto aguas arriba como aguas abajo del tramo correspondiente. En el caso del presente estudio se realizó la modelación en régimen permanente, es decir, sin considerar la variación del flujo en el tiempo. Para la asignación de los parámetros hidráulicos, se realizaron visitas al sitio y la inspección de los cauces, con el fin de asignar factores de fricción ("n" de Manning) adecuados, según el material y condición de los cauces. Se siguió, para ello la metodología de Arcement y Schneider (1989), mediante la cual la "n" base para un cauce, se escoge en función de los materiales del lecho y a ese valor se le suman parámetros adicionales, en función de la forma del cauce, variaciones de forma de la sección transversal, presencia de vegetación, entre otras cosas. Los autores presentan tablas para asignar estos valores, según las condiciones del sitio:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m$$

...en donde:

- n_b : Valor de base para un canal recto, uniforme y liso conformado por materiales naturales
- n_1 : Factor de corrección para tomar en cuenta el efecto de las irregularidades de la superficie
- n_2 : Valor para representar las variaciones de la forma y tamaño de la sección transversal del canal
- n_3 : Valor para indicar las obstrucciones del cauce
- n_4 : Valor para indicar la presencia de vegetación y condiciones de flujo
- m : Factor de corrección del efecto de la sinuosidad a lo largo del cauce

A continuación, se presentan resultados para cada uno de los ríos analizados mediante la metodología anteriormente descrita (Figuras 58, 59 y 60).

Figura 57. Resumen de resultados hidráulicos (HEC-RAS 1D) para la quebrada Calderón.

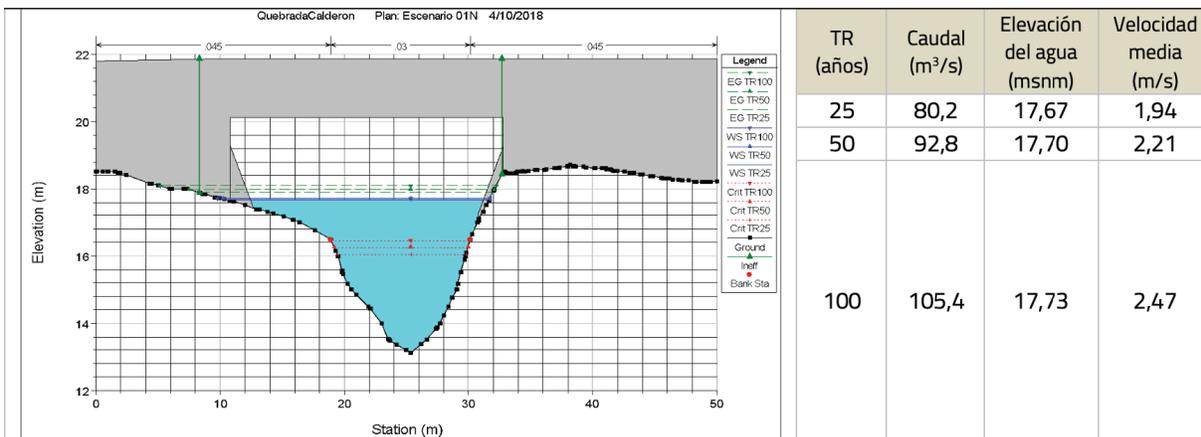


Figura 58. Resumen de resultados hidráulicos (HEC-RAS 1D) para el río Aguas Claras.

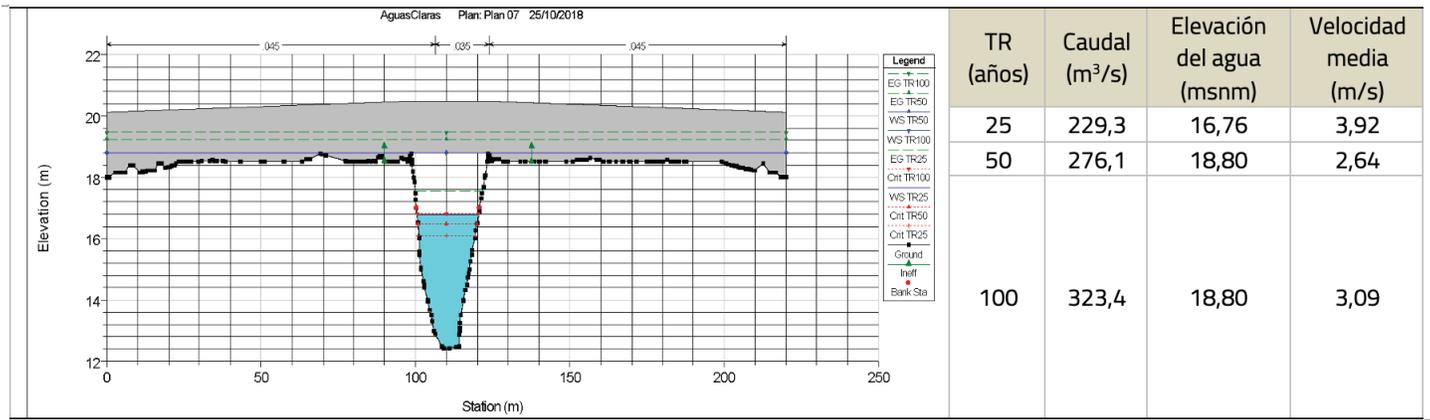
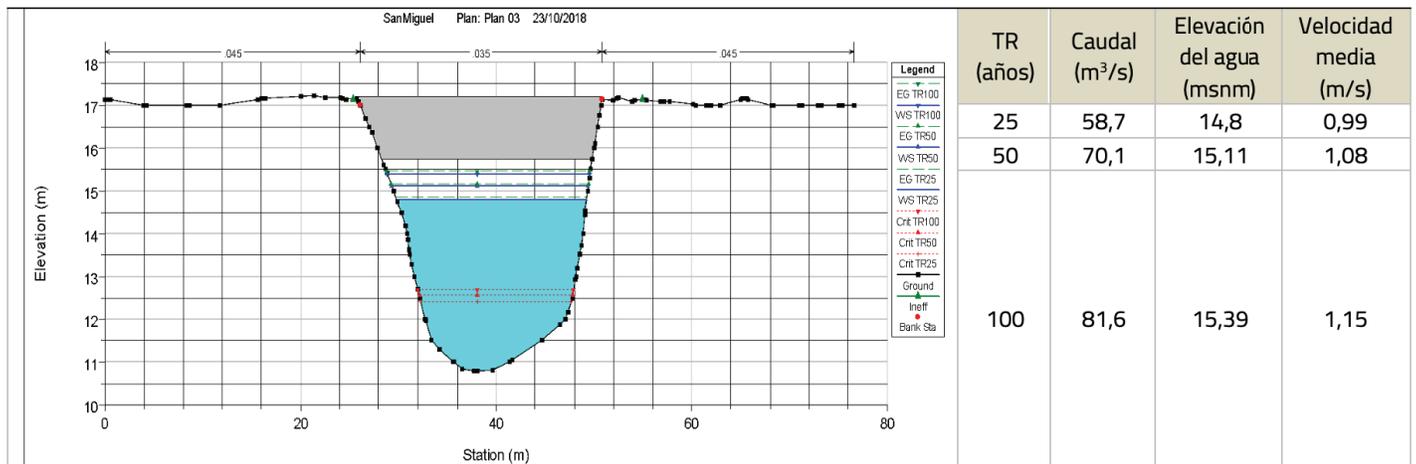


Figura 59. Resumen de resultados hidráulicos (HEC-RAS 1D) para el río San Miguel



Como se mencionó antes, para el caso particular del río Chirripó se contó con topografía y batimetría más detalladas, por lo que pudo crearse un modelo bidimensional para llevar a cabo simulaciones hidráulicas mediante el programa IBER, el cual es un modelo matemático bidimensional para simular el flujo en lámina libre y los procesos de transporte en ríos y estuarios. Fue desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), impulsado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Gobierno de España (CEDEX). El modelo IBER es un software de uso libre disponible para descarga en la web.

El módulo hidrodinámico de IBER resuelve las ecuaciones de aguas someras, promediadas en profundidad bidimensionales, también conocidas como ecuaciones de St. Venant 2D. Dichas ecuaciones asumen las hipótesis de distribución de presión hidrostática y distribución uniforme de velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo de los ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios y zonas costeras. La hipótesis de distribución uniforme de la velocidad, en profundidad, también se cumple en ríos y estuarios, siempre y cuando no existan procesos relevantes de estratificación debido a diferencias de salinidad, temperatura o viento. El modelo requiere una definición geométrica en tres dimensiones del área estudiada, parámetros de rugosidad de la superficie, condiciones hidráulicas iniciales y de contorno y una ventana temporal para el cálculo.

Para la realización de este modelo, se utilizó un levantamiento fotogramétrico que incluye las elevaciones del terreno con tamaños de píxel de 0,2 x 0,2 m y simulaciones con los caudales para períodos de recurrencia de 100 y 500 años del río Chirripó. A continuación, se presentan gráficamente los resultados obtenidos para el escenario del período de recurrencia de 500 años. Los resultados muestran que en el sector del puente no se prevén desbordamientos y que los niveles del agua permanecen suficientemente alejados de la cuerda inferior de las vigas de este. Además, las velocidades se mantienen por debajo de los 2 m/s.

Figura 60. Elevaciones del agua (en msnm) para el caudal con período de recurrencia de 500 años, en el sector del puente del río Chirripó

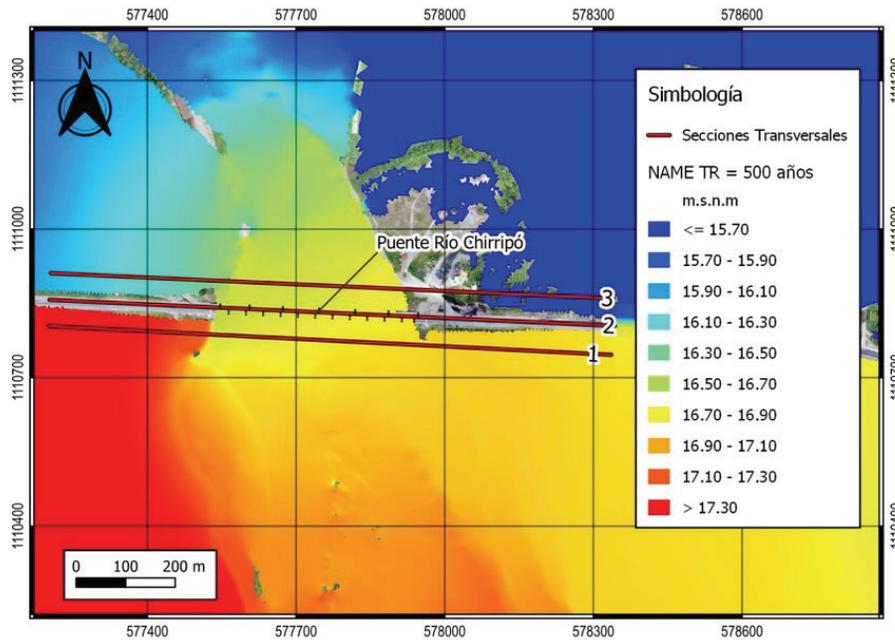


Figura 61. Profundidades del agua (en m) para el caudal con período de recurrencia de 500 años, en el sector del puente del río Chirripó

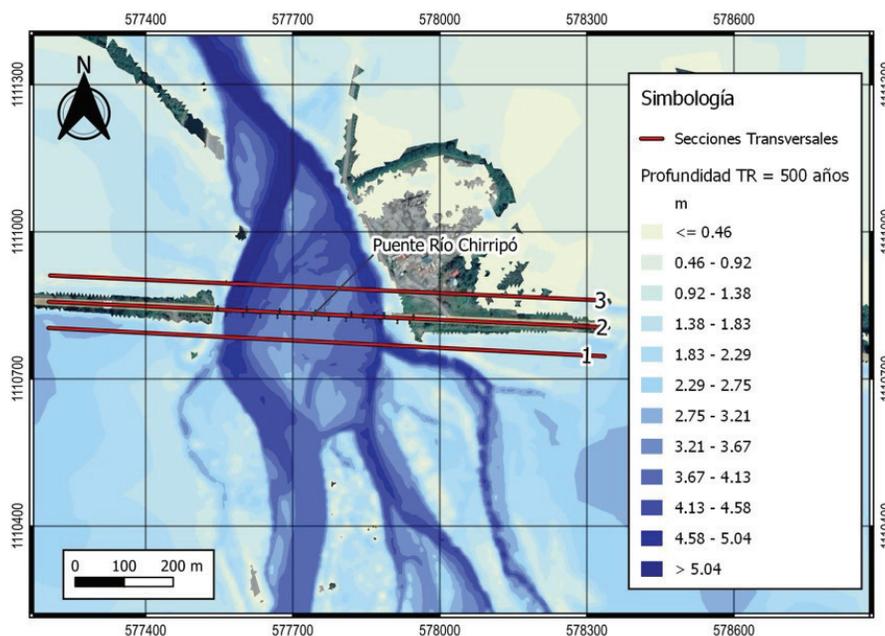


Figura 62. Sección transversal en el puente, utilizada para el caudal con período de recurrencia de 500 años en el río Chirripó

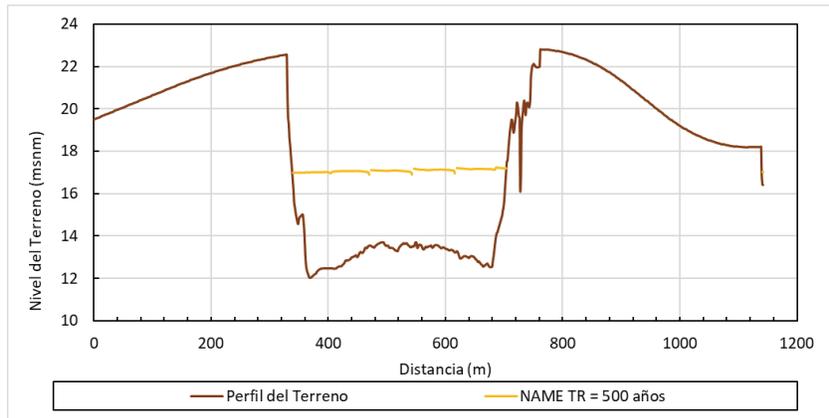


Figura 63. Velocidades del agua (en m/s) para el caudal, con período de recurrencia de 500 años, en el sector del puente sobre el río Chirripó

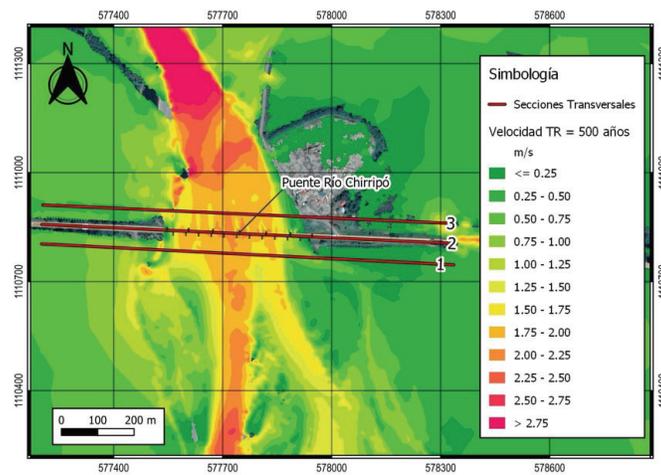
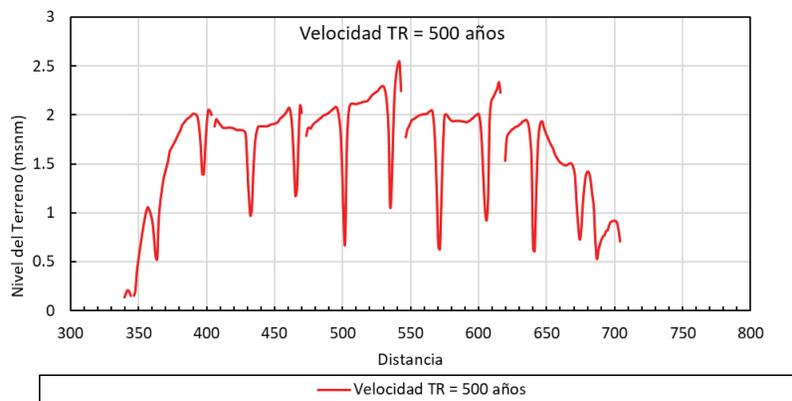


Figura 64. Sección transversal de velocidades en la sección del puente, para el caudal con período de recurrencia de 500 años en el río Chirripó



4.4 Análisis de la amenaza de la socavación

La socavación puede definirse como la excavación y erosión de material del lecho y bancos de un curso de agua como resultado de la acción abrasiva del agua (Hamill, 1999). En un puente, la socavación total potencial se puede subdividir en dos formas principales (FHWA 2001):

- Socavación general en el puente (socavación por contracción)
- Socavación local en pilas o bastiones

Estas formas pueden suceder también de manera agregada, por lo que se deben analizar para cada puente y su suma será la socavación potencial total esperada. Adicionalmente a estos factores, la posibilidad de migración lateral del curso de agua también debe analizarse, con el fin de tener un panorama completo acerca de la estabilidad del sitio en donde se erigirá la obra (FHWA, 2001).

La socavación también puede definirse como un proceso mediante el cual el cauce del río se profundiza debido a la erosión del material de fondo, producto del aumento de la velocidad (energía cinética) del agua cuando hay una contracción en el flujo. Estas condiciones pueden ser naturales (e.g. contracción natural, flujos secundarios debidos a una curva) o ser el resultado de la contracción del cauce causada por construcción de un puente o de sus rampas de aproximación. Para el cálculo de la socavación por contracción, en condiciones de "lecho vivo" se recomienda el uso de la ecuación modificada de Laursen (García, 2007) que con ciertas consideraciones se puede escribir como

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{6/7} * \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_1}$$

$$y_s = y_2 - y_0$$

...en donde

- y_s = profundidad media de socavación (m)
- y_f = profundidad media aguas arriba de la sección contraída (m)
- y_2 = profundidad media en la sección contraída, después de la socavación (m)
- y_0 = profundidad media en la sección contraída, antes de la socavación (m)
- Q_1 = caudal aguas arriba en el canal principal y que transporta sedimentos (m³/s)
- Q_2 = caudal en sección contraída (m³/s)
- W_1 = ancho del fondo del canal principal aguas arriba (m)
- W_2 = ancho del canal principal en la sección contraída menos ancho de las pilas (m)
- k_1 = exponente que depende de las condiciones de arrastre de fondo y que varía entre 0.59 y 0.69

La socavación local, al pie de estribos y bastiones, se debe a la formación de vórtices horizontales que empiezan aguas arriba, se movilizan al pie del bastión y que forman vórtices verticales aguas abajo, lo cual genera la erosión del material del lecho. Existen varias relaciones empíricas para determinar la socavación (García, 2007; Hamill, 1999), como por ejemplo la ecuación de Froehlich, la cual fue incorporada a los análisis de los puentes en este estudio:

$$y_s = 2.27 * K_1 * K_2 * (L') * y_a^{0.57} * Fr^{0.61}$$

...en donde

- y_s = profundidad media de socavación (m)
- K_1 = factor de corrección por la forma del estribo (1.0 para estribos verticales a 0,55 para estribos en talud con flujo por encima)
- K_2 = factor de corrección por ángulo de ataque θ (90° perpendicular al flujo)

$$K_2 = \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13}$$

- L' = longitud del estribo proyectada normal al flujo (m)
- y_a = profundidad media en la planicie de inundación en la sección de aproximación (m)
- Fr = número de Froude en la planicie de inundación en la sección de aproximación

Esta ecuación se recomienda para una relación $L/y_1 \leq 25$ (FHWA, 2001 y USACE, 2010), en donde L es la longitud del estribo en contacto con el agua y y_1 la profundidad en el pie del estribo, inmediatamente aguas arriba del puente. Puede utilizarse tanto para condiciones de lecho vivo como de aguas claras. Para efectos del diseño de un puente nuevo, se recomienda adicionar a y_s el valor de y_a como factor de seguridad. Los resultados del cálculo de socavación, se presenta en las siguientes figuras para cada uno de los puentes analizados, los cuales se obtuvieron mediante la aplicación de las ecuaciones antes descritas y empleando el software HEC-RAS.

Figura 65. Resumen de los resultados del análisis de la socavación en la quebrada Calderón

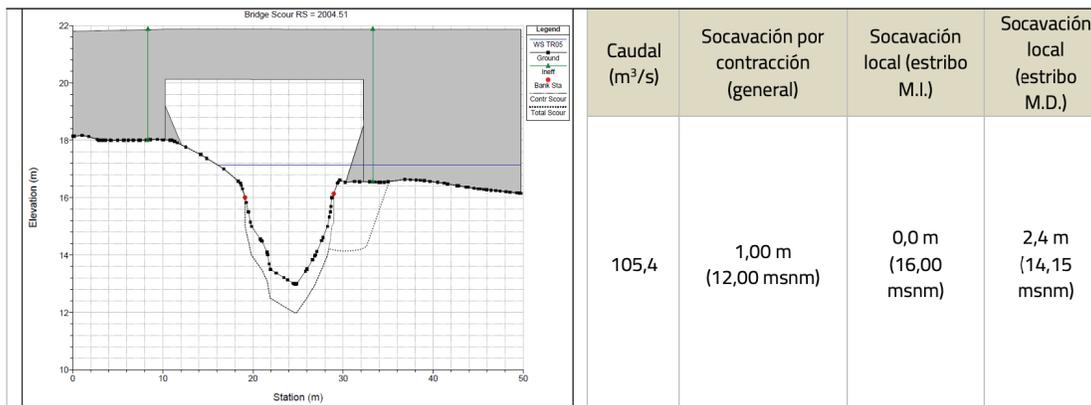


Figura 66. Resumen de los resultados del análisis de la socavación en el río Aguas Claras

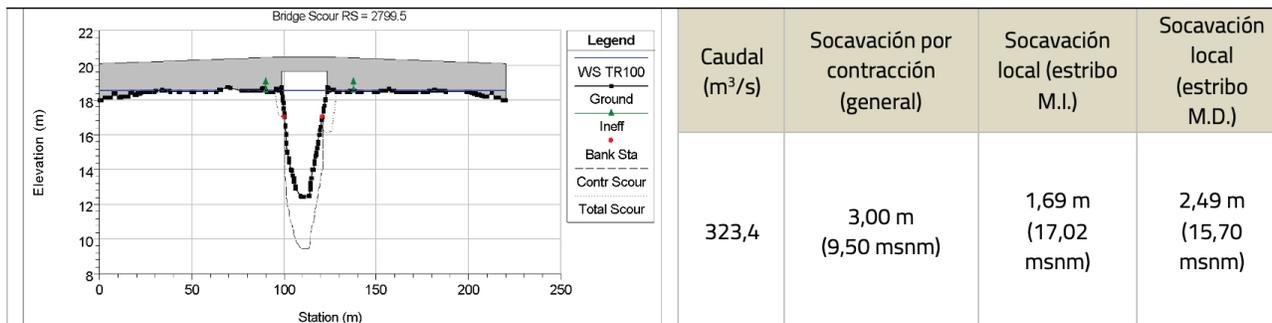
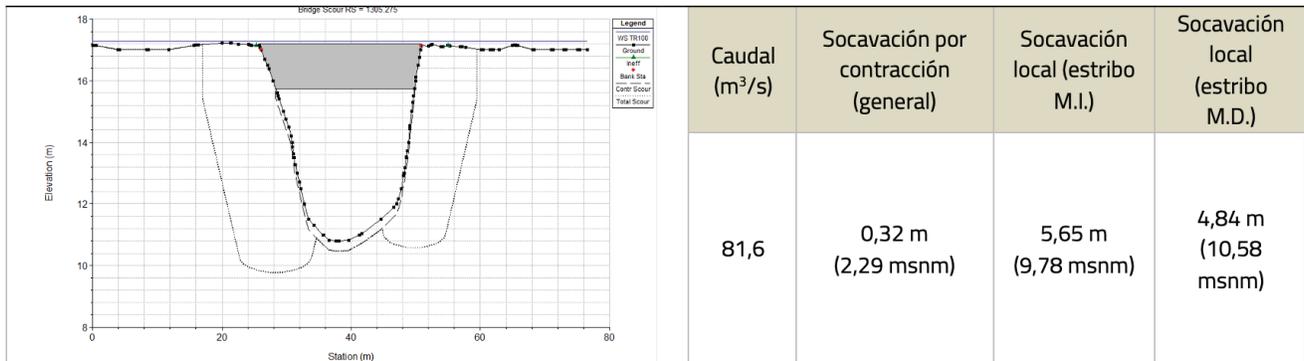


Figura 67. Resumen de resultados del análisis de la socavación en el río San Miguel



Se desprende, de los resultados anteriores que, para los puentes estudiados, la socavación se mantiene dentro de los límites razonables. Solo en el caso del río Aguas Claras la socavación general es apreciable (3,0 m por debajo del fondo del cauce), pero las fundaciones de los bastiones, por pilotes, alcanzan niveles con materiales firmes por debajo del nivel estimado de la socavación. En el caso del río Chirripó, debido a que se contó con el modelo bidimensional en IBER, se tomaron los parámetros hidráulicos en secciones transversales, cercanas al puente, una en el propio puente y otra 400 m aguas arriba, y se llevaron a cabo los cálculos con las fórmulas de socavación discutidas anteriormente. Los resultados se muestran en las tablas siguientes.

Tabla 29. Datos utilizados para los cálculos de la socavación en el puente sobre el río Chirripó (Tr=500 años)

Contracción General		
Datos		
Q2=	2067 m ³ /s	Caudal total puente
Q1m=	1397 m ³ /s	Caudal en canal de aproximación con arrastre de sedimentos
W1=	300 m	Ancho de canal de aproximación principal
W2=	360 m	Ancho de canal en sección contraída menos ancho de pilas
y2=	m	Profundidad promedio en canal en sección contraída (sin socav)
y1=	3.22 m	Profundidad en canal de aproximación
dm	10 mm	Diámetro medio del material de cama (1.25*D50)
Vc	1.51 m/s	Velocidad crítica para transporte de material D50
V1	1.44 m/s	Si V<Vc aplica clear water scour
CLEAR WATER		
Aproximaciones o Bastiones		
Datos		
b =	20 m	largo del bastión (cuanto se mete al canal principal)
m =	0.50	relación ancho obstruido (b/B)
Ka'	1	coeficiente
Kp =	1	factor de ubicación
Ks =	0.75	factor de forma (0.45 para spill-trough 1.5:1, 1 para vertical wall, 0.75 wing wall)
Kalfa =	1	factor del ángulo
Knapa =	1	factor de porosidad
Kl =	2.15	factor de alineamiento (Liu), 1.1 para spill-trough, 2.15 para vertical
Kb =	1	0.75 para bastión streamlined y 1.5 para "blunt"

Parametros hidráulicos estribos		
Qo =	670 m ³ /s	caudal obstruido
ho =	3.22 m	profundidad obstruida
hp =	2 m	profundidad media en planicie inundación
B =	600 m	ancho total (ancho medio)
Uo =	1.5 m/s	velocidad en el pie
Theta =	0.06	param. movilidad
d90 =	0.05 m	
d84 =	0.03 m	
d50 =	0.01 m	
b/ho =	6.2024	Si <0.5, fuerte interacción. si 0.5<b/ho<1.5 interacción débil. si >1.5 no hay int
qo =	1.1 m ³ /s/m	caudal unitario
Fro =	0.27	Froude
sigma =	3.00	desv. Estandar
ks =	0.15 m	rugosidad
Uc =	1.37 m/s	velocidad crítica

Pilas		
Datos		
bp =	1.4 m	ancho de la pila
Lp =	5 m	longitud
omega =	5°	ángulo del flujo con la pila
Ks =	1	factor de forma (1 pila circular, 1.1 pila cuadrada, 0.9 pila afilada)
KØ =	1.36	factor de ángulo
Kg =	1	factor de granulometría (1 si b/D50>25)
Kgr =	1	efecto de grupo
Kl =	1.36	factor global
Cps =	1.50	factor de forma de Neill

Parametros hidráulicos		
Qo =	2000 m ³ /s	caudal
ho =	3.76 m	profundidad aguas arriba de la pila
Uo =	1.66 m/s	velocidad
Theta =	0.06	parametro movilidad
d90 =	0.10 m	
d84 =	0.06 m	
d50 =	0.01 m	
Fro =	0.27	Froude
sigma =	6.00	desviación estand.
ks =	0.3 m	rugosidad
Uc =	1.24 m/s	velocidad crítica

Tabla 30. Resultados de los cálculos de socavación para el río Chirripó (TR=500 años)

Contracción General

<i>Formula</i>	<i>y₂-y₁ (m)</i>	<i>Condición</i>
Richardson & Davis (1995)	1.28	Lecho vivo
HEC-18	0.21	Aguas claras
Socavación General	0.21 m	

Socavación Estribos

<i>Formula</i>	<i>ye (m)</i>	<i>Condición</i>
Liu (1961)	9.26	Lecho vivo
Froehlich (1989)	4.09	Lecho vivo
Hoffmans (1995)	5.09	(U _o >U _c)
Promedio	6.15 m	
Socavación Total	6.36 m	

Socavación Pilas

<i>Formula</i>	<i>ds (m)</i>	<i>Condición</i>
Neill (1973)	2.82	(U _o >U _c)
Breusers (1977) 1	3.96	
2	2.83	
CSU Richardson & Davis (1992)	8.27	
Froehlich (1991)	2.49	
Johnson (1992)	3.11	
CSU (Farias)	3.07	
Promedio	3.91 m	
Socavación Total	4.13 m	

En el caso de este puente, se observa que los valores de la socavación general son relativamente bajos (21 cm) aunque la socavación local es apreciable: 3,91 m en las pilas y 6,15 m en los estribos. Estos son los valores promedio de las diferentes fórmulas aplicadas. El orden de magnitud de la socavación no es motivo de sorpresa, dados los tirantes del río y sus velocidades durante las avenidas con período de recurrencia de 500 años. Se conoce que las fundaciones de las pilas y estribos de este puente son profundas, con pilotes, los cuales deben llegar a estratos firmes por debajo de estos niveles estimados. Además, como se observó en el sitio, existen protecciones mediante escolleras y enrocamientos, con cantos de diámetros medios grandes (> 75 cm) que agrega seguridad a las pilas y bastiones durante las crecidas (Figura 69).

Figura 68. Escolleras de protección en las pilas del puente sobre el río Chirripó (abril, 2024)



4.5 Aspectos de la vulnerabilidad y de la exposición

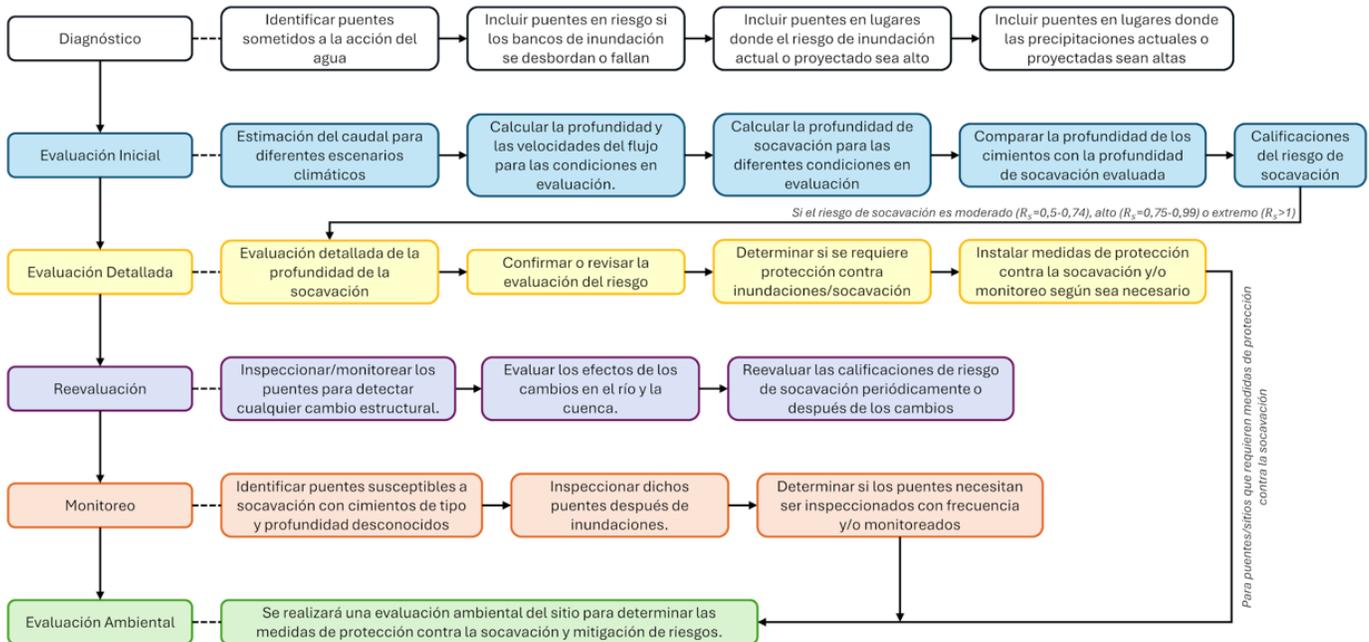
4.5.1 Generalidades

La exposición a la amenaza se cuantifica mediante dos criterios: i) Cuando un puente o tramo de carretera queda o no cubierto por la inundación y, ii) mediante el cálculo de un índice de socavación potencial para los pilares y bastiones de los puentes. Además, para esto último se puede integrar los elementos asociados al cálculo de la profundidad de socavación, comparándola con el nivel de las cimentaciones.

Los resultados hidráulicos para los cinco puentes muestran que ninguno de ellos va a ser sobrepasado por el agua, por lo que las superestructuras no van a tener una exposición directa a la avenida. Adicionalmente, la carretera como tal no estará expuesta a los niveles de inundación analizados en los sitios de los puentes, por lo que su funcionalidad no será afectada.

Como complemento de la metodología HAZUS, más cualitativa, la propuesta de CIRIA para “evaluación inicial” (Figura 109) compara los niveles de socavación estimados con los de las cimentaciones de los bastiones y pilas. Los resultados indican que las profundidades potenciales de socavación se mantienen dentro de los límites y no se alcanzaría la profundidad de la cimentación. Esto no quiere decir que las estructuras permanecerán intactas ante el paso de las avenidas, pero sí que sus fundaciones están diseñadas para esta magnitud de eventos. No se espera que haya daños a la subestructura del puente que afecte su funcionalidad. Adicionalmente, se debe destacar que para todos los casos se identificó la presencia de protecciones contra la socavación, en la forma de enrocamientos y escolleras con tamaños de partícula suficientes para proveer la protección necesaria. Se debe recordar que estas protecciones requieren de mantenimiento, por lo que cuando los puentes se expongan a acciones erosivas que propicien la socavación, el material deberá ser repuesto y reconformado como preparación para el siguiente evento.

Figura 69. Esquema metodológico para evaluar la amenaza de la socavación, según CIRIA (Sasidharan et al., 2023).



4.5.2 Asignación de índice de socavación y probabilidades de falla

Los resultados permiten asignar valores al índice de socavación de HAZUS, no solo desde un punto de vista cualitativo, sino apoyado en los resultados cuantitativos. Para los puentes y para los períodos de recurrencia de 100 y 500 años, el índice de socavación se estima en 4 en Barbilla y Chirripó y en 5 en la quebrada Calderón, río Aguas Claras y río San Miguel. Un índice de socavación de 4 refleja que la cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas, pero la revisión de campo indica que se requiere acción para proteger los cimientos expuestos. Este valor se asignó a aquellas estructuras donde la presencia de material de protección (escolleras, enrocados) es necesaria para optimizar el desempeño de la fundación durante las avenidas, como es el caso de los ríos Barbilla y Chirripó. El valor 5, para el índice de socavación, se refiere a una cimentación estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas, lo cual es el caso para los otros tres puentes. Para el caso del período de recurrencia de 1000 años, se asignaron índices de socavación de 3 para todos los puentes, al considerar que para esa magnitud de avenidas las profundidades de socavación comienzan a ser críticas con respecto a los niveles de fundación de los puentes.

El índice de socavación permite estimar la probabilidad de falla, según plantea la metodología HAZUS. Según los valores definidos como índice de socavación, la probabilidad de falla resulta en 0 para todos los puentes analizados, para los períodos de recurrencia de 100 y 500 años. Para el período de recurrencia de 1000 años, se asignan los valores numéricos de probabilidad de falla y funcionalidad según establece la metodología. El resumen de esta asignación y evaluación se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Asignación del índice de socavación y las probabilidades de falla y de funcionalidad, según HAZUS (FEMA, 2022).

Tr=100 años

No.	Estación RN-32	Puente	Índice de socavación	Probabilidad de falla	Probabilidad de funcionalidad
1	115+510	Río Barbilla	4 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas; la revisión de campo indica que se requiere acción para proteger los cimientos expuestos)	0,0	1,0
2	120+602	Quebrada Calderón	5 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0	1,0
3	121+455	Río Aguas Claras	5 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0	1,0
4	123+446	Río San Miguel	5 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0	1,0
5	125+317	Río Chirripó	4 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas; la revisión de campo indica que se requiere acción para proteger los cimientos expuestos)	0,0	1,0

Tr=500 años

No.	Estación RN-32	Puente	Índice de socavación	Probabilidad de falla	Probabilidad de funcionalidad
1	115+510	Río Barbilla	4 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas; la revisión de campo indica que se requiere acción para proteger los cimientos expuestos)	0,0	1,0
2	120+602	Quebrada Calderón	5 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0	1,0
3	121+455	Río Aguas Claras	5 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0	1,0
4	123+446	Río San Miguel	5 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0	1,0
5	125+317	Río Chirripó	4 (cimentación del puente es estable para las condiciones de socavación evaluadas o calculadas; la revisión de campo indica que se requiere acción para proteger los cimientos expuestos)	0,0	1,0

Tr=1000 años

No.	Estación RN-32	Puente	Índice de socavación	Probabilidad de falla	Probabilidad de funcionalidad
1	115+510	Río Barbilla	3 (el puente es crítico para la socavación; cimentaciones determinadas como inestables para condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0075	0,9925
2	120+602	Quebrada Calderón	3 (el puente es crítico para la socavación; cimentaciones determinadas como inestables para condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,03	0,97
3	121+455	Río Aguas Claras	3 (el puente es crítico para la socavación; cimentaciones determinadas como inestables para condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,03	0,97
4	123+446	Río San Miguel	3 (el puente es crítico para la socavación; cimentaciones determinadas como inestables para condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,03	0,97
5	125+317	Río Chirripó	3 (el puente es crítico para la socavación; cimentaciones determinadas como inestables para condiciones de socavación evaluadas o calculadas)	0,0075	0,9925

4.5.3 Estimación de las pérdidas económicas

El modelo HAZUS estima las pérdidas económicas directas en los puentes, debidas a las avenidas, mediante el cálculo de la probabilidad de falla, como indicador del porcentaje del daño para calcular los costos de reparación y reposición.

Costo de reparación y reemplazo = Probabilidad de falla x Valor en inventario

En el caso de la Ruta Nacional 32 fue posible estimar el valor de inventario de forma relativamente actualizada, debido a la reciente construcción de puentes paralelos a los existentes, como parte de la ampliación de la carretera.

Para el caso de los períodos de recurrencia de 100 y 500 años, debido a que para todos los casos la probabilidad de falla fue estimada en 0, no se puede calcular un costo de reparación y reposición. Sin embargo, para el período de recurrencia de 1000 años, las probabilidades de falla presentan valores que permiten calcular un costo de reparación y reemplazo, tal como se muestra a continuación:

Tabla 32. Costo de reposición de los puentes analizados (Tr = 1000 años)

No.	Estación RN-32	Puente	Probabilidad de falla	Valor en inventario (USD)	Costo (USD)
1	115+510	Río Barbilla	0,0075	\$ 4 306 402	\$ 32 298
2	120+602	Quebrada Calderón	0,03	\$ 897 592	\$ 26 928
3	121+455	Río Aguas Claras	0,03	\$ 1 072 461	\$ 32 174
4	123+446	Río San Miguel	0,03	\$ 897 592	\$ 26 928
5	125+317	Río Chirripó	0,0075	\$ 17 664 925	\$ 132 487

4.6 Conclusiones y recomendaciones

- Los resultados hidráulicos muestran que ninguno de los cinco puentes analizados (río Barbilla, quebrada Calderón, río Aguas Claras, río San Miguel y río Chirripó), de acuerdo con los datos disponibles y procesados, sería sobrepasado por el agua durante las avenidas estudiadas, lo cual indica que las superestructuras no estarán directamente expuestas a las avenidas.
- Los cálculos de socavación indican que las profundidades potenciales de socavación se mantienen dentro de límites que no deberían alcanzar la profundidad de los pilotes de pilas y bastiones, sugiriendo que las fundaciones están diseñadas para soportar eventos de la magnitud analizada, hasta el período de retorno de 500 años. Eventos con períodos de retorno mayores pueden llegar a generar condiciones críticas, y elevaría el índice de socavación de los puentes. Fue verificada la presencia de protecciones contra la socavación (enrocamientos y escolleras) en todos los puentes, lo cual proporciona una protección adicional contra los efectos erosivos de las avenidas. Sin embargo, estos dispositivos deben recibir mantenimiento constante, para garantizar su longevidad y eficiencia.
- Los análisis realizados dejan en evidencia la necesidad de implementar buenas prácticas de diseño para la subestructura de los puentes. Un correcto alineamiento de las pilas (por ejemplo, cuando se construye un puente nuevo junto a un puente existente) es fundamental para garantizar condiciones hidráulicas adecuadas, para evitar obstrucciones innecesarias al flujo y para permitir un adecuado funcionamiento hidrodinámico. También, los resultados resaltan la necesidad de mantenimiento bajo el puente después de grandes avenidas, con el objetivo de remover detritos y material acumulado frente a las pilas y bastiones (troncos, desechos), así como para reponer el material de enrocamiento que protege las pilas y fundaciones. Finalmente, una adecuada conceptualización de las fundaciones, con sus elementos soportantes ubicados

suficientemente por debajo de la profundidad estimada de socavación, son vitales para mantener la integridad del puente ante las acciones de las avenidas.

- Según la metodología HAZUS aplicada, todos los puentes recibieron un índice de socavación de 4 o 5, lo que se traduce en una probabilidad de falla nula o muy baja, para los períodos de retorno hasta 500 años. Para el período de retorno de 1000 años, donde se pueden esperar efectos de socavación más severos, las probabilidades de falla aumentan a 0.75% en los puentes continuos y a 3.0% en los puentes de 1 solo vano. Debido a las bajas probabilidades de falla estimadas, los costos de reparación y reemplazo según el modelo HAZUS solo se pudieron calcular para el período de retorno de 1000 años. Para este caso se estima un costo agregado de reparación y reemplazo de \$250 000 para los cinco puentes analizados.

4.7 Limitaciones y estudios posteriores recomendados

Durante el desarrollo del estudio de caso sobre la RN-32 para la aplicación de la metodología propuesta, se identificaron las siguientes limitaciones:

- Batimetría de los cauces. Este estudio contó con información topográfica y batimétrica de los cauces en estudio (a excepción del río Barbilla), por lo cual se pudieron construir modelos hidráulicos y realizar cálculos detallados de socavación. Sin embargo, esto no siempre es el caso, por lo que una exitosa aplicación de la metodología dependerá de información detallada y de buena calidad de los cauces de los ríos involucrados.
- Detalle de infraestructura de drenaje pluvial de la carretera. No se contó con esta información, por lo que su desempeño hidráulico no fue abordado en la aplicación de la metodología. Sería posible realizar un análisis de mayor detalle si se contara con planos de cunetas y alcantarillas, aunque un nivel de detalle así probablemente sería incompatible con la escala de trabajo para toda una ruta de decenas o cientos de kilómetros.
- Modelo Numérico del Terreno (MNT). Un MNT con suficiente extensión y resolución es requerido para el desarrollo y aplicación de modelos de flujo bidimensionales, lo cual permite un adecuado mapeo de zonas de inundación y una correcta estimación de los parámetros hidráulicos de interés (profundidades, velocidades). Para la presente aplicación se contó con un MNT para el sector del río Chirripó, que se extendía a lo largo de una parte del tramo analizado de la ruta 32, pero no en su totalidad, lo cual limitó la identificación de potenciales sectores de la carretera impactados por desbordamientos. Para futuras aplicaciones, un MNT de alta resolución, idealmente derivado mediante tecnología LiDAR, podría ser de utilidad para obtener resultados más precisos.
- Información hidrometeorológica actualizada y de extensión suficiente. El estudio de caso contó con información relativamente limitada en cuanto a la extensión temporal de los registros de caudales máximos instantáneos en los ríos del tramo en estudio. Esta limitación fue difícil de solventar, pues en algunos casos de aplicación obligaría al uso de metodologías indirectas para la estimación de caudales. Esto es particularmente importante si se desea integrar la variable del cambio climático, puesto que es necesario primero tener una adecuada representación de la variabilidad climática natural, para lo cual se necesitan registros suficientemente largos y representativos de la zona de estudio.

Asimismo, se recomiendan los siguientes estudios para futuras aplicaciones de la metodología, que permitan ampliar la valoración del riesgo asociado al clima sobre la infraestructura vial:

- Determinación probabilística de incrementos (o disminuciones) en las magnitudes de lluvias extremas, para diferentes escenarios climáticos. Durante la aplicación de la metodología se contó con series de tiempo de diferentes variables climáticas, provenientes de diferentes escenarios climáticos y para tres períodos futuros: próximo (2015 a 2040), medio (2041 a 2070) y lejano (2071 a 2100). Un primer análisis de la variable precipitación máxima anual en 24 horas permitió identificar que el cambio futuro de esta variable no parece significativo para ninguno de los escenarios. Se recomienda

realizar un estudio más exhaustivo sobre el comportamiento de esta variable, que permita cuantificar de una forma más precisa el cambio y justificar porcentajes de incremento (o disminución) de esta variable, que se pueda integrar en modelos de transformación precipitación-escorrentía cuando estos se utilicen para estimar los caudales pico para los análisis hidráulicos y de socavación.

- Desarrollo de relaciones regionalizadas para la estimación de caudales pico en cuencas sin medición, a partir de los registros de grupos de estaciones hidrológicas cercanas. Mediante el análisis de registros en varias estaciones en una cuenca o en cuencas vecinas, es posible aplicar métodos de regionalización que solventen las limitaciones de escasez o extensión de registros hidrológicos.

5. Análisis del riesgo sísmico de los puentes de la RN-32

5.1 Ejemplo práctico para la evaluación del riesgo derivado de la sismicidad en once puentes de la RN-32

Como ejemplo práctico de la aplicación de esta guía metodológica, se ha evaluado la vulnerabilidad sísmica de once puentes, ubicados entre San José y Limón sobre la Ruta Nacional 32 (RN-32). Entre las estructuras analizadas, cinco son puentes nuevos, mientras que seis corresponden a estructuras existentes que han sido mejoradas y rehabilitadas, cuyas intervenciones van desde reforzamientos menores hasta su reconstrucción total. En la Tabla 33 se muestra la información básica de los puentes evaluados en este estudio.

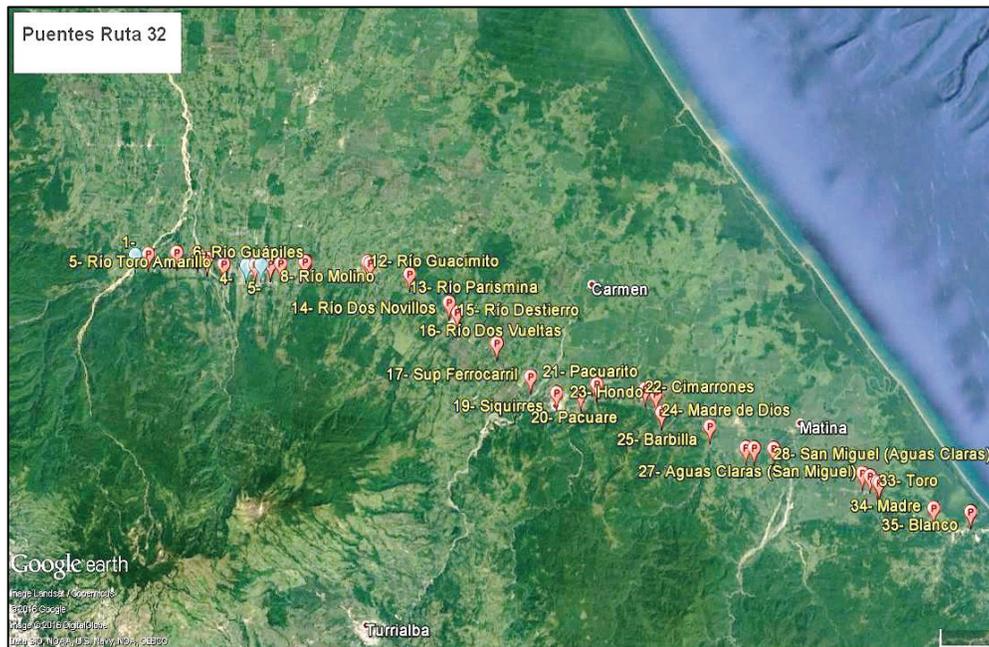
Tabla 33. Nombre, localización y año de diseño de los puentes evaluados en este estudio

ID	Puente	Tipo (Nuevo/ Rehabilitado)	Tipo de suelo	Efecto de falla cercana	PR: 1035 años			PR: 2475 años		
					PGA Tr 1033	Sa (0.3s) Tr 1033	Sa (1.0s) Tr 1033	PGA Tr 2475	Sa (0.3s) Tr 2475	Sa (1.0s) Tr 2475
1	Río Sucio	Rehabilitado	S3	NO	0.653	1.410	0.552	0.784	1.677	0.700
2	Río Barbilla	Nuevo	S2	Sí	0.580	1.455	0.436	0.720	1.851	0.568
3		Rehabilitado	S2	Sí	0.580	1.455	0.436	0.720	1.851	0.568
4	Quebrada Calderón	Nuevo	S3	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
5		Rehabilitado	S3	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
6	Río Aguas Claras	Nuevo	S2	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
7		Rehabilitado	S3	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
8	Río San Miguel	Nuevo	S2	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840
9		Rehabilitado	S3	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840
10	Río Chirripó	Nuevo	S3	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840
11		Rehabilitado	S3	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840

* N/D: Dato no disponible; N/A: No aplica

En la Figura 71 aparece el mapa con la localización geográfica de cada uno de los puentes ubicados a lo largo de la RN-32. Para efectos del presente estudio, se puede subdividir el área de análisis en dos tramos: primero, el tramo de montaña que atraviesa el Parque Nacional Braulio Carrillo, en el cual se ubica el puente sobre río Sucio, en la estación 37+829 de la carretera y, segundo, el tramo plano, el cual se extiende entre Guápiles y Limón, en el cual se encuentran los demás puentes analizados, más específicamente entre las comunidades de Barbilla y el paso sobre río Chirripó, en el cantón de Matina, provincia de Limón.

Figura 70. Mapa con la localización de los puentes estudiados sobre la RN-32



5.2 Análisis de la amenaza sísmica

5.2.1 Caracterización de la demanda sísmica para los puentes evaluados en la RN-32

Para caracterizar la demanda sísmica en cada puente, se realizaron estudios de amenaza sísmica específicos en toda la región estudiada, referidos a varios puntos escogidos estratégicamente y que abarcan la ubicación de los puentes a lo largo de la RN-32. Este estudio fue elaborado por Laporte y Soto (2017) y ofrece los espectros de isoamenaza (UHS) para cada ubicación especificada. A partir de los resultados de estos espectros, se determinaron los valores de la aceleración pico del terreno, PGA, y de las pseudoaceleraciones espectrales de 0,3 y 1,0 segundos, $S_a(0,3\text{ s})$ o $S_a(1,0\text{ s})$, para períodos de recurrencia de 1033 y 2475 años, los cuales corresponden a los períodos de diseño para puentes esenciales y críticos, según se establece en los LDSP.

Según el mapa de amenaza sísmica del Código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2016), todos los puentes evaluados se sitúan en la zona sísmica III, cuya aceleración pico efectiva según los LDSP es 0,36 g para un período de recurrencia de 1000 años. Además, de acuerdo con los estudios de amenaza sísmica de la región, para los puentes evaluados se determinó que debe considerarse el efecto de falla cercana en todas las estructuras ubicadas sobre el tramo plano de la RN-32, debido a la presencia de fallas activas comprobadas a menos de 5 km de los sitios de emplazamiento de las estructuras. Para el puente sobre río Sucio, en el tramo de montaña, no se aplicó este criterio.

Para determinar los parámetros del espectro de respuesta de las aceleraciones, deben tenerse en cuenta las características del sitio de cimentación, es decir, de la rigidez del medio soportante, caracterizada por el valor promedio de la velocidad de la onda cortante en los 30 metros superficiales del perfil estratigráfico (V_{s30}). La información correspondiente a los tipos de cimentación, en cada uno de los puentes ubicados en el tramo plano del trayecto, se obtuvo de los estudios geotécnicos elaborados por IMSA INGENIEROS CONSULTORES S.A. Para el caso del puente sobre el río Sucio, no se dispone de dicha información.

De acuerdo con los estudios geotécnicos suministrados para cada puente, la clase del suelo predominante en los sitios de emplazamiento de los puentes analizados es del tipo S3, con excepción de los puentes sobre el río Barbilla, en cuyo caso se indica que corresponde al tipo S2. Para el caso del puente sobre el río Sucio, no se tiene el detalle del tipo de sitio de cimentación, por lo cual se asumió el tipo S3, según se recomienda en la sección 2.2 del Código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2016). Con base en la información de los espectros UHS, obtenida del estudio de amenaza sísmica para cada una de las estructuras analizadas, se determinaron los parámetros PGA, Sa(0,3 s) y Sa(1,0 s) para los dos períodos de recurrencia de diseño definidos anteriormente, según lo establece la normativa nacional. Estos valores se resumen en la Tabla 34.

Tabla 34. Nombre, localización y año de diseño de los puentes evaluados en este estudio

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Tipo de suelo	Efecto de falla cercana	PR: 1035 años			PR: 2475 años		
					PGA Tr 1033	Sa (0.3s) Tr 1033	Sa (1.0s) Tr 1033	PGA Tr 2475	Sa (0.3s) Tr 2475	Sa (1.0s) Tr 2475
1	Río Sucio	Rehabilitado	S3	NO	0.653	1.410	0.552	0.784	1.677	0.700
2	Río Barbilla	Nuevo	S2	Sí	0.580	1.455	0.436	0.720	1.851	0.568
3		Rehabilitado	S2	Sí	0.580	1.455	0.436	0.720	1.851	0.568
4	Quebrada	Nuevo	S3	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
5	Calderón	Rehabilitado	S3	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
6	Río Aguas	Nuevo	S2	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
7	Claros	Rehabilitado	S3	Sí	0.595	1.716	0.665	0.732	2.101	0.857
8	Río San	Nuevo	S2	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840
9	Miguel	Rehabilitado	S3	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840
10	Río Chirripó	Nuevo	S3	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840
11		Rehabilitado	S3	Sí	0.580	1.667	0.651	0.716	2.046	0.840

5.2.2 Análisis de los factores de exposición a las amenazas

Para este estudio se ha tomado una muestra de once puentes a lo largo de la RN-32, de los cuales cinco son puentes nuevos y seis son puentes rehabilitados. En el tramo de montaña de la RN-32, se localiza el puente sobre río Sucio, mientras que en el tramo plano se ubican los puentes sobre el río Barbilla, quebrada Calderón, río Aguas Claras, río San Miguel y río Chirripó. Cabe destacar que, para cada una de las localidades sobre el tramo plano de carretera, se cuenta con dos puentes: uno de construcción reciente y otro existente al que se le realizaron trabajos de rehabilitación. En el caso de los puentes rehabilitados, las obras van desde intervenciones menores, como por ejemplo la sustitución de elementos de apoyo o el refuerzo de elementos postensados, hasta la reconstrucción total del puente.

5.2.3 Descripción y clasificación estructural de los puentes evaluados sobre la ruta 32

Entre las características principales de la mayoría de los puentes evaluados se destacan, como tipo de superestructura predominante, las vigas cajón de concreto presforzado. En cuanto a los tipos de cimentación utilizados destacan los sistemas de cimentación profunda, como por ejemplo los bastiones cerrados del tipo muro en voladizo sobre pilotes, o los bastiones abiertos del tipo viga cabezal sobre pila-pilote o tipo marco. Entre los apoyos destacan los de tipo expansivo. La mayoría de los puentes estudiados poseen apoyos de neopreno reforzado y, en algunos casos, hay sistemas de aislamiento sísmico, como en los puentes sobre el río Chirripó.

Para la clasificación de los puentes y posterior evaluación del riesgo sísmico, mediante la metodología adoptada, se debe recopilar los datos relacionados con las características estructurales de cada uno. Para este caso, se ha considerado la siguiente información:

- Nombre del puente
- Tipo (nuevo o rehabilitado)
- Año de diseño
- Año de rehabilitación (no aplica para puentes nuevos)
- Ubicación (estación sobre la carretera)
- Número de tramos o claros libres
- Tipo de superestructura: referente a la tipología estructural (vigas cajón, vigas I) y el material principal (concreto reforzado o presforzado, acero)
- Tipo de subestructura: describe tanto el tipo de bastión como las pilas y dispositivos de apoyo, además del tipo de aislamiento en apoyos
- Continuidad en tramos: continuo, discontinuo y simplemente apoyado
- Longitud total del puente
- Longitud de cada tramo
- Ángulo de sesgo

En los siguientes cuadros se muestra, de manera resumida, la información acerca de las características estructurales de cada uno de los puentes evaluados en este estudio. La Tabla 35 presenta la información básica (nombre, ubicación respecto a la estación sobre la carretera, años de diseño y rehabilitación y tipo de puente -nuevo o rehabilitado). Por otro lado, las características estructurales de cada puente se resumen en la Tabla 36 para los puentes nuevos y en la Tabla 37 para los puentes rehabilitados. Con base en dicha información, se procedió a definir sus categorías según el NBI y el manual Hazus, de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 23 de la guía metodológica. Esta clasificación es indispensable para la construcción de las curvas de vulnerabilidad, a partir de las cuales se obtienen las probabilidades del daño que puede alcanzar cada puente ante la acción sísmica, según los dos períodos de recurrencia indicados en secciones anteriores y las pérdidas económicas asociadas a la reparación o reconstrucción de los distintos grados de daño.

Tabla 35. Nombre, tipo, ubicación y año de diseño de los puentes evaluados

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Ubicación (estación)	Año de diseño	Año de rehabilitación
1	Río Sucio	Rehabilitado	37+829	1984	N/D
2	Río Barbilla	Nuevo	115+506	2017	N/A
3		Rehabilitado	115+510	1968	2020
4	Quebrada	Nuevo	120+615	2017	N/A
5	Calderón	Rehabilitado	120+602	1968	2020
6	Río Aguas Claras	Nuevo	121+469	2017	N/A
7		Rehabilitado	121+455	1968	2020
8	Río San Miguel	Nuevo	123+459	2020	N/A
9		Rehabilitado	123+446	1970	2020
10	Río Chirripó	Nuevo	125+317	2018	N/A
11		Rehabilitado	125+317	1969	2022

Tabla 36. Características estructurales de los puentes nuevos evaluados sobre la RN-32

ID	Puente	Clase NBI	Clase Hazus	No. de tramos	Tipo de superestructura	Tipo de bastión	Tipo de Subestructura		Aislamiento en apoyos	Continuidad de tramo	Long. total (m)	L de tramos (m)	α (°)
							Tipo de pila	Tipo de apoyo					
2	Puente río Barbilla	06	HWB23	3	Viga cajón, Concreto presforzado	4 pila pilote con cabezal (abierto)	2 pila pilote con cabezal	No monolítico	Neopreno reforzado	Continuo	105	35	15
4	Puente quebrada Calderón	506	HWB4	1	Viga cajón, Concreto presforzado	Muro en voladizo sobre pilotes (cerrado)	N/A	No monolítico	Neopreno reforzado	Simplemente apoyado	25	25	0
6	Puente río Aguas Claras	506	HWB4	1	Viga cajón, Concreto presforzado	Muro en voladizo sobre pilotes (cerrado)	N/A	No monolítico	Neopreno reforzado	Simplemente apoyado	25	25	0
8	Puente río San Miguel	506	HWB4	1	Viga cajón, Concreto presforzado	Muro en voladizo sobre pilotes (cerrado)	N/A	No monolítico	Neopreno reforzado	Simplemente apoyado	25	25	0
10	Puente sobre río Chirripó	606	HWB23	13	Viga cajón, Concreto presforzado	4 pila pilote con cabezal (abierto)	2 pilas con cabezal, cimentación de placa aislada sobre pilotes	No monolítico	Aisladores FPS	Continuo	435.82	Tr. 1 y 11: 34.86 m Tr. 2-10: 35.0 m Tr. 12 y 13: 24.86 m	0

Tabla 37. Características estructurales de los puentes rehabilitados evaluados sobre la RN-32

ID	Puente	Clase NBI	Clase Hazus	No. de tramos	Tipo de superestructura	Tipo de bastión	Tipo de Subestructura		Aislamiento en apoyos	Continuidad de tramo	Long. total (m)	L de tramos (m)	α (°)
							Tipo de pila	Tipo de apoyo					
1	Puente río Sucio	606	HWB23	3	Viga cajón, concreto presforzado, sección variable	Tipo marco (abierto)	Pila circular sobre placa aislada	No monolítico	Neopreno reforzado	Continuo	187,25	Tramo 1: 55,5 m Tramo 2: 102 m Tramo 3: 30m	0
3	Puente río Barbilla	606	HWB4	3	Viga I, Concreto presforzado	B1: Muro en voladizo (cerrado) B2: Muro en voladizo sobre pilotes (cerrado)	Muro con martillo	No monolítico	Aislador LRB	Continuo	100	Tr. 1 y 3: 33,25m Tramo 2: 33,5 m	24
5	Puente quebrada Calderón	506	HWB4	1	Viga cajón, Concreto presforzado	3 pila pilote con cabezal (abierto)	N/A	No monolítico	Neopreno reforzado	Simplemente apoyado	25	25	0
7	Puente río Aguas Claras	506	HWB4	1	Viga cajón, Concreto presforzado	3 pila pilote con cabezal (abierto)	N/A	No monolítico	Neopreno reforzado	Simplemente apoyado	25	25	0
9	Puente río San Miguel	506	HWB23	1	Viga cajón, Concreto presforzado	3 pila pilote con cabezal (abierto)	N/A	No monolítico	Neopreno reforzado	Simplemente apoyado	25	25	0
11	Puente sobre río Chirripó	402	HWB16	8	Vigas I metálicas, sección variable	Muro en voladizo sobre pilotes (cerrado)	Muro con martillo, cimentación de placa aislada sobre 4 pilotes de acero	No monolítico	Aisladores tipo SFB	Continuo	431,86	Tr. 1 y 8: 15,8m Tr. 2 y 7: 59,2m Tr. 3 y 6: 6,7m Tr. 4 y 5: 73,2m	0

5.2.4 Costos de construcción de los puentes evaluados

Como parte de los objetivos del análisis del riesgo, deben estimarse las pérdidas económicas asociadas con los niveles del daño esperado, para un determinado evento sísmico. Según se verá en secciones, más adelante, estas pérdidas se pueden estimar a partir de las probabilidades de excedencia de diferentes de los grados del daño, usando como base el costo de reposición de cada puente.

Para el caso de los puentes evaluados en este trabajo, se han determinado los costos de reposición para el puente sobre el río Sucio a partir de la elaboración de un presupuesto detallado con base en la información disponible en los planos existentes. Por su parte, los costos de reposición de los puentes sobre la RN-32 en el tramo plano de la carretera fueron otorgados por UNOPS. En dicho documento se incluyeron los costos de reposición, tanto de los puentes nuevos como de los rehabilitados. En la Tabla 38 se muestran los costos de reposición para cada uno de los puentes.

Tabla 38. Costos de reposición de los puentes evaluados en el estudio de riesgo

ID	Ubicación	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Número de tramos	Precio de reposición US\$
1	37+829	Río Sucio	Rehabilitado	3	5,886,091.10*
2	115+506	Río Barbilla	Nuevo	3	3,060,204.69
3	115+510		Rehabilitado	3	1,246,197.42
4	120+615	Quebrada Calderón	Nuevo	1	582,896.13
5	120+602		Rehabilitado	1	314,696.32
6	121+469	Río Aguas Claras	Nuevo	1	757,764.97
7	121+455		Rehabilitado	1	314,696.32
8	123+459	Río San Miguel	Nuevo	1	582,896.13
9	123+446		Rehabilitado	1	314,696.32
10	125+317	Río Chirripó	Nuevo	13	12,240,818.77
11	125+317		Rehabilitado	8	5,424,105.74

* Valor estimado a partir de un presupuesto detallado con base en planos existentes. Fuente: (UNOPS, 2024)

5.3 Análisis de la vulnerabilidad de los puentes evaluados sobre la Ruta Nacional 32

A continuación, se presentan los resultados del análisis de vulnerabilidad de los puentes evaluados sobre la ruta 32, siguiendo la metodología Hazus y los procedimientos de cálculo descritos en este capítulo.

5.3.1 Estimación de los parámetros para la construcción de las curvas de fragilidad

De acuerdo con los pasos para la aplicación de la metodología Hazus para el análisis de riesgo sísmico de los puentes, se deben conocer previamente las características de cada uno de los puentes, según las clases Hazus definidas en la Tabla 23 de la guía metodológica. Para el caso de los puentes evaluados en este estudio, dicha información se resume en las Tablas 35, 36 y 37.

Como segundo paso, se requiere conocer las características de la demanda sísmica, en específico, determinar los parámetros de aceleración pico efectiva (PGA), y las aceleraciones espectrales para períodos estructurales corto y largo, correspondientes al $S_a(0,3\text{ s})$ y $S_a(1,0\text{ s})$ respectivamente. Estos parámetros se determinaron en la sección 5.2.1 y se resumen en la Tabla 34.

El paso 3 de la metodología consiste en calcular los factores de modificación de las medianas estándar ofrecidas por el manual Hazus para elaborar las curvas de fragilidad utilizadas en la estimación del riesgo sísmico, por medio de las ecuaciones 3 a 5 que se indican en la sección 7.5.2.3 de la guía metodológica. Para el caso de los puentes evaluados, se identificaron cuatro clases de puentes: HWB4, HWB16, HWB21 y HWB23. Las medianas correspondientes a estas cuatro clases se obtienen según la Tabla 7-6 del manual Hazus v5.1 y se muestran para los diferentes grados del daño en la Tabla 39.

Tabla 39. Medianas de aceleración espectral para la aplicación de las curvas de fragilidad en puentes

Clase	Sa (1s) (g)			
	Ligero	Moderado	Extenso	Completo
HWB4	0.8	1.0	1.2	1.7
HWB16	0.9	0.9	1.1	1.5
HWB21	0.6	0.9	1.3	1.6
HWB23	0.9	0.9	1.1	1.5

Fuente: (FEMA, 2022)

Los factores de modificación de las medianas de aceleración espectral aplicables para los puentes evaluados en este estudio se resumen en la Tabla 40.

Tabla 40. Factores de modificación, calculados para las clases de puentes evaluadas

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehab.)	Clasif. Hazus	No. de tramos	α (°)	EQ (K _{SD})	I _{shape}	K _{skew}	Tr 1033			Tr 2475	
									K _{shape}	K _{SD}	K _{skew}	K _{shape}	K _{SD}
1	Río Sucio	Rehabilitado	HWB21	3	0	EQ3	0	1.00	0.98	1.165	1.00	1.04	1.165
2	Río Barbilla	Nuevo	HWB23	3	15	EQ3	1	0.98	0.75	1.165	0.98	0.77	1.165
3		Rehabilitado	HWB23	3	24	EQ3	1	0.96	0.75	1.165	0.96	0.77	1.165
4	Quebrada Calderón	Nuevo	HWB4	1	0	EQ1	1	1.00	0.97	1.00	1.00	1.02	1.00
5		Rehabilitado	HWB4	1	0	EQ1	1	1.00	0.97	1.00	1.00	1.02	1.00
6	Río Aguas Claras	Nuevo	HWB4	1	0	EQ1	1	1.00	0.97	1.00	1.00	1.02	1.00
7		Rehabilitado	HWB4	1	0	EQ1	1	1.00	0.97	1.00	1.00	1.02	1.00
8	Río San Miguel	Nuevo	HWB4	1	0	EQ1	1	1.00	0.98	1.00	1.00	1.03	1.00
9		Rehabilitado	HWB4	1	0	EQ1	1	1.00	0.98	1.00	1.00	1.03	1.00
10	Río Chirripó	Nuevo	HWB23	13	0	EQ3	1	1.00	0.98	1.028	1.00	1.03	1.028
11		Rehabilitado	HWB16	8	0	EQ3	1	1.00	0.98	1.047	1.00	1.03	1.047

Con base en los factores de modificación de la Tabla 40, el paso 4 consiste en corregir los valores de las medianas de aceleración espectral de la Tabla 39 mediante las ecuaciones 6 a 9 (ver sección 7.5.2.3 de la guía metodológica), y así elaborar las curvas de fragilidad de cada uno de los puentes. Dichos valores se calcularon para los dos períodos de recurrencia de control indicados anteriormente. Para el período de 1035 años, los resultados de las nuevas medianas se indican en la Tabla 41, mientras que para el período de recurrencia de 2475 años se muestran en la Tabla 42.

Tabla 41. Medianas corregidas para la construcción de las curvas de fragilidad para un período de recurrencia de 1035 años

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Clasificación Hazus	Factor		Nuevas medianas		
				Slight	Ligero	Moderado	Extenso	Completo
1	Puente Río Sucio	Rehabilitado	HWB21	1.00	0.60	1.05	1.51	1.86
2	Puente Río Barbilla	Nuevo	HWB23	0.750	0.67	1.03	1.26	1.72
3		Rehabilitado	HWB23	0.750	0.67	1.00	1.22	1.67
4	Puente Quebrada Calderón	Nuevo	HWB4	0.969	0.78	1.00	1.20	1.70
5		Rehabilitado	HWB4	0.969	0.78	1.00	1.20	1.70
6	Puente Río Aguas Claras	Nuevo	HWB4	0.969	0.78	1.00	1.20	1.70
7		Rehabilitado	HWB4	0.969	0.78	1.00	1.20	1.70
8	Puente Río San Miguel	Nuevo	HWB4	0.976	0.78	1.00	1.20	1.70
9		Rehabilitado	HWB4	0.976	0.78	1.00	1.20	1.70
10	Puente sobre Río Chirripó	Nuevo	HWB23	0.976	0.88	0.92	1.13	1.54
11		Rehabilitado	HWB16	0.976	0.88	0.94	1.15	1.57

Tabla 42. Medianas corregidas para la construcción de las curvas de fragilidad para un período de recurrencia de 2475 años

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Clasificación Hazus	Factor		Nuevas medianas		
				Slight	Ligero	Moderado	Extenso	Completo
1	Río Sucio	Rehabilitado	HWB21	1.00	0.60	1.05	1.51	1.86
2	Río Barbilla	Nuevo	HWB23	0.77	0.69	1.03	1.26	1.72
3		Rehabilitado	HWB23	0.77	0.69	1.00	1.22	1.67
4	Quebrada Calderón	Nuevo	HWB4	1.00	0.80	1.00	1.20	1.70
5		Rehabilitado	HWB4	1.00	0.80	1.00	1.20	1.70
6	Río Aguas Claras	Nuevo	HWB4	1.00	0.80	1.00	1.20	1.70
7		Rehabilitado	HWB4	1.00	0.80	1.00	1.20	1.70
8	Río San Miguel	Nuevo	HWB4	1.00	0.80	1.00	1.20	1.70
9		Rehabilitado	HWB4	1.00	0.80	1.00	1.20	1.70
10	Río Chirripó	Nuevo	HWB23	1.00	0.90	0.92	1.13	1.54
11		Rehabilitado	HWB16	1.00	0.90	0.94	1.15	1.57

Seguidamente, en el paso 5 se utilizaron las medianas nuevas con el factor de dispersión $\sigma = 0,6$ para definir las curvas de fragilidad finales de cada puente, usando la ecuación (1) o la ecuación (2) que se indican en la sección 7.5.2.3 de la guía metodológica, para luego evaluar las probabilidades de alcanzar distintos grados de daños causados el movimiento sísmico esperado. Para cada puente y cada período de recurrencia del sismo de diseño (1033 años y 2475 años) se determinaron dichas curvas según los cuatro niveles del daño. En la Figura 72 se muestra como ejemplo las curvas de fragilidad para el puente sobre el río Sucio, para un período de recurrencia de 1033 años.

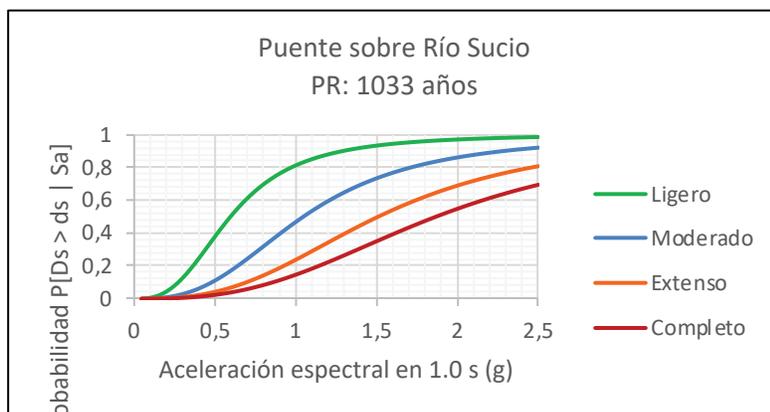


Figura 71. Curvas de fragilidad desarrolladas para el puente sobre el río Sucio, según el período de recurrencia de 1033 años (Clase HWB21)

A partir de las curvas de fragilidad de cada puente, se determinaron las probabilidades de daño obtenidas de la estimación del riesgo sísmico para los dos períodos de recurrencia (paso 7). Los porcentajes asociados a la probabilidad de alcanzar cada uno de los grados de daño definidos anteriormente (daño nulo, ligero, moderado, extenso y completo) se resumen gráficamente de la Figura 73 a la 76.

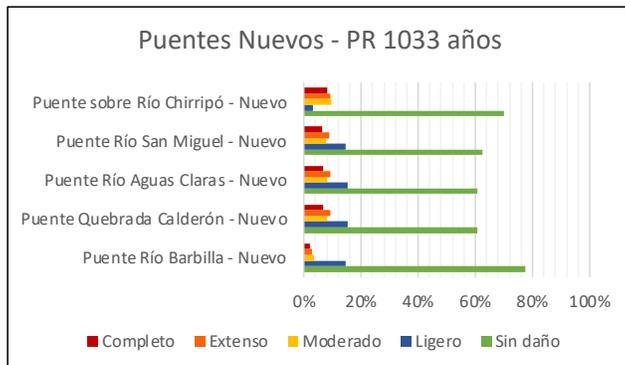


Figura 72. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 1033 años

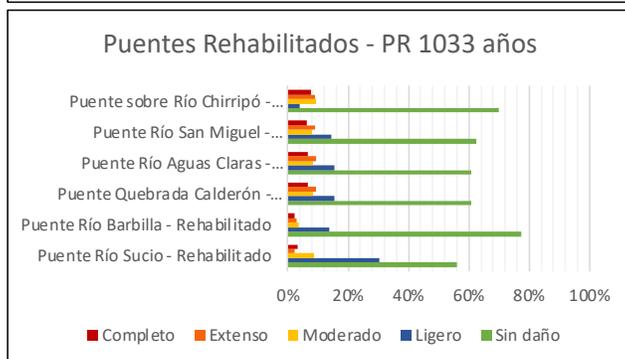


Figura 73. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto en los puentes rehabilitados, para un período de recurrencia de 1033 años

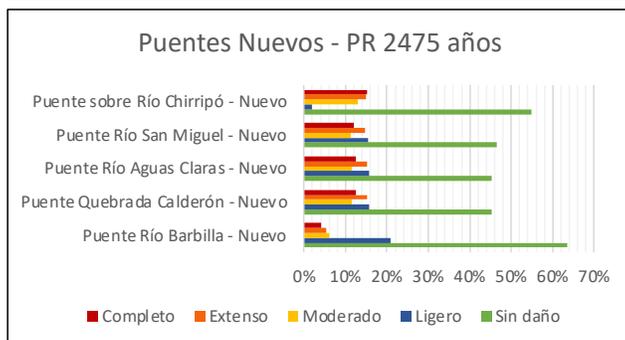


Figura 74. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto, en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 2475 años



Figura 75. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto, en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 2475 años

Con base en los porcentajes obtenidos, se determinaron las probabilidades de los estados discretos del daño y el índice del daño medio, para cada puente, mediante la ecuación 16 de la guía metodológica. En las Tablas 43 y 44 se resumen los resultados de la clasificación del daño medio, para cada una de las estructuras analizadas y para los períodos de recurrencia especificados.

Tabla 43. Probabilidades del daño físico, para los puentes evaluados, según el período de recurrencia de 1033 años

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Clase Hazus	Sin daño	Probabilidades de daño P[D = ds Sa]				IDM	Daño medio
					Ligero	Moderado	Extenso	Completo		
1	Río Sucio	Rehabilitado	HWB21	56%	30%	9%	2%	3%	0.7	Ligero
2	Río Barbilla	Nuevo	HWB23	77%	14%	3%	3%	2%	0.4	Sin daño
3		Rehabilitado	HWB23	77%	14%	4%	3%	2%	0.4	Sin daño
4	Quebrada Calderón	Nuevo	HWB4	61%	15%	8%	9%	7%	0.9	Ligero
5		Rehabilitado	HWB4	61%	15%	8%	9%	7%	0.9	Ligero
6	Río Aguas Claras	Nuevo	HWB4	61%	15%	8%	9%	7%	0.9	Ligero
7		Rehabilitado	HWB4	61%	15%	8%	9%	7%	0.9	Ligero
8	Río San Miguel	Nuevo	HWB4	63%	15%	8%	9%	6%	0.8	Ligero
9		Rehabilitado	HWB4	63%	15%	8%	9%	6%	0.8	Ligero
10	Río Chirripó	Nuevo	HWB23	70%	3%	10%	9%	8%	0.8	Ligero
11		Rehabilitado	HWB16	70%	4%	9%	9%	8%	0.8	Ligero

Tabla 44. Probabilidades del daño físico, para los puentes evaluados, para el período de recurrencia de 2475 años

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Clase Hazus	Sin daño	Probabilidades de daño P[D = ds Sa]				IDM	Daño medio
					Ligero	Moderado	Extenso	Completo		
1	Río Sucio	Rehabilitado	HWB21	39%	37%	14%	4%	6%	1.0	Ligero
2	Río Barbilla	Nuevo	HWB23	63%	21%	6%	5%	4%	0.7	Ligero
3		Rehabilitado	HWB23	63%	20%	6%	6%	4%	0.7	Ligero
4	Quebrada Calderón	Nuevo	HWB4	45%	16%	11%	15%	13%	1.3	Ligero
5		Rehabilitado	HWB4	45%	16%	11%	15%	13%	1.3	Ligero
6	Río Aguas Claras	Nuevo	HWB4	45%	16%	11%	15%	13%	1.3	Ligero
7		Rehabilitado	HWB4	45%	16%	11%	15%	13%	1.3	Ligero
8	Río San Miguel	Nuevo	HWB4	47%	16%	11%	15%	12%	1.3	Ligero
9		Rehabilitado	HWB4	47%	16%	11%	15%	12%	1.3	Ligero
10	Río Chirripó	Nuevo	HWB23	55%	2%	13%	15%	15%	1.3	Ligero
11		Rehabilitado	HWB16	55%	3%	13%	15%	15%	1.3	Ligero

Según las dos tablas anteriores, de acuerdo con el análisis del riesgo realizado, las probabilidades mayores del daño en los puentes evaluados corresponden con el nivel de daño nulo. Sin embargo, al ponderar las probabilidades de todos los grados de daño se obtiene el índice de daño medio (IDM) para cada estructura, el cual difiere de esa clasificación. Para el caso del período de recurrencia de 1033 años, se obtuvo un nivel de daño medio “ligero” en todos los puentes evaluados, excepto los puentes sobre río Barbilla, en el cual resulta un IDM nulo, mientras que para el período de recurrencia de 2475 años se obtiene un grado “ligero” de daño medio en todas las estructuras.

5.3.2 Estimación de los costos de reposición para cada estado del daño

De acuerdo con la metodología Hazus, las pérdidas económicas se cuantifican como un porcentaje del precio de construcción de cada puente, como se indicó en la sección 6.6.4.1. Los costos de construcción de los puentes ubicados en el tramo plano de la RN-32 fueron cedidos por UNOPS, mientras que los costos de reposición del puente sobre río Sucio se determinaron a partir de un presupuesto deducido a partir de los planos existentes. Estos costos se indicaron en la Tabla 38. Los costos asociados a cada nivel de daño, para los puentes evaluados, se muestran en la Tabla 45.

Tabla 45. Pérdidas económicas estimadas para los diferentes grados del daño, en cada puente

ID	Ubicación	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	No. tramos	Costo según nivel de daño (USD)			
					Ligero	Moderado	Extenso	Completo
1	37+829	Río Sucio	Rehabilitado	3	\$176,582.73	\$470,887.29	\$1,471,522.78	\$3,924,060.73
2	115+506	Río Barbilla	Nuevo	3	\$91,806.14	\$244,816.38	\$765,051.17	\$2,040,136.46
3	115+510		Rehabilitado	3	\$37,385.92	\$99,695.79	\$311,549.36	\$830,798.28
4	120+615	Quebrada Calderón	Nuevo	1	\$17,486.88	\$46,631.69	\$145,724.03	\$582,896.13
5	120+602		Rehabilitado	1	\$9,440.89	\$25,175.71	\$78,674.08	\$314,696.32
6	121+469	Río Aguas Claras	Nuevo	1	\$22,732.95	\$60,621.20	\$189,441.24	\$757,764.97
7	121+455		Rehabilitado	1	\$9,440.89	\$25,175.71	\$78,674.08	\$314,696.32
8	123+459	Río San Miguel	Nuevo	1	\$17,486.88	\$46,631.69	\$145,724.03	\$582,896.13
9	123+446		Rehabilitado	1	\$9,440.89	\$25,175.71	\$78,674.08	\$314,696.32
10	125+317	Río Chirripó	Nuevo	13	\$367,224.56	\$979,265.50	\$3,060,204.69	\$1,883,202.89
11	125+317		Rehabilitado	8	\$162,723.17	\$433,928.46	\$1,356,026.44	\$1,356,026.44

5.3.3 Estimación de la pérdida máxima probable y de la pérdida anual esperada

Como resultado final del cálculo del riesgo sísmico se han estimado la pérdida económica máxima probable (PMP) para los dos períodos de recurrencia analizados y la pérdida anual esperada (PAE) en cada puente. La pérdida máxima probable se estimó a partir de los porcentajes obtenidos para cada grado del daño (Tablas 43 y 44) y sus costos correspondientes de reparación o reconstrucción, según la Tabla 45.

A partir de la pérdida máxima probable asociada a cada período de recurrencia, en función de la probabilidad anual de excedencia, se calculó la curva de excedencia de las pérdidas y la pérdida anual esperada (PAE) para cada puente. El área bajo la curva de excedencia representa el valor de la PAE para cada puente. En este caso, la curva de excedencia se construyó a partir de los dos períodos de recurrencia para los cuales se determinaron los parámetros de la demanda sísmica: 1.033 años y 2.475 años. De acuerdo con esto, la gráfica muestra una línea recta que conecta las pérdidas probables asociadas a ambos Tr. Para una estimación más precisa de las PAE, se recomienda estimar las probabilidades de excedencia y los costos asociados respectivos para más períodos de recurrencia, de manera que se obtenga una gráfica más precisa. Como ejemplo, en la Figura 77 se muestra la curva de excedencia correspondiente al puente nuevo sobre el río Sucio.

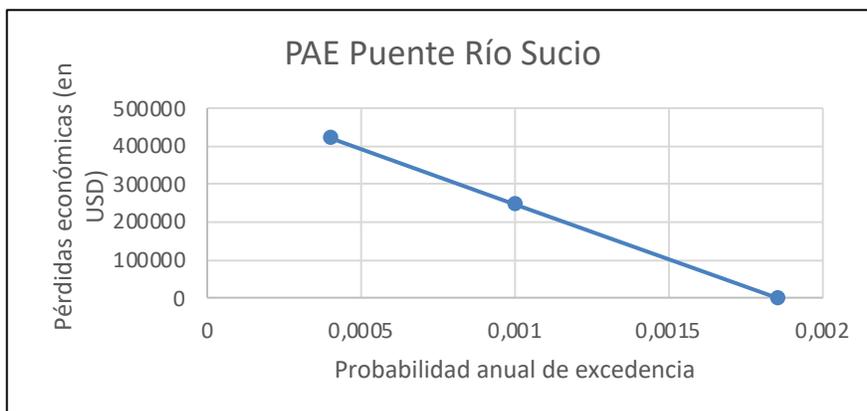


Figura 76. Curva de excedencia y pérdida anual esperada obtenida para el puente sobre río Sucio

Los valores de las pérdidas máximas probables (PMP) y anuales esperadas (PAE), para cada uno de los puentes analizados, se resumen en la Tabla 46 (puentes nuevos) y la Tabla 47 (puentes rehabilitados).

Tabla 46. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes nuevos

ID	Ubicación	Puente	PMP PR1000	PMP PR2500	PAE
2	115+506	Río Barbilla - Nuevo	\$83,305.66	\$159,940.15	\$164.12
4	120+615	Quebrada Calderón - Nuevo	\$58,167.91	\$103,493.39	\$112.29
6	121+469	Río Aguas Claras - Nuevo	\$75,618.28	\$134,541.41	\$145.98
8	123+459	Río San Miguel - Nuevo	\$55,108.34	\$99,065.16	\$106.60
10	125+317	Río Chirripó - Nuevo	\$541,402.28	\$878,603.24	\$1,038.22

Tabla 47. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes rehabilitados

ID	Ubicación	Puente	PMP PR1000	PMP PR2500	PAE
1	37+829	Río Sucio - Rehabilitado	\$248,853.49	\$423,294.43	\$477.46
3	115+510	Río Barbilla - Rehabilitado	\$35,924.25	\$68,980.99	\$70.78
5	120+602	Quebrada Calderón - Rehabilitado	\$31,403.92	\$55,874.43	\$60.62
7	121+455	Río Aguas Claras - Rehabilitado	\$31,403.92	\$55,874.43	\$60.62
9	123+446	Río San Miguel - Rehabilitado	\$29,752.11	\$53,483.70	\$57.55
11	125+317	Río Chirripó - Rehabilitado	\$271,849.47	\$454,691.64	\$521.09

5.4 Efectos del CGA sobre la fragilidad sísmica de los puentes evaluados en la RN-32

5.4.1 Estimación de los parámetros para la construcción de las curvas de fragilidad con efectos del CGA

Para la estimación de los efectos del CGA en la vulnerabilidad de los puentes analizados en este estudio, se ha tomado como base el modelo de Chirdeep et.al. (2023). Como se indicó anteriormente, el incremento en las probabilidades de alcanzar determinados grados de daño en las curvas de fragilidad se obtiene con el cambio de los valores de las medianas y desviaciones estándar (i.e. $med(t)$ y $\zeta(t)$ respectivamente) de la función de probabilidad acumulativa log-normal, los cuales se determinan mediante la elaboración de modelos de análisis no lineales, que evalúan el comportamiento estructural de ciertos componentes del puente ante la exposición a diversos factores que afectan en las tasas de deterioro de los materiales.

Los valores de $med(t)$ y $\zeta(t)$ son dependientes de los factores causantes de deterioro y/o factores asociados con el CGA considerados en el análisis (e.g. corrosión, exposición a cloruros, humedad relativa, cambios de temperatura, salpicadura marina, etc), así como del componente estructural sometido a los análisis (pilas, apoyos, etc.). Actualmente, no se cuenta con estudios o investigaciones que desarrollen modelos de análisis en los que se integren todos los componentes estructurales de un puente en un solo conjunto y que permitan determinar los parámetros estadísticos necesarios para construir las curvas de fragilidad con efectos de CGA, para describir el comportamiento global de la estructura. Debido a esto, es necesario fomentar una línea de investigación en este campo y desarrollar trabajos en los que se estudien los efectos del CGA aplicados a puentes de diferentes tipos (e.g. puentes de 1 tramo, múltiples tramos, puentes metálicos, etc), donde se analice el comportamiento global de estas estructuras y generen información estadística útil para el análisis de vulnerabilidad y riesgo de estas estructuras con mayor precisión.

Debido a que no se cuenta con información específica sobre los parámetros estadísticos que permitan establecer las medianas

y desviaciones estándar para el análisis de la vulnerabilidad sísmica para los tipos de puentes evaluados en este trabajo, se ha utilizado la información disponible en las investigaciones que se han mencionado en este documento. Para efectos de este estudio, en la construcción de las curvas de fragilidad con efecto de CGA para los puentes evaluados sobre la RN-32, se han establecido los siguientes supuestos:

- La desviación estándar $\zeta(t) = \beta_c$, tal y como la define el manual Hazus, con un valor de 0.6.
- IM corresponde a la medida de intensidad utilizada en este caso, que corresponde a la aceleración espectral para un período de respuesta estructural de 1 segundo ($Sa(1s)$).
- $med(t)$ toma valores específicos determinados para cada estado del daño que dependen de los factores del CGA y que se muestran en la Tabla 48. Estas medianas varían de acuerdo con la edad supuesta de la estructura analizada.
- Los valores de las medianas modificadas por efecto del CGA utilizados no consideran la posible variabilidad según la clase Hazus definida para cada puente, ya que estos valores fueron obtenidos para un tipo específico de puente.

Tabla 48. Medianas de aceleración espectral para la aplicación de las curvas de fragilidad en puentes

Años	med(t) (g)			
	Ligero	Moderado	Extenso	Completo
25	0.27	0.43	0.54	0.68
50	0.19	0.34	0.44	0.56
75	0.16	0.28	0.35	0.44

Fuente: Chirdeep et. al. (2023)

De acuerdo con lo expuesto, el CGA puede incrementar la vulnerabilidad de las estructuras debido principalmente a la degradación de los materiales y a los posibles cambios en la humedad del terreno de la cimentación. Tomando como base los conceptos explicados en la sección 8.6 de la guía metodológica, se analizó la variación en las curvas de fragilidad de los puentes considerados sobre la RN-32. Como resultado de dicho análisis, se observó un incremento de las probabilidades de ocurrencia de los niveles del daño (ligero, moderado, extenso y completo).

Como ejemplo de esto, la Figura 78 muestra las curvas de fragilidad, construidas para el puente sobre el río Sucio, para un evento de diseño con período de recurrencia de 1033 años. Las líneas discontinuas corresponden con las curvas de fragilidad asociadas a cada nivel del daño, obtenidas mediante la metodología Hazus. Las líneas continuas corresponden con las curvas modificadas, que consideran los efectos del CGA.

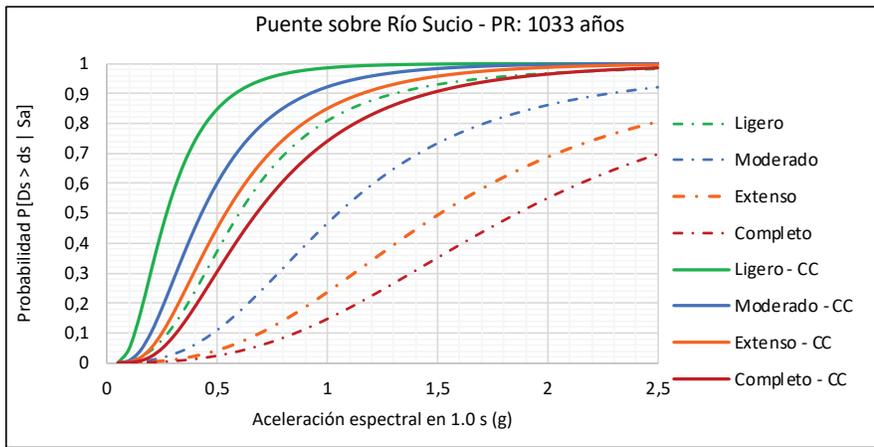


Figura 77. Comparación de las curvas de fragilidad para el puente sobre el Río Sucio, para distintos niveles de daño, con y sin los efectos del CGA, para un período de recurrencia de 1033 años

Como se puede observar en la Figura 78, las curvas representadas por líneas continuas se encuentran desplazadas verticalmente "hacia arriba", en comparación con sus contrapartes dibujadas con líneas discontinuas. Este desplazamiento indica un incremento en las probabilidades para cada estado del daño, al considerar los efectos del CGA, conforme al modelo adoptado en este estudio, lo cual confirma la tendencia en el aumento en la vulnerabilidad.

A partir de las curvas de fragilidad de cada puente, que consideran los efectos de CGA, se determinan las probabilidades del daño, obtenidas de la estimación del riesgo sísmico para los dos períodos de recurrencia según se describe en el paso 7 de la guía. En contraste con los resultados obtenidos sin considerar el CGA, con los valores de medianas modificados por efecto de CGA utilizados se observa un cambio importante en los porcentajes asociados a la probabilidad de alcanzar cada uno de los grados de daño (daño nulo, ligero, moderado, extenso y completo), donde predomina en todos los puentes una alta probabilidad de alcanzar daño completo. Las probabilidades de daño con efectos de CGA se resumen gráficamente de la Figura 79 a la 82.

Figura 78. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 1033 años



Figura 79. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes rehabilitados, para un período de recurrencia de 1033 años

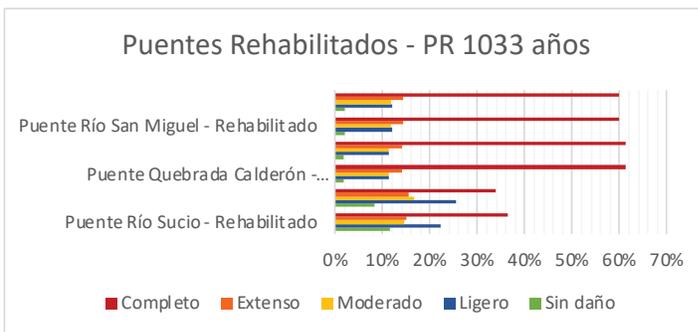


Figura 80. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes nuevos, para un período de recurrencia de 2475 años

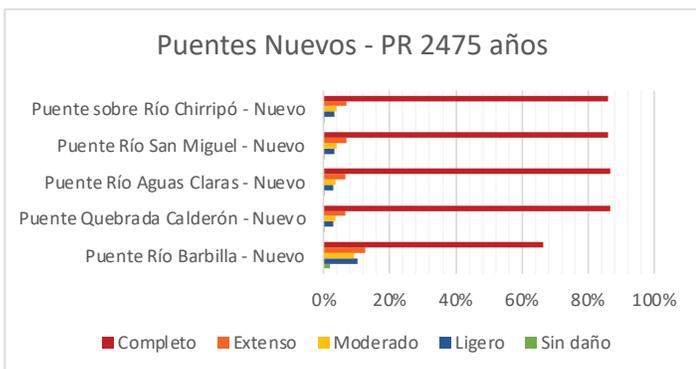
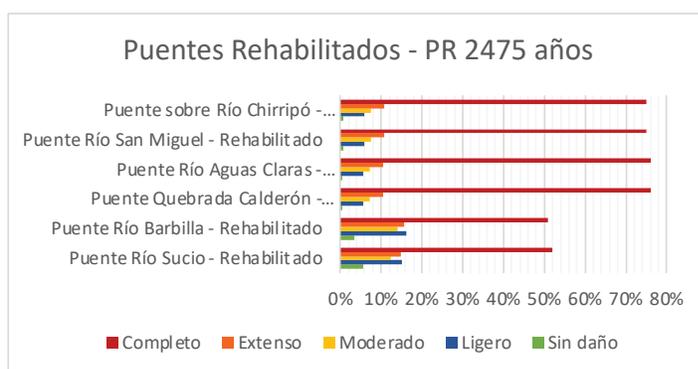


Figura 81. Gráfico con las probabilidades de cada estado del daño discreto con efecto del CGA en los puentes rehabilitados, para un período de recurrencia de 2475 años



Con base en los porcentajes obtenidos se determinaron las probabilidades de los estados del daño discreto y se determinó el índice del daño medio, para cada puente. En las Tablas 49 y 50 se resumen los resultados de la clasificación del daño medio, para cada una de las estructuras analizadas y para los períodos de recurrencia especificados, con efecto de CGA.

Tabla 49. Probabilidades del daño físico en los puentes evaluados, bajo el efecto del CGA, según el período de recurrencia de 1033 años

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Clase Hazus	Sin daño	Probabilidades de daño P[D = ds, Sa]				IDM	Daño medio
					Ligero	Moderado	Extenso	Completo		
1	Río Sucio	Rehabilitado	HWB21	12%	22%	15%	15%	36%	2.4	Moderado
2	Río Barbilla	Nuevo	HWB23	5%	18%	13%	15%	49%	2.9	Extenso
3		Rehabilitado	HWB23	8%	26%	17%	16%	34%	2.4	Moderado
4	Quebrada Calderón	Nuevo	HWB4	1%	7%	7%	10%	75%	3.5	Completo
5		Rehabilitado	HWB4	2%	11%	11%	14%	61%	3.2	Extenso
6	Río Aguas Claras	Nuevo	HWB4	1%	7%	7%	10%	75%	3.5	Completo
7		Rehabilitado	HWB4	2%	11%	11%	14%	61%	3.2	Extenso
8	Río San Miguel	Nuevo	HWB4	1%	7%	7%	11%	74%	3.5	Completo
9		Rehabilitado	HWB4	2%	12%	12%	14%	60%	3.2	Extenso
10	Río Chirripó	Nuevo	HWB23	1%	7%	7%	11%	74%	3.5	Completo
11		Rehabilitado	HWB16	2%	12%	12%	14%	60%	3.2	Extenso

Tabla 50. Probabilidades del daño físico, para los puentes evaluados, bajo el efecto de CGA, para el período de recurrencia de 2475 años

ID	Puente	Tipo (Nuevo/Rehabilitado)	Clase Hazus	Sin daño	Probabilidades de daño P[D = ds, Sa]				IDM	Daño medio
					Ligero	Moderado	Extenso	Completo		
1	Río Sucio	Rehabilitado	HWB21	6%	15%	12%	15%	52%	2.9	Extenso
2	Río Barbilla	Nuevo	HWB23	2%	10%	9%	13%	66%	3.3	Extenso
3		Rehabilitado	HWB23	3%	16%	14%	16%	51%	2.9	Extenso
4	Quebrada Calderón	Nuevo	HWB4	0%	3%	4%	7%	87%	3.8	Completo
5		Rehabilitado	HWB4	1%	6%	7%	11%	76%	3.6	Completo
6	Río Aguas Claras	Nuevo	HWB4	0%	3%	4%	7%	87%	3.8	Completo
7		Rehabilitado	HWB4	1%	6%	7%	11%	76%	3.6	Completo
8	Río San Miguel	Nuevo	HWB4	0%	3%	4%	7%	86%	3.8	Completo
9		Rehabilitado	HWB4	1%	6%	7%	11%	75%	3.5	Completo
10	Río Chirripó	Nuevo	HWB23	0%	3%	4%	7%	86%	3.8	Completo
11		Rehabilitado	HWB16	1%	6%	7%	11%	75%	3.5	Completo

Según las dos tablas anteriores, de acuerdo con el análisis del riesgo realizado, al considerar los efectos del CGA las probabilidades mayores del daño en los puentes evaluados corresponden con el nivel de daño completo. Para el período de recurrencia de 1033 años de la sacudida de diseño, el índice de daño medio (IDM) en los puentes nuevos cambia al nivel de daño completo, con excepción del puente sobre río Barbilla. En el caso de los puentes rehabilitados, se tiene daño extenso en la mayoría de los puentes, excepto en los puentes sobre río Sucio y río Barbilla, donde se obtienen niveles de daño moderado. Por su parte, para el período de recurrencia de 2475 años, se obtienen índices de daño extenso en los puentes sobre río Sucio y río Barbilla (nuevo y rehabilitado), y grados de daño completo en todas las demás estructuras.

5.4.2 Estimación de los costos de reposición para cada estado del daño

De acuerdo con la metodología Hazus, las pérdidas económicas se cuantifican como un porcentaje del precio de reposición de cada puente. Con base en los costos de reposición indicados en la Tabla 38 y los costos asociados a cada nivel de daño, para los puentes evaluados, los cuales se muestran en la Tabla 45, se calcularon las pérdidas máximas probables asociadas a las probabilidades de alcanzar cada nivel de daño, obtenidas de las curvas de fragilidad con efecto del CGA. Estos valores se resumen en la Tabla 51 para el caso de los puentes nuevos y en la Tabla 52 para los puentes rehabilitados.

Tabla 51. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes nuevos

ID	Ubicación	Puente	PMP Tr 1033	PMP Tr 2475	PAE
2	115+506	Río Barbilla - Nuevo	\$1 170 279.68	\$1 483 881.14	\$2 699.96
4	120+615	Quebrada Calderón - Nuevo	\$459 187.22	\$516 974.47	\$1 594.27
6	121+469	Río Aguas Claras - Nuevo	\$596 943.39	\$672 066.81	\$2 072.55
8	123+459	Río San Miguel - Nuevo	\$453 162.81	\$513 249.14	\$1 520.53
10	125+317	Río Chirripó - Nuevo	\$1 819 987.22	\$1 876 701.87	\$19 380.84

Tabla 52. Pérdidas máximas probables (PMP) y pérdidas anuales esperadas (PAE) para los puentes rehabilitados

ID	Ubicación	Puente	PMP Tr 1033	PMP Tr 2475	PAE
1	37+829	Río Sucio - Rehabilitado	\$1 758 492.13	\$2 340 912.66	\$3 759.00
3	115+510	Río Barbilla - Rehabilitado	\$356 057.28	\$491 637.35	\$731.48
5	120+602	Quebrada Calderón - Rehabilitado	\$207 973.66	\$250 108.94	\$545.43
7	121+455	Río Aguas Claras - Rehabilitado	\$207 973.66	\$250 108.94	\$545.43
9	123+446	Río San Miguel - Rehabilitado	\$203 934.55	\$247 167.63	\$522.79
11	125+317	Río Chirripó - Rehabilitado	\$1 078 012.68	\$1 207 460.72	\$3 861.86

Como se puede observar en los dos cuadros anteriores, las pérdidas máximas probables (PMP) y la pérdida anual esperada (PAE) incrementan considerablemente cuando se considera en el análisis los efectos del CGA. Es importante recordar que los parámetros estadísticos utilizados para la estimación de las curvas de fragilidad con efectos de CGA fueron obtenidos de investigaciones realizadas utilizando modelos para una tipología de puente específico (ver Chirdeep et al., 2023) (Figura 4: puente de dos claros, una pila central, 40 m de longitud), que puede no ser representativa para todos los puentes estudiados en este trabajo. Por tanto, si se desea obtener estimaciones más precisas, es necesario realizar estudios que permitan determinar los parámetros que apliquen a cada clase Hazus específica. Aun así, es evidente que al tomar en consideración los efectos del CGA en los análisis de vulnerabilidad sísmica de los puentes, incrementa significativamente los costos relacionados con daños, debidos a eventos sísmicos extremos.

Entonces, estos resultados sugieren que los modelos tradicionales que no incorporan el efecto posible del CGA pueden subestimar las probabilidades reales de los diferentes grados del daño y las pérdidas económicas asociadas a los eventos sísmicos intensos en el futuro. Se destaca así la importancia de aplicar modelos y metodologías que integren estos factores para la evaluación integral del riesgo. Es una forma de fortalecer la asistencia al proceso de toma de decisiones y la intervención de las estructuras que requieren atención prioritaria.

5.5 Presentación de todas las curvas de fragilidad obtenidas para el análisis del riesgo

A continuación, se presentan las curvas de fragilidad de los puentes evaluados sobre la RN-32, según la metodología Hazus, para los períodos de recurrencia $T_r = 1033$ años y 2475 años, y para los escenarios sin y con efectos de CGA.

5.5.1 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes nuevos – PR 1033 años

Figura 82. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años

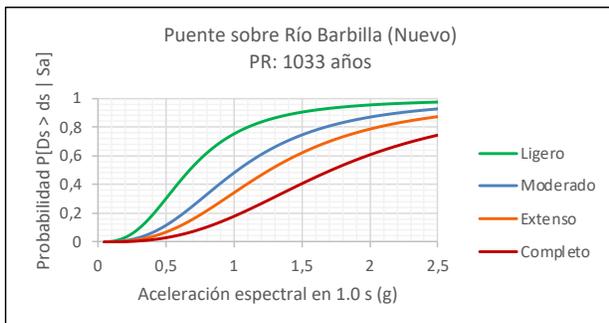


Figura 83. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años

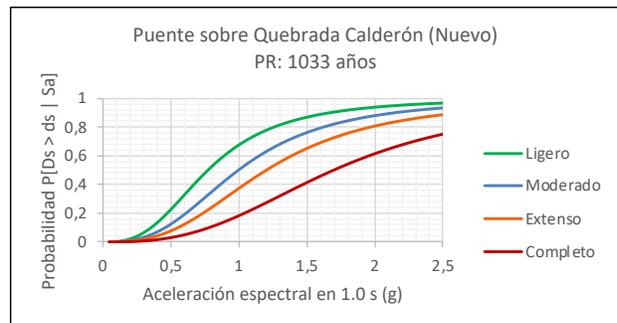


Figura 84. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años

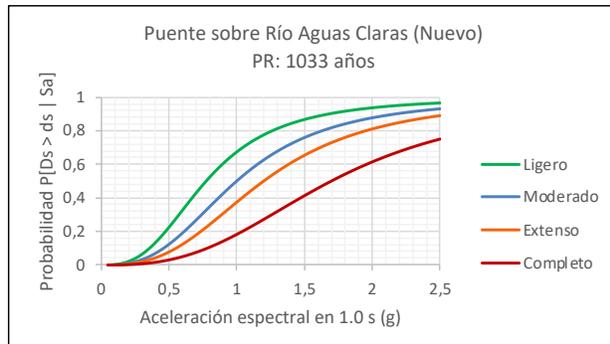


Figura 85. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años

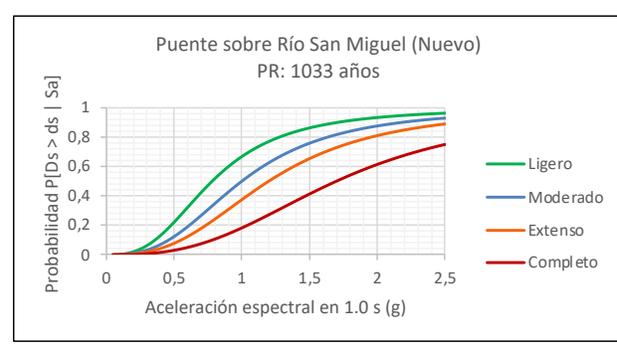
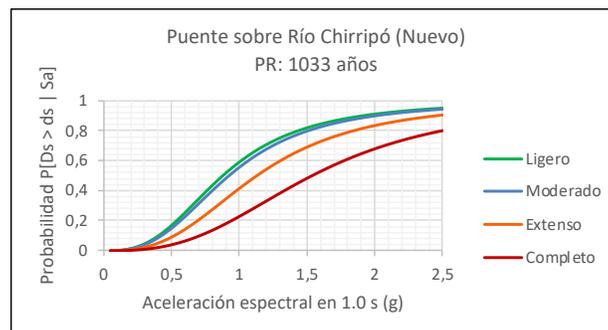


Figura 86. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años



5.5.2 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 1033 años

Figura 87. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 1033 años

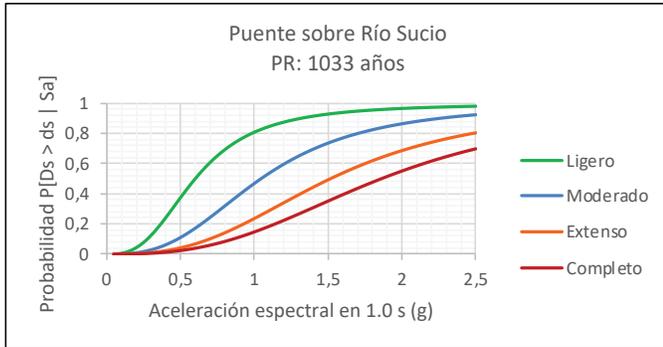


Figura 88. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla -rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años

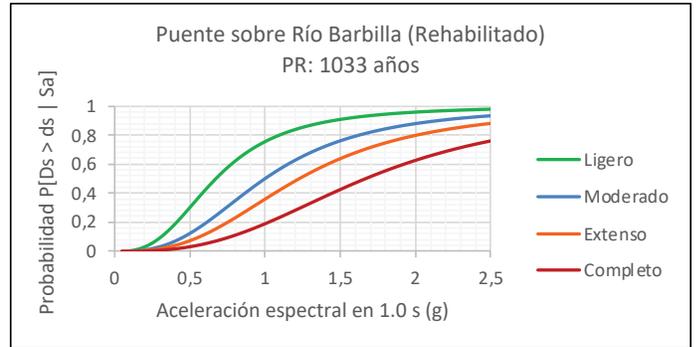


Figura 89. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón -rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años

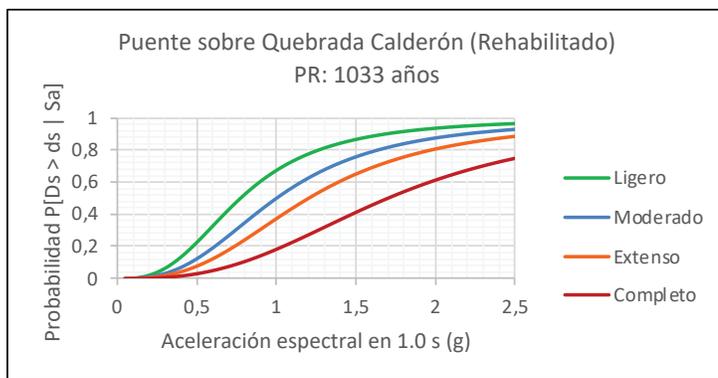


Figura 90. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras -rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años

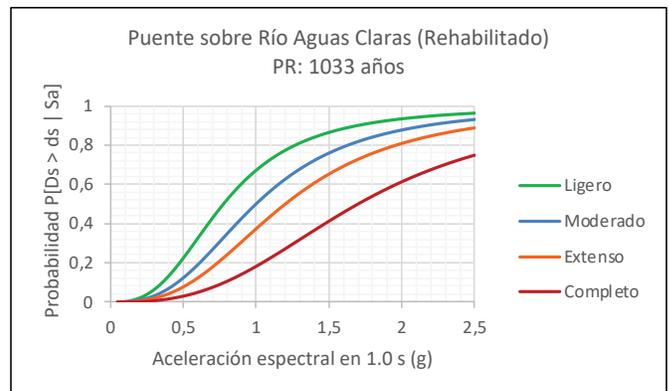


Figura 91. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel -rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años

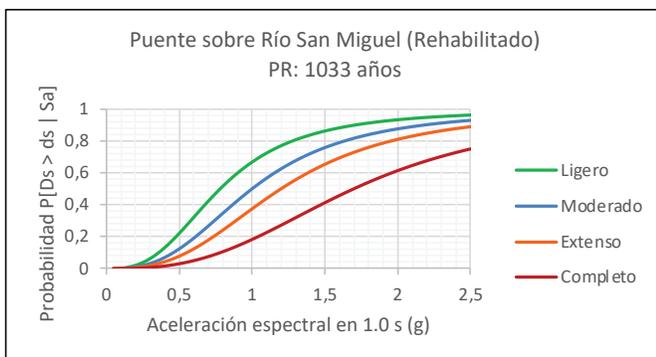
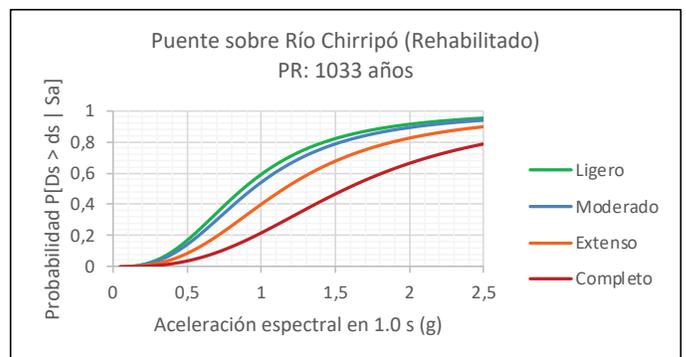


Figura 92. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó -rehabilitado (clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 1033 años



5.5.3 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes nuevos – PR 2475 años

Figura 93. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años

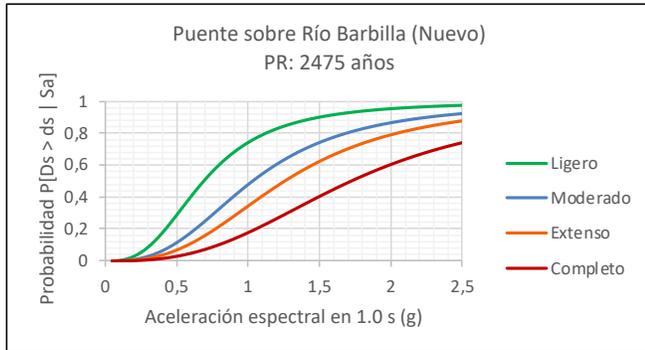


Figura 94. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años

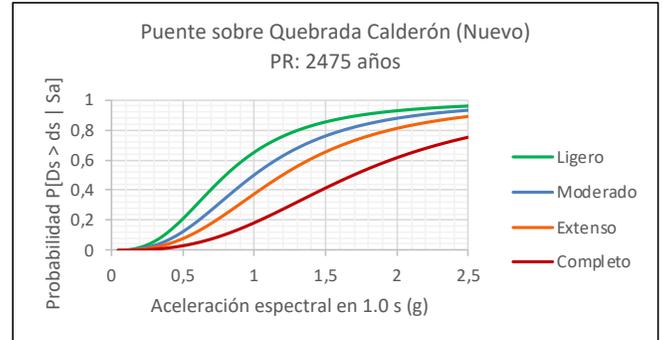


Figura 95. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años

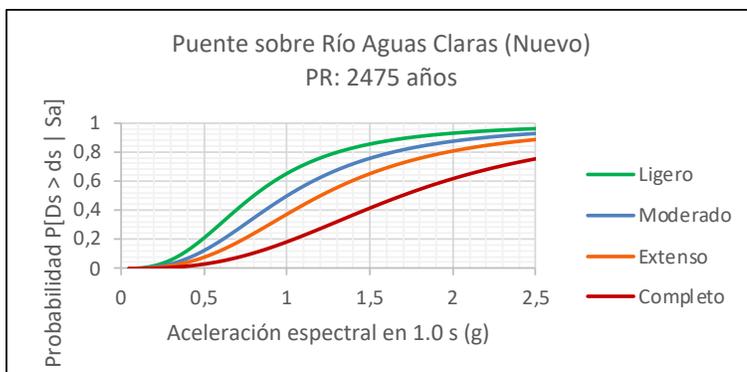


Figura 96. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años

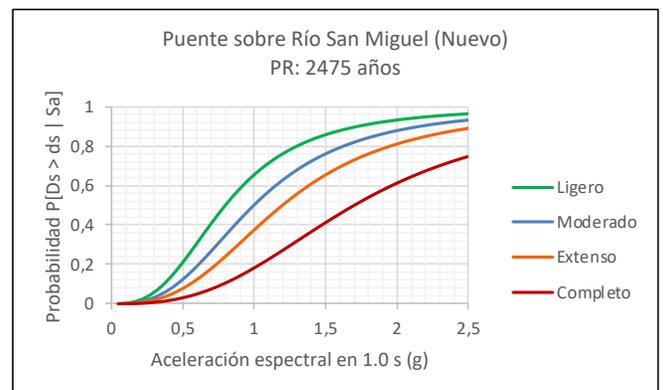
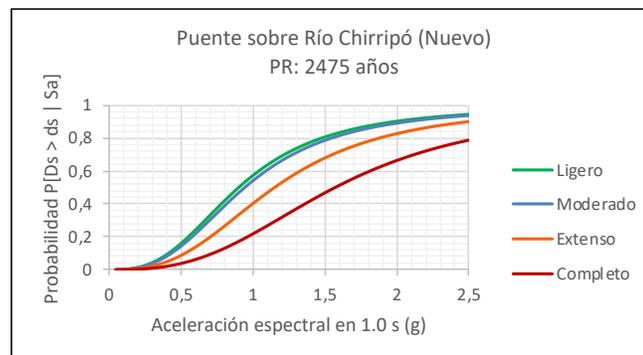


Figura 97. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años



5.5.4 Curvas de fragilidad sin efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 2475 años

Figura 98. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 2475 años

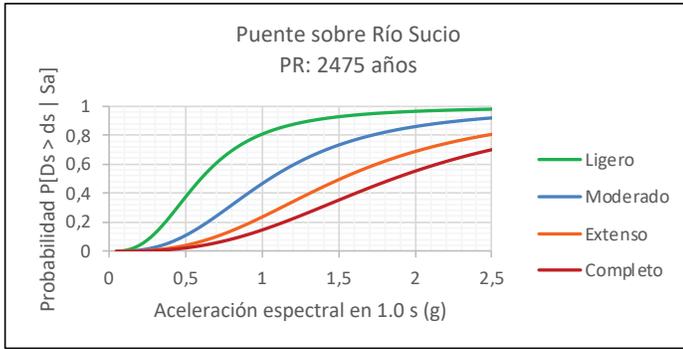


Figura 99. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla -rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años

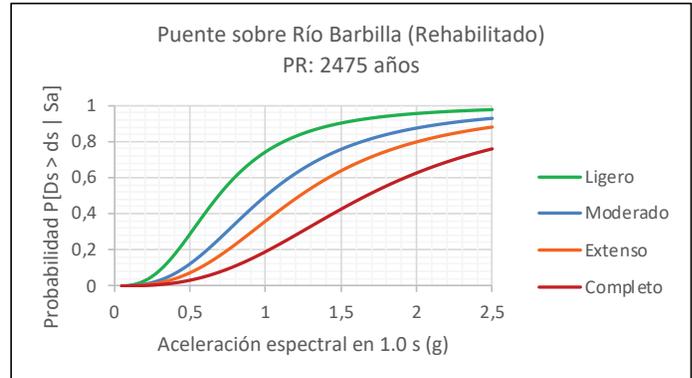


Figura 100. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón -rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años

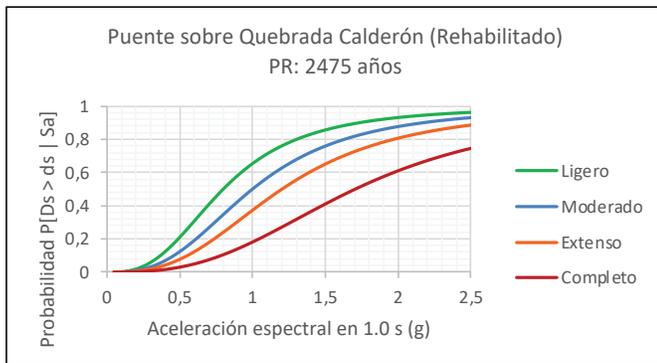


Figura 101. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras – rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años

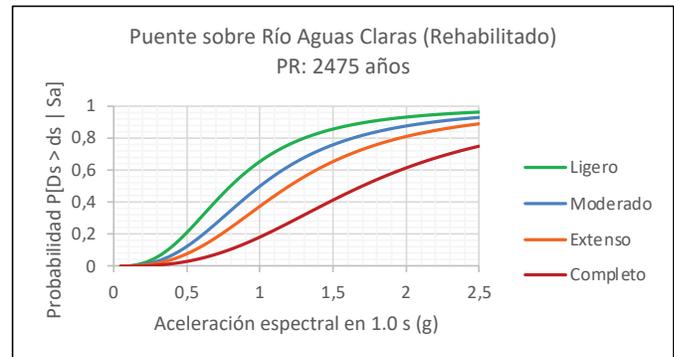


Figura 102. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel -rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años

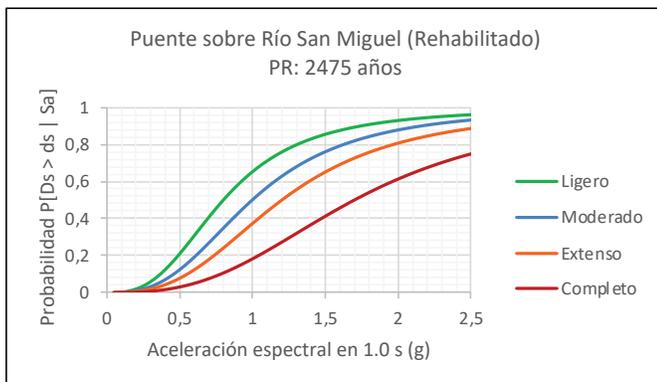
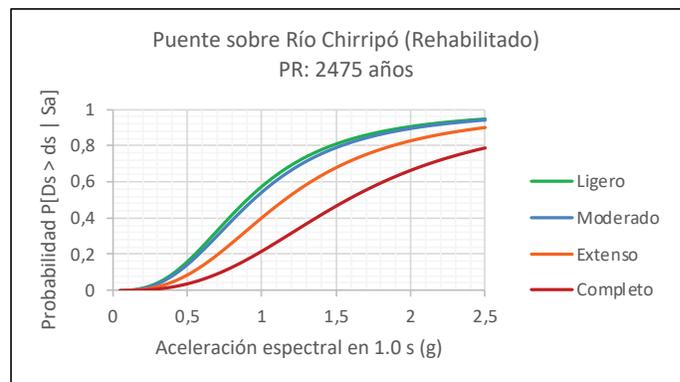


Figura 103. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó – rehabilitado (clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 2475 años



5.5.5 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes nuevos – PR 1033 años

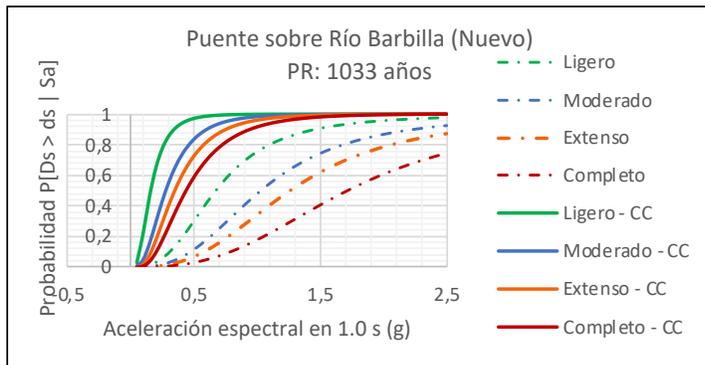


Figura 104. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

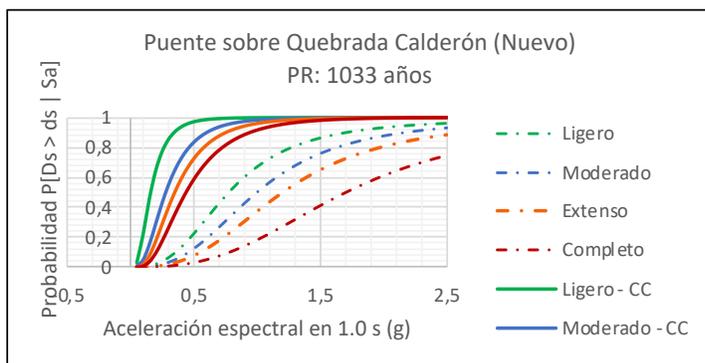


Figura 105. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

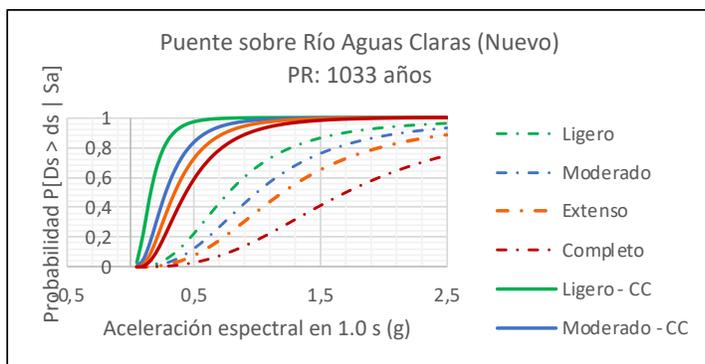


Figura 106. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

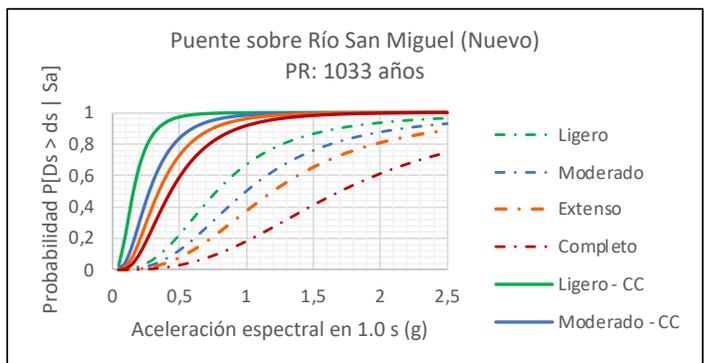


Figura 107. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

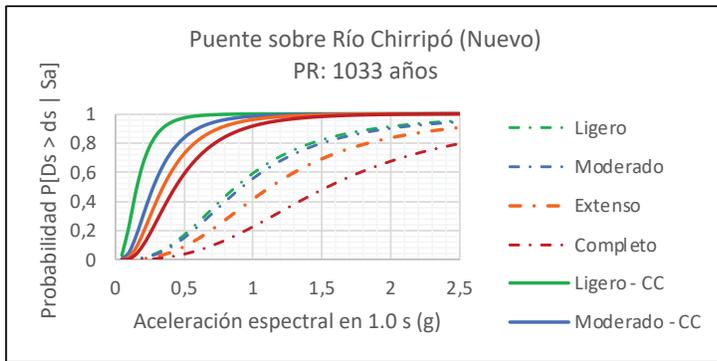


Figura 108. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

5.5.6 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 1033 años

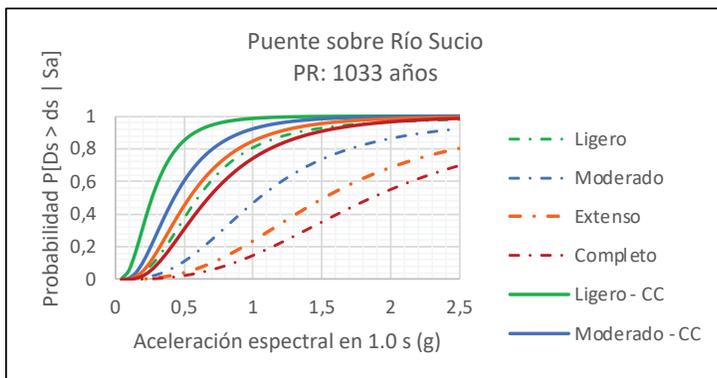


Figura 109. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

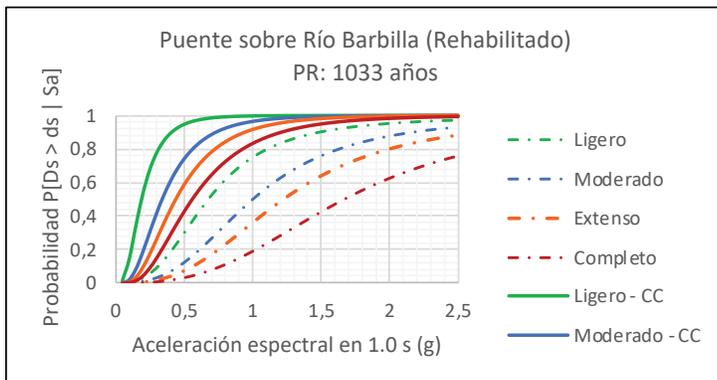


Figura 110. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

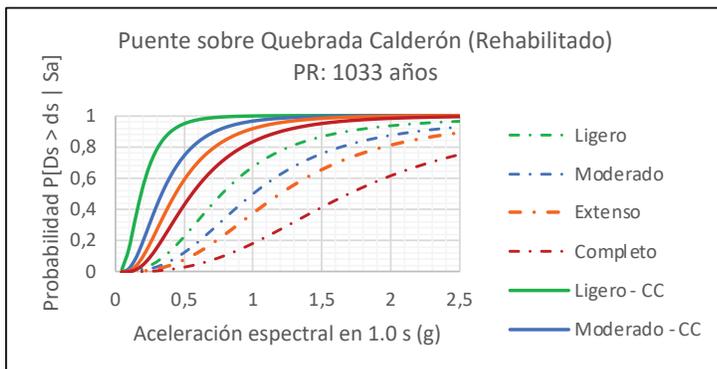


Figura 111. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

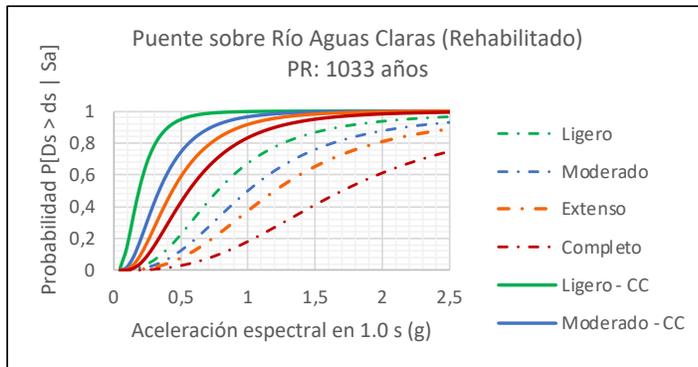


Figura 112. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras – rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

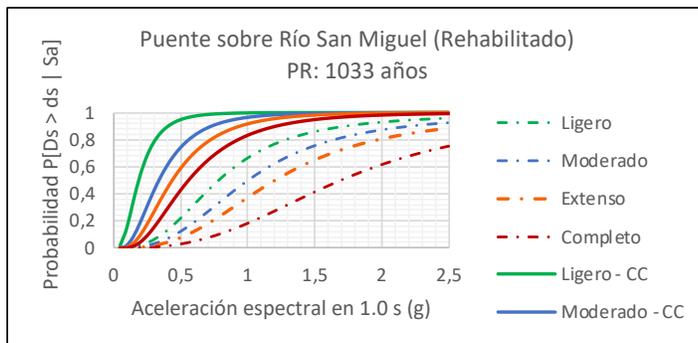


Figura 113. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - rehabilitado (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

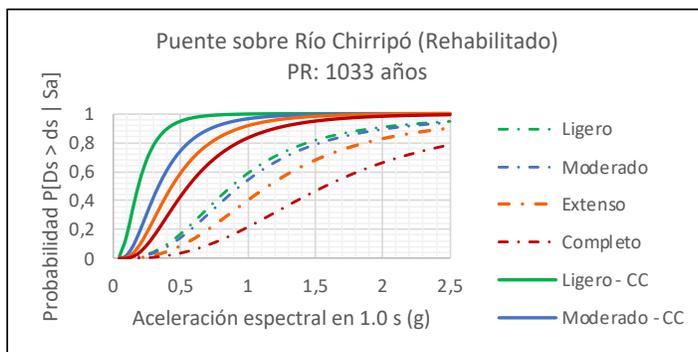


Figura 114. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó – rehabilitado (clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 1033 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

5.5.7 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes nuevos – PR 2475 años

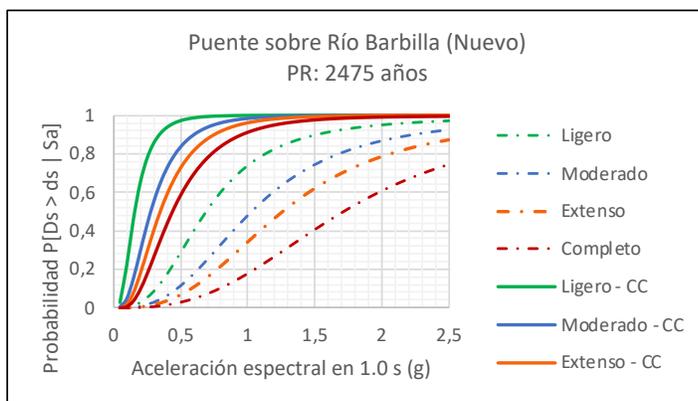


Figura 115. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

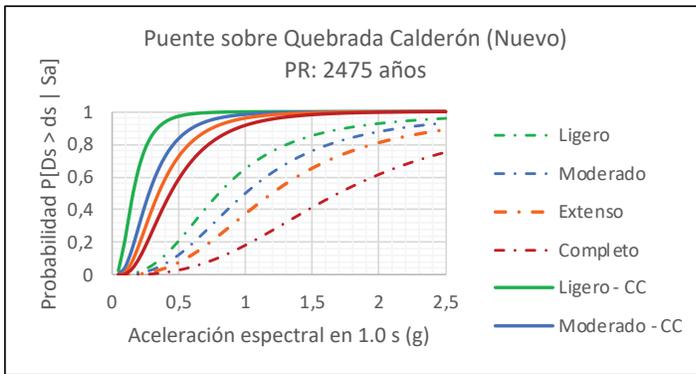


Figura 116. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

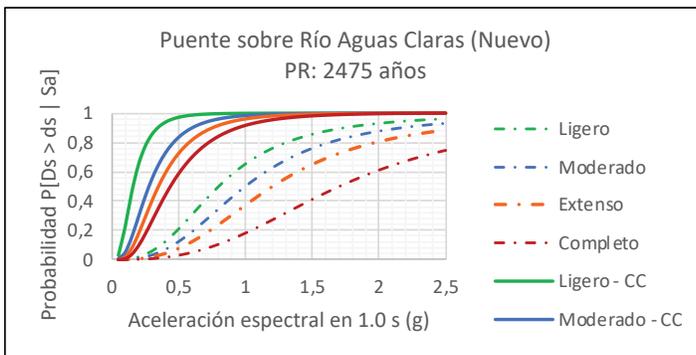


Figura 117. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Aguas Claras - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

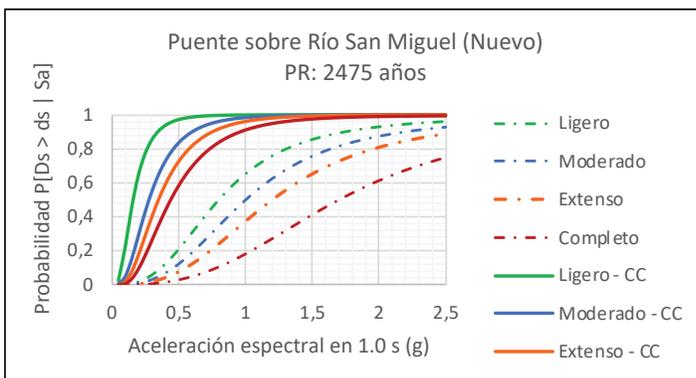


Figura 118. Curvas de fragilidad para el puente sobre río San Miguel - nuevo (clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

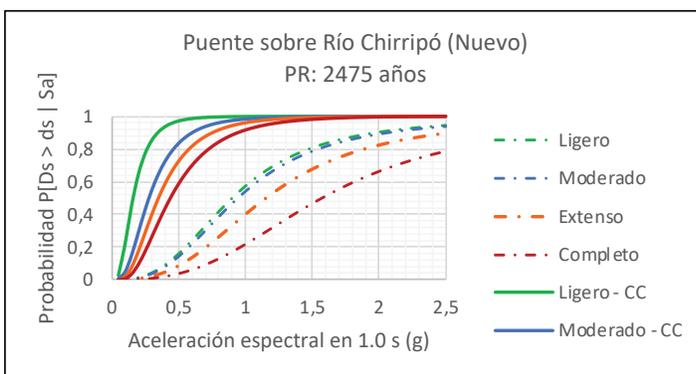


Figura 119. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Chirripó - nuevo (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

5.5.8 Curvas de fragilidad con efectos de CGA para puentes rehabilitados – PR 2475 años

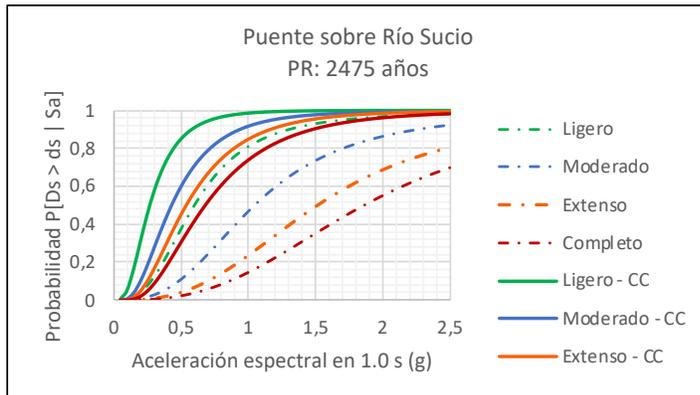


Figura 120. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Sucio (clase Hazus: HWB21) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

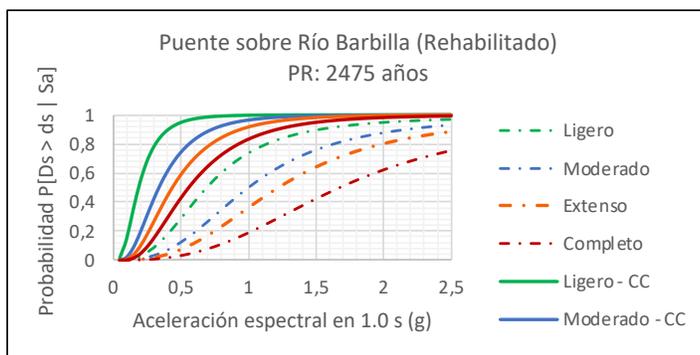


Figura 121. Curvas de fragilidad para el puente sobre río Barbilla - rehabilitado (clase Hazus: HWB23) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

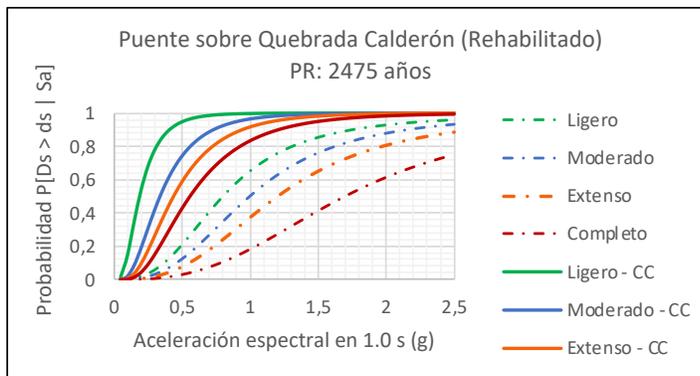


Figura 122. Curvas de fragilidad para el puente sobre quebrada Calderón - rehabilitado (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

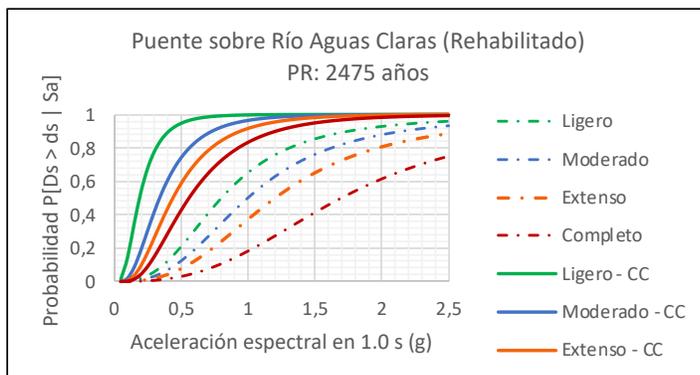


Figura 123. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río Aguas Claras – rehabilitado (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

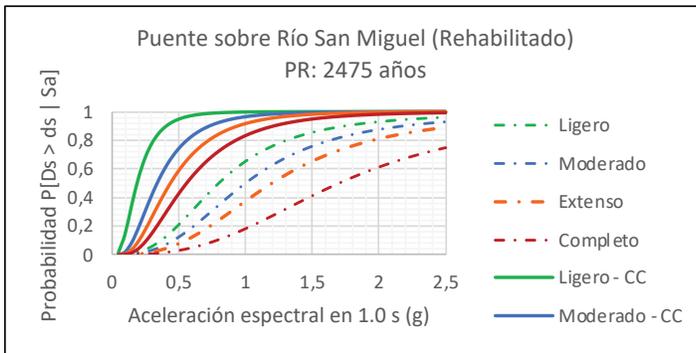


Figura 124. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río San Miguel - rehabilitado (Clase Hazus: HWB4) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

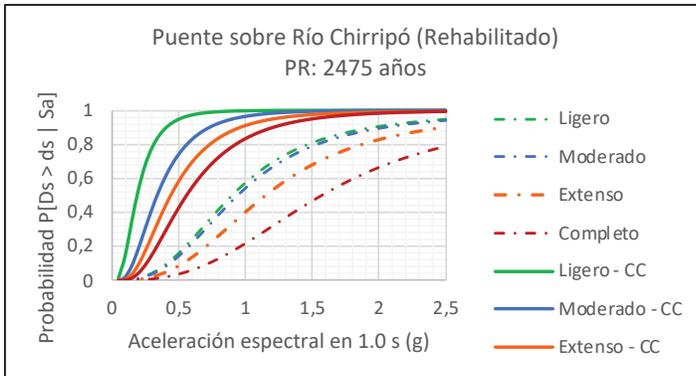


Figura 125. Curvas de fragilidad para el puente sobre Río Chirripó – rehabilitado (Clase Hazus: HWB16) para el período de recurrencia de 2475 años. Las curvas con líneas discontinuas representan las curvas sin considerar efectos del CGA. Las curvas con líneas continuas representan las curvas que sí consideran los efectos del CGA.

5.6 Presentación de todas las curvas de excedencia y PAE obtenidas

Seguidamente, se ilustran las curvas de excedencia de la pérdida anual esperada (PAE) para los puentes nuevos. Posteriormente se mostrarán, también, las curvas de excedencia de pérdidas para los puentes rehabilitados; para el escenario sin CGA.

5.6.1 Gráficos de las curvas de excedencia y pérdida anual esperada para puentes rehabilitados

Figura 126. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Barbilla - nuevo

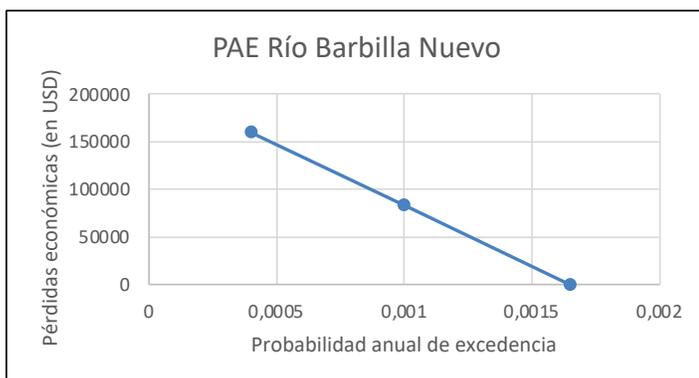


Figura 127. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Quebrada Calderón - nuevo

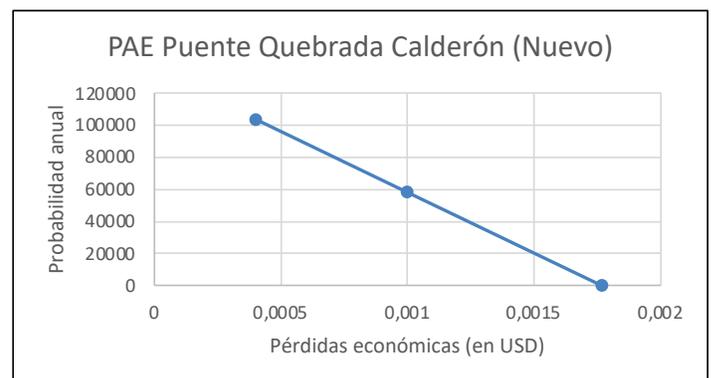


Figura 128. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Aguas Claras - nuevo

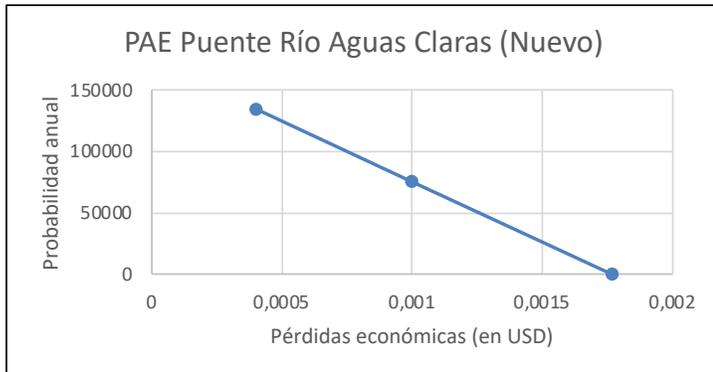


Figura 129. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río San Miguel - nuevo

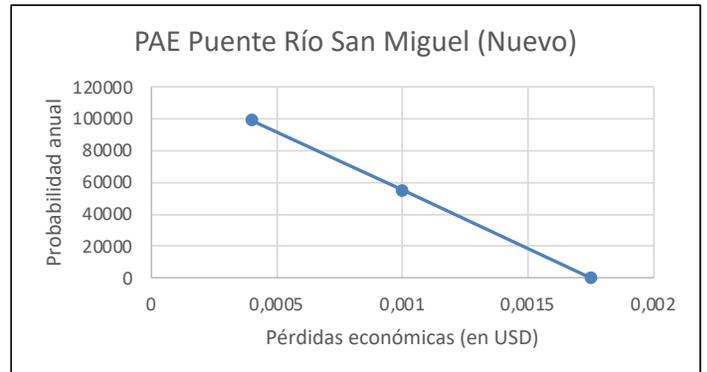
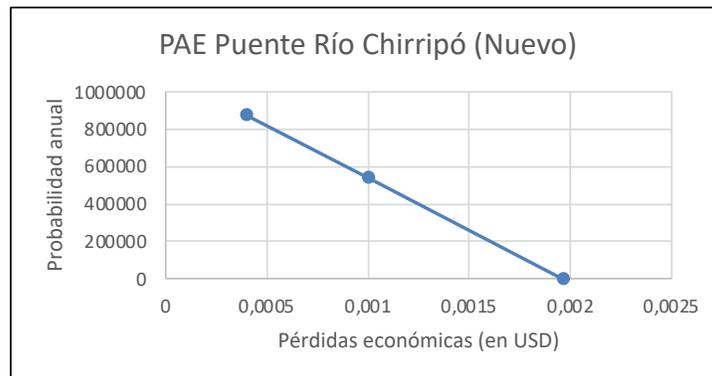


Figura 130. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Chirripó - nuevo



5.6.2 Gráficos de las curvas de excedencia y pérdida anual esperada para puentes rehabilitados

Figura 131. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Sucio

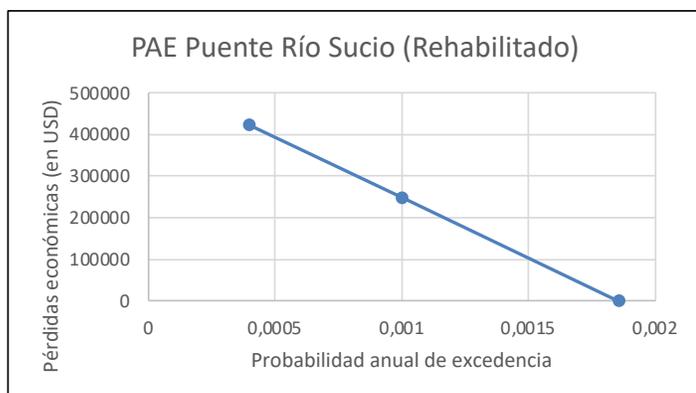


Figura 132. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Barbilla - rehabilitado

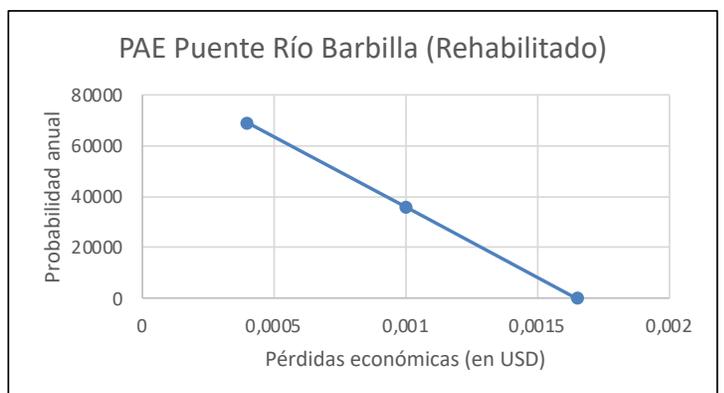


Figura 133. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Quebrada Calderón - rehabilitado

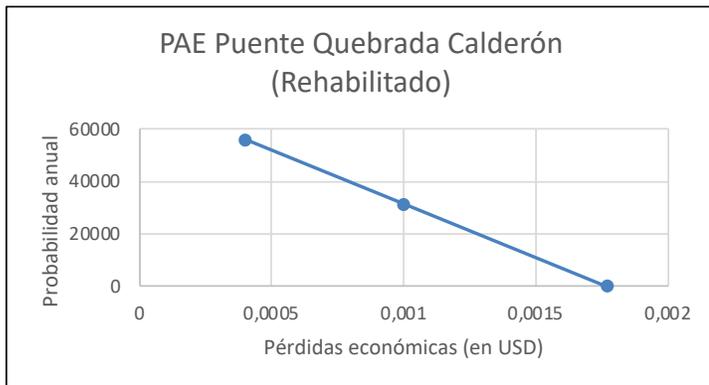


Figura 134. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Aguas Claras - rehabilitado

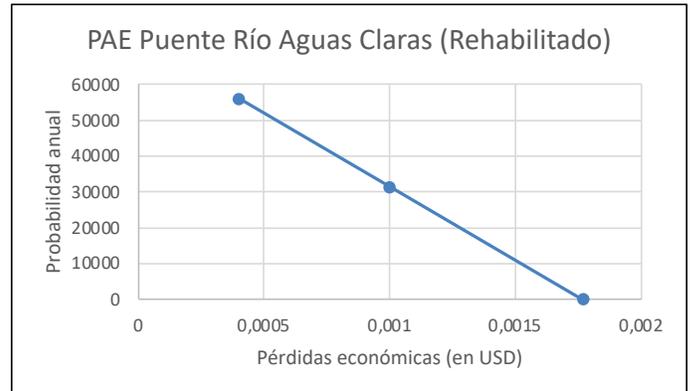


Figura 135. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río San Miguel - nuevo

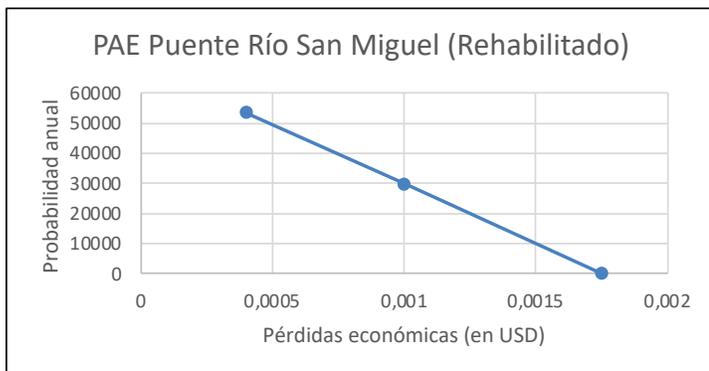
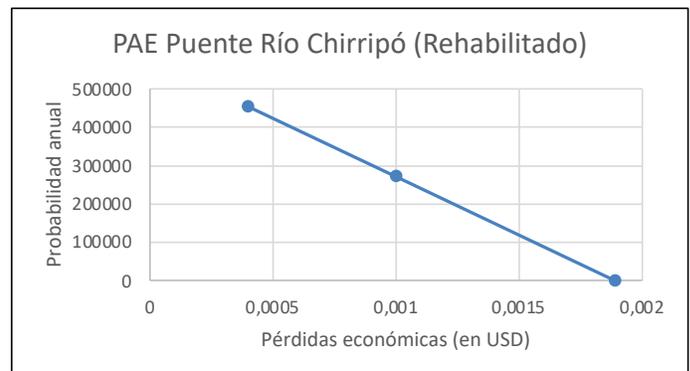


Figura 136. Curvas de excedencia y PAE para el puente sobre Río Chirripó - nuevo



5.7 Comentarios acerca de los resultados del riesgo sísmico

Es conveniente dejar claro que, si bien han sido detectadas algunas evidencias difusas que correlacionan ciertos tipos de actividad microsísmica, sobre todo en áreas glaciáricas sometidas al derretimiento de los hielos y el rebote isostático respectivo, así como y el derretimiento de los suelos saturados (permafrost), sus causas, condiciones y consecuencias no han sido cuantificadas todavía con suficiente rigor científico, aun y cuando han podido ser registrados. El consenso científico indica que el clima no causa, de manera directa, eventos sísmicos de magnitudes $M_w \geq 2$, como para incorporarlos en un análisis del riesgo, al menos comparados con la actividad sismotectónica actual que se registra en Costa Rica. Por ello, se considera innecesario, por ahora, abordar este caso en particular (Verbitsky et al. 2024; Adven, M; 2018).

El cambio en los resultados de riesgo con influencia de CGA puede resultar abrupto. Sin embargo, este es el resultado para los modelos y metodologías vigentes (Chirdeep et al, 2023). Todavía no hay investigación local alguna que permita razonablemente mejorar estos modelos para su aplicación en Costa Rica.

El estudio de Chirdeep et al (2023) menciona que “el marco metodológico se demuestra utilizando un estudio de caso de un puente de carretera sin diseño sísmico, ubicado cerca de zonas de influencia marina dentro de la región sísmicamente activa de Gujarat, India”. Los climas de Gujarat, India, y Limón, Costa Rica, son ambos tropicales y aunque presentan variaciones estacionales y ambientales distintas, comparten algunas similitudes, con altas temperaturas, dependencia de lluvias estacionales y vulnerabilidades ante eventos climáticos extremos. Se proyecta que el cambio climático traerá temperaturas más altas, tormentas intensificadas y patrones de precipitación variables a ambas regiones, con implicaciones para la agricultura, la biodiversidad y la estabilidad socioeconómica.

6. Conclusiones y recomendaciones generales

6.1. Conclusiones

1. La aplicación de la metodología de evaluación de riesgos múltiples en la Ruta Nacional 32 no solo ha permitido validar un enfoque robusto para analizar amenazas en infraestructura vial, sino que también ha generado aprendizajes importantes que fortalecen la capacidad para gestionar estos riesgos en Costa Rica. El estudio piloto de esta metodología en un corredor crítico como la RN-32, que atraviesa zonas montañosas y expuestas a fenómenos naturales de alta intensidad, aporta una visión integral de los desafíos y la importancia de mejorar continuamente las estrategias de resiliencia en infraestructura.
2. El uso de una metodología multicriterio para evaluar amenazas múltiples (inestabilidad de laderas, sismicidad, lahares y avenidas fluviales) ha permitido identificar áreas de vulnerabilidad con una precisión adecuada, aunque limitada por la calidad de algunos datos de entrada. Herramientas como Hazus y CIRIA, complementadas con información geotécnica y geológica específica de la región, han facilitado una aproximación detallada a los distintos tipos de riesgo. Sin embargo, se ha observado que la falta de datos actualizados y precisos sobre parámetros clave (como mapas geológicos de alta resolución, modelos de elevación digital y registros climáticos detallados) presenta una limitación importante. Esto subraya la necesidad de contar con una base de datos más exhaustiva y continua para mejorar la precisión de futuras evaluaciones.
3. La RN-32 enfrenta amenazas naturales significativas debido a su ubicación geográfica y características del terreno. En particular, la sección montañosa que atraviesa el Parque Nacional Braulio Carrillo presenta un alto riesgo de deslizamientos e inestabilidad de laderas, exacerbado por las intensas precipitaciones y la densa cobertura vegetal. En la llanura y piedemonte, los tramos cercanos al río Sucio y otras corrientes fluviales enfrentan riesgos elevados de inundaciones y lahares, especialmente en zonas de puentes y estructuras cercanas a los volcanes activos. Los resultados obtenidos en esta aplicación piloto permiten concluir que estas amenazas, tanto por su magnitud como por su recurrencia, representan un riesgo crítico para la operación segura y continua de la RN-32, y requieren intervenciones específicas para mitigar el potencial de daños en la infraestructura.
4. La precisión de los resultados obtenidos en este estudio estuvo condicionada por la disponibilidad y calidad de los datos de entrada. La ausencia de modelos de elevación digital de alta precisión, junto con datos geológicos y climatológicos actualizados, impidió alcanzar un nivel de detalle que permita una estimación exacta de los riesgos. Esto afecta, en particular, la evaluación de amenazas como la inestabilidad de laderas y los eventos hidrológicos extremos, donde la variabilidad de las condiciones locales (pendientes, vegetación, y precipitaciones) puede influir significativamente en la vulnerabilidad de la infraestructura. Esta limitación destaca la importancia de fortalecer la recopilación de datos y realizar monitoreos periódicos, especialmente en corredores viales con alta exposición a riesgos.
5. La metodología aplicada permite abordar la variabilidad climática y sus posibles efectos en el comportamiento de las amenazas evaluadas. Los resultados obtenidos demuestran que el cambio climático, en particular el aumento de las

temperaturas y la intensificación de eventos lluviosos podría agravar los riesgos asociados a deslizamientos y lahares, incrementando tanto la frecuencia como la severidad de estos fenómenos. Este hallazgo subraya la necesidad de que futuros análisis de riesgo en infraestructura vial integren proyecciones de cambio climático en sus modelos para asegurar la resiliencia a largo plazo de los corredores viales en el país.

6. La combinación de múltiples amenazas en una misma región, como es el caso de la RN-32, resalta la importancia de desarrollar modelos de riesgo integrados que permitan evaluar los efectos acumulativos y sinérgicos de varios tipos de amenaza. Por ejemplo, la exposición simultánea a deslizamientos por lluvias y sismos intensos, o a lahares en combinación con avenidas fluviales, puede agravar considerablemente los riesgos para la infraestructura. La aplicación de esta metodología ha permitido identificar con claridad estas áreas de mayor riesgo combinado, especialmente en los tramos que atraviesan zonas de actividad sísmica y volcánica activa. Esto evidencia la importancia de adoptar un enfoque holístico en la gestión de riesgo para infraestructura crítica.
7. La aplicación de esta metodología representa un hito importante para la integración del análisis de riesgos en la planificación y operación de infraestructura vial en Costa Rica. La experiencia adquirida en este piloto no solo ofrece una base sólida para la toma de decisiones informadas sobre intervenciones en la RN-32, sino que también proporciona un modelo replicable para otros corredores viales expuestos a amenazas naturales. Este enfoque metodológico facilita la incorporación de medidas de resiliencia en la infraestructura pública, reforzando así la capacidad de los actores locales y nacionales para gestionar de manera proactiva los riesgos de origen natural. Además, la metodología desarrollada en este proyecto puede servir como referencia para otros países de la región que enfrentan desafíos similares en cuanto a la exposición de infraestructura crítica a amenazas naturales.
8. Por último, los hallazgos de esta evaluación resaltan la importancia de promover una cultura de resiliencia en el diseño, construcción y operación de infraestructura en Costa Rica. La RN-32 es un corredor vital para la conectividad y el desarrollo económico del país; sin embargo, su exposición a múltiples amenazas demanda un cambio en la forma en que se planifica y gestiona la infraestructura pública. La integración del análisis de riesgo en las fases de diseño y construcción, así como en los protocolos de mantenimiento, es esencial para reducir la vulnerabilidad y asegurar la funcionalidad de la infraestructura en el largo plazo. Esta experiencia demuestra que la resiliencia no solo es una necesidad técnica, sino también una responsabilidad social y económica que debe ser asumida por todas las instituciones involucradas en el desarrollo y gestión de la infraestructura pública.

6.2 Recomendaciones

1. Fortalecimiento de la base de datos geológica y climática: Para mejorar la precisión de las evaluaciones de riesgo, se recomienda realizar levantamientos geológicos y geotécnicos detallados a lo largo de toda la Ruta 32. Asimismo, se debe incrementar la frecuencia y cobertura de la recopilación de datos climáticos e hidrológicos, especialmente en relación con patrones de lluvia y caudales fluviales, considerando las proyecciones de cambio climático.
2. Implementación de obras de mitigación en áreas críticas: Basándose en la evaluación, se identifican como prioritarias intervenciones de estabilización de taludes en las áreas con mayor riesgo de deslizamientos y avenidas fluviales, principalmente en los tramos de montaña del Parque Nacional Braulio Carrillo. Además, se deben vigilar el puente y las estructuras existentes en el sector del río Sucio para mejorar su capacidad de resistir eventos sísmicos y lahares.
3. Monitoreo continuo de la infraestructura: Es fundamental establecer un sistema de monitoreo de deslizamientos en tiempo real para los tramos de mayor riesgo, incorporando tecnologías de sensores remotos, como el LIDAR y la teledetección. Además, se sugiere instalar estaciones de monitoreo sísmico e hidrométrico en puntos clave de la ruta, permitiendo así una respuesta más rápida ante eventos extremos.

4. Fortalecimiento de capacidades institucionales y comunitarias: La capacitación continua del personal técnico y operativo en el manejo de emergencias y gestión del riesgo es clave para reducir la vulnerabilidad. Se recomienda desarrollar planes de evacuación y simulacros en las comunidades aledañas, asegurando que la población esté preparada y tenga vías de escape seguras en caso de desastres.
5. Consideración de escenarios de cambio climático en futuras ampliaciones: Toda intervención futura en la Ruta 32 debe considerar la adaptación al cambio climático, integrando medidas de resiliencia en el diseño y construcción de la infraestructura vial. Esto incluye adaptar el dimensionamiento de las obras de drenaje y refuerzo de taludes para soportar eventos climáticos más intensos y frecuentes.
6. Refinamiento y actualización periódica de la metodología de evaluación de riesgo: A medida que se disponga de nuevos datos y herramientas tecnológicas, es crucial revisar y mejorar continuamente la metodología aplicada. La experiencia ganada en esta evaluación piloto debería servir como base para ajustar los modelos y parámetros utilizados, asegurando así que se mantenga una evaluación de riesgos robusta y adaptada a las condiciones cambiantes del entorno.

6.3 Integración del Riesgo

1. La “Metodología para el análisis de riesgos con enfoque multiamenaza y criterios probabilísticos en los proyectos de inversión pública” publicada por MIDEPLAN en 2021 puede ser utilizada como una herramienta para integrar los componentes del riesgo que han sido calculados con esta guía metodológica. Se debe considerar que el enfoque de MIDEPLAN es de “multi-riesgo”, o sirve para integrar el riesgo calculado para diferentes amenazas, pero no es en sí una herramienta para el análisis del riesgo producto de amenazas múltiples. Por lo que resulta ser un buen complemento para integrar los resultados de estudios como este.

Este proyecto pionero representa un avance significativo hacia la resiliencia de la infraestructura vial en Costa Rica. La implementación de estas recomendaciones fortalecerá no solo la seguridad y durabilidad de la Ruta 32, sino también la capacidad del país para gestionar y mitigar riesgos en otros corredores viales estratégicos expuestos a otras amenazas naturales.