



Evaluación del riesgo y desarrollo
de capacidades en Costa Rica

**Revisión de datos y modelos existentes de
amenazas geológicas y recomendaciones
para la evaluación del riesgo**

Abril 2025

Preparado para:



Preparado por:



Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A #84-14 Of. 504
Edificio Torrenova
Bogotá, D.C. Colombia
www.ingeniar-risk.com



Centro Internacional de Métodos
Numéricos en Ingeniería
Edificio C1 Campus Nord UPC
C/ Gran Capitá, S/N 08034
Barcelona, España
www.cimne.com



Número de producto: INGENIAR-CIMNE-GRMA-02-v1

Citar como: Cardona, O.D., Bernal, G., Villegas, C., González, D., Carreño, M.L., Marulanda, M., Molina, J. F., Marulanda, P., Rincón, D., Grajales, S., Herrera, S., Acosta, M., Brenes, A. (2025). Revisión de datos y modelos existentes de amenazas geológicas y recomendaciones para la evaluación del riesgo. Global Risk Modelling Alliance – SUGESE, Costa Rica

TABLA DE CONTENIDO

<u>1</u>	<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>5</u>
<u>2</u>	<u>AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS</u>	<u>7</u>
2.1	EVENTOS DE DESLIZAMIENTO EN LA RUTA NACIONAL 2	7
2.2	COMPONENTES NECESARIOS PARA LA MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS	9
2.3	INFORMACIÓN Y MODELOS DISPONIBLES	9
2.3.1	INFORMACIÓN BASE Y DE REFERENCIA	9
2.3.2	PROYECTO RECLAIMM/CEPREDENAC-NORUEGA	13
2.3.3	MODELO CDRI-GIRI	14
2.4	MODELO SELECCIONADO	17
2.5	DATOS ESPACIALES SOBRE DESLIZAMIENTOS	18
2.6	RESUMEN DE MODELOS E INFORMACIÓN SOBRE DESLIZAMIENTOS	18
<u>3</u>	<u>AMENAZA VOLCÁNICA</u>	<u>20</u>
3.1	EVENTOS DE ORIGEN VOLCÁNICO QUE HAN AFECTADO LA RUTA NACIONAL 2	20
3.2	COMPONENTES NECESARIOS PARA LA MODELACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA	21
3.3	INFORMACIÓN Y MODELOS DISPONIBLES	22
3.3.1	ESTUDIOS DE LA AMENAZA VOLCÁNICA	22
3.3.2	MODELOS PROBABILISTAS DEL PROYECTO CAPRA	23
3.4	MODELO SELECCIONADO	25
3.5	DATOS ESPACIALES SOBRE VOLCANES	25
3.6	RESUMEN DE MODELOS E INFORMACIÓN SOBRE AMENAZA VOLCÁNICA	25
<u>4</u>	<u>AMENAZA SÍSMICA</u>	<u>27</u>
4.1	EVENTOS SÍSMICOS RELEVANTES EN COSTA RICA	27
4.2	COMPONENTES NECESARIOS PARA LA MODELACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA	28
4.3	INFORMACIÓN Y MODELOS DISPONIBLES	29
4.3.1	MODELO RESIS II	29
4.3.2	MODELO DE AMENAZA SÍSMICA DE COSTA RICA DE 2022	30
4.3.3	MODELO ASLAC	31
4.4	MODELO SELECCIONADO	33
4.5	DATOS ESPACIALES SOBRE SISMOS	33
4.6	RESUMEN DE MODELOS E INFORMACIÓN SOBRE AMENAZA SÍSMICA	34

5	PROGRAMA DE DESARROLLO DE CAPACIDADES	35
5.1	PARTICIPANTES EN EL CURSO VIRTUAL ASINCRÓNICO	35
5.2	MÓDULO 2 – COMPONENTES DE LA MODELACIÓN DEL RIESGO.....	36
5.2.1	DESIZAMIENTOS	36
5.2.2	VOLCANES	38
5.2.3	SISMO.....	39
6	BIBLIOGRAFÍA	41
	ANEXO 1: DATASET DE MODELOS DE GEOAMENAZAS	43
	AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS	43
	AMENAZA VOLCÁNICA	43
	AMENAZA SÍSMICA	44

1 INTRODUCCIÓN

El programa Global Risk Modelling Alliance (GRMA), auspiciado por el InsuResilience Solutions Fund (ISF), tiene como objetivo principal fortalecer las capacidades de los países y ciudades en el análisis del riesgo climático y de desastres orientado a las finanzas. Esta iniciativa busca llenar vacíos críticos en modelos y datos, mejorando las evaluaciones del riesgo climático y de desastres a nivel nacional y subnacional. Para lograrlo, en el caso de Costa Rica GRMA identificó y co-definió, junto con los socios locales, las necesidades específicas del país, con el fin de ofrecer herramientas abiertas para la gestión del riesgo, así como datos y acceso a una experiencia operativa en materia de financiamiento del riesgo.

Este informe presenta los resultados de la revisión de datos y modelos existentes de amenazas geológicas y las recomendaciones para su uso y aplicación en las evaluaciones del riesgo previstas en el marco del proyecto; Tarea 3 de los Términos de Referencia. Describe el tipo de información disponible y los modelos que se han utilizado para la evaluación de mapas de amenaza por deslizamientos, erupciones volcánicas y sismos en Costa Rica, que serían útiles o apropiados para la evaluación probabilista del riesgo. Este producto corresponde, en conjunto, a los **entregables 3.1.a, 3.1.b, 3.1.c, 3.2.a, 3.2.b, 3.2.c, 3.3.a, 3.3.b y 3.3.c** de los Términos de Referencia del proyecto, cuyo objetivo, en la medida de lo posible, es utilizar datos, mapas y modelos existentes, en el caso de las geoamenazas, previamente aplicados en Costa Rica en evaluaciones similares.

En el Informe de Inicio de esta consultoría se realizó una descripción general de los estudios de amenaza y riesgo que, principalmente en las últimas dos décadas, se han realizado en Costa Rica. En el informe se señala que algunos de estos estudios han tenido un enfoque probabilista, sin embargo, se afirma que en general éstos han sido la excepción. La mayoría de los estudios de amenaza han sido descripciones cualitativas, con valoraciones de alto, medio y bajo, y prácticamente no han tenido uso ni relevancia para la realización de estudios de riesgo; que, a su vez, se considera, han sido prácticamente inexistentes. Sin embargo, es también importante señalar que la información que se ha generado a lo largo de los años, en el marco de diferentes iniciativas académicas o institucionales, nacionales o internacionales, significa un valioso acervo para el país, aunque no puedan utilizarse para la evaluación probabilista del riesgo.

Para efectos de este proyecto es importante señalar que la resolución y completitud de la información existente es diversa y fragmentada y que en general no es posible usar estos trabajos previos, aunque estén catalogados como de amenaza o riesgo, si el objetivo es obtener resultados de riesgo utilizando métricas probabilistas. En consecuencia, se puede afirmar, como punto de partida de este informe, que aunque existen datos, mapas y estudios de diferente índole, en su mayoría no se pueden utilizar como base para los objetivos de este proyecto. En consecuencia, deben considerarse como insumos o trabajos con los cuales se pueden contrastar algunos de los resultados. Siguiendo esta perspectiva, se evaluó la información y los modelos disponibles en Costa Rica, con el fin de establecer su potencial uso para la evaluación del riesgo en el marco de este proyecto. Se evaluaron criterios de escala, resolución, aplicabilidad y disponibilidad, con el fin de establecer su posible utilización y pertinencia llegándose a las siguientes conclusiones.

En relación con la *amenaza por deslizamientos*, a pesar de múltiples trabajos realizados solo se cuenta con un modelo coherente y consistente con lo requerido para las evaluaciones de riesgo. Se trata del modelo

GIRI-CDRI, el cual cumple con los criterios de calidad para las aplicaciones previstas en esta consultoría. No obstante, dado que ese modelo fue construido a partir de información global, es importante señalar que en el marco de este proyecto existe la oportunidad de actualizarlo y mejorarlo información local de mayor detalle disponible en Costa Rica. Este trabajo puede realizarse en forma conjunta con el grupo de LANAMME/ECG, como líder del Grupo Técnico de Trabajo del proyecto Operativo 1.

En lo que se refiere a la *amenaza volcánica*, se cuenta con modelos probabilistas para los volcanes que representan una amenaza en la carretera RN2, particularmente, los volcanes Turrialba e Irazú. Estos modelos fueron construidos durante el proyecto CAPRA (2008) en Costa Rica, se utilizaron para capacitación en el proyecto GRAF y cumplen con los criterios de calidad mínimos para ser usados en las evaluaciones de riesgo para el proyecto GRMA. Sin embargo, en este caso se presenta, también, la oportunidad de actualizar y mejorar la resolución de los modelos con información local de mayor detalle disponible actualmente. Este trabajo puede realizarse, también, de manera conjunta con el grupo de LANAMME/ECG, como líder del Grupo Técnico de Trabajo del proyecto Operativo 1¹.

Con respecto a la *amenaza sísmica*, a diferencia de los casos anteriores, existen varios modelos con similitudes en su enfoque metodológico, que básicamente es el mismo. Sin embargo, el modelo del cual se dispone con toda la información base completa, que es el más actualizado y que cumple con todos los criterios de calidad para ser usado directamente en las evaluaciones de riesgo sísmico en el proyecto de GRMA en Costa Rica, es el modelo ASLAC. Este modelo, además, ha sido previamente empleado por la industria aseguradora a nivel internacional y ha sido referente para CCRIF. Este informe se estructura en diferentes secciones como se indica a continuación:

Sección 1. Corresponde a esta introducción

Sección 2. Presenta el resumen de información y modelos disponibles de la amenaza por deslizamientos se indica la propuesta de mejora y adecuación.

Sección 3. Presenta el resumen de información y modelos disponibles de la amenaza volcánica y se indica la propuesta de mejora y adecuación.

Sección 4. Presenta el resumen de información y modelos disponibles de la amenaza sísmica y se hace la justificación del modelo que se considera más apropiado.

Sección 5. Presenta un resumen de los contenidos del programa de capacitación en materia de amenazas y riesgos geológicos, así las personas de las instituciones costarricenses involucradas en este programa de capacitación, así como el estado de avance.

¹ El rol del Líder del GTT no implica una responsabilidad contractual sobre el producto de esta consultoría.

2 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS

En general, los procesos de remoción en masa se pueden definir como el movimiento cuesta abajo de un cierto volumen de roca o suelo cerca de la superficie de la Tierra, debido principalmente a la fuerza de gravedad. Estos movimientos en masa son una parte importante del proceso de erosión, ya que el material es transportado de un nivel a otro más bajo y posteriormente por ríos o quebradas. Los procesos de movimientos en masa ocurren continuamente en las laderas, algunos muy lentamente y otros en forma repentina y a menudo con resultados desastrosos. A cualquier movimiento perceptible cuesta abajo de roca o suelo, o una mezcla de ambos, se le conoce en genéricamente como un deslizamiento.

En este proyecto la modelación de la amenaza por deslizamientos se aplica específicamente para el Proyecto Operacional 1: Evaluación del riesgo de desastres y climático en infraestructura vial – Ruta Nacional 2 Autopista Panamericana (RN2).

2.1 Eventos de deslizamiento en la Ruta Nacional 2

Para efectos de tener un contexto general acerca de la amenaza por deslizamientos en este proyecto es pertinente señalar que la Ruta Nacional 2, conocida también como la Carretera Interamericana Sur, es uno de los corredores logísticos más estratégicos de Costa Rica. Esta vía conecta la Gran Área Metropolitana con la región sur del país, facilitando el tránsito de bienes, personas y servicios entre San José y la frontera con Panamá. Sin embargo, su trazado por zonas montañosas, suelos volcánicos inestables y regiones de alta pluviosidad la convierte en una infraestructura susceptible a ser afectada por deslizamientos de tierra, los cuales han tenido históricamente impactos significativos en la movilidad nacional, este corredor de comercio y la economía del país (Quesada-Román, 2015; Monge Sandí, 2022).

Uno de los eventos más severos de los últimos años ocurrió en octubre de 2022, cuando un sistema de baja presión generó lluvias persistentes que provocaron múltiples deslizamientos en el tramo entre La Hortensia y El Jardín de Pérez Zeledón. La carretera fue cerrada por varios días, afectando severamente el tránsito de vehículos livianos y pesados. Este cierre generó pérdidas económicas estimadas en más de mil millones de colones diarios (aproximadamente 1.8 millones de dólares), dado que los transportistas debieron utilizar rutas alternas más extensas y menos seguras (Monge Sandí, 2022). Además, comunidades como Rivas y San Isidro del General vieron limitado su acceso a hospitales, centros educativos y redes de abasto, lo que agravó el impacto social del evento. La infraestructura sufrió daños en muros de contención, alcantarillado pluvial y en la base estructural de la calzada (Monge Sandí, 2022).

El tramo que atraviesa el Cerro de la Muerte ha sido escenario recurrente de deslizamientos, especialmente en los kilómetros comprendidos entre el 60 y el 90. En agosto de 2021, un deslizamiento de gran tamaño obligó al cierre total de la vía por más de 48 horas, afectando gravemente la logística nacional. Años antes, en junio de 2017, otro evento de similar magnitud afectó la zona de División, dejando incomunicadas varias comunidades rurales. La combinación de taludes pronunciados, vegetación inestable y condiciones de visibilidad reducida por neblina ha contribuido a una larga serie de incidentes, algunos de los cuales han incluido víctimas mortales por accidentes vehiculares durante o después de los derrumbes (Quesada-Román, 2015).

Uno de los eventos de mayor impacto en la historia reciente de esta carretera fue causado por la tormenta tropical Nate, en octubre de 2017. Las lluvias excepcionales que acompañaron este fenómeno generaron más de veinte deslizamientos críticos a lo largo de la Interamericana Sur, particularmente en los cantones de Pérez Zeledón, Buenos Aires y Osa (Muñoz Barrantes, 2017). La ruta sufrió daños estructurales extensos, incluyendo el colapso de puentes, obstrucción de alcantarillas y pérdida de soporte en múltiples taludes. El puente sobre el río Térraba en Paso Real estuvo en riesgo de colapso por socavación, mientras que varias comunidades quedaron sin energía eléctrica ni acceso a agua potable por varios días. Las reparaciones en esta vía requirieron una inversión superior a los \$10 000 millones (algunos informes estiman hasta \$13 000 millones), según el MOPT y el CNE (Bosque, 2017). En julio de 2015, un deslizamiento significativo en la zona de El Empalme, entre Cartago y Pérez Zeledón, provocó una interrupción del paso durante más de 36 horas. Las lluvias constantes saturaron los suelos, provocando el colapso de taludes sin obras de estabilización y obligando a la evacuación preventiva de varias viviendas cercanas (Quesada-Román, 2015). Este tipo de incidentes ha sido frecuente en ese tramo debido a la insuficiencia de drenajes transversales y la carencia de cunetas profundas que permitan manejar de manera eficiente los flujos pluviales.

