

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**CÁLCULO DE ACELERACIONES SÍSMICAS EN COSTA RICA AL EMPLEAR
UN ENFOQUE DE RIESGO UNIFORME**

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado de Ingeniería Civil para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras

Presenta:

Sergio Álvarez González

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2025

Dedicatoria

*A Dios,
por darme la fortaleza física y mental necesaria alcanzar
este punto en mi carrera profesional.
Sin su guía esta investigación no habría sido posible.
Su luz me ha guiado en cada paso,
recordándome que todo lo que logro
es un reflejo de su amor y propósito en mí.
Este trabajo representa una muestra más de su gracia.*

***"Dios ha creado todo y todo existe por Él y para Él.
¡A Dios sea el honor por toda la eternidad!
Romanos 11:36***

*Cada paso en el conocimiento es, para mí, un paso
más hacia la comprensión de Su propósito.*

*A Él encomiendo este logro,
con gratitud y reverencia,
reconociendo que todo lo bueno proviene de Su mano.*

Agradecimientos

A mis padres

Por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por su apoyo incondicional, por sus consejos sabios, por las enseñanzas transmitidas con amor y por los valores que me han inculcado desde pequeño, los cuales han sido la base de mi formación como persona y profesional. Pero, sobre todo, gracias por el amor que siempre me han demostrado.

A mis hermanos y hermana

Por estar presentes en cada etapa de mi vida con palabras de aliento. Su compañía, ejemplo y afecto han sido un motor constante que me ha impulsado a seguir adelante.

A mi director de proyecto, el Dr. Ing. Diego Hidalgo Leiva

Por la dedicación, disposición, conocimiento y guía que me brindó para llevar a cabo la realización de este trabajo. Su vasta experiencia y motivación fueron fundamentales para poder alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo con éxito. Le agradezco sinceramente su apoyo constante, paciencia y confianza depositada en mí.

A mis asesores, el Dr. Víctor Schmidt Díaz y el Dr. Sergio Lobo Aguilar

Por la disposición y aportes brindados durante la elaboración de este trabajo. Asimismo, agradezco profundamente la formación que me han brindado a lo largo de mis estudios de posgrado. Ambos son profesores que admiro mucho, tanto por su calidad profesional como su forma de enseñar.

A mis amigos

Por la amistad sincera y apoyo brindado a lo largo de este camino. Su compañía hizo de este proceso una experiencia más enriquecedora, divertida y llevadera. Gracias por estar siempre ahí.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras.

Dr. Andrés González Ureña
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado**

Dr. Diego Hidalgo Leiva
Director del Tesis

Dr. Víctor Schmidt Diaz
Asesor

Dr. Sergio Lobo Aguilar
Asesor

Dr. María José Rodríguez Roblero
**Representante del
Programa de Posgrado en Ingeniería Civil**

Ing. Sergio Gabriel Álvarez González
Sustentante

Tabla de contenidos

Resumen	ix
Abstract	x
Lista de figuras	xi
Lista de cuadros.....	xvi
Lista de abreviaturas	xviii
Simbología	xix
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes y marco teórico	1
1.1.1. Tectónica de placas en América Central y Costa Rica	1
1.1.2. Amenaza sísmica	3
1.1.3. Estudios de amenaza sísmica en Costa Rica	5
1.1.4. Riesgo sísmico.....	14
1.1.5. Mapas de amenaza sísmica versus mapas de riesgo sísmico.....	16
1.2. Justificación.....	21
1.3. Objetivos.....	24
1.3.1. Objetivo general.....	24
1.3.2. Objetivos específicos.....	24
1.4. Alcance	25
1.5. Limitaciones	26
1.6. Metodología.....	27
1.6.1. Investigación y revisión bibliográfica	28
1.6.2. Recopilación de información de amenaza sísmica en Costa Rica.....	28
1.6.3. Desarrollo de código de programación.....	29
1.6.4. Cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme y coeficientes de riesgo	29

1.6.5.	Generación de mapas en software GIS	41
1.6.6.	Análisis de sensibilidad.....	41
1.6.7.	Discusión de resultados.....	42
2.	Resultados y discusión	43
2.1.	Aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo y coeficientes de riesgo	43
2.2.	Análisis de sensibilidad de parámetros de entrada en la metodología.....	63
2.2.1.	Desviación estándar (β)	63
2.2.2.	Probabilidad de colapso	69
2.3.	Aspectos a tomar en cuenta si se considerara la implementación de aceleraciones RTGM en el CSCR	71
3.	Conclusiones y recomendaciones	74
3.1.1.	Sobre la metodología de cálculo.....	74
3.1.2.	Sobre los mapas de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo.....	75
3.1.3.	Sobre los mapas de coeficientes de riesgo	75
3.1.4.	Sobre la razón de aceleraciones orientadas al riesgo para un período de retorno de 2475 años y 475 años.....	76
3.1.5.	Sobre el análisis de sensibilidad	77
3.1.6.	Sobre los aspectos a tomar en cuenta si se considerara la implementación de aceleraciones RTGM en el CSCR.....	78
3.2.	Recomendaciones	79
4.	Referencias bibliográficas	81
5.	Anexos	89
5.1.	Anexo A: Código de MATLAB de cálculo de aceleraciones orientadas al riesgo sísmico para un sitio de interés con gráficas incluidas	90
5.2.	Anexo B: Validación de resultados obtenidos a través del código desarrollado con MATLAB.....	99

5.3. Anexo C: Código de MATLAB de cálculo de aceleraciones orientadas al riesgo sísmico para un conjunto de sitios.....	101
5.4. Anexo D: Código de PYTHON para generación de mapas de aceleraciones sísmicas y coeficientes de riesgo de manera automatizada	108

Resumen

En Costa Rica, el diseño sísmico de estructuras se fundamenta actualmente en un enfoque de amenaza sísmica uniforme, según lo establece el CSCR 2010/14 [1]. Este enfoque utiliza aceleraciones correspondientes a un período de retorno de 475 años, también conocidas como aceleraciones orientadas hacia la amenaza uniforme (UHGM), bajo el supuesto de que todas las estructuras diseñadas con estas aceleraciones tendrán una probabilidad uniforme de colapso. Sin embargo, dicha premisa desconoce la variabilidad en la capacidad estructural y en las características propias del movimiento sísmico, lo que puede generar niveles de riesgo desiguales entre regiones del país. Como alternativa, esta tesis propone la aplicación del enfoque de riesgo uniforme, el cual busca establecer aceleraciones sísmicas orientadas a proporcionar un nivel constante de riesgo (RTGM). Se implementó la metodología propuesta por Luco et al. [2] utilizando el estudio de amenaza sísmica más reciente de Costa Rica [3]. Para ello, se desarrolló un código en MATLAB que permitió calcular aceleraciones orientadas al riesgo (RTGM) y coeficientes de ajuste (RC) en 10 541 sitios del país. Los resultados muestran diferencias significativas entre ambos enfoques, con razones entre RTGM y UHGM que oscilan entre 0,89 y 1,83. Asimismo, el análisis de sensibilidad demostró que los resultados son altamente dependientes de los parámetros de entrada, lo cual resalta la necesidad de establecer criterios nacionales para su aplicación. Finalmente, se discuten los principales cambios que serían necesarios en el Código Sísmico de Costa Rica para adoptar aceleraciones RTGM. Esta tesis representa un aporte inicial hacia la discusión de métodos alternativos para estimar la demanda sísmica, especialmente aquellos orientados hacia el riesgo.

Abstract

In Costa Rica, the seismic design of structures is currently based on a uniform seismic hazard approach, as established in the CSCR 2010/14 [1]. This approach uses accelerations corresponding to a return period of 475 years—also known as Uniform Hazard Ground Motions (UHGM)—under the assumption that all structures designed with these accelerations will have a uniform probability of collapse. However, this assumption disregards the inherent variability in structural capacity and ground motion characteristics, which may result in unequal levels of seismic risk across different regions of the country. As an alternative, this thesis proposes the application of the risk-targeted approach, which aims to define seismic accelerations that provide a consistent level of structural risk (RTGM). The methodology proposed by Luco et al. [2] was implemented using the most recent seismic hazard study for Costa Rica [3]. A MATLAB code was developed to calculate risk-targeted ground motions (RTGM) and corresponding adjustment coefficients (RC) for 10,541 sites across the country. The results reveal significant differences between both approaches, with RTGM-to-UHGM ratios ranging from 0.89 to 1.83. Additionally, the sensitivity analysis showed that the results are highly dependent on input parameters, highlighting the need to establish national criteria for their appropriate application. Finally, the main adjustments required in the Costa Rican Seismic Code to incorporate RTGM are discussed. This thesis represents an initial contribution to the discussion of alternative methods for estimating seismic demand, particularly those oriented toward structural risk.

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Mapa de América Central que muestra los principales elementos tectónicos y placas que interactúan. Los límites de las placas están marcados con líneas negras gruesas, las fronteras nacionales con líneas grises oscuras y el territorio costarricense está delimitado con línea roja. Los triángulos amarillos indican los volcanes del Holoceno, las estrellas blancas marcan las capitales y ciudades de interés, y los vectores negros representan el movimiento de las placas en relación con la Placa del Caribe. Adaptado de [1].....	1
Figura 1.2. Contexto tectónico de Costa Rica y estaciones de la Red Sismológica Nacional (RSN). La región contenida dentro de las líneas punteadas representa el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica Central (CDCCR). La línea punteada representa el límite noreste simplificado del Bloque Antearco Centroamericano a lo largo de las Fallas del Arco Volcánico (FAV). Adaptado de [2].	2
Figura 1.3. Curvas de amenaza sísmica para la ciudad de San José. Se emplean 13 periodos de oscilación que varían desde PGA hasta los 3.0 s. Adaptada de [5].....	4
Figura 1.4. Zonificación sísmica: a) Zonas de placa superior y PFZ. b) Zonas interplaca. c) Zonas intraslab. d) Diagrama esquemático de las zonas sísmicas. Adaptada de [2].....	8
Figura 1.5. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 475 años y para PGA. Tomada de [5].....	10
Figura 1.6. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 2475 años y para PGA. Tomada de [5].....	11
Figura 1.7. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 475 años y para un período de oscilación de 0,2 s. Tomada de [5].	11
Figura 1.8. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 2475 años y para un período de oscilación de 0,2 s. Tomada de [5].	12
Figura 1.9. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 475 años y para un período de oscilación de 1,0 s. Tomada de [5].	12
Figura 1.10. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 2475 años y para un período de oscilación de 1,0 s. Tomada de [5].	13
Figura 1.11. Ejemplo de curvas fragilidad. Adaptada de [20].	16

Figura 1.12. Curvas de amenaza sísmica para la aceleración pico del suelo (PGA) en las ciudades de Quepos (Puntarenas), Damasco (Limón) y Los Chiles (Alajuela), donde se observa que, para un mismo período de retorno, la aceleración es aproximadamente igual.17

Figura 1.13. Probabilidad de colapso en 50 años para la aceleración pico del suelo (PGA) de una estructura genérica, correspondiente a un período de retorno de 2475 años, en las ciudades de Quepos (Puntarenas), Damasco (Limón) y Los Chiles (Alajuela). Se observa que las probabilidades de colapso difieren entre sitios, lo que refleja la influencia de la forma de la curva de amenaza sísmica en estimación del riesgo de colapso.....18

Figura 1.14. Metodología general seguida para el desarrollo de la investigación.27

Figura 1.15. Ejemplo de curva de amenaza sísmica para PGA en términos de frecuencia anual de excedencia.31

Figura 1.16. Definición de valor de aceleración orientado hacia la amenaza uniforme para un período de retorno de 2475 años para una curva de amenaza sísmica PGA.32

Figura 1.17. Ejemplo de curva de fragilidad acumulada elaborada.....33

Figura 1.18. Ejemplo de derivada de la curva de fragilidad (curva de densidad de probabilidades de colapso).....34

Figura 1.19. Ejemplo de multiplicación punto a punto de la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad (densidad de frecuencia de colapso anual de una estructura genérica).....35

Figura 1.20. Ejemplo de integral acumulativa de la multiplicación punto a punto de la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad (“integral de riesgo”).35

Figura 1.21. Ejemplo de comparación de la probabilidad de colapso acumulada contra la probabilidad de colapso aceptable para la primera iteración.37

Figura 1.22. Ejemplo de comparación de la probabilidad de colapso acumulada contra la probabilidad de colapso aceptable para la segunda iteración.....38

Figura 1.23. Ejemplo de comparación de la probabilidad de colapso acumulada contra la probabilidad de colapso aceptable para la tercera iteración.....39

Figura 1.24. Resumen de metodología de cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) y coeficientes de riesgo (RC).40

Capítulo 2

Figura 2.1. Mapa de aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de una aceleración con periodo de retorno de 475 años.	43
Figura 2.2. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 475 años.	45
Figura 2.3. Mapa de aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 2475 años.	47
Figura 2.4. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 2475 años.	48
Figura 2.5. Mapa de aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($S_{a\ 0,2\ s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 475 años.	50
Figura 2.6. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($S_{a\ 0,2\ s}$) ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 475 años.	51
Figura 2.7. Mapa de aceleraciones sísmicas para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($S_{a\ 0,2\ s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 2475 años.	52
Figura 2.8. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($S_{a\ 0,2\ s}$) ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 2475 años.	53
Figura 2.9. Mapa de aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($S_{a\ 1,0\ s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 475 años.	54
Figura 2.10. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($S_{a\ 1,0\ s}$) ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 475 años.	55
Figura 2.11. Mapa de aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($S_{a\ 1,0\ s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 2475 años.	56

Figura 2.12. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 2475 años.	57
Figura 2.13. Mapa de las razones de las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) ajustadas para períodos de retorno de 2475 y 475 años.	60
Figura 2.14. Mapa de las razones de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) ajustadas para períodos de retorno de 2475 y 475 años.	61
Figura 2.15. Mapa de las razones de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) ajustadas para períodos de retorno de 2475 y 475 años.	62
Figura 2.16. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, con $\beta=0.4, 0.6$ y 0.8.	63
Figura 2.17. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, con $\beta=0.4, 0.6$ y 0.8.	64
Figura 2.18. Variación β con parámetros normativos para ajuste de aceleraciones asociadas a un período de retorno de 475 años: (a) Curva de amenaza sísmica, (b) Curva de fragilidad acumulada, (c) Derivada de la curva de fragilidad y (d) Integral acumulada del producto entre la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad.	66
Figura 2.19. Variación β con parámetros normativos para ajuste de aceleraciones asociadas a un período de retorno de 475 años: (a) Curva de amenaza sísmica, (b) Curva de fragilidad acumulada, (c) Derivada de la curva de fragilidad y (d) Integral acumulada del producto entre la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad.	67
Figura 2.18. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, con $P(c gm) = 0.001 \%, 0.01 \%$ y 0.1%	69
Figura 2.19. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, con $P(c gm) = 5 \%, 10 \%$ y 15%	69

Capítulo 5

Figura 5.1. Ubicación de los cuatro sitios comparados para validar el funcionamiento correcto del código de programación desarrollado en MATLAB.....99

Lista de cuadros

Capítulo 1

Cuadro 1.1. Sismos importantes recientes en Costa Rica, y víctimas humanas y daños experimentados. Adaptado de [32].....	21
Cuadro 1.2. Probabilidad de excedencia (PE) y frecuencia anual de excedencia (λ) para cada período de retorno (TR) considerado.....	31
Cuadro 1.3. Probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño del [P(c gm)] para cada período de retorno (TR) de referencia.	32
Cuadro 1.4. Probabilidad de colapso aceptable (PCT) para cada período de retorno (TR) de referencia.	36
Cuadro 1.5. Parámetros de entrada utilizados en este trabajo para cada período de retorno (TR).....	37
Cuadro 1.6. Parámetros de entrada utilizados en el análisis de sensibilidad.	42

Capítulo 2

Cuadro 2.1. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de una aceleración con periodo de retorno de 475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).....	46
Cuadro 2.2. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de una aceleración con periodo de retorno de 2475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).....	49
Cuadro 2.3. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de una aceleración con periodo de retorno de 475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).....	52
Cuadro 2.4. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de una aceleración con periodo de retorno de 2475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).....	54

Cuadro 2.5. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de una aceleración con periodo de retorno de 475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).....56

Cuadro 2.6. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de una aceleración con periodo de retorno de 2475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).....58

Cuadro 2.7. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones sísmicas orientados al riesgo (RTGM) para Costa Rica, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).
.....58

Cuadro 2.8. Cambio relativo del coeficiente de riesgo (RC) por aumento porcentual del parámetro β al ajustar aceleraciones correspondientes a 475 años y 2475 año.68

Cuadro 2.9. Cambio relativo del coeficiente de riesgo (RC) por aumento porcentual del parámetro $P(c|gm)$ al ajustar aceleraciones correspondientes a 475 años y 2475 año.70

Capítulo 5

Cuadro 5.1. Diferencias porcentuales obtenidas entre aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo calculadas con el código desarrollado en MATLAB y con la calculadora web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).....100

Lista de abreviaturas

- ASCE – Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles
- ASZ – Zona de Suturas del Atrato
- ATC – Consejo de Tecnología Aplicada
- BT – Bocas del Toro
- CAFA – Bloque de Antearco de América Central
- CAVF – Frente Volcánico de América Central
- CDCCR – Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica
- CDNP – Cinturón Deformado del Norte de Panamá
- CG – Ciudad de Guatemala
- CHC – Bloque Chocó
- CHT – Bloque Chorotega
- CSCR – Código Sísmico de Costa Rica
- EPDB – Cinturón Deformado del Este de Panamá
- ESFZ – Zona de Falla de El Salvador
- F – Monte sub-marino Fisher
- GF – Falla Guayape
- GMPE – Modelos de atenuación sísmica
- HD – Depresión de Honduras
- IBC – Código Internacional de Construcción
- INETER – Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
- ISC – Centro Sismológico Internacional
- JCF – Falla Jocotán-Chamelecón
- JF – Falla Jalpatagua
- LIS – Laboratorio de Ingeniería Sísmica
- MA – Managua
- NAB – Bloque Norandino
- ND – Depresión de Nicaragua
- PA – Ciudad de Panamá
- PE – Probabilidad anual de excedencia

- PFZ – Zona de Fractura de Panamá
- PGA – Aceleración pico en el suelo
- PL – Puerto Limón (Costa Rica)
- PMFS – Sistema de Fallas Polochic-Motagua
- PQ – Plateau de Quepos
- PTJ – Unión Triple de Panamá
- RSN – Red Sismológica Nacional
- RTGM – Movimiento del suelo orientado hacia el riesgo
- Sa – Aceleraciones espectrales
- SAT – Fosa de Sudamérica
- SF – Falla Swan
- SJ – San José
- SPDB – Cinturón Deformado del Sur de Panamá
- SS – San Salvador
- TE – Tegucigalpa
- TR – Período de retorno
- UHGM – Movimiento del suelo orientado hacia la amenaza
- UPA – Universidad de Panamá
- RC – Coeficiente de riesgo

Simbología

- β – Desviación estándar
- $P(C|gm)$ – Probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño
- P_C^T – Probabilidad de colapso aceptable
- P_c – Probabilidad de colapso en 50 años
- P – Probabilidad de colapso anual
- t – Ventana de tiempo
- λ – Frecuencia anual de excedencia

1. Introducción

1.1. Antecedentes y marco teórico

1.1.1. Tectónica de placas en América Central y Costa Rica

América Central se encuentra ubicada mayoritariamente sobre la placa tectónica del Caribe y la Microplaca de Panamá, aunque una porción del norte de Guatemala está ubicada sobre la placa de Norteamérica (ver Figura 1.1). La placa del Caribe se encuentra rodeada por la placa Cocos, la placa de Nazca, la placa de Norteamérica y la placa de Sudamérica. La compleja deformación de la corteza en América Central es el resultado del movimiento relativo que existe entre estas placas y microplacas [4]. Asimismo, Costa Rica como parte de América Central, está influenciada por la dinámica tectónica de estas placas mencionadas.

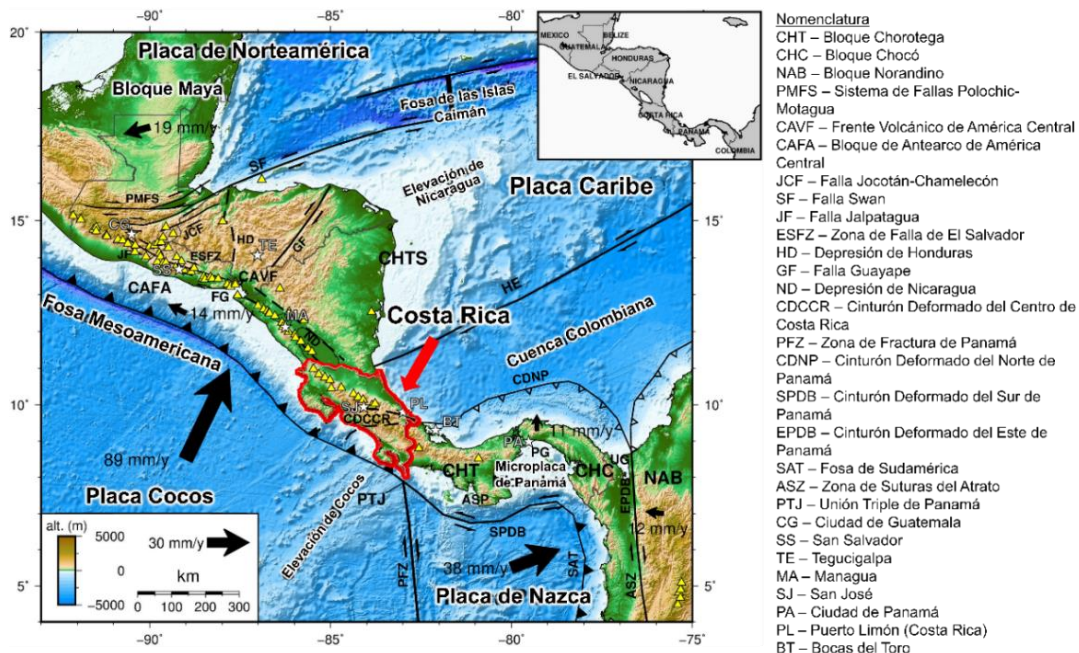


Figura 1.1. Mapa de América Central que muestra los principales elementos tectónicos y placas que interactúan. Los límites de las placas están marcados con líneas negras gruesas, las fronteras nacionales con líneas grises oscuras y el territorio costarricense está delimitado con línea roja. Los triángulos amarillos indican los volcanes del Holoceno, las estrellas blancas marcan las capitales y ciudades de interés, y los vectores negros representan el movimiento de las placas en relación con la Placa del Caribe.

Adaptado de [4].

La Figura 1.2 muestra con mayor detalle los principales elementos tectónicos y placas que presentan influencia en el territorio costarricense y que explican su contexto tectónico. Como se puede observar en la Figura 1.2, Costa Rica se encuentra en una región de subducción y cerca del punto de unión (también llamado "punto triple") de las placas Cocos, Caribe, Nazca y la microplaca de Panamá, lo que explica la importante actividad sísmica que se experimenta en el país. La sismicidad también es significativa a lo largo de la Fosa Mesoamericana (el cual es el límite entre la placa Caribe y Cocos) y en el noreste, donde la placa de Cocos se subduce debajo de la placa Caribe y la microplaca de Panamá a una velocidad promedio de 89 mm/año. También se presenta una alta actividad sísmica en la Zona de Fractura de Panamá (PFZ), en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) y en el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). Según Hidalgo Leiva, et al. (2021), la mayoría de los sismos que se experimentan en Costa Rica se asocian con la interacción entre estas placas y las fallas corticales dentro de la placa Caribe.

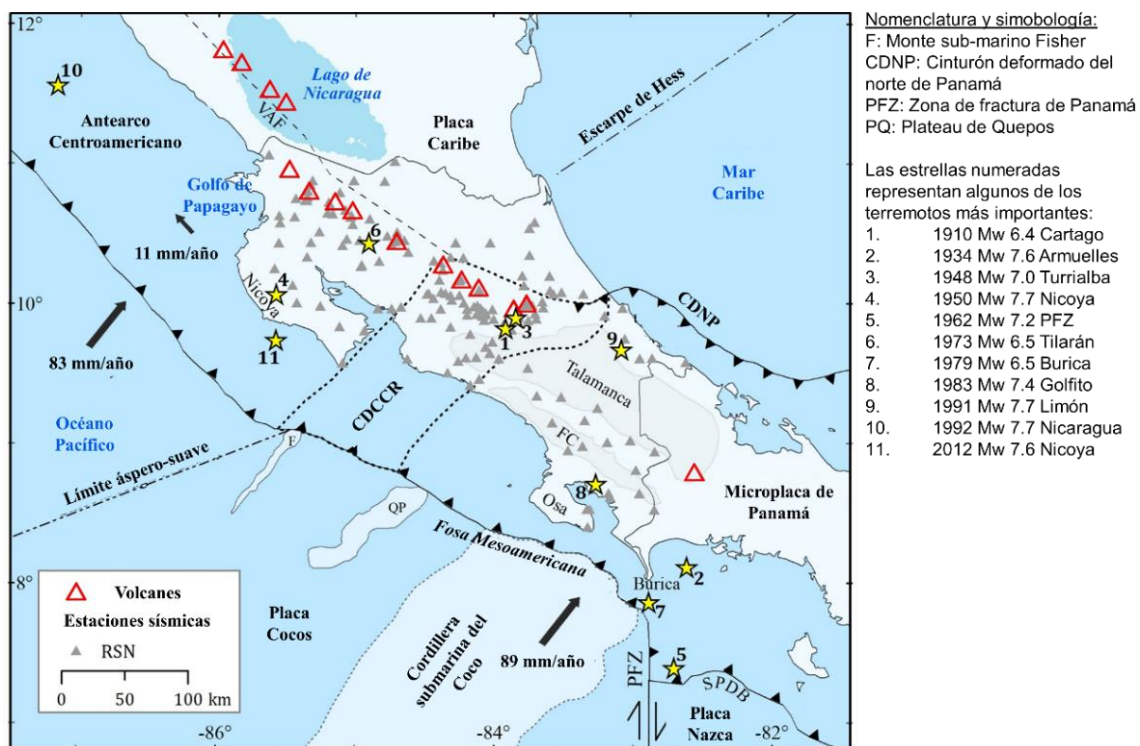


Figura 1.2. Contexto tectónico de Costa Rica y estaciones de la Red Sismológica Nacional (RSN). La región contenida dentro de las líneas punteadas representa el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica Central (CDCCR). La línea punteada representa el límite noreste simplificado del Bloque Antearco Centroamericano a lo largo de las Fallas del Arco Volcánico (FAV). Adaptado de [5].

1.1.2. Amenaza sísmica

Dado el contexto tectónico y la naturaleza sísmica previamente descritos, Costa Rica ha sido objeto de numerosos estudios relacionados con la amenaza sísmica. Antes de mencionar algunos de los estudios realizados en el país, se procederá a explicar algunos conceptos clave.

La Organización Panamericana de la Salud define la amenaza como “...*la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.*” [6]. A partir de lo anterior, el concepto de amenaza sísmica se puede entender como la probabilidad de ocurrencia o excedencia de un movimiento sísmico de determinadas características, que puede esperarse en una región o sitio específico dentro de un período de tiempo definido [7].

Los estudios de amenaza sísmica consideran un conjunto de variables independientes, como lo son la distancia, la magnitud y el tipo de suelo para predecir el comportamiento de otras variables dependientes en la superficie que son relevantes para el diseño o evaluación del desempeño de estructuras [3], como por ejemplo la aceleración.

Para poder llevar a cabo un estudio de amenaza sísmica, se necesita al menos 3 elementos básicos: una zonificación sísmica, un catálogo sísmico adecuado para la zona de estudio y modelos de atenuación sísmica que se ajusten al entorno sismo-tectónico de la región de estudio [3].

Los resultados del cálculo de la amenaza sísmica para una región o sitio específico pueden expresarse a través de curvas de amenaza sísmica (ver Inciso 1.1.2.1) o mapas de amenaza sísmica (ver Inciso 1.1.2.2).

1.1.2.1. Curvas de amenaza sísmica

Una curva de amenaza sísmica indica la probabilidad de excedencia de diferentes valores de un parámetro o medida de intensidad sísmica seleccionada, en una ventana de tiempo definida. Por ejemplo, la Figura 1.3 muestra curvas de amenaza sísmica obtenidas para la ciudad de San José, a través de las cuales, se relaciona el valor de la aceleración pico en el suelo (conocido como PGA) con un nivel de probabilidad de excedencia anual, así como para

otras aceleraciones máximas espectrales (simbolizadas como S_a en la Figura 1.3), correspondientes a diferentes períodos de oscilación, que para este caso en particular son: 0.1 s, 0.2 s, 0.3 s, 0.4 s, 0.5, 0.6 s, 0.7 s, 0,8 s, 0.9 s, 1.0 s. 1.5 s, 2.0. s y 3.0 s.

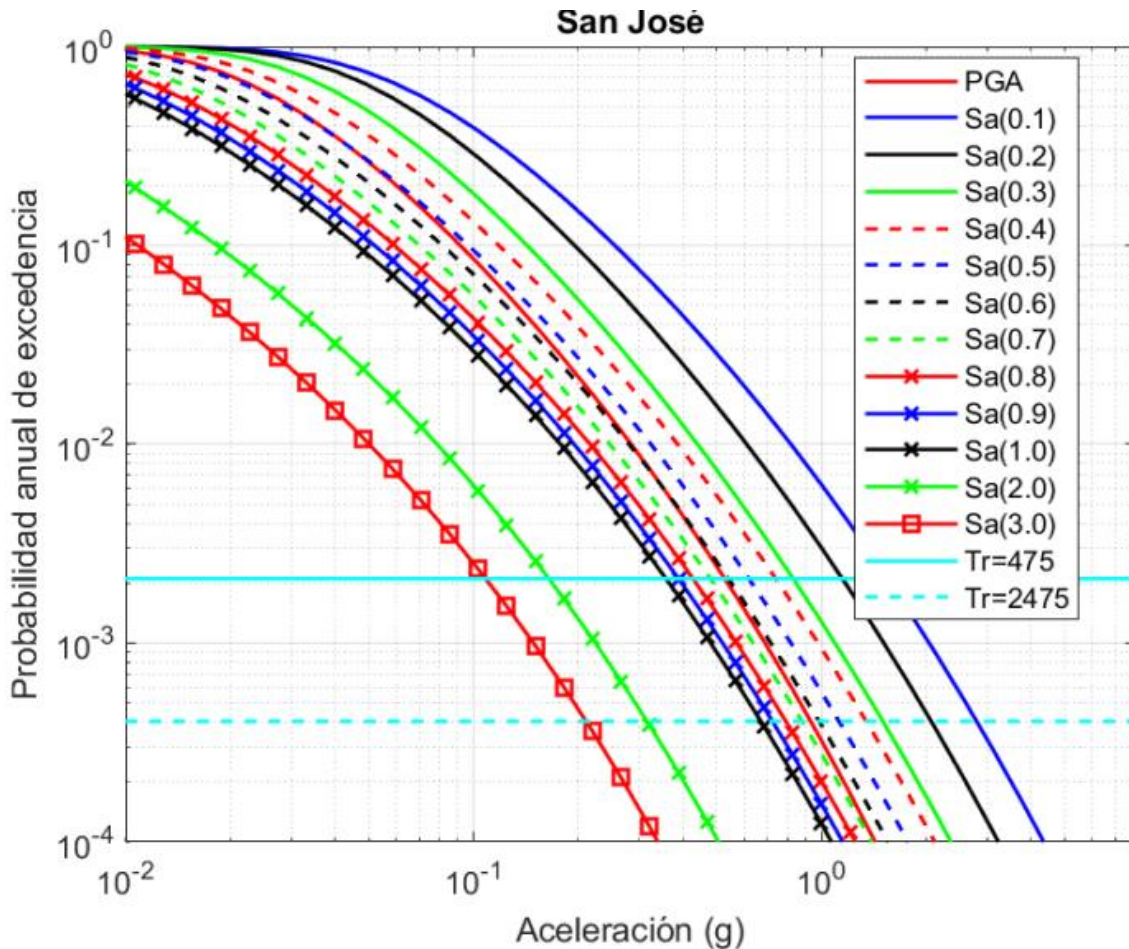


Figura 1.3. Curvas de amenaza sísmica para la ciudad de San José. Se emplean 13 periodos de oscilación que varían desde PGA hasta los 3.0 s. Adaptada de [3].

La metodología para construir una curva de amenaza sísmica no es parte del alcance de este trabajo y por lo tanto no se abordan, sin embargo, en referencias como el estudio "Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia" [8] y otras similares, se explica con detalle el proceso para construirlas.

1.1.2.2. Mapas de amenaza sísmica

Los mapas de amenaza sísmica representan los valores de las aceleraciones máximas espectrales (S_a) o las aceleraciones pico del terreno (PGA) en diferentes regiones dentro de un territorio o región para una probabilidad de excedencia definida en una ventana de tiempo determinada o un periodo de retorno, que resultan equivalentes. El proceso para construir un mapa de amenaza sísmica consiste en los siguientes pasos [8]:

1. Establecer un conjunto de sitios de análisis, distribuidos dentro de un área o territorio de interés.
2. Seleccionar una probabilidad anual de excedencia (PE) y un periodo de oscilación.
3. Construir para cada sitio de análisis del conjunto de sitios, las curvas de amenaza sísmica correspondientes al período de oscilación definido en el paso anterior.
4. Consultar para cada sitio de análisis, los valores de aceleración correspondientes a la probabilidad de excedencia (PE) establecida en el segundo paso.
5. Construir el mapa a través de los valores de aceleración obtenidos para cada sitio del conjunto de sitios.

En el siguiente apartado se muestran mapas de amenaza sísmica obtenidos para Costa Rica en un estudio de amenaza sísmica reciente [3].

1.1.3. Estudios de amenaza sísmica en Costa Rica

Según se indicó anteriormente, debido a su naturaleza sísmica, Costa Rica ha sido objeto de numerosos estudios de amenaza sísmica. El primer estudio de amenaza sísmica realizado para Costa Rica fue desarrollado en 1977 por el Centro de Ingeniería Sísmica Jhon A. Blume de la Universidad de Stanford [9]. Desde ese entonces, se han llevado a cabo varios estudios, destacándose entre ellos los proyectos Resis I [10] y Resis II [11], con una actualización publicada en 2012 [12]. Parte de estos estudios han sido utilizados por la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico para actualizar la demanda sísmica en el diseño de estructuras en Costa Rica [3], quienes han desarrollado sus propios estudios de amenaza sísmica para la definición de la amenaza presentada en las normas de diseño.

Asimismo, en los últimos años se ha realizado una inversión significativa para poder aumentar la cantidad de equipos utilizados en la Red Sismológica Nacional [13], y en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica [14]. Esta densificación de estaciones sísmicas por parte de la Red Sismológica Nacional se puede observar en la Figura 1.2. Además, en el 2017 se publicó una nueva definición de zonificación sísmica para América Central [4], lo que ha permitido actualizar los resultados de estudios de amenaza sísmica publicados anteriormente.

Por otro lado, recientemente, se llevó a cabo un proyecto de investigación titulado "*Actualización de la Amenaza Sísmica para Costa Rica*" [3], desarrollado entre los años 2019 y 2021 a través del Espacio Universitario de Estudios Avanzados (UCREA) de la Universidad de Costa Rica.

Dicho proyecto de investigación se basó en la zonificación y nomenclatura establecida por Alvarado et al. [4], quienes clasificaron la región centroamericana en 58 zonas sísmicas, de las cuales 29 se encuentran en Costa Rica. En este país, se identifican tres regiones principales de sismicidad: fallamiento cortical en la placa superior, interplacas (subducción superficial) e intraslab (subducción profunda). De acuerdo con la nomenclatura propuesta, cada abreviatura comienza con la letra C, N o P, que corresponden a la letra inicial de Costa Rica, Nicaragua y Panamá, respectivamente. A esta primera letra le sigue un número que indica las zonas de fallamiento cortical, luego las letras "si" seguido de un número para las zonas interplacas, y las letras "sp" con otro número para las zonas intraslab (ver Figura 1.4) [3].

La zonificación sísmica de Alvarado et al. [4] identifica 19 zonas de fallamiento cortical en la placa superior, donde la sismicidad superficial (a menos de 35 km de profundidad) se genera por la deformación interna e interacción entre las placas del Caribe y Panamá, así como con otras placas y bloques vecinos. Estas zonas se distribuyen principalmente en el antearco del Pacífico (identificadas como C1-N2, C2, C3, C4 y N4 en la Figura 1.4.a), donde las profundidades de sismicidad son menores de 10 km, y en el arco magmático (N6-7, N8, C5, C6, C7 y P5), así como en el lago Nicaragua y el trasarco del Caribe (N9-10, N12, N13-14, C9 y C10) con profundidades de sismicidad menores de 35 km. Las sismicidades en estas áreas se concentran en las fallas del arco volcánico (FAV), el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR) y el Escarpe de Hess. Además, otras regiones de alta

deformación de la corteza, como el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) (C8-P10) y la Zona de Fractura de Panamá (PFZ) (P1), son catalogadas como zonas de placa superior (ver Figura 1.3.a) [3].

En la zona interplacas, se identifican 5 segmentos que describen esta región sísmogénica a profundidades de 10 km a 40 km [4]. Estos segmentos se clasifican según la sísmicidad histórica y las morfologías del fondo marino de la placa del Coco. Fuera de la costa nicaragüense del Pacífico se encuentra la zona Nsi16, y la Península de Nicoya está representada por Csi11 (ver Figura 1.4.b) [3].

Al sur del límite áspero-suave, la zona Csi12, ubicada frente a la costa central de Costa Rica, presenta características batimétricas como los montes submarinos de Fisher (F) y el Plateau de Quepos (PQ) [15]. Más al sur, en la Península de Osa (Csi13), se observa la subducción de la cordillera submarina del Coco. En Panamá occidental, la zona Psi9 corresponde a la subducción oblicua de la placa de Nazca bajo la microplaca de Panamá (ver Figura 1.4.b) [3].

Finalmente, 5 zonas de intraslab describen la sísmicidad de la zona de Wadati-Benioff de la placa del Coco, que se subduce a profundidades intermedias, de 40 km a aproximadamente 250 km [4] (ver Figura 1.4.c). En Nicaragua, la zona Nsp17 se sumerge a 65° hacia el noreste, alcanzando hasta 250 km de profundidad bajo el lago Nicaragua [16].

En Costa Rica, la profundidad disminuye progresivamente de noroeste a sureste. La zona Csp14, en el noroeste, alcanza hasta 200 km cerca del límite con Nicaragua, mientras que en el centro (Csp15) se sitúa a 130 km. En el sur de Costa Rica (Csp16) y en el oeste de Panamá (Psp11), los terremotos más profundos ocurren a aproximadamente 70 km [17].

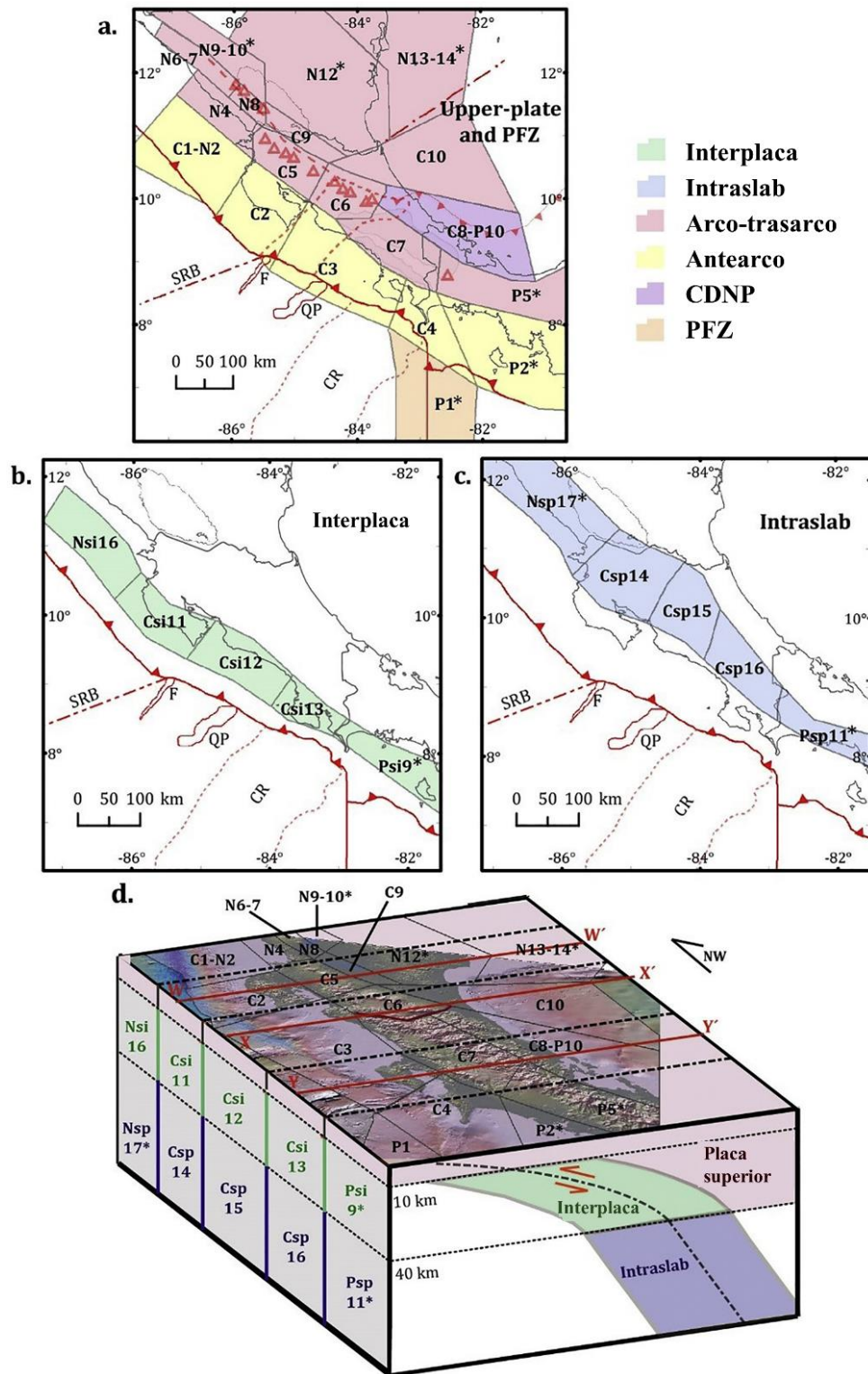


Figura 1.4. Zonificación sísmica: a) Zonas de placa superior y PFZ. b) Zonas interplaca. c) Zonas intraslab. d) Diagrama esquemático de las zonas sísmicas. Adaptada de [5].

En dicho proyecto de investigación se construyó un catálogo sísmico para Costa Rica y las regiones circundantes. Para ellos se utilizaron datos de la Red Sismológica Nacional (RSN) [13] y otros catálogos como el Centro Sismológico Internacional (ISC), el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), la Universidad de Panamá (UPA) y el Proyecto Resis II [11]. Este catálogo construido abarca terremotos entre los años 1522 y 2020, conteniendo información como fecha, ubicación y magnitud.

Para asegurar la calidad de los datos, se eliminaron los terremotos con ubicaciones inexactas o sin determinación de magnitud. Posteriormente, se creó un esquema para priorizar la selección de terremotos cuando estos se encontraban en varios catálogos con discrepancias en ubicación y magnitud. Los terremotos fueron asignados a su fuente sísmica correspondiente siguiendo la zonificación presentada en la Figura 1.4. Las magnitudes se homogenizaron a la magnitud de momento (M_w). El catálogo final se compuso de 122 229 sismos con magnitudes entre 0.3 M y 7.7 M_w , abarcando un periodo de casi 500 años [3]. De esta manera, con este catálogo construido, se obtuvo para cada fuente sísmica la relación entre la magnitud de los terremotos y su frecuencia de ocurrencia a través de relación de Gutenberg-Richter. Asimismo, se calculó el potencial máximo de energía.

Seguidamente se realizó una selección de modelos de atenuación sísmica (GMPE) para determinar el proceso de atenuación de las ondas sísmicas al alejarse de su hipocentro. Se partió de una base de datos que contiene 480 modelos a nivel mundial, de los cuales se preseleccionaron aproximadamente 150 para el caso de Costa Rica, utilizando la herramienta OpenQuake [3].

Para la fecha de realización de este proyecto de investigación, la base de datos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) contaba con 2471 registros de aceleración provenientes de 155 eventos sísmicos. Estos registros se utilizaron para evaluar si los modelos de atenuación sísmica (GMPE) podían modelar adecuadamente la atenuación sísmica observada en estos eventos.

Es así como a partir de la zonificación sísmica empleada, el catálogo sísmico construido, los modelos de recurrencia sísmica y los modelos de atenuación empleados, se elaboraron mapas de aceleraciones sísmicas para periodos de retorno de 150 años, 475 años, 975 años

y 2475, considerando valores intensidad para PGA (aceleración pico en el suelo) y períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s.

En la Figura 1.5, Figura 1.6, Figura 1.7, Figura 1.8, Figura 1.9 y Figura 1.10, se presentan los mapas de aceleraciones sísmicas para Costa Rica, para períodos de retorno de 475 años y 2475 años, para PGA y períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s.

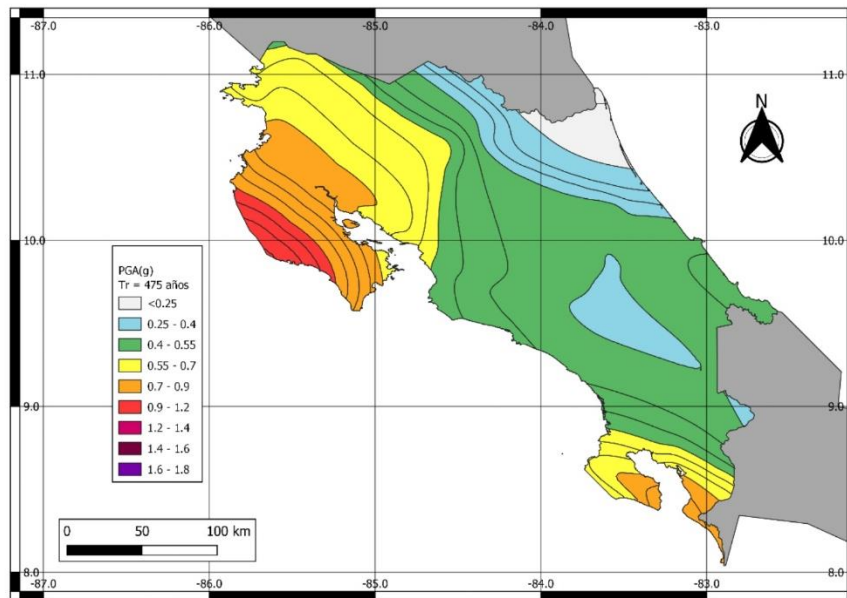


Figura 1.5. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 475 años y para PGA. Tomada de [3].

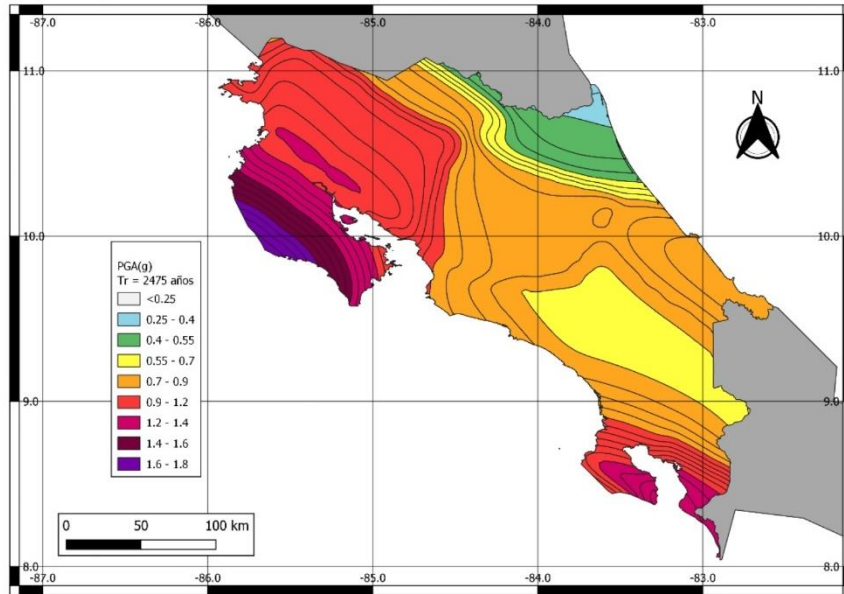


Figura 1.6. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 2475 años y para PGA. Tomada de [3].

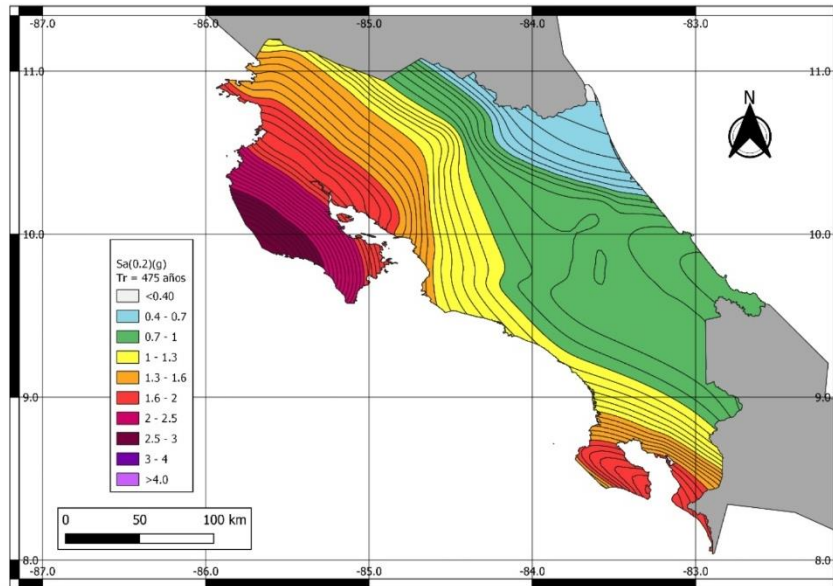


Figura 1.7. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 475 años y para un período de oscilación de 0,2 s. Tomada de [3].

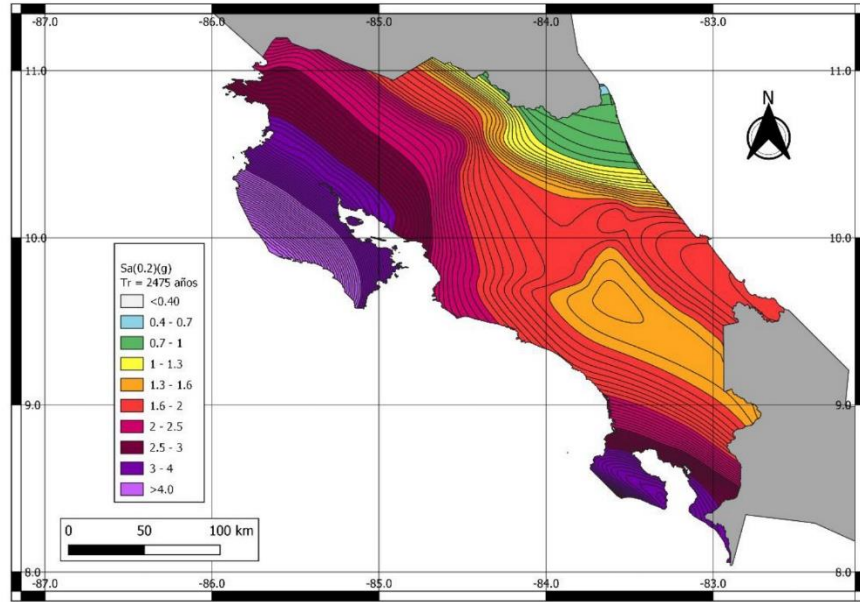


Figura 1.8. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 2475 años y para un periodo de oscilación de 0,2 s. Tomada de [3].

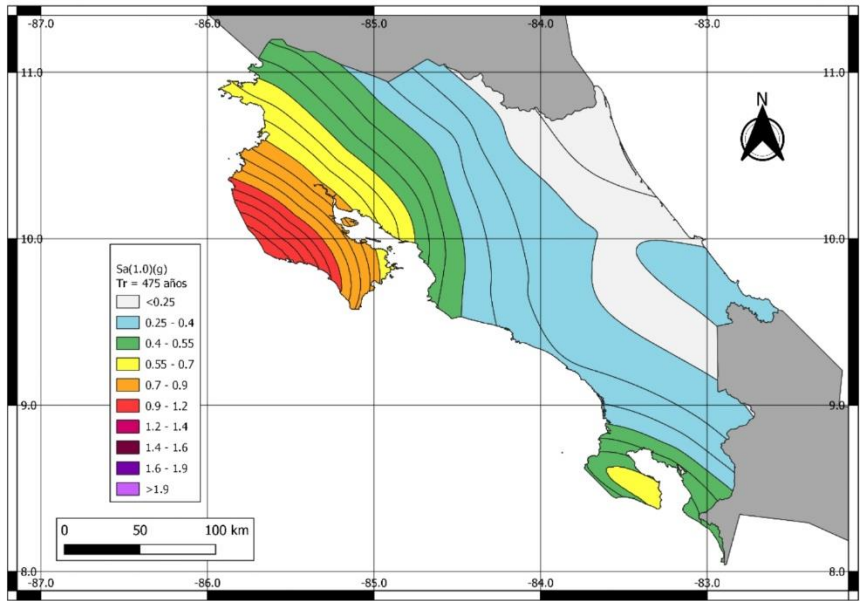


Figura 1.9. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 475 años y para un periodo de oscilación de 1,0 s. Tomada de [3].

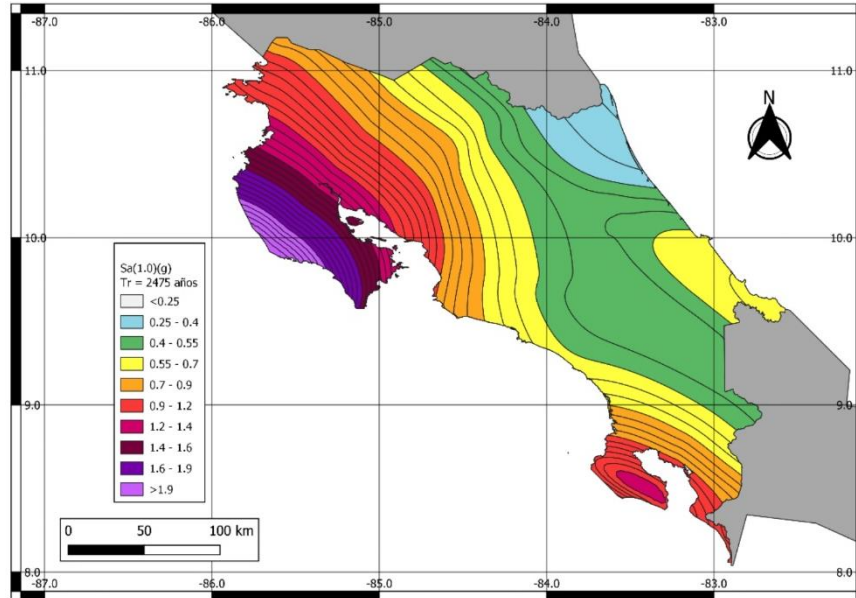


Figura 1.10. Mapa de amenaza sísmica para Costa Rica para un periodo de retorno de 2475 años y para un período de oscilación de 1,0 s. Tomada de [3].

Según se observa de la Figura 1.5 a la Figura 1.10, en estos mapas se aprecia la influencia de la fuente sísmica de subducción en la zona pacífica del país, la cual presenta valores mayores de aceleración en comparación con los valores observados en el Caribe del país. Esto es consecuente con el hecho de que históricamente los sismos de mayor magnitud, han ocurrido en la zona sísmica de Nicoya (como por ejemplo el terremoto de Sámara de 2012 de 7,6 Mw), seguida de la península de Osa (como por ejemplo el terremoto de Golfito de 1983 de 7,4 Mw). En la zona de Punta Burica también se observan valores altos debido a que corresponda una zona afectada por los sismos que ocurren en la zona sísmica de Osa, más los sismos de la Zona de Fractura de Panamá (PFZ) y los sismos de fallamiento local en esa zona específica [3].

Al interior del país, los valores de aceleración disminuyen y la distribución de la amenaza sísmica se ve principalmente influenciada por el fallamiento local y en particular por el fallamiento relacionado con el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR) y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) en la Zona Caribe del País, fuente en la que ocurrió el Terremoto de Limón de 1991 de 7,6 Mw [3].

1.1.4. Riesgo sísmico

Tradicionalmente, la mayoría de las normativas de diseño sísmico han empleado mapas de amenaza sísmica con un período de retorno específico para estimar la demanda sísmica para el diseño de estructuras. Sin embargo, en los Estados Unidos se ha impulsado desde el año 2007 [2] la implementación de nuevas disposiciones de diseño sísmico, que siguen un enfoque más novedoso conocido como "riesgo sísmico uniforme".

El riesgo se define a partir de los conceptos de amenaza y vulnerabilidad, este se entiende como "*...el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.*" [6]. Así, el riesgo sísmico corresponde a la probabilidad de consecuencias de daño, ante la ocurrencia de un movimiento sísmico de determinadas características, que puede esperarse en una región o sitio específico dentro de un período de tiempo definido, y cuya probabilidad de daño está directamente relacionada con la vulnerabilidad sísmica de una estructura, de un grupo de estructuras o de una zona urbana completa.

Matemáticamente, el riesgo sísmico se puede expresar como una convolución entre la amenaza sísmica, la vulnerabilidad sísmica, y los elementos expuestos, que, para el caso particular de la ingeniería estructural, pueden ser las edificaciones y obras civiles ubicadas en un área determinada y expuestas a la amenaza estudiada [6].

Es importante indicar que la diferencia fundamental entre el concepto de amenaza sísmica (estudiado en el Apartado 1.1.2) y el concepto de riesgo sísmico radica en que la amenaza sísmica se relaciona únicamente con la probabilidad de ocurrencia de un movimiento sísmico de determinadas características, mientras que el riesgo sísmico expresa la probabilidad de que se experimenten daños como consecuencia de la ocurrencia de dicho evento, cuya probabilidad está estrechamente relacionada con la vulnerabilidad y grado de exposición de los elementos expuestos los efectos del sismo [6].

1.1.4.1. Vulnerabilidad sísmica

El concepto de vulnerabilidad se define como “...*el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso.*”[6]. Así, en la ingeniería sísmica, la vulnerabilidad sísmica de una estructura, de un grupo de estructuras o de una zona urbana completa, refleja la predisposición a sufrir daños como consecuencia de la ocurrencia de un movimiento sísmico de determinadas características o valores de intensidad.

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de una estructura que está directamente asociada a características constructivas y estructurales de la misma [18], y que es independiente de la amenaza sísmica del sitio, por lo que es posible que una estructura sea vulnerable sísmicamente pero no estar en riesgo de experimentar daños debido al sitio en donde se encuentra construida [19].

1.1.4.1. Curvas de fragilidad

Una de las formas más utilizadas para expresar y cuantificar la vulnerabilidad de una estructura ante un sismo son las curvas de fragilidad. La construcción de este tipo de curvas requiere una comprensión de la respuesta del sistema estructural para diferentes niveles de la demanda sísmica [20], además, debido a que hay una incertidumbre asociada a la capacidad estructural de una edificación, es lógico expresar dichas curvas como una distribución de probabilidad [2], particularmente una de tipo Log-Normal.

Si bien los dos parámetros que definen la forma de una curva con distribución probabilística de tipo Log-Normal son la media central y la desviación estándar, dichas curvas también pueden ser parametrizadas por cualquier otro percentil de la distribución de probabilidad, como, por ejemplo, el valor del percentil 10, tal y como se propone en la metodología de Luco et al. [2] la cual es empleada en este trabajo para la construcción de curvas de fragilidad.

La Figura 1.11 presenta ejemplos de curvas de fragilidad construidas para una estructura, las cuales relacionan la probabilidad de excedencia para diferentes estados de daño (que en este caso son: sin daño, daño leve, daño moderado, daño severo y daño completo), como función de una medida de intensidad asociada a la demanda sísmica, que en este caso corresponde a PGA.

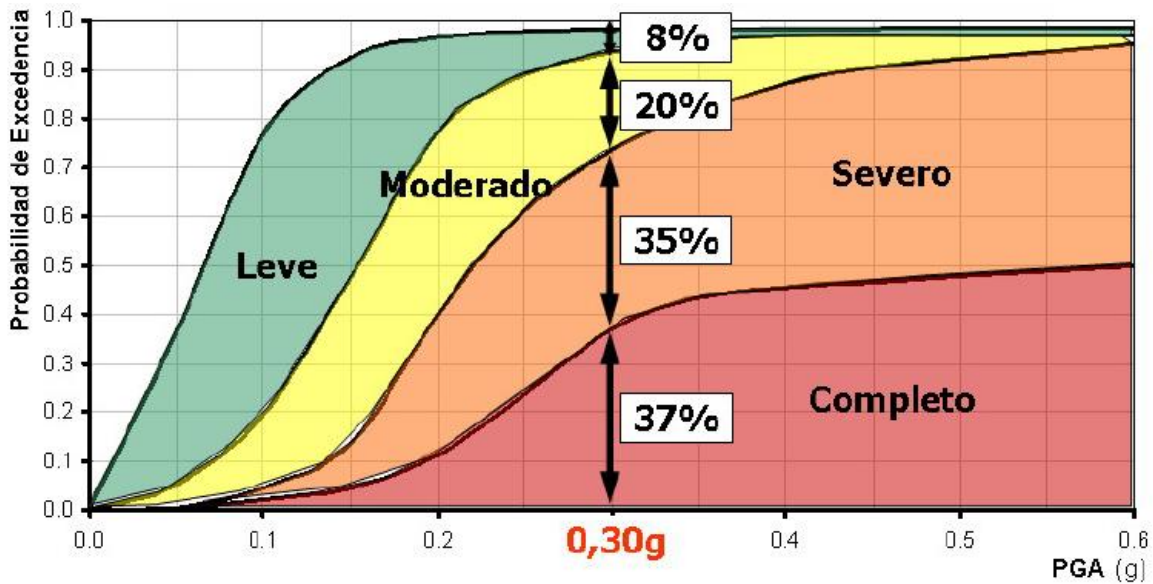


Figura 1.11. Ejemplo de curvas fragilidad. Adaptada de [21].

Por lo tanto, según se observa en la Figura 1.11, las curvas de fragilidad representan gráficamente la probabilidad de exceder un determinado estado de daño, para diferentes valores de una respuesta estructural o medida de intensidad sísmica establecida [22].

1.1.5. Mapas de amenaza sísmica versus mapas de riesgo sísmico

Según se indicó anteriormente, tradicionalmente, la mayoría de las normativas de diseño sísmico han empleado mapas de amenaza sísmica con un período de retorno específico para estimar la demanda sísmica para el diseño de estructuras. Por ejemplo, en Costa Rica y la mayoría de los países europeos se ha empleado un período de retorno de 475 años, mientras que, en Estados Unidos, antes del año 2010, se utilizaba un período de retorno de 2475 años. Esta práctica se ha llevado a cabo bajo la premisa de que la probabilidad de falla de una edificación es igual a la probabilidad de excedencia de los movimientos sísmicos de diseño [23].

Sin embargo, este enfoque ha enfrentado críticas al reconocerse que en realidad la incertidumbre en la capacidad estructural de las edificaciones y la variabilidad en las características propias del movimiento del suelo, conocida como "variabilidad de registro a registro" [2]. Esta incertidumbre puede llevar a que un edificio colapse ante un valor de

aceleración que es menor que el valor utilizado en el diseño, o, por el contrario, sobreviva ante un valor de aceleración que es mayor que el valor utilizado en el diseño.

Adicionalmente, al basarse únicamente en un período de retorno, se considera solo un punto específico de la curva de amenaza sísmica, lo que implica ignorar la forma completa de dicha curva. Esto representa una limitación, ya que las estructuras no colapsan ante un único valor de demanda, sino dentro de un rango de aceleraciones. En consecuencia, incluso dos edificaciones expuestas a una misma aceleración correspondiente a un determinado período de retorno pueden presentar probabilidades de colapso significativamente distintas, debido a sus diferentes capacidades estructurales y a los niveles de incertidumbre asociados.

En la Figura 1.12 se presenta un ejemplo con tres sitios que, para un período de retorno de 2475 años, tienen la misma aceleración. Sin embargo, se observa que antes y después de ese punto, la forma de las curvas de amenaza difiere. Esto implica que la frecuencia anual de excedencia para otros valores de aceleración varía entre sitios, lo cual puede traducirse en diferentes probabilidades de colapso acumulada, a pesar de compartir el mismo valor de aceleración para dicho período de retorno, tal como se observa en la Figura 1.13.

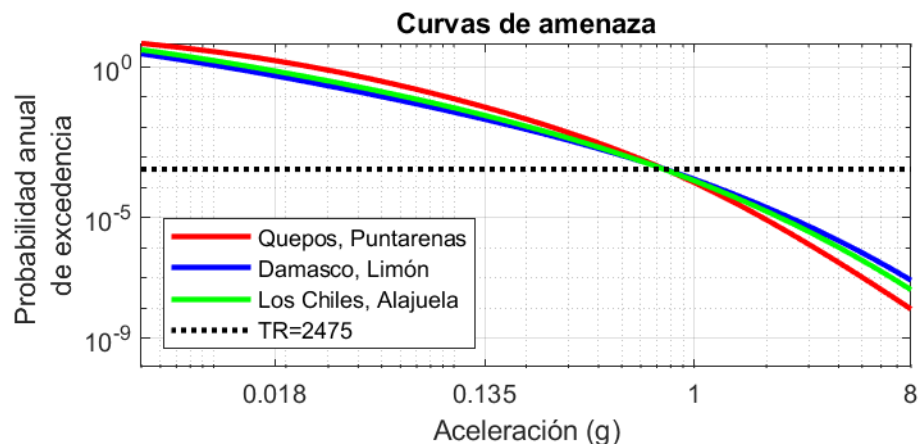


Figura 1.12. Curvas de amenaza sísmica para la aceleración pico del suelo (PGA) en las ciudades de Quepos (Puntarenas), Damasco (Limón) y Los Chiles (Alajuela), donde se observa que, para un mismo período de retorno, la aceleración es aproximadamente igual.

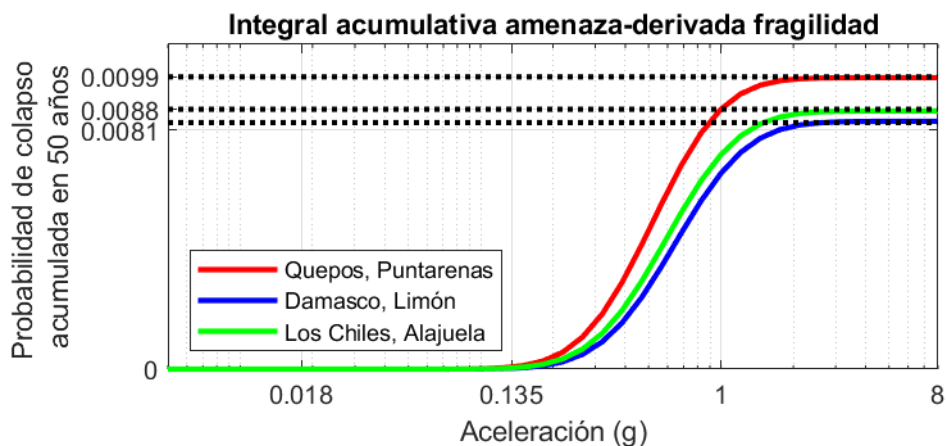


Figura 1.13. Probabilidad de colapso en 50 años para la aceleración pico del suelo (PGA) de una estructura genérica, correspondiente a un período de retorno de 2475 años, en las ciudades de Quepos (Puntarenas), Damasco (Limón) y Los Chiles (Alajuela). Se observa que las probabilidades de colapso difieren entre sitios, lo que refleja la influencia de la forma de la curva de amenaza sísmica en estimación del riesgo de colapso.

La comprensión de esta problemática impulsó el desarrollo de mapas de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo, cuyo objetivo es proporcionar niveles más consistentes de seguridad para el diseño estructural [2]. A diferencia del enfoque tradicional, que busca una probabilidad de excedencia uniforme o aceleraciones asociadas a un mismo período de retorno, estos nuevos mapas se fundamentan en alcanzar una probabilidad de colapso uniforme.

No obstante, como se explicará con mayor detalle en la metodología de este trabajo (ver Sección 1.6), las curvas y mapas obtenidos a partir de un estudio de amenaza sísmica se utilizan como información de entrada para el cálculo y elaboración de mapas orientados al riesgo uniforme. Esto resalta la necesidad de contar con estudios de amenaza actualizados como lo es el caso del proyecto de investigación "*Actualización de la Amenaza Sísmica para Costa Rica*" [3] comentado en el Apartado 1.1.3.

La idea de elaborar mapas de aceleraciones sísmicas orientados al riesgo uniforme fue mencionada por primera vez en el documento ATC-03 en 1978 [24] del Consejo de Tecnología Aplicada (ATC, por sus siglas en inglés), y luego desarrollada dentro del Proyecto 07 [2] que incluyó al Grupo de Revisión de Procedimientos de Diseño Sísmico del Consejo de Seguridad Sísmica de Edificios (BSSC, por sus siglas en inglés), el Servicio Geológico de

los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés).

En el Proyecto 07, se propusieron los ajustes necesarios para lograr una distribución uniforme de la probabilidad de colapso en los mapas de amenaza sísmica que se encontraban en las disposiciones sísmicas FEMA 450-1/2003 [25] del Programa Nacional de Reducción de Riesgos de Terremotos (NEHRP, por sus siglas en inglés). Estos ajustes fueron explicados por Luco et al. [2] en el artículo "*Risk-Targeted versus Current Seismic Design Maps for the Conterminous United States*" (procedimiento que se detalla en la Sección 1.6 de este trabajo). En ese artículo se indicó que, para alcanzar una probabilidad de colapso uniforme, aproximadamente igual al promedio vigente en el Oeste de los Estados Unidos en aquel momento, los factores de ajuste a los movimientos del suelo en el Centro y Este generalmente estaban en un rango entre 0,7 a 0,9, mientras que, en el Oeste, los factores de ajuste generalmente se encontraban en un rango de 0,9 a 1,15.

Los resultados del Proyecto 07 se utilizaron para redactar las disposiciones sísmicas del documento FEMA P-750 [26] y de la norma ASCE 7-10 [27], los cuales también, son la base para los requisitos de diseño sísmico de los códigos de construcción de los Estados Unidos, como el Código Internacional de Construcción (IBC, por sus siglas en inglés) [28]. Así, en el año 2010, en la sección 21.2.1.2 de la norma ASCE 7-10 [27] se incluyó por primera vez un método de cálculo de aceleraciones orientadas al riesgo sísmico uniforme en una normativa.

En la actualidad, los mapas de diseño sísmico desarrollados mediante este enfoque se han utilizado ampliamente en las prácticas de diseño de los Estados Unidos, sin embargo, también se han realizado una serie de estudios específicos en otros países del mundo, con el fin de desarrollar mapas similares.

Por ejemplo, Douglas et al. [29] investigaron el desarrollo de mapas de riesgo sísmico uniforme para Francia. En este estudio en particular, a diferencia de los resultados presentados por Luco et al. en 2007 [2], al utilizar valores "razonables" en los parámetros de entrada "libres" en la metodología