Además de los eventos provocados por lluvias, varios sismos con epicentros en la región fronteriza de Panamá han tenido un impacto indirecto sobre la Ruta Nacional 2. Temblores como el de Chiriquí en 2003 y 2021 provocaron inestabilidad en taludes y fisuras en la calzada en sectores como Paso Canoas y San Vito. Aunque no causaron deslizamientos de gran magnitud, estos sismos obligaron al Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) a realizar inspecciones de emergencia y labores de estabilización preventiva para evitar colapsos posteriores (LANAMME/ECG-UCR, 2017).

A pesar de su rol esencial en el comercio internacional, el mantenimiento de la Ruta Nacional 2 ha sido mayormente reactivo, y las obras de mitigación estructural no han sido implementadas de manera sostenida. La falta de inversión en muros de contención, sistemas de monitoreo geotécnico permanente y rediseño de drenajes ha contribuido a que los mismos puntos críticos se vean afectados de forma reiterada año tras año. Esto representa no solo un costo económico directo por concepto de reparaciones, sino también un impacto acumulado sobre la productividad nacional y la seguridad vial (Quesada-Román, 2015).

En conclusión, los deslizamientos de tierra en la Ruta Nacional 2 representan una problemática constante para la conectividad del país, afectando no solo la infraestructura vial sino también el corredor de comercio y el acceso de comunidades enteras a servicios esenciales. La adaptación a este tipo de amenaza requiere una visión integral que incluya planificación territorial, inversiones estratégicas en infraestructura resiliente, implementación de tecnología para la detección temprana de movimientos de masa y una coordinación efectiva entre las instituciones responsables de gestión del riesgo y desarrollo vial. Esta ruta interamericana en su segmento sur seguirá siendo un punto neurálgico del país, por lo que su sostenibilidad y seguridad deben considerarse una prioridad nacional (Quesada-Román, 2015; Monge Sandí, 2022).

2.2 Componentes necesarios para la modelación de la amenaza por deslizamientos

Una evaluación probabilista del riesgo de un segmento vial como la RN2 exige la evaluación de la amenaza, en este caso por deslizamientos, entendiendo y teniendo en cuenta, por lo menos, cuatro aspectos fundamentales que gobiernan este fenómeno:

- Las cargas actuantes sobre los bloques o porciones de material que pueden deslizarse.
- El papel del agua en la modificación de las propiedades mecánicas de los materiales de laderas.
- La estructura geológica de la ladera y las modificaciones generadas por el hombre.
- La incidencia de los eventos detonantes, como sismos o lluvias intensas.

Las condiciones de carga, contenido de agua y su papel modificador en la resistencia de los materiales de la ladera, así como la estructura geológica y las modificaciones causadas por el hombre, son aspectos que dan cuenta de la *susceptibilidad*, la cual nos habla de las condiciones intrínsecas que favorecen la inestabilidad. Por otra parte, los *eventos detonantes* son factores externos a las condiciones de la ladera, que deben ser tratados por separado e incorporados al momento de calcular la amenaza por deslizamientos. Finalmente, debe establecerse la incidencia de los eventos detonantes sobre la manifestación de los deslizamientos. Esto usualmente se modela por medio de *umbrales detonantes*, que son modelos que indican con cual nivel de intensidad (de lluvia o de movimiento fuerte, según corresponda) es probable la manifestación de un deslizamiento en una ladera. En resumen, un modelo de amenaza por deslizamientos, que pueda ser empleado posteriormente en evaluaciones del riesgo de desastres, debe ser conformado por submodelos de *susceptibilidad*, *umbrales* y *eventos detonantes*.

2.3 Información y modelos disponibles

Teniendo en cuenta el tipo de datos que se requieren para la evaluación de la amenaza por deslizamientos, en esta sección se presenta un resumen de la información y modelos existentes sobre deslizamientos en Costa Rica, y en particular sobre el trazado de la Ruta Nacional 2, y se indican tanto la potencialidad como las limitaciones de la información disponible, con fines de evaluación de la amenaza y el riesgo con un enfoque probabilista. Igualmente, a continuación, se hace una descripción de los datos y modelos existentes que pueden ser usados directamente en la modelación probabilista del riesgo, que se espera realizar, y qué modificaciones o ajustes sería deseable o necesario realizar para obtener un buen resultado.

2.3.1 Información base y de referencia

La información base y de referencia en la modelación de la amenaza por deslizamientos corresponde a los datos o capas de información acerca del fenómeno, su ocurrencia y las condiciones del entorno relacionadas con su manifestación, que por sí solos no constituyen modelos terminados de alguno de los componentes necesarios mencionados previamente. A continuación, se describe la información disponible al respecto.

2.3.1.1 Catálogo de deslizamientos

El catálogo de deslizamientos es un inventario de los eventos históricos que contiene información del tipo de actividad de los procesos de remoción en masa, su distribución espacial, el tipo de proceso, así como

sus características. En este caso, en el portal del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) se identifican capas de amenaza natural del dominio de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgo y Atención de Emergencias (CNE) que corresponden a dos capas vectoriales con información georreferenciada de deslizamientos ocurridos en el territorio costarricense².

La capa *Deslizamientos* (ver Figura 1), contiene 1,126 registros que corresponden a fenómenos de remoción en masa inducidos por eventos hidrometeorológicos y sísmicos que han generado la inestabilidad de laderas. Además de la localización de los eventos la capa contiene información del área y el perímetro afectados para la mayoría de los registros, sin embargo, no se diferencia por tipo de proceso de remoción en masa ni características específicas del evento. En los metadatos de la capa se menciona que se utiliza para la actualización de las zonas de amenazas del país, para ubicar las áreas más propensas a deslizamientos y facilitar la toma de decisión para el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo. Por su parte, la capa *Coronas de deslizamientos* (ver Figura 2), contiene información de zonas identificadas como de potencial de deslizamiento ante eventos de lluvia intensa o de movimiento sísmico.

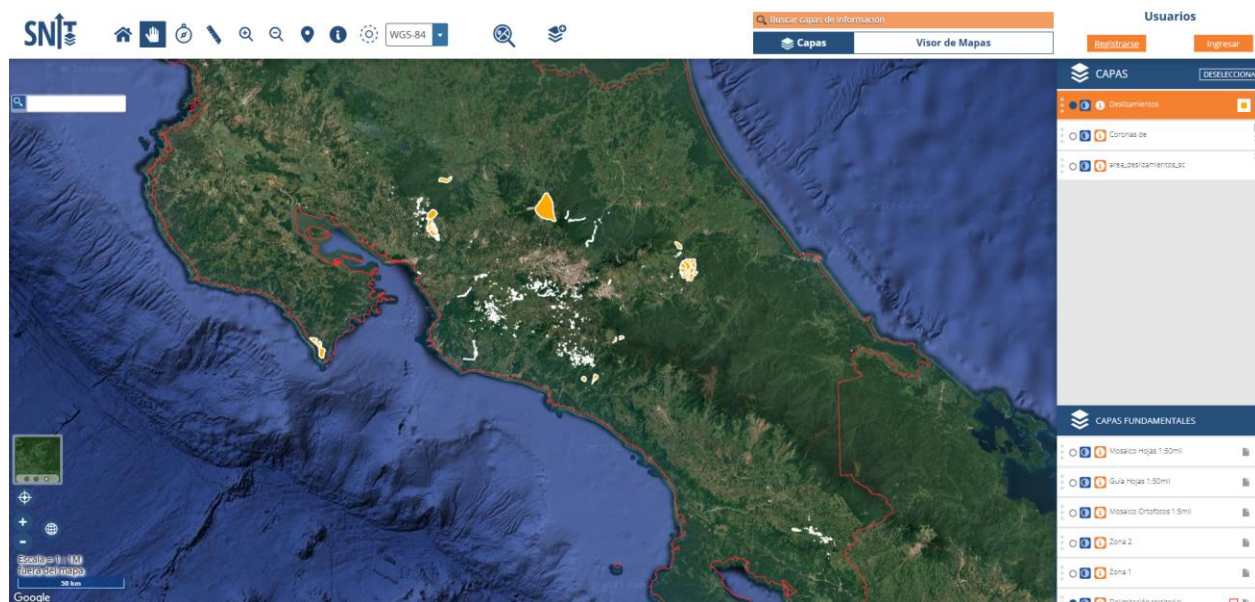


Figura 1. Visualización de la capa Deslizamientos en el visor de mapas del SNIT

² Las capas se encuentran disponibles para descarga en el enlace:
https://www.snitcr.gov.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NDU=&nombre=CNE

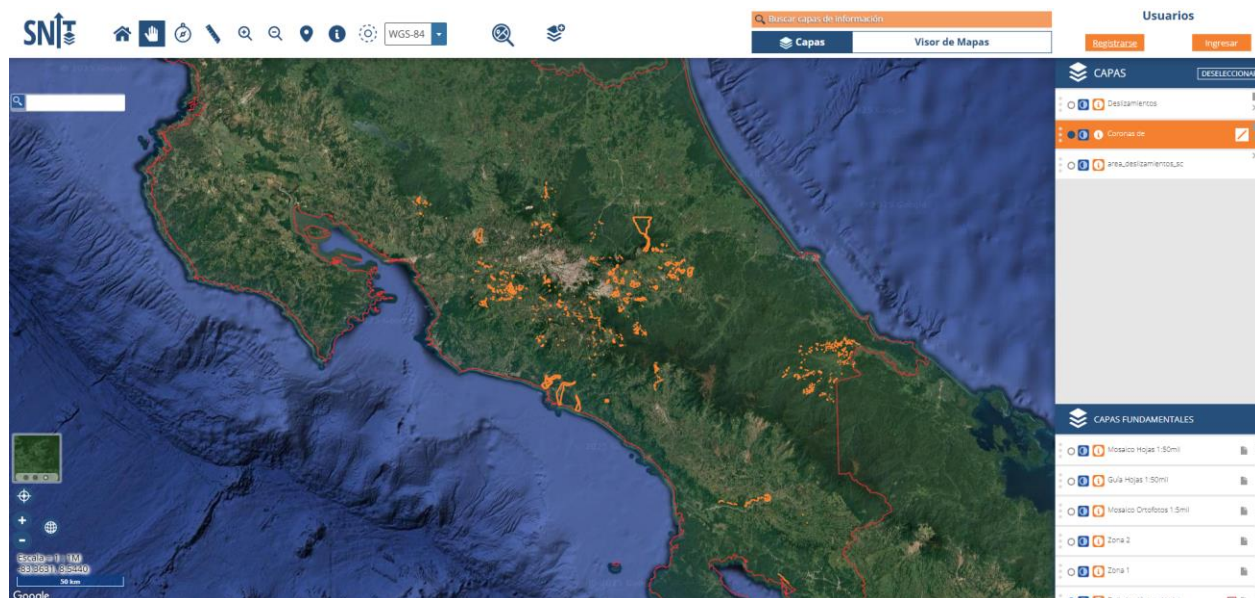


Figura 2. Visualización de la capa Corona de deslizamientos en el visor de mapas del SNIT

Esta información permite corroborar y justificar los valores de susceptibilidad a los deslizamientos que se empleen en la modelación del proyecto GRMA. Es una información apropiada para tal fin.

2.3.1.2 Sistema de Información Geográfica LANAMME/ECG UCR

El SIG de LANAMME/ECG contiene información relacionada con la red vial nacional (RVN) de Costa Rica, en lo que se refiere a condiciones estructurales de los tramos de la red. Con respecto a los deslizamientos, se presenta información sobre *Geotecnia de la red vial nacional*, en la cual se presentan puntos de muestreo, a lo largo de las principales vías del país, con el estudio puntual de taludes y laderas propensas a deslizamientos. El SIG de LANAMME/ECG provee información detallada para 201 ubicaciones sobre la RVN, 10 de las cuales se ubican sobre el trazado de la RN2. En estos puntos se provee información sobre la clasificación general de la condición de los taludes, su altura, pendiente, tipo de material predominante, rango promedio de precipitación anual de la zona, así como fotografías de los taludes. La información de detalle se complementa con 2710 puntos de observación simplificada, 115 de ellos ubicados sobre la RN2, para los cuales se establece una condición general y se proveen fotografías.

Aparte de la información geotécnica, el SIG de LANAMME/ECG contiene información adicional sobre elementos de la red vial, en particular puentes y tramos viales de las redes vial nacional y vial cantonal, así como información sobre auditorías técnicas. Esta información será considerada para la conformación del modelo de exposición de la RN2. Estas bases de datos están disponibles y ya fueron solicitadas a LANAMME/ECG a través de SUGESE, quien debe solicitarlas formalmente.

Esta información permite corroborar y justificar los valores de susceptibilidad a los deslizamientos que se empleen en la modelación del proyecto GRMA. Es una información apropiada para tal fin.

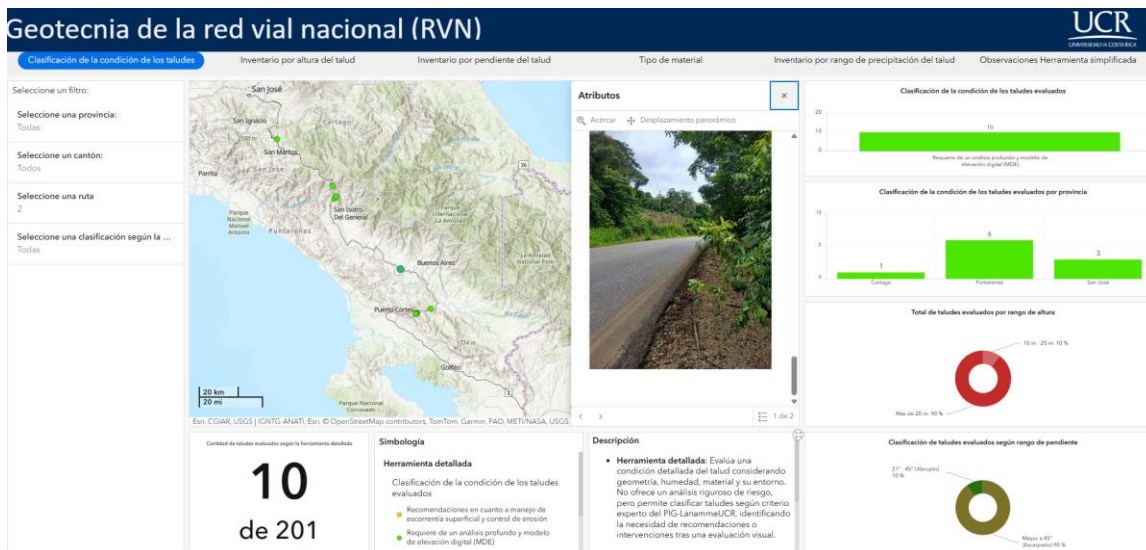


Figura 3. Visualización de puntos con información geotécnica en la RN2. Visor SIG de LANAMME/ECG UCR.

2.3.1.3 Mapas de amenaza del CNE

La CNE, por su parte, ha elaborado mapas simplificados de información sobre amenazas naturales a nivel de cantón para todo el país³. Estos mapas proveen una aproximación de las fuentes de las amenazas naturales en el territorio costarricense. En esta información se identifican polígonos que representan potencial de deslizamientos.

Estos mapas solo están disponibles en formato PDF. No se ha tenido acceso a la información o datos georreferenciados de base, por lo cual esta información no es apropiada y es insuficiente para ser incorporada en la modelación. No obstante, estos mapas e información pueden ser empleados para realizar una comparación visual con la capa de susceptibilidad que se emplee en el modelo.

³ Los mapas se encuentran disponibles en https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/.

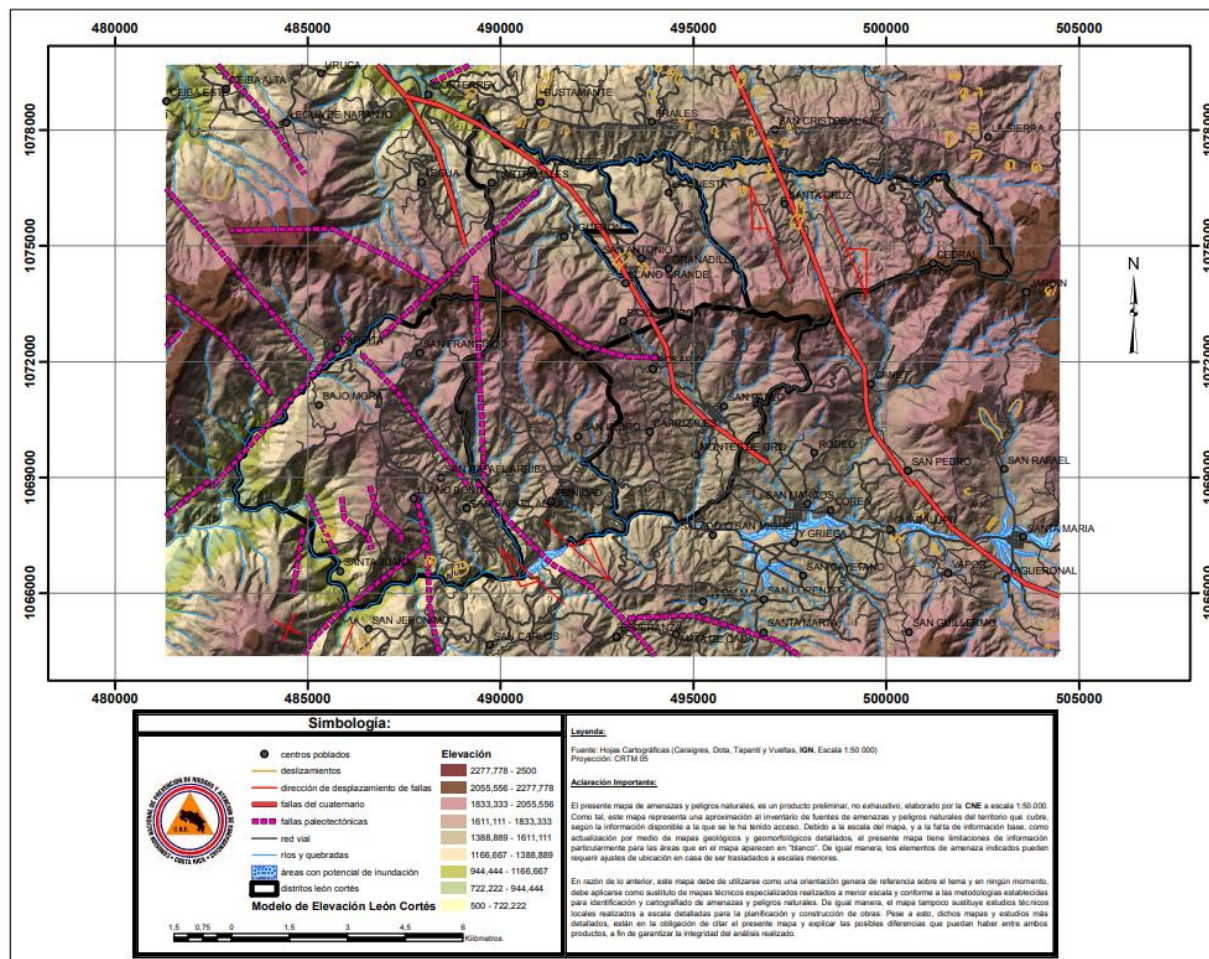


Figura 4. Mapa de amenazas y peligros naturales del Cantón de León cortés. Elaborado por la CNE.

2.3.2 Proyecto RECLAIMM/CEPREDENAC-Noruega

Por otra parte, es importante referenciar el Proyecto RECLAIMM (Fortalecimiento de Capacidades para el Manejo de Riesgos por Deslaves en Países Centroamericanos), que fue una iniciativa conjunta entre el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central (CEPREDENAC) y el gobierno de Noruega (NGI - Instituto Noruego de Geotecnia). Su objetivo principal fue fortalecer las capacidades de los países centroamericanos en la gestión y mitigación de riesgos por deslizamientos de tierra.

En Costa Rica, el proyecto se enfocó en la creación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos, considerando factores como geología, pendiente, uso del suelo y patrones de precipitación. Aunque el proyecto RECLAIMM se implementó en varios países de la región, la información específica sobre su ejecución en Costa Rica es limitada y no se ha logrado acceder a los productos georreferenciados como el mapa de susceptibilidad generado. Se encontró la imagen que se presenta en la Figura 5, pero la base de datos correspondiente al mapa no está disponible.

Esta información es, entonces, también inapropiada e insuficiente para ser incorporada en la modelación y solo puede ser empleada para realizar una comparación visual con la capa de susceptibilidad que se emplee en el modelo.

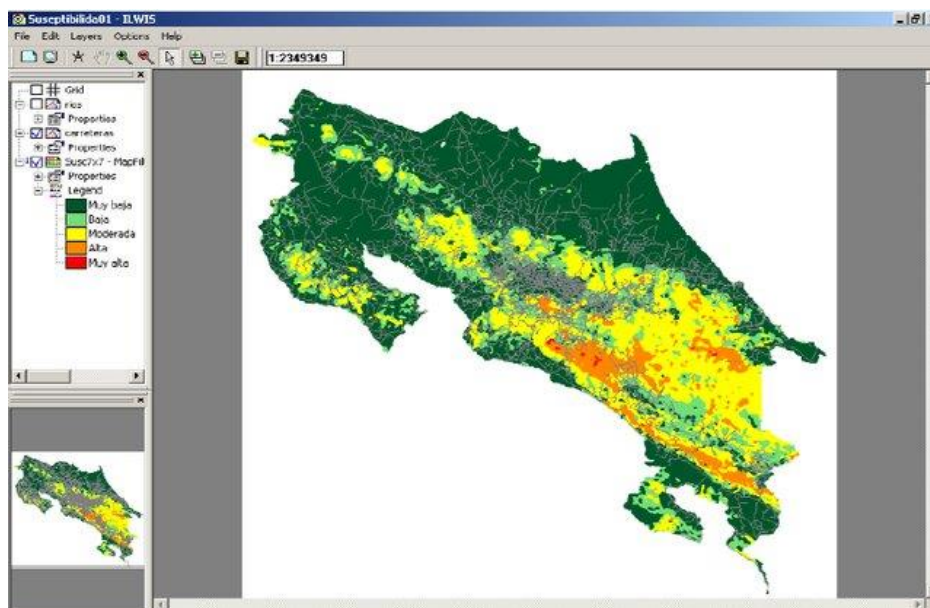


Figura 5. Imagen del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de Costa Rica – proyecto RECLAIMM. Tomado de ResearchGate.

2.3.3 Modelo CDRI-GIRI

En el marco del proyecto *Global Infrastructure Resilience Index* (GIRI) de la *Coalition for Disaster Resilience Infrastructure* (CDRI) se desarrolló un modelo de amenaza por deslizamientos, a diferencia de los anteriores, completamente probabilista, que considera la amenaza por deslizamientos inducidos por terremotos o precipitaciones (incluyendo el efecto del cambio climático) a nivel mundial.

Este modelo de amenaza por deslizamientos, disponible para Costa Rica, es metodológicamente consistente con lo requerido para la modelación del riesgo en el proyecto GRMA, es decir, se trata de un modelo que da cuenta de la susceptibilidad a los deslizamientos y provee umbrales detonantes apropiados para la evaluación de la amenaza con un enfoque probabilista.

Si bien el modelo GIRI-CDRI también provee modelos de los fenómenos detonantes (lluvias intensas y terremotos), dichos modelos no se van a considerar en el proyecto GRMA, dado que, en el caso de las lluvias intensas en el marco del proyecto se desarrollará un modelo de mayor detalle para Costa Rica como parte de las actividades de modelación de inundaciones en este proyecto Operacional 1, así como para los proyectos Estratégico y Operacional 2 y 3.

Cabe mencionar que el método de cuantificación de la amenaza del modelo GIRI-CDRI, es el mismo propuesto por la Guía Metodológica para la Integración del Análisis del Riesgo en los proyectos de infraestructura pública vial de Costa Rica, desarrollada en 2024⁴.

De acuerdo con lo anterior, el modelo GIRI-CDRI es el mejor disponible. No obstante, dada su relativa baja resolución, y por estar conformado a partir de información obtenida de bases de datos globales, sería factible llevar a cabo una actualización y mejora para adaptar el modelo a la información más detallada existente en el país.

2.3.3.1 Modelo de susceptibilidad GIRI-CDRI

El modelo de susceptibilidad GIRI-CDRI de deslizamientos cubre todo el territorio de Costa Rica, por medio un mosaico de 4 mallas rectangulares de 5x5 grados, con resolución espacial de 90 metros, en las cuales se clasifica la susceptibilidad de las laderas de Costa Rica en 5 categorías, haciendo uso del método de Mora-Vahrson (1994). En cada pixel se estima la susceptibilidad a los deslizamientos, como la probabilidad anual de ocurrencia de un evento de deslizamiento de tierra potencialmente destructivo, considerando como factores de susceptibilidad la pendiente topográfica, litología, cobertura vegetal y humedad del suelo, como se indica a continuación:

$$S = S_r \cdot S_l \cdot S_h \cdot S_v \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde S es la susceptibilidad a los deslizamientos, S_r es el factor asociado a la pendiente topográfica, S_l es el factor de condiciones litológicas, S_h es el factor que describe la humedad del suelo, y S_v es el factor de cobertura vegetal. S toma valores entre 0 y 1, y puede ser interpretado como una *probabilidad intrínseca* de las laderas a deslizarse. Este resultado solo corresponde a la susceptibilidad y, por lo tanto, no indica la probabilidad real de ocurrencia de los deslizamientos dato que aún no incorpora los eventos detonantes. El mapa de susceptibilidad obtenido de GIRI CDRI para Costa Rica se presenta en la Figura 6.

Las categorías de susceptibilidad empleadas son 5, desde 1 = susceptibilidad muy baja a deslizamientos de tierra hasta 5 = susceptibilidad muy alta. Estas clases corresponden a una clasificación sobre valores de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, cuya definición requiere incluir rangos de intensidad de los fenómenos detonantes, como se describe a continuación.

⁴ La formulación de dicho documento fue liderada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la Fundación de la Universidad de Costa Rica, y financiada por EUROCLIMA. La guía forma parte de la Acción Proyectiva: Fortalecimiento de capacidades para la utilización de información climática para robustecer los procesos de toma de decisiones en Costa Rica.

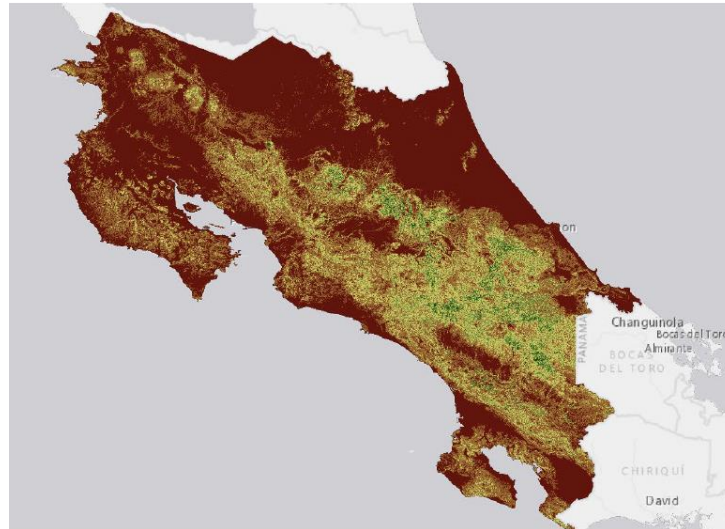


Figura 6. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de Costa Rica del proyecto CDRI-GIRI liderado por INGENIAR

2.3.3.2 Modelo de umbrales detonantes GIRI-CDRI

El modelo de umbrales considerado en GIRI-CDRI, como se describe en Palau et al., 2022, es un modelo simplificado que correlaciona las categorías de susceptibilidad con niveles de intensidad de los fenómenos detonantes, para establecer una probabilidad de deslizamiento correspondiente. En ese sentido, es una extensión del modelo de susceptibilidad, en el cual se asigna una probabilidad de ocurrencia del fenómeno ante diferentes valores de intensidad de la amenaza detonante.

La Tabla 1 muestra las probabilidades de deslizamiento según GIRI-CDRI, dadas como función de la precipitación estandarizada de 24 horas P_n , que se define como:

$$P_n = \frac{P_{24h} - \mu_{24h}}{\sigma_{24h}} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde P_{24h} es la precipitación acumulada de 24 horas del evento (día) en consideración, μ_{24h} y σ_{24h} son respectivamente la media y desviación estándar multianual de precipitación diaria del sitio de evaluación.

Tabla 1. Umbral lluvia-deslizamiento considerado

Rango P_n	Categoría susceptibilidad				
	Susc. 1	Susc. 2	Susc. 3	Susc. 4	Susc. 5
$P_n < 0.3$	0%	0%	0%	0%	0%
$0.3 \leq P_n < 2.0$	0%	1%	2%	3%	5%
$2.0 \leq P_n < 3.7$	0%	2%	3%	5%	10%
$3.7 \leq P_n < 5.0$	0%	3%	5%	10%	15%
$P_n \geq 5.0$	0%	5%	10%	15%	20%

En el caso del detonante sísmico, se emplea una clasificación similar, pero en función de la aceleración máxima del terreno, o PGA (Peak Ground Acceleration), la cual se relaciona con las categorías de

susceptibilidad para indicar una probabilidad de ocurrencia de deslizamiento detonado por sismo. Este umbral se presenta en la Tabla 2. PGA se expresa como fracción de la aceleración de la gravedad.

Tabla 2. Umbral aceleración-deslizamiento considerado

Rango <i>PGA</i>	Categoría susceptibilidad				
	Susc. 1	Susc. 2	Susc. 3	Susc. 4	Susc. 5
$0.05g \leq PGA < 0.15g$	0%	0%	0%	0.1%	0.5%
$0.15g \leq PGA < 0.25g$	0%	0%	0.1%	0.5%	1%
$0.25g \leq PGA < 0.35g$	0%	0.1%	0.5%	1%	5%
$0.35g \leq PGA < 0.45g$	0%	0.5%	1%	5%	10%
$PGA \geq 0.45g$	0%	1%	5%	10%	40%

2.3.3.3 Propuesta de ajuste al modelo GIRI-CDRI

De la mano con el equipo técnico de LANAMME/ECG, quienes lideran el grupo de trabajo del proyecto Operacional 1 en el cual se busca evaluar el riesgo para la carretera nacional RN2 de Costa Rica, se procederá a la actualización y mejora de la cuantificación de la susceptibilidad a los deslizamientos en Costa Rica, haciendo uso del método planteado en el Informe de Inicio de esta consultoría, y que involucra múltiples factores de propensividad, mejorando la descripción del fenómeno frente al método original de GIRI-CDRI que solamente considera 4 factores.

Así mismo, se buscará, en la medida de lo posible, mejorar la resolución del modelo, para acomodarlo a una resolución de 12.5 metros de pixel, o por lo menos de 30 metros de pixel, alrededor del corredor de la RN2. Finalmente, se consultará con los expertos de LANAMME/ECG y otros expertos involucrados en el proyecto, sobre la pertinencia de los umbrales detonantes previamente empleados en GIRI-CDRI, y la necesidad o no de modificarlos para ajustarlos a las condiciones locales de Costa Rica.

Cabe resaltar que actualmente se dispone de la totalidad del dataset de GIRI-CDRI, el cual, como se mencionó anteriormente, es lo mejor que existe disponible para las actividades previstas en los Términos de Referencia de esta consultoría. No obstante, se busca realizar la adecuación, no por una inconveniencia del modelo de que se dispone, sino dada la oportunidad de incorporar la mejor información y la experiencia local de los expertos involucrados, lo cual beneficiará el proyecto y permitirá obtener resultados más ajustados a las características locales.

2.4 Modelo seleccionado

De acuerdo con lo anterior, para la amenaza por deslizamientos, se ha seleccionado el modelo GIRI-CDRI, el cual resulta coherente y consistente con los requisitos necesarios para evaluaciones probabilistas del riesgo. Este modelo cumple con los criterios de calidad establecidos para las aplicaciones previstas en esta consultoría. Sin embargo, dado que fue desarrollado a partir de información global, se identifica una oportunidad para su actualización y mejora mediante la incorporación de datos locales de mayor detalle disponibles en Costa Rica. Este proceso se llevará a cabo en colaboración con el grupo LANAMME/ECG, quien lidera el Grupo Técnico de Trabajo del Proyecto Operativo 1.

2.5 Datos espaciales sobre deslizamientos

Los datasets geoespaciales disponibles asociados a este modelo se entregan como parte del Anexo 1 de este informe. La información relacionada con susceptibilidad de deslizamientos que pueden ser detonados por lluvia y por sismo incluye mallas con una resolución espacial de 90 metros y cubren todo el territorio del país. Con la información climática de precipitaciones, y escenarios de cambio climático, que se obtendrán, en el marco de este proyecto (Tarea 2), permitirán obtener una vez depurado el proceso mapas de frecuencia anual -periodo de retorno- o de amenaza de deslizamientos y, posteriormente, de riesgo en forma probabilista.

2.6 Resumen de modelos e información sobre deslizamientos

Modelo o información	Observaciones	Disponibilidad	Limitaciones	Ventajas	Tipo de información
Catálogo de deslizamientos (SNIT - CNE)	Incluye 1,126 eventos con información espacial, área y perímetro; no detalla tipo de proceso.	Disponible en el visor del SNIT	No diferencia procesos ni características específicas del evento	Útil para validar valores de susceptibilidad; buena cobertura nacional	Histórica, espacial, vectorial
Sistema de Información Geográfica LANAMME/ECG UCR	Incluye 201 puntos geotécnicos detallados y 2710 puntos simplificados; 10 y 115 en RN2 respectivamente.	Disponible mediante solicitud formal a LANAMME/ECG	Datos puntuales, no cobertura continua	Alta calidad técnica, incluye fotos, pendiente, altura, tipo de material, etc.	Puntual, técnica, observacional
Mapas de amenaza del CNE	Mapas simplificados a nivel de cantón en formato PDF	Acceso público al PDF, sin datos georreferenciados base	No se puede integrar en modelos espaciales por falta de base GIS	Aporta una visión general de amenaza; útil como referencia visual	Cartográfica, visual, institucional
Proyecto RECLAIMM / CEPREDENAC - Noruega	Creación de mapa de susceptibilidad a nivel regional; solo disponible imagen sin base de datos	Imagen disponible en línea (ResearchGate)	Sin acceso a la base de datos georreferenciada	Aporta contexto regional, visualización referencial	Imagen, referencial, regional
Modelo GIRI-CDRI (Global Infrastructure Resilience Index)	Modelo probabilista completo; incluye susceptibilidad y umbrales detonantes (lluvia y sismo)	Totalmente disponible (entregado en el Anexo 1)	Resolución de 90m; usa bases globales, susceptible de mejora local	Modelo coherente, completo, validado, ya compatible con GRMA	Probabilista, raster, global

3 AMENAZA VOLCÁNICA

La evaluación probabilista de la amenaza volcánica es un campo de aplicación muy reciente de la modelación del riesgo catastrófico. Su propósito es describir, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de los episodios eruptivos de un volcán con el fin de describir una colección de eventos representativos de todas las maneras como la amenaza puede manifestarse en el territorio. Para calcular la amenaza volcánica se requiere modelar la actividad eruptiva del volcán, determinar la posibilidad que los productos volcánicos sean emitidos desde puntos de emisión específicos, calcular la distribución de los productos volcánicos, e integrar estos componentes en un catálogo estocástico de episodios eruptivos, que sean mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos.

En esta consultoría, la modelación de la amenaza volcánica se aplica específicamente para el Proyecto Operacional 1: Evaluación del riesgo de desastres y climático en infraestructura vial – Ruta Nacional 2 Autopista Panamericana (RN2).

3.1 Eventos de origen volcánico que han afectado la Ruta Nacional 2

La Ruta Nacional 2 de Costa Rica ha estado históricamente expuesta a una variedad de amenazas naturales, entre ellas, fenómenos de origen volcánico. Estos últimos han desempeñado un papel importante, aunque muchas veces de manera indirecta, debido a la interacción entre la actividad geológica y las condiciones climáticas locales. Esta vía, al atravesar zonas de alta pendiente, terrenos de origen volcánico y regiones montañosas cercanas a centros de actividad volcánica como los volcanes Turrialba e Irazú, ha sufrido una serie de impactos cuya frecuencia y magnitud justifican un análisis técnico sostenido en el tiempo (Vahrson & Cartín, 2020).

La actividad eruptiva del Volcán Turrialba entre 2014 y 2017 constituye uno de los episodios más significativos en términos de afectación a la infraestructura vial. Durante este periodo, el volcán registró múltiples erupciones de tipo freático y magmático, con columnas eruptivas que alcanzaron alturas superiores a los 3.000 metros sobre el cráter. La dispersión de ceniza favorecida por los vientos alisios provocó depósitos considerables sobre amplias zonas del Valle Central, incluyendo sectores por donde atraviesa la Ruta Nacional 2, especialmente entre San José, Curridabat y Cartago. Aunque el espesor de la ceniza en estas áreas raramente superó los 5 milímetros, su persistencia generó una serie de impactos acumulativos (Duarte, 2016).

Entre los principales efectos registrados se incluyen la reducción de la visibilidad en la vía, particularmente en horas pico y durante episodios de precipitación ligera, lo cual incrementó el riesgo de accidentes. Además, se reportaron obstrucciones frecuentes en alcantarillas y sistemas de drenaje, lo que aumentó la susceptibilidad de la vía a inundaciones localizadas y deslizamientos superficiales, particularmente en las cuestas de Taras, Ochomogo y el Cerro de la Muerte, donde la estabilidad de taludes es crítica (LANAMME-UCR, 2015)..

En el caso del Volcán Irazú, su actividad ha sido más intermitente y menos explosiva en décadas recientes, pero no por ello menos relevante. El incremento en la actividad sísmica y fumarólica observado en 2020, sumado a una mayor inestabilidad en el sistema hidrológico de la región, tuvo consecuencias indirectas sobre la Ruta Nacional 2, particularmente en el tramo que conecta Cartago con el Cerro de la Muerte. La

saturación de suelos por lluvias intensas, acentuada por la influencia volcánica en la hidrología subterránea, ha sido identificada como un factor contribuyente en varios deslizamientos que afectaron brevemente el paso vehicular, obligando a intervenciones de emergencia por parte del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) (Alvarado, 1993; Sojo, 2018).

En particular, alrededor del kilómetro 25, cerca de la ciudad de Cartago, se manifiesta una sucesión de abanicos laháricos históricos y prehistóricos formados a partir de las erupciones del volcán Irazú, cuyo cráter se encuentra a unos 16 Km del sitio, conformados por la acumulación de material de origen volcánico; material que ha transitado por el cauce del río Reventado, afectando a la ciudad de Cartago, y potencialmente a la RN2 que tiene su trazado actual por el lugar, como ocurrió durante el periodo de actividad volcánica entre 1963 y 1965 (Gunther Vahrson & Cartín, 2020).

3.2 Componentes necesarios para la modelación de la amenaza volcánica

Es posible encontrar múltiples enfoques para la evaluación de la amenaza volcánica, la cual ha sido históricamente abordada desde una perspectiva determinista, en donde se pretende principalmente explicar las razones y mecanismos mediante los cuales se han manifestado eventos volcánicos verificados en tiempos geológicos, permitiendo así una descripción de las condiciones de ocurrencia de las erupciones y tránsito o propagación de los productos volcánicos y la posible afectación. Este tipo de enfoques, si bien proveen información de contexto muy significativa, no son apropiados ni suficientes para la modelación probabilista del riesgo, de la manera como se solicita en los Términos de Referencia para ser aplicada en el proyecto GRMA.

La modelación probabilista de la amenaza volcánica requiere, por lo tanto, de la definición de una serie de componentes que permitan simular una colección de eventos derivados de la actividad volcánica, para su uso en modelación del riesgo. Estos componentes son:

- Modelo de ocurrencia de erupciones, que permita expresar la ocurrencia como un proceso estocástico que puede ser estacionario o no.
- Modelo de régimen de colapso de columnas eruptivas, que permita determinar en qué medida se manifiestan fenómenos como flujos piroclásticos, y que porcentaje del material erupcionado se involucra en su desarrollo.
- Modelos de tránsito o propagación de productos. Se trata de modelos específicos que permitan establecer las intensidades causadas por los posibles productos volcánicos. En particular: caída de ceniza, flujos piroclásticos, lahares, proyectiles balísticos y ondas de choque y, en menor medida flujos de lava⁵.

A la luz de la existencia o no de estos submodelos, se ha evaluado la información disponible para determinar su pertinencia en la modelación del riesgo dentro del proyecto GRMA.

⁵ Esto se debe a que el carácter explosivo de los volcanes Turrialba e Irazú, y el tipo de magma involucrado, reduce la probabilidad de que se manifiesten flujos de lava.

3.3 Información y modelos disponibles

Costa Rica cuenta con más de diez estructuras volcánicas importantes, de las cuales cinco presentan una actividad significativa. No obstante, dado que el Proyecto Operación 1 se centra en la RN2 como elemento sobre el cual se evalúa el riesgo, la revisión de la información y modelos disponibles se centra en los volcanes Turrialba e Irazú. La Tabla 3 presenta un resumen de las principales características de estos dos volcanes.

Tabla 3. Características generales de los volcanes Turrialba e Irazú

Característica	Volcán Turrialba	Volcán Irazú
<i>Tipo de volcán</i>	Estratovolcán (Alvarado et al., 2006)	Estratovolcán (Alvarado et al., 2006)
<i>Tipo de actividad principal</i>	Vulcaniana, freatomagmática, pliniana (Reagan et al. 2006; Martínez et al., 2012)	Vulcaniana, pliniana (Alvarado & Soto, 2002)
<i>Explosividad</i>	Explosivo (moderada) (Pacheco et al., 2015)	Explosivo (alta en eventos históricos) (Alvarado et al., 1997)
<i>Actividad reciente</i>	Emisiones de ceniza, gases, explosiones leves (Ruiz et al., 2017)	Fumarolas, baja actividad desde los años 90 (Barquero et al., 2000)
<i>Eventos eruptivos destacados</i>	2014–2017: frecuentes emisiones de ceniza (Ruiz et al., 2017; Conde et al., 2019)	1963–1965: erupción pliniana de gran impacto (Alvarado & Soto, 2002)
<i>Altura de columna eruptiva</i>	Hasta 3,000 m sobre el cráter (Ruiz et al., 2017)	Más de 8,000 m en erupciones plinianas (Alvarado & Soto, 2002)
<i>Impacto sobre RN2</i>	ceniza, reducción de visibilidad (Pacheco et al., 2015)	posibles lahares, ceniza (Alvarado et al., 2006; ICE, 2011)

3.3.1 Estudios de la amenaza volcánica

Se han identificado estudios sobre la amenaza volcánica realizados para los volcanes Turrialba e Irazú. Estos estudios, liderados por la Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), buscan establecer las regiones de posible incidencia de productos volcánicos derivados de la actividad de estos volcanes, con énfasis en el alcance de los productos y la intensidad de la posible afectación.

3.3.1.1 Volcán Turrialba

El estudio titulado “Peligro Volcánico del Turrialba, Costa Rica” (Alvarado et al., 2020a) provee información sobre el emplazamiento geológico del edificio volcánico, su morfología, su historia eruptiva tanto en tiempos geológicos como en tiempos históricos, así como simulaciones de escenarios eruptivos con las potenciales intensidades causadas en el terreno.

La información contenida en este estudio es útil para la parametrización de los modelos de amenaza probabilista que se utilizarán en el marco del proyecto GRMA.

3.3.1.2 Peligros volcánicos del Irazú

El estudio titulado “Peligros Volcánicos del Irazú, Costa Rica” (Alvarado et al., 2020b) sigue una estructura similar al del volcán Turrialba, brindando información sobre el emplazamiento geológico del edificio

volcánico, su morfología, su historia eruptiva tanto en tiempos geológicos como en tiempos históricos, y también simulaciones de escenarios eruptivos con las potenciales intensidades causadas en el terreno.

La información contenida en este estudio es altamente útil para la parametrización de modelos de amenaza probabilista. No obstante, se aclara que el estudio no provee una modelación probabilista de la amenaza. Es decir, la información contenida es de gran utilidad, más los resultados obtenidos no son suficientes para ser directamente usados en la evaluación probabilista del riesgo en este proyecto.

3.3.2 Modelos probabilistas del proyecto CAPRA

Como parte del proyecto CAPRA (2008) se calculó la amenaza volcánica para 9 volcanes en Costa Rica, en particular para el Poas, Arenal, Irazú, Turrialba, Rincón de la Vieja, Tenorio, Barva, Miravalles y Orosí. En el 2010, INGENIAR-CIMNE actualizó los modelos de amenaza de estos volcanes, a partir de la mejor información disponible sobre tasas de actividad, magnitudes de erupciones, morfología, propiedades del magma y de los materiales depositados, con el fin de definir modelos probabilistas capaces de simular múltiples eventos eruptivos y permitir la evaluación probabilista del riesgo volcánico.

Los modelos desarrollados por INGENIAR-CIMNE se encuentran implementados en el software VHAST (Bernal, 2010) de la plataforma CAPRA-ROBOT. Actualmente los modelos cubren caída de ceniza, flujos piroclásticos, lahares y flujos de lava (estos últimos como eventos raros), para los volcanes mencionados.

Conviene anotar que los modelos de productos volcánicos implementados para los volcanes Turrialba e Irazú, en particular los modelos de distribución de ceniza volcánica y tránsito de lahares, son los mismos sugeridos en la Guía Metodológica para la Integración del Análisis del Riesgo en los proyectos de infraestructura pública vial de Costa Rica, desarrollada en 2024.

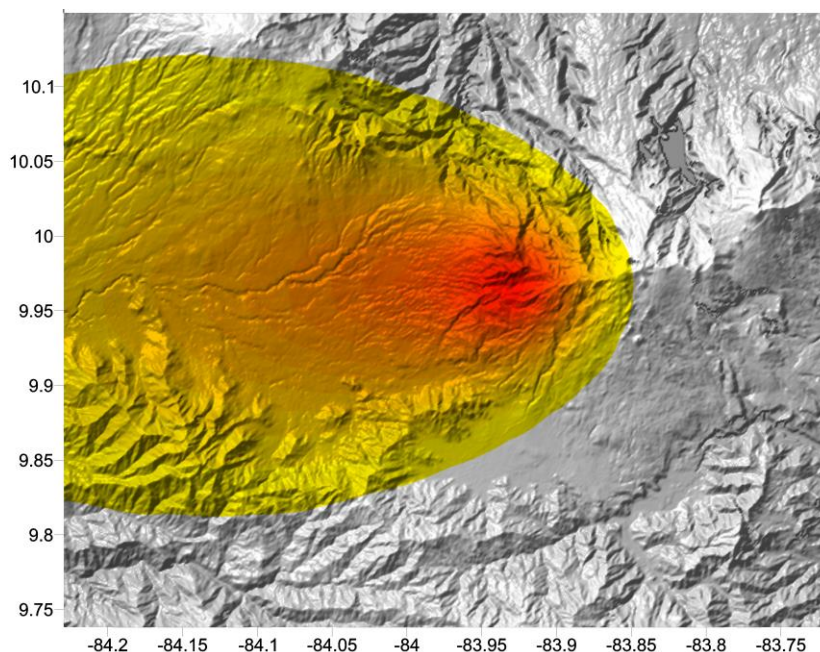


Figura 7. Escenario de caída de ceniza en el volcán Irazú

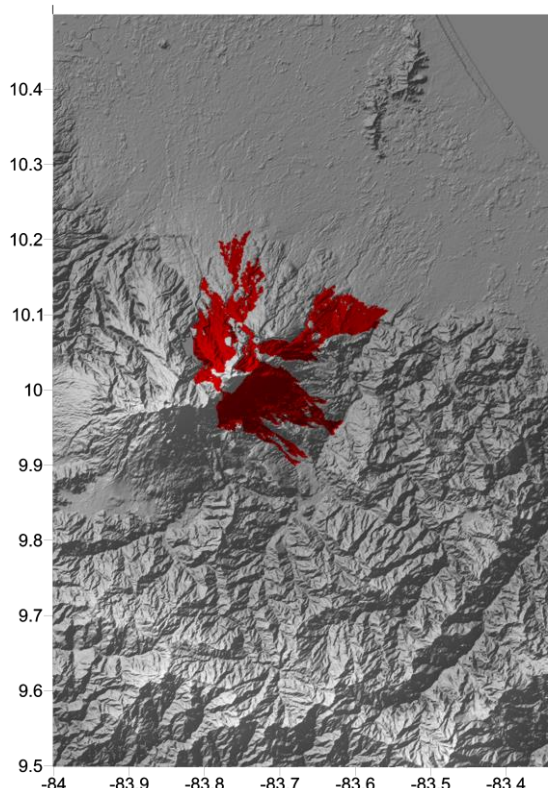


Figura 8. Escenario de flujos piroclásticos en el volcán Turrialba

3.3.2.1 Propuesta de ajuste a los modelos probabilistas de CAPRA

De la mano con el equipo técnico de LANAMME/ECG, quienes lideran el grupo de trabajo del proyecto Operacional 1 en el cual se busca evaluar el riesgo para la carretera nacional RN2 de Costa Rica, se procederá a la actualización y mejora de la evaluación probabilista de la amenaza volcánica para el Turrialba y el Irazú, a partir de la incorporación de la información más reciente sobre la actividad y emplazamiento geológico y morfológico de estos volcanes (Alvarado et al., 2020a, 2020b). Se buscará, en la medida de lo posible, mejorar la resolución del modelo, para acomodarlo a una resolución de 12.5 metros de pixel, alrededor de los edificios volcánicos y en cercanías a la RN2. Se actualizarán los parámetros base de la modelación de productos volcánicos de acuerdo con la información más reciente publicada en Alvarado et al., 2020a y 2020b. Finalmente, se complementarán los modelos con la evaluación para proyectiles balísticos y ondas de choque.

Cabe resaltar que actualmente se dispone de la totalidad de los modelos volcánicos de CAPRA, los cuales son lo mejor que existe disponible para las actividades previstas en los Términos de Referencia de este proyecto. No obstante, se buscará realizar su adecuación, ajuste y complementación, no por una inconveniencia de los modelos existentes, sino dada la oportunidad de incorporar la mejor información y la experiencia local de los expertos involucrados, lo cual beneficiará el proyecto y permitirá obtener resultados más ajustados a las características locales.

3.4 Modelo seleccionado

En lo que respecta a la amenaza volcánica, se dispone de modelos probabilistas desarrollados para los volcanes que representan una amenaza sobre la carretera RN2, en particular los volcanes Turrialba e Irazú. Estos modelos fueron construidos en el marco del proyecto CAPRA (2008) en Costa Rica y cumplen con los criterios de calidad mínimos requeridos para su uso en las evaluaciones de riesgo del proyecto GRMA. Al igual que en el caso de los deslizamientos, se identifica la oportunidad de actualizar y mejorar la resolución de estos modelos mediante el uso de información local de mayor detalle actualmente disponible. Este proceso será realizado en conjunto con el grupo LANAMME/ECG, quien lidera el Grupo Técnico de Trabajo del Proyecto Operativo 1.

Es importante señalar que la utilización de este modelo de amenaza volcánica permite evaluar efectos no solo en activos de infraestructura sino efectos ambientales en caso de requerirse en el futuro. Para el caso de cultivos implicaría utilizar un modelo de vulnerabilidad especial ante la caída de piroclastos (caída de ceniza). Los modelos ante otras amenazas volcánicas se consideran de vulnerabilidad binaria dada la alta capacidad destructiva de estos fenómenos. La vulnerabilidad de los cultivos ante la caída de piroclastos se basa en la evaluación de las características fenológicas de las plantas que determinan su respuesta biológica a la alteración de su entorno natural. Generalmente, las plantas cierran los estomas de sus hojas para reducir la pérdida de agua por transpiración, lo que implica reducir su nivel de fotosíntesis, ritmo de crecimiento y rendimiento final. La modelación de la vulnerabilidad se puede realizar siguiendo la metodología de cálculo del rendimiento propuesta por la FAO (modelo AquaCrop). El modelo por lo tanto puede ser útil para evaluación del riesgo de servicios ecosistémicos.

3.5 Datos espaciales sobre volcanes

Los datasets geospaciales disponibles asociados a este modelo se entregan como parte del Anexo 1 de este informe. Se entrega información que contienen parámetros del modelo probabilista de amenaza volcánica del proyecto VHASt (del CAPRA ROBOT) para los volcanes Irazú y Turrialba, topografía con 4 mallas de fragmentos geospaciales del Modelo Digital de Elevación, con una resolución espacial de 12.5 metros, y que cubren parte del territorio de Costa Rica, de la región por donde atraviesa la carretera Ruta Nacional 2, y el área en donde se localizan los volcanes Turrialba e Irazú. Los modelos CAPRA/VHASt están ya disponibles para su uso para producir mapas de amenaza volcánica probabilista, por ejemplo, caída de ceniza con diferentes períodos de retorno, y con base en la información de frecuencia -basada en eventos- obtener posteriormente el riesgo en forma probabilista. Igualmente, se pueden generar escenarios de eventos específicos.

3.6 Resumen de modelos e información sobre amenaza volcánica

Modelo o información	Observaciones	Disponibilidad	Limitaciones	Ventajas	Tipo de información
Estudios de peligro volcánico – Volcán Turrialba (Alvarado et al., 2020a)	Estudio geológico y de escenarios eruptivos, útil para parametrización	Disponible como documento técnico	No es una modelación probabilista directa; no incluye catálogo estocástico	Información reciente, útil para mejorar modelos existentes	Geológica, contextual, técnica

Estudios de peligro volcánico – Volcán Irazú (Alvarado et al., 2020b)	Similar al Turrialba; incluye simulaciones históricas y morfología	Disponible como documento técnico	No es directamente utilizable en modelación de riesgo	Base técnica sólida para actualizar modelos probabilistas	Geológica, contextual, técnica
Modelos probabilistas del proyecto CAPRA (VHAST – INGENIAR-CIMNE)	Modelos desarrollados para 9 volcanes; incluye ceniza, flujos, lahares y lava	Disponible, implementado en CAPRA-ROBOT	Requiere actualización de parámetros y resolución	Modelación probabilista completa, validada y ya implementada	Probabilista, geoespacial, técnica
Propuesta de ajuste a modelos CAPRA	Mejora en resolución (12.5m), incorporación de datos recientes y nuevos productos (balísticos, ondas)	En desarrollo en conjunto con LANAMME/ECG	Aún no implementado, depende de avances técnicos	Permitirá obtener modelos más detallados y localmente precisos	Modelación propuesta, técnica, aplicada

4 AMENAZA SÍSMICA

En general, el propósito de la evaluación de la amenaza sísmica es describir, en términos de probabilidad, el proceso natural de ocurrencia de los terremotos y su intensidad y efectos en el territorio, con el objetivo de dimensionar el problema de forma completa, no solo considerando los eventos ya ocurridos en el pasado sino también los eventos que no han ocurrido aún. Esto implica, primero, la necesidad de modelar la ocurrencia de rupturas en la corteza terrestre, conservando características mínimas asociadas al momento sísmico liberado, tamaño y orientación de la ruptura; segundo, una medida de la frecuencia de ocurrencia de los terremotos y su manifestación en el tiempo, que sea estadísticamente consistente con lo observado en catálogos sismológicos; y tercero, una manera de establecer las intensidades del movimiento fuerte causadas en cualquier ubicación del territorio como resultado de la ocurrencia de sismos particulares.

En el marco de este proyecto se trabajará con la información disponible proveniente de esfuerzos previos realizados al respecto en Costa Rica. A continuación, se presentan los estudios más relevantes y completos que han sido identificados.

4.1 Eventos sísmicos relevantes en Costa Rica

Costa Rica, situada sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico, ha sido históricamente una región de alta sismicidad debido a la interacción de varias placas tectónicas, principalmente la placa del Cocos y la placa Caribe. Esta condición geológica ha dado lugar a numerosos eventos sísmicos de gran relevancia, que han marcado la historia del país tanto en términos de afectación humana como de impactos económicos y estructurales (Alonso-Henar et al., 2013).

Uno de los eventos sísmicos más significativos en la historia de Costa Rica fue el terremoto de Cartago ocurrido el 4 de mayo de 1910. Este sismo, con una magnitud estimada de 6,4ML, tuvo un impacto devastador sobre la ciudad de Cartago, donde se registró el colapso de más del 80% de las edificaciones. El evento dejó un saldo de aproximadamente 700 personas fallecidas y miles de heridos y damnificados (Alonso-Henar et al., 2013). La destrucción fue tal que motivó la reubicación de muchas familias y la reestructuración urbana de la ciudad. Este terremoto marcó un antes y un después en la gestión del riesgo sísmico en el país, aunque en ese momento aún no existían normativas de construcción sismorresistentes (Alonso-Henar et al., 2013).

Décadas más tarde, el 22 de abril de 1991, ocurrió otro terremoto de gran magnitud, esta vez con epicentro cerca de la localidad de Pandora, en la región de Limón, en la costa Caribe del país. Con una magnitud de 7,7Mw, este evento es uno de los más potentes registrados en Costa Rica (Quesada-Román, 2021). A pesar de que el epicentro se situó en una zona menos densamente poblada, los efectos fueron severos: se reportaron 48 fallecidos, más de 500 personas heridas y más de 7.000 viviendas con algún grado de daño (Nishenko et al., 2021). Infraestructura crítica, como puentes y carreteras, sufrieron graves afectaciones, lo cual dificultó las labores de rescate y asistencia (Denyer et al., 1994; Moya, 2021). Este sismo también generó cambios morfológicos en la zona, como el levantamiento de tierras y desplazamientos de terreno, lo cual ha sido objeto de estudio por parte de geólogos a nivel mundial.

Posteriormente, el terremoto de Cóbano, registrado el 25 de marzo de 1990, con una magnitud de 7,0Ms, sacudió la región de la península de Nicoya. Aunque fue menos destructivo que el de Limón, este evento sísmico provocó daños significativos en viviendas, así como en el sistema vial y en escuelas rurales (Protti & Schwartz, 1994). A pesar de que no se registraron muertes directamente atribuibles al sismo, sí hubo cuantiosas pérdidas materiales. Este terremoto fue fundamental para reforzar la percepción del riesgo en la zona del Pacífico costarricense y motivó el inicio de estudios más rigurosos sobre la acumulación de energía sísmica en la península de Nicoya, la cual es considerada una de las zonas de mayor amenaza sísmica del país (Alonso-Henar et al., 2013).

En tiempos más recientes, el terremoto de Cinchona, ocurrido el 8 de enero de 2009, representa otro hito relevante en la historia sísmica de Costa Rica. Con una magnitud de 6,2Mw y epicentro cerca del volcán Poás, este sismo afectó severamente las comunidades de Cinchona, Vara Blanca y otros sectores del cantón de Alajuela. Se contabilizaron 29 fallecidos, más de 90 heridos y más de 2.000 personas desplazadas. El deslizamiento de tierras provocado por el sismo fue uno de los factores más letales, al sepultar viviendas y bloquear accesos. Además, provocó el colapso de parte de la infraestructura vial y dejó aisladas a numerosas comunidades (LANAMME UCR 2009; Monge Sandí, 2009).

Otro evento significativo ocurrió el 5 de septiembre de 2012, conocido como el terremoto de Samara o de Nicoya, con una magnitud de 7,6Mw. Este sismo tuvo lugar en la zona costera del Pacífico norte y fue ampliamente sentido en todo el país. A pesar de su gran magnitud, el número de víctimas fue reducido (una persona fallecida directamente y varias decenas de heridos). Sin embargo, los daños estructurales sí fueron considerables: más de 2.300 edificios sufrieron algún nivel de afectación, incluyendo hospitales, escuelas, viviendas y oficinas gubernamentales.

4.2 Componentes necesarios para la modelación de la amenaza sísmica

La modelación probabilista de la amenaza sísmica sigue una metodología bien definida desde su aparición por primera vez a finales de la década de 1960, derivada de los trabajos pioneros de Luis Esteva en México y Anil Cornell en los Estados Unidos. Se trata de una metodología robusta, a partir de la cual se han desarrollado enfoques y métodos para la evaluación, posteriormente, de todo tipo de amenazas naturales. Es decir, los preceptos básicos de la modelación catastrófica con enfoques probabilistas pueden ser rastreados hasta los trabajos en amenaza sísmica de Esteva y Cornell.

La evaluación de la amenaza sísmica requiere de tres componentes básicos:

- Un modelo de fuentes, que describa su geometría en el espacio y la distribución de la localización de las rupturas de la corteza terrestre en el territorio de análisis.
- Un modelo de sismicidad, que permita la modelación probabilista de la ocurrencia en el tiempo de sismos de diferentes magnitudes en cada una de las fuentes consideradas.
- Un modelo de atenuación, que define la intensidad del movimiento fuerte, como variable aleatoria, en función de la magnitud de los terremotos y la distancia fuente-sitio.

A la luz de la existencia o no de estos submodelos, se evalúa la información disponible en Costa Rica para determinar su pertinencia en la modelación del riesgo sísmico dentro del proyecto GRMA.

4.3 Información y modelos disponibles

En esta sección se presenta un resumen de los modelos de amenaza sísmica existentes en Costa Rica. Se indican las potencialidades y limitaciones que tienen para ser usados directamente en la modelación del riesgo en el marco del proyecto.

4.3.1 Modelo RESIS II

El Proyecto Reducción del Riesgo Sísmico en Guatemala, El Salvador y Nicaragua, con Cooperación Regional para Honduras, Costa Rica y Panamá (RESIS II) (NORSAR et. al. 2008) fue una iniciativa regional que buscó evaluar la amenaza sísmica, la vulnerabilidad y el riesgo en seis países centroamericanos, incluyendo Costa Rica. Este proyecto fue desarrollado con la colaboración de instituciones locales como la Red Sismológica Nacional y la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y el Instituto Costarricense de Electricidad y expertos internacionales en sismología y geotecnia de la Universidad Politécnica de Madrid, Centroamérica y Europa.

En el caso de Costa Rica, el estudio se enfocó, principalmente, en la evaluación probabilista de la amenaza sísmica, considerando la sismicidad histórica y reciente del país. Para ello, se construyó y analizó un catálogo sísmico que se conformó a partir del catálogo nacional aportado por el país y un catálogo regional basado en el catálogo de Rojas et al. (1993) y que fue actualizado hasta diciembre 2007, con el aporte de los catálogos locales de El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá y los datos regionales del Centro Sismológico de América Central (CASC).

Este catálogo abarcó eventos significativos desde el año 1522, con magnitudes de momento (M_w) iguales o superiores a 3.5. A partir de esta información se identificaron y caracterizaron las principales fuentes sismogénicas, clasificadas en tres grandes grupos: fuentes corticales, de subducción interplaca y de subducción intraplaca. Para la estimación de la aceleración sísmica esperada en distintas localidades se utilizaron modelos de atenuación adecuados para la región. En el caso de las fallas superficiales se emplearon los modelos de Climent et al. (1994) y Zhao et al. (2006); para las fuentes de subducción interplaca se utilizó el modelo de Youngs et al. (1997), y para las fuentes intraplaca se aplicaron los modelos de Zhao et al. (2006) y Youngs et al. (1997).

El cálculo de amenaza sísmica se realizó con el programa CRISIS2007 (plataforma CAPRA). Los resultados de RESIS II incluyen mapas de aceleración máxima del terreno (PGA) y ordenadas espectrales (SA) de 0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2 segundos, para periodos de retorno de 500, 1000 y 2500 años. Además, se generaron curvas de amenaza para estos parámetros en la ciudad de San José, así como espectros de amenaza uniforme correspondientes a los tres períodos de retorno mencionados. Los mapas obtenidos, como el que se muestra en la Figura 9, fueron fundamentales para determinar las exigencias para el desarrollo de códigos de construcción sismo-resistentes y para la planificación territorial en Costa Rica.

Es importante destacar que el modelo RESIS II, es metodológicamente compatible con la modelación del riesgo catastrófico. Es más, como parte del desarrollo de la plataforma CAPRA por parte del Banco Mundial, BID y UNDRR en 2008 en Costa Rica, INGENIAR-CIMNE incorporó el modelo RESIS II en la plataforma CAPRA. Por lo tanto, en la actualidad se cuenta con el modelo y los resultados, que además son la base del proyecto GRAF, realizado más recientemente para CNE con el apoyo de la UNDRR. Los

resultados del RESIS II y el GRAF son compatibles con la modelación del riesgo sísmico en el marco del proyecto GRMA. Estos proyectos han sido un referente en el sector público del país, sin embargo, se han realizado otros modelos más recientes, más completos y de mayor alcance, que han tenido en cuenta en parte insumos del RESIS II y el GRAF, de los cuales a continuación se presenta una sinopsis de sus enfoques y ventajas.

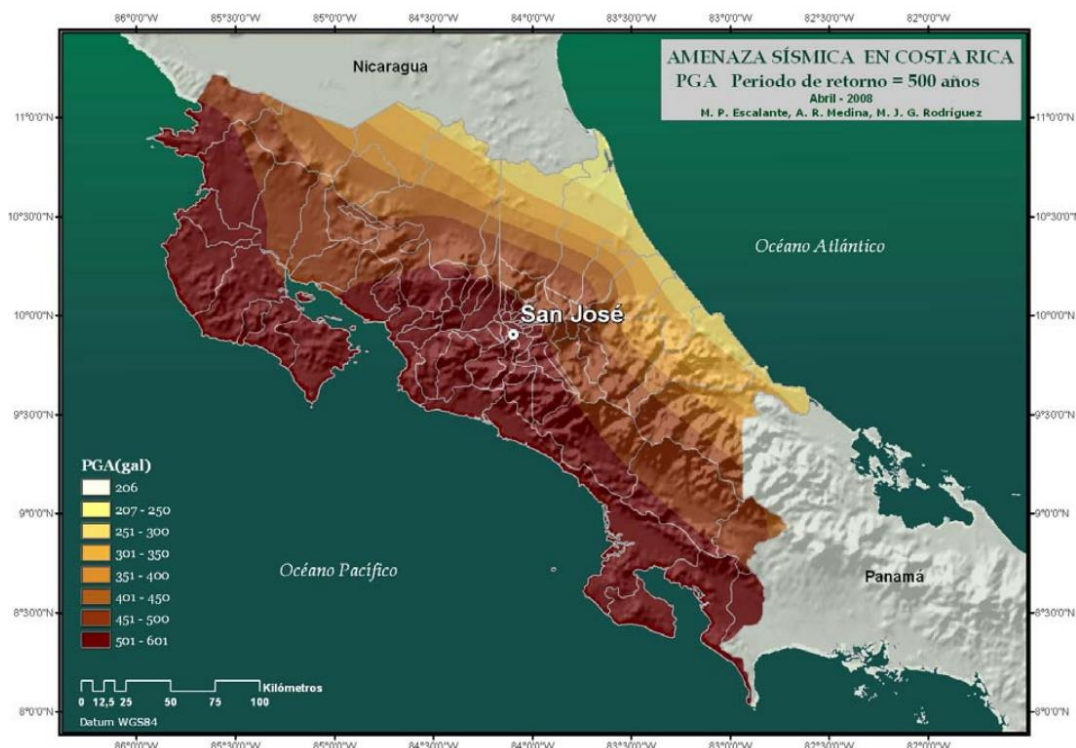


Figura 9. Mapa de amenaza sísmica en términos de PGA para un período de retorno de 500 años. (Tomado de NORSAR et. al. 2008)

4.3.2 Modelo de amenaza sísmica de Costa Rica de 2022

Este fue un proyecto conjunto que involucró a investigadores de la Universidad de Costa Rica, incluyendo al Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), la Red Sismológica Nacional (RSN), el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME/ECG), y los departamentos de Psicología y Trabajo Social, así como a investigadores del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). El objetivo principal fue generar un nuevo modelo de amenaza sísmica para el país y contextualizar las experiencias sísmicas vividas por las comunidades rurales, con el fin de promover políticas orientadas a la mitigación del riesgo.

Este modelo fue desarrollado utilizando la base de datos de terremotos elaborada por Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021), a partir de información del LIS y la RSN de la Universidad de Costa Rica, así como de agencias sismológicas de Panamá y Nicaragua. El catálogo cubre eventos ocurridos entre los años 1522 y 2020, con magnitudes de momento (M_w) entre 0.3 y 7.7.

Para la zonificación sísmica, se utilizó la propuesta de Alvarado et al. (2017), que define 28 zonas que abarcan el territorio de Costa Rica y sus zonas aledañas. Estas zonas fueron agrupadas en tres dominios tectónicos: placa superior (18 zonas), interplaca (5 zonas) e intraplaca (5 zonas). Los modelos de atenuación del movimiento fuerte se aplicaron mediante combinaciones ponderadas específicas para cada tipo de fuente. Para las zonas intraplaca se utilizaron los modelos de Abrahamson et al. (2016), Montalva et al. (2017), Kanno et al. (2006), García et al. (2005) y Lin & Lee (2008); para las zonas interplaca, los de Kanno et al. (2006), Zhao et al. (2006) y Montalva et al. (2017); y para las fuentes corticales, los de Cauzzi et al. (2015), Kanno et al. (2006) y Boore et al. (2014).

El cálculo de la amenaza sísmica se realizó utilizando el software OpenQuake (GEM, 2020). De acuerdo con el estudio, los mapas de aceleración máxima del suelo (PGA) para períodos de retorno de 475 y 2475 años, así como las aceleraciones espectrales correspondientes, han permitido clasificar el territorio nacional en cuatro niveles de amenaza sísmica:

- Extremadamente alta: para las penínsulas de Nicoya, Osa y Burica, situadas directamente sobre la zona de subducción interplaca.
- Muy alta: para la mayor parte de la provincia de Guanacaste.
- Alta: para la mayor parte del país (~41%), incluyendo el centro de Costa Rica y San José.
- Moderada: para la Cordillera de Talamanca y el norte de Costa Rica.

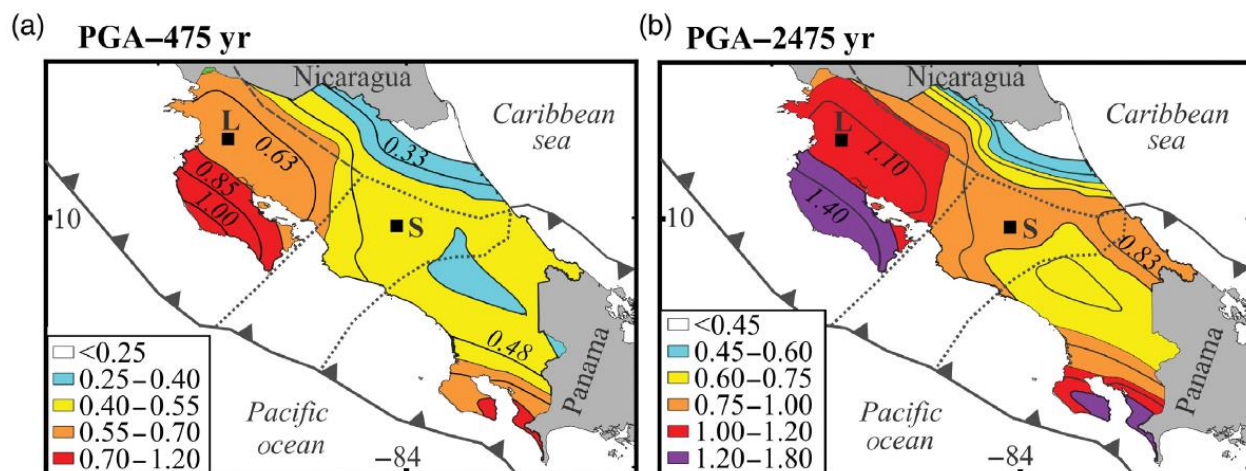


Figura 10. Resultados del modelo de amenaza sísmica de Costa para medidas de intensidad seleccionadas de la aceleración máxima del suelo (PGA) para un período de retorno de (a) 475 y (b) 2475 años. (Tomado de Hidalgo Leiva et al. 2022)

La información base necesaria para el uso de este modelo para la evaluación del riesgo en el marco del proyecto GRMA no está disponible; es decir, los modelos geométricos de fuentes, sismicidad y atenuación empleados. Por lo tanto, este modelos no será considerado para la evaluación del riesgo sísmico en el país.

4.3.3 Modelo ASLAC

Existe también un modelo regional de Amenaza Sísmica para Latino América y el Caribe (ASLAC) que se desarrolló pensando, que pudiera servir además que, para normativa sismorresistente, para evaluar el

riesgo catastrófico de portafolios o carteras de activos o elementos expuestos; de especial utilidad para la industria de seguros y reaseguros. Aunque, como en el caso de Costa Rica, la mayoría de los países de la región ya han contado con modelos probabilistas propios y nacionales de amenaza sísmica, no existía un modelo regional integrado. En general, no era posible ensamblar los modelos nacionales debido a importantes discontinuidades en las fronteras político-administrativas, causadas por la falta de integración de las fallas transnacionales y el uso de diferentes modelos de predicción de movimiento fuerte (GMPM, por sus siglas en inglés).

El modelo ASLAC (Salgado-Gálvez et al., 2018) ha sido el primer modelo probabilista de amenaza sísmica armonizado para la región de América Latina y el Caribe. Este modelo cubre de manera completa, continua, homogénea y exhaustiva toda la región, con una resolución suficientemente alta a escala nacional. Esto incluye fallas compartidas e incluso de los países vecinos.

Para su desarrollo, se ensambló un catálogo sísmico actualizado utilizando fuentes internacionales (Engdahl y Villaseñor, 2002; Storchak et al., 2013; USGS-NEIC, 2015), complementado con información proveniente de fuentes locales y regionales. El catálogo incluye eventos desde el año 1900 hasta 2015, y se estableció una magnitud de momento mínima (M_w) de 4.0.

La zonificación tectónica se realizó considerando únicamente las características sismo-tectónicas, sin atender a las fronteras político-administrativas, con el fin de garantizar la continuidad espacial del modelo. Se definieron subregiones dentro del modelo para asignar la actividad sísmica a diferentes fuentes. Por ejemplo, en América Central, los eventos ubicados entre la trinchera de subducción y la curva de nivel de 40 km se clasificaron como interplaca. Aquellos ubicados fuera de esta curva se clasificaron como intraplaca si su profundidad es mayor a 40 km, o como corticales si su profundidad es igual o menor a 40 km.

Se seleccionaron modelos de atenuación ajustados a las características sismo-tectónicas de la región y se aplicaron relaciones híbridas, asignando combinaciones ponderadas de dos o más modelos a las distintas fuentes. En América Central, se utilizaron los modelos de Chiou-Youngs (2014) y Climent et al. (1994), cada uno con un peso de 0.5 para las fuentes corticales; y los modelos de Zhao et al. (2006), Lin and Lee (2008) y Youngs et al. (1997), con un peso de 0.33 cada uno para las fuentes interplaca e intraplaca.

La evaluación de la amenaza sísmica se llevó a cabo siguiendo la metodología PSHA, utilizando el software CRISIS2015 (Ordaz et al., 2015). Como resultado, se generaron curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme (EAU), los cuales pueden obtenerse para cualquier ubicación dentro del dominio del modelo. A partir de estas curvas, se construyeron mapas de amenaza sísmica para distintos períodos de retorno y ordenadas espectrales.

El modelo también incluye un catálogo sintético de terremotos, definidos como mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos, que representan en forma probabilista todos los eventos sísmicos factibles de ocurrir. Cada evento cuenta con una frecuencia de ocurrencia asociada. Este catálogo, que incluye más de un millón de terremotos, se almacenó en un archivo *.AME (para la amenaza basada en eventos) compatible con diversos programas abiertos y licenciados para la evaluación rigurosa y probabilista del riesgo sísmico, como los disponibles en la plataforma CAPRA.

La Figura 11 presenta los mapas de amenaza sísmica de Costa Rica obtenidos a partir del modelo ASLAC. A la izquierda se presenta el mapa correspondiente a un período de retorno de 500 años, y a la derecha, el de 2500 años, ambos en términos de PGA.

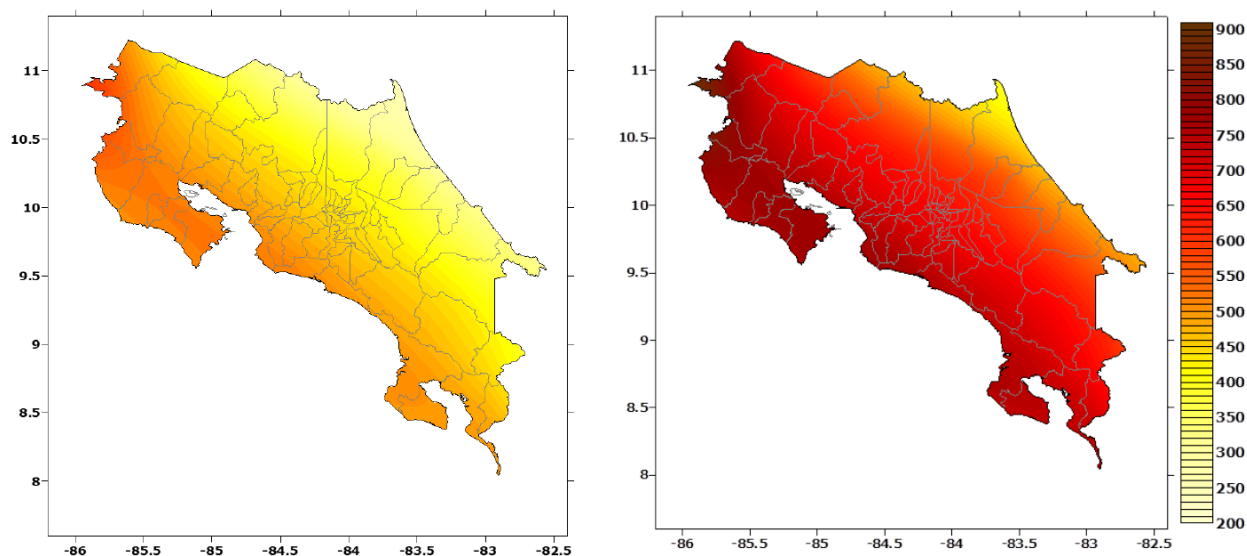


Figura 11. Mapas de amenaza sísmica para Costa Rica. Izquierda: PGA y 500 años de período de retorno. Derecha: PGA y 2500 años de período de retorno. Calculado por INGENIAR-CIMNE usando CAPRA-ROBOT. Unidades en cm/s^2 .

El modelo ASLAC es actualmente el modelo más avanzado y actualizado de amenaza sísmica para América Latina y el Caribe. Se utiliza en modelos de riesgo catastrófico para la estimación de pérdidas en el sector asegurador, siendo un modelo de referencia tenido en cuenta por aseguradoras como CCRIF y brokers como AON, Willis Re, JLT, AXA. Además, ha sido certificado por la Superintendencia Financiera de Colombia para ser empleado por las compañías de seguros en la evaluación de solvencia y fijación de precios. Estas características hacen que ASLAC sea un modelo idóneo para ser utilizado en los proyectos enmarcados en el GRMA. El equipo consultor cuenta con acceso al modelo ASLAC y dispone del catálogo estocástico completo, lo que permite su aplicación directa en los análisis que se esperan realizar.

4.4 Modelo seleccionado

Para el desarrollo de este proyecto, en lo que corresponde a la evaluación de la amenaza sísmica, se ha considerado que el modelo ASLAC es el que mejor cumple con todos los criterios de calidad requeridos para su aplicación directa en las evaluaciones de riesgo del proyecto GRMA en Costa Rica. Este modelo, además de su solidez técnica, ha sido previamente utilizado por la industria aseguradora, lo que respalda su validez y aplicabilidad en contextos reales de gestión del riesgo, como se espera sea la modelación que se espera realizar en los proyectos de GRMA y otras iniciativas similares en la región de América Latina y el Caribe.

4.5 Datos espaciales sobre sismos

Los datasets geospaciales disponibles asociados a este modelo se entregan como parte del Anexo 1 de este informe. Para la amenaza sísmica, se incluye un catálogo sintético de terremotos, generado para

representar de manera probabilista la amenaza sísmica de Costa Rica, calculada en el modelo ASLAC. La información contenida en el .AME descrito en el Anexo 1 permite obtener mapas de amenaza sísmica para diferentes períodos de retorno.

4.6 Resumen de modelos e información sobre amenaza sísmica

Modelo o información	Observaciones	Disponibilidad	Limitaciones	Ventajas	Tipo de información
Modelo RESIS II (NORSAR et al., 2008)	Modelo histórico y validado; incluye mapas de PGA y SA para varios periodos de retorno	Disponible en CAPRA; integrado por INGENIAR-CIMNE	Desactualizado; reemplazado por modelos más recientes	Metodológicamente compatible, útil como referencia	Probabilista, geoespacial, técnica
Modelo de amenaza sísmica de Costa Rica (2022)	Desarrollado por UCR, RSN, ICE, LANAMME/ECG; incluye zonificación y mapas para 475 y 2475 años	No disponible para uso en este proyecto (faltan insumos base)	No se cuenta con los modelos geométricos ni de atenuación	Actualizado, detallado, con validación institucional	Académica, técnica, no implementada
Modelo ASLAC (Salgado-Gálvez et al., 2018)	Modelo armonizado para toda LAC; incluye catálogo sintético completo	Totalmente disponible; accesible por el consultor	Ninguna relevante para el proyecto GRMA	Modelo más actualizado y robusto; usado por CCRIF y aseguradoras	Probabilista, geoespacial, estocástico

5 PROGRAMA DE DESARROLLO DE CAPACIDADES

Como parte del proceso de fortalecimiento de capacidades en el uso de datos sísmicos, de amenaza volcánica y por deslizamientos para evaluaciones de riesgo, en el marco de este proyecto se está desarrollando el Curso de Modelación Probabilista del Riesgo de Desastres.

Este curso está dirigido a profesionales, especialistas e investigadores vinculados al Grupo Técnico de Trabajo del programa GRMA - Costa Rica, así como funcionarios de otras entidades locales interesadas, con formación en disciplinas relacionadas con las ciencias de la tierra, ingeniería, matemáticas, física, econometría o análisis financiero/actuarial.

El objetivo principal del curso es proporcionar a los participantes los fundamentos científicos necesarios para comprender y ejecutar la modelación del riesgo, así como interpretar sus resultados. Al finalizar el proceso formativo, los participantes estarán en capacidad de realizar evaluaciones de riesgo ante amenazas naturales utilizando herramientas avanzadas del sistema CAPRA-ROBOT.

El curso asincrónico de capacitación inició formalmente el 18 de marzo de 2025. Tiene una duración aproximada de 24 semanas con una dedicación estimada de 2 horas semanales. No obstante, la duración real dependerá de la dedicación personal al curso. Este curso cubre todas las temáticas de modelación previstas en el proyecto GRMA - Costa Rica, como se detalla en el Informe de Inicio de esta consultoría. Esto incluye actividades de capacitación en amenaza y riesgo sísmico, volcánico y por deslizamientos.

5.1 Participantes en el curso virtual asincrónico

Los participantes que se encuentran inscritos en el curso virtual asincrónico fueron definidos a partir de consultas realizadas por SUGESE, quien llevó a cabo el proceso de convocatoria al curso a nivel institucional. Cada institución, en atención a la solicitud de SUGESE, definió quienes de sus funcionarios o expertos relacionados se incorporarían al curso como participantes.

Actualmente, el curso cuenta con 56 participantes inscritos, provenientes de distintas instituciones vinculadas al proyecto como se relaciona a continuación:

Tabla 4. Relación de número de inscritos por entidad

Entidad	Inscritos
Aseguradora del Itsmo (ADISA) S.A.	1
Aseguradora Sagicor Costa Rica S.A.	1
ASSA Compañía de Seguros	1
Banco Central de Costa Rica (BCCR)	2
Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE)	8
Davivienda Seguros Costa Rica S.A.	1
Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica	5
Futurismo	3
Instituto Meteorológico Nacional (IMN)	3
Instituto Nacional de Seguros	2

Entidad	Inscritos
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica (LANAMME/ECG)	8
MAPFRE Seguros Costa Rica S.A.	2
Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)	3
MNK Seguros	1
Municipalidad de Heredia	5
Seguros LAFISE Costa Rica S.A.	1
Sistema de Banca para el Desarrollo	2
Superintendencia General de Seguros (SUGESE)	7

El curso se desarrolla en 3 módulos principales: Módulo 1 – Fundamentos, Módulo 2 – Componentes de la modelación del riesgo, y Módulo 3 – Aplicaciones avanzadas. Se presenta a continuación el contenido y alcance del Módulo 2 por ser el que contiene las actividades específicas de capacitación en amenaza por deslizamientos, volcanes y sismos.

5.2 Módulo 2 – Componentes de la modelación del riesgo

El Módulo 2 está enfocado en la modelación de amenazas naturales y la evaluación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. En este módulo, cada participante puede seleccionar la amenaza de interés entre las consideradas en el proyecto GRMA. Es decir, el módulo provee material relacionado con la modelación de la amenaza para todos los fenómenos incluidos en el proyecto GRMA.

Dado el alcance de este informe, se presentan de forma resumida el alcance y contenidos de los módulos relacionados con la evaluación de la amenaza por deslizamientos, volcanes y sismos únicamente.

5.2.1 Deslizamientos

Este módulo inicia cubriendo los métodos requeridos para incorporar el cambio climático en la evaluación de riesgos hidrometeorológicos, dado que fenómenos como las lluvias intensas —detonantes clave en la ocurrencia de deslizamientos— se ven significativamente afectados por este fenómeno. El cambio climático se integra como un modificador de los forzamientos meteorológicos, lo que transforma las métricas tradicionales de riesgo en estimaciones de probabilidad imprecisas. Para abordar esta incertidumbre profunda, se introduce la teoría de conjuntos aleatorios, brindando una base matemática sólida que permite considerar de manera rigurosa los efectos del cambio climático en la evaluación del riesgo. Asimismo, se emplean proyecciones climáticas globales hasta el año 2100 para ilustrar el proceso de simulación de variables meteorológicas indexadas a múltiples escenarios futuros.

Posteriormente, se estudiarán los procesos de remoción en masa, la clasificación de los deslizamientos y la evaluación de la propensividad a su ocurrencia. También se introducirá el uso de redes neuronales artificiales como herramienta para la modelación de la susceptibilidad y la amenaza por deslizamientos detonados por lluvias y sismos. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad relacionada con la amenaza por deslizamientos.

Tabla 5. Temario del módulo 2: Deslizamiento

Unidad	Título	Temas
1	Conceptos básicos de Cambio Climático	• Sistema climático terrestre • Balance energético • Circulación general de la atmósfera • Forzamiento radiativo • Emisiones de gases de efecto invernadero • Modelos de circulación global • Proyecciones globales
2	Incorporación del CC en la modelación de amenaza y riesgo	• Downscaling • Simulación estocástica • Regla de escala • Modelo de todas las variaciones
3	Remoción en masa	• Procesos de remoción en masa. • Clasificación de deslizamientos. • Propensividad a la ocurrencia de deslizamientos. • Introducción a las redes neuronales
4	Susceptibilidad a los deslizamientos	• Modelación de la susceptibilidad de laderas
6	Modelación de amenaza por deslizamientos	• Umbrales lluvia-deslizamiento • Deslizamientos detonados por lluvias intensas • Deslizamientos detonados por terremotos

Las sesiones teóricas estarán acompañadas de sesiones *hands-on* donde el estudiante aprenderá el manejo de software especializado para la modelación de la amenaza por deslizamientos, entre los cuales se incluyen:

Drought Pro: es una herramienta de simulación avanzada que permite la modelación estocástica del forzamiento meteorológico, en particular la lluvia, como fenómeno detonante de deslizamientos. El sistema fue inicialmente concebido para la modelación de sequías (de ahí su nombre) pero ha evolucionado a ser un sistema de simulación climática general, el cual por medio de un generador climático estocástico crea múltiples simulaciones de variables meteorológicas (como la precipitación y la temperatura), basándose en las series diarias históricas disponibles en el territorio. Dadas estas capacidades, se emplea en la modelación de múltiples fenómenos distintos, como sequías, inundaciones, deslizamientos o incendios forestales, al permitir la construcción de modelos probabilistas del forzamiento meteorológico.

Landslide Hazard Mapper (LHM): es una herramienta para la evaluación probabilista de la amenaza por deslizamientos. La susceptibilidad a deslizamientos se evalúa mediante un modelo de inteligencia artificial (Red Neuronal Artificial - ANN) de aprendizaje profundo, entrenado para clasificar cada sitio como susceptible o no (en términos de su probabilidad de ser susceptible) en función de sus características intrínsecas. Los factores detonantes se definen como un conjunto de eventos sísmicos o de lluvia, acompañados de umbrales para la aceleración sísmica y la intensidad de lluvia. LHM calcula la probabilidad de exceder dichos umbrales ante la ocurrencia de cada evento detonante, y luego agrega, para cada sitio, la probabilidad total de ocurrencia de deslizamientos.

Los participantes estarán en capacidad de realizar modelaciones probabilistas de amenaza por deslizamientos con fines de estimación del riesgo posteriormente, haciendo uso de estas herramientas, asociadas con la metodología CAPRA empleada en el proyecto GRMA. Estas capacidades están alineadas con los objetivos del Proyecto Operacional 1, orientado al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación del riesgo de desastres en el sector de infraestructura vial.

5.2.2 Volcanes

El módulo presenta las bases conceptuales para la evaluación probabilista de la amenaza volcánica. Se estudiarán aspectos fundamentales de la vulcanología, así como la modelación probabilista de los diferentes productos volcánicos como caída de ceniza, flujos piroclásticos, lahares (o flujos de lodo) y flujos de lava. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad relacionada con la amenaza volcánica.

Tabla 6. Temario del módulo 2: Volcanes

Unidad	Título	Temas
1	Vulcanismo	• Origen y manifestación del vulcanismo • Tipos de volcanes • Estilos eruptivos • Índice de Explosividad Volcánica • Principales productos volcánicos
2	Régimen de colapso de columnas eruptivas	• Magnitud de erupciones • Forzamientos en las columnas eruptivas • Régimen de colapso • Distribución de material boyante y colapsado
3	Modelación de productos volcánicos	• Flujos de lava • Flujos piroclásticos (PDC) • Lahares • Caída de ceniza • proyectiles balísticos
4	Amenaza volcánica	• Modelación probabilista de ocurrencia de erupciones • Periodos de recurrencia vs periodos de retorno • Integración probabilista

Las sesiones teóricas se complementarán con sesiones prácticas tipo *hands-on* donde los estudiantes aprenderán el manejo de software especializado para la modelación de la amenaza volcánica, como:

VHAST (Volcanic Hazard Analysis and Simulation Tool): herramienta de modelación probabilista de amenazas volcánicas que cubre flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de ceniza y lahares. VHAST permite la definición de sitios probables de emisión de productos volcánicos sobre una malla de topografía, desde donde se ejecutan modelos de distribución de productos volcánicos, evento por evento. VHAST incorpora modelos de colapso de columna eruptiva para representar de manera robusta la amenaza asociada a erupciones explosivas de volcanes de tipo vulcaniano o pliniano.

Al finalizar, los participantes estarán en capacidad de realizar modelaciones probabilistas de amenaza volcánica con fines de estimación del riesgo posteriormente, utilizando estas herramientas asociadas con la metodología CAPRA empleada en el proyecto GRMA. Estas capacidades se encuentran en concordancia con los objetivos del Proyecto Operacional 1, orientado al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación del riesgo de desastres en el sector de infraestructura vial.

5.2.3 Sismo

Este módulo presenta en su primera parte las bases conceptuales para la evaluación probabilista de la amenaza sísmica. Se estudian aspectos básicos de sismología, la caracterización del movimiento fuerte, la metodología de evaluación de la amenaza sísmica y la respuesta de los suelos ante un evento sísmico. La Tabla 7 presenta en detalle los temas tratados en cada unidad relacionada con la amenaza sísmica.

Tabla 7. Temario del módulo 2: Sismo

Unidad	Título	Temas
1	Aspectos básicos de sismología	• Tectónica de placas • Fallas geológicas • Modelo de fuente sísmica • Momento sísmico y magnitud • Distribución de la dislocación y liberación del momento sísmico • Ondas sísmicas • Mecanismo focal
2	Movimiento fuerte	• Acelerogramas • Espectro de fuente • Vibraciones aleatorias • Modelos de atenuación • Respuesta estructural
3	Evaluación probabilista de la amenaza sísmica	• Fuentes sismogénicas • Sismicidad • Atenuación • Catálogo estocástico • Integración de la amenaza • Evaluación determinista
4	Efectos de sitio	• Definición de efectos de sitio • Técnicas de estimación • Respuesta 1D elástica • Respuesta 1D no lineal • Efectos de sitio en regiones

Las sesiones teóricas se complementarán con sesiones prácticas tipo *hands-on*, en las que los participantes aprenderán a utilizar software especializado para la modelación de amenaza sísmica, entre los cuales se incluyen:

Strong Motion Analyst (SMA): es un programa para el procesamiento de información sísmológica. Implementa metodologías para el procesamiento de señales sísmicas, análisis de respuesta de sitio, atenuación de movimiento fuerte y procesamiento de catálogos sísmológicos.

R-CRISIS: es el módulo de amenaza sísmica de CAPRA-ROBOT, desarrollado principalmente por Mario Ordaz (UNAM, México). Es una herramienta versátil que permite realizar Análisis Probabilista de Amenaza Sísmica (PSHA), y ha sido usada en proyectos a nivel mundial, incluyendo aplicaciones en la industria nuclear, el sector asegurador, códigos de construcción y microzonificación sísmica.

Los participantes estarán en capacidad de realizar modelaciones probabilistas de amenaza sísmica con el fin de estimar el riesgo posteriormente, haciendo uso de estas herramientas, que están asociadas con la metodología CAPRA empleada en el proyecto GRMA. Estas capacidades están en línea con los objetivos del Proyecto Estratégico, así como con los Proyectos Operacionales 1 y 3, fortaleciendo la integración de herramientas técnicas en la gestión del riesgo de desastres en los sectores de infraestructura vial y turismo. Es importante, también, destacar que, dada la similitud en cuanto al enfoque conceptual de evaluación probabilista de otros modelos, como los mencionados en esta revisión, los participantes tendrán igualmente la posibilidad de comprender como modelos como el RESIS II o el GRAF han permitido evaluar la amenaza sísmica en Costa Rica.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, G. E. (1993). Volcanology and Petrology of Irazú Volcano, Costa Rica (Tesis doctoral, Univ. Kiel).
- Alvarado, G. E. (2011). Los volcanes de Costa Rica. 3ª ed. San José, Costa Rica: EUNED.
- Alvarado, G. E. (2021). Clasificación de la amenaza volcánica en Costa Rica. En CNE (Ed.), *Amenaza volcánica en Costa Rica* (pp. 10-29). San José, Costa Rica: CNE.
- Alvarado, G. E., Soto, G. J., & Fernández, E. (1997). La erupción del volcán Irazú de 1963–1965. *Revista Geológica de América Central*, 20, 5–18.
- Alvarado, G. E., Soto, G. J., & Rojas, W. (2006). Mapa de amenazas volcánicas de Costa Rica. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE).
- Barquero, J., Fernández, E., & Chavarría, M. (2000). Evaluación de la actividad fumarólica del Volcán Irazú. *Revista Geológica de América Central*, 23, 67–78.
- Bosque, D. (2017). MOPT: 'Daños de tormenta Nate en vías son de proporciones titánicas'. *La Nación*.
- Camacho, E., Nishenko, S. P., Preuss, J., Morales, L. D., & Astorga, A. (2021). Limón 1991: Revisión de la sismicidad histórica y campo de deformación cosísmica. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1–20. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/47500>
- Conde, V., Ruiz, G., & Alvarado, G. E. (2019). Actividad reciente del Volcán Turrialba y su impacto en la calidad del aire. *Revista Geológica de América Central*, 60, 11–25.
- Denyer, P., Personius, S., & Arias, M. (1994). Coastal uplift and liquefaction effects from the 1991 Limón earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 1234–1248.
- Duarte, E. (2016). Emplazamiento de ceniza al sur del volcán Turrialba. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Gunther Vahrson, W., & Cartín, N. (2020). Ibídem sobre abanicos laháricos del volcán Irazú.
- Gunther Vahrson, W., & Cartín, N. (2020). Deslizamientos en la cuenca media y superior del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*.
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). (2011). Estudio de amenazas naturales en la Región Central de Costa Rica. Unidad de Geología.
- Lanamme-UCR. (2015). Prevén de inundación de sedimentos en caso de erupción del Turrialba. Universidad de Costa Rica.
- Lanamme-UCR. (2009). Informe de evaluación de daños tras el terremoto de Cinchona. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- Martínez, M., Rojas, W., & Soto, G. (2012). Tipos de erupciones en volcanes activos de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 47, 55–74.

- Monge Sandí, A. L. (2022). Informe de visita al deslizamiento en el km 118+000 (La Hortensia), Ruta Nacional 2. Lanamme-UCR.
- Monge Sandí, A. L. (2009). Impacto del sismo de Cinchona sobre infraestructura vial y respuesta institucional. Universidad de Costa Rica.
- Muñoz Barrantes, J. (2017). Inspección de emergencia de puentes tras la tormenta Nate. Lanamme-UCR.
- Nishenko, S., Camacho, E., Astorga, A., Morales, L. D., & Preuss, J. (2021). The 22 April 1991 Limón, Costa Rica tsunami field survey. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1–16.
- Pacheco, J., Ruiz, G., & Alpízar, W. (2015). Monitoreo y evaluación de emisiones del Volcán Turrialba: actividad eruptiva 2014–2015. CENISA, Universidad de Costa Rica.
- Protti, M., & Schwartz, S. (1994). Stratigraphy and seismicity in the Nicoya Peninsula. *Seismological Research Letters*, 65(4), 305–318.
- Quesada-Román, F. (2015). Deslizamientos e inundaciones en Costa Rica: frecuencia, vulnerabilidad y costo económico. Uniciencia.
- Quesada-Román, A. (2021). Review of the geomorphological effects of the 1991 Limón earthquake. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1–13.
- Reagan, M., Duarte, E., Soto, G., Fernandez, E. (2006). The eruptive history of Turrialba volcano, Costa Rica, and potential hazards from future eruptions. *Geological Society of America Special Papers*. DOI: 10.1130/2006.2412(13)
- Ruiz, G., Conde, V., & Murillo, M. (2017). Impacto socioeconómico de las erupciones del Volcán Turrialba entre 2014 y 2017. *Revista Geológica de América Central*, 56, 35–49.
- Sojo, D. (2018). Geología de la hoja Paraíso (1:10 000). *Revista Geológica de América Central*.

ANEXO 1: DATASET DE MODELOS DE GEOAMENAZAS

Como parte de los productos que componen este entregable, se estableció un sitio web (Drive) para alojar los modelos de amenaza por deslizamientos, volcanes y sismos, disponibles para Costa Rica y que serán usados en la modelación del riesgo en el marco de este proyecto. Este repositorio compila los **entregables 3.1.b, 3.2.b y 3.3.b**, correspondientes a los datos geoespaciales de las amenazas por deslizamientos, volcanes y sismos. A continuación, se provee un listado de los archivos que componen este Dataset.

El enlace para acceder al Dataset es el siguiente:

https://1drv.ms/f/c/3cbf1924fdfe9005/Eg7zJGLtYoBDvqQReY3N2qkBu48YXkE5o4VE_Hj7QJLHA?e=y7gZNV

Amenaza por deslizamientos

Detonados por Lluvia

En este directorio se encuentran los archivos que corresponden a las mallas de susceptibilidad a los deslizamientos detonados por lluvia que cubren todo el territorio del país. La resolución espacial es de 90 metros.

Archivo	Formato
n05w085_sus	.grd
n05w090_sus	.grd
n10w085_sus	.grd
n10w090_sus	.grd

Los archivos con extensión .grd son archivos de datos ráster generados y utilizados por el software Surfer, desarrollado por Golden Software. Estos archivos contienen una malla regular de valores numéricos que representan una variable continua en el espacio, usualmente utilizada para modelar superficies topográficas, distribuciones geofísicas o resultados de interpolaciones espaciales.

Detonados por Sismo

En este directorio se encuentran los archivos que corresponden a las mallas de susceptibilidad a los deslizamientos detonados por sismo que cubren todo el territorio del país. La resolución espacial es de 90 metros.

Archivo	Formato
n05w085_sus	.grd
n05w090_sus	.grd
n10w085_sus	.grd
n10w090_sus	.grd

Amenaza volcánica

Proyectos VHAST

En este directorio se encuentran los archivos relacionados a continuación.

Archivo	Formato
IRAZÚ	.vpr
TURRIALBA	.vpr

Estos archivos contienen los parámetros del modelo probabilista de amenaza volcánica, en el formato de proyecto del software VHAAT, que es el software de modelación de amenaza volcánica de CAPRA-ROBOT. Los archivos .vpr almacenan esta información en formato XML, incluyendo los datos de recurrencia de las erupciones para una medida de magnitud seleccionada (en este caso el VEI⁶), la localización de los puntos de emisión de material, y los parámetros que definen la ejecución de los modelos de distribución de productos volcánicos, incluyendo parámetros de control que se definen como variables aleatorias.

Topografía

En este directorio se encuentran los archivos relacionados a continuación.

Archivo	Formato
AP_26652_FBS_F0150_RT1.dem	.tif
AP_26900_FBS_F0160_RT1.dem	.tif
AP_26900_FBS_F0170_RT1.dem	.tif
AP_26900_FBS_F0180_RT1.dem	.tif

Estas mallas corresponden a fragmentos geoespaciales del Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir de datos del sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), a bordo del satélite japonés ALOS (Advanced Land Observing Satellite). Este MDE tiene una resolución espacial de 12.5 metros y las mallas contienen valores de elevación expresados en metros sobre el nivel del mar.

Cada archivo en formato .tif (GeoTIFF) representa una malla o tesela del modelo, que cubre un área geográfica determinada. En este caso, las cuatro mallas disponibles cubren parte del territorio de Costa Rica, específicamente la región por donde atraviesa la carretera RN2, así como el área donde se localizan los volcanes Turrialba e Irazú.

Amenaza sísmica

En este directorio se encuentra el archivo relacionado a continuación.

Archivo	Formato
ASLAC2_CRI_Parametrico	.AME

El archivo .AME es un formato que contiene un catálogo sintético de terremotos, generado para representar de manera probabilista la amenaza sísmica de Costa Rica calculada en el modelo ASLAC. Este catálogo está conformado por un conjunto de 27,900 eventos sísmicos simulados, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos (MECE), lo que permite una representación completa y no redundante del fenómeno. Cada evento incluye información sobre su localización, magnitud, frecuencia

⁶ Índice de Explosividad Volcánica

anual de ocurrencia y parámetros que permiten calcular los dos primeros momentos estadísticos (media y desviación estándar) de las aceleraciones espectrales esperadas.

Este tipo de archivo es fundamental para la modelación probabilista del riesgo sísmico, ya que permite evaluar la variabilidad y recurrencia de posibles escenarios sísmicos. Los archivos .AME son compatibles con diversas herramientas de análisis tanto de código abierto como licenciadas, incluyendo aquellas integradas en la plataforma CAPRA ROBOT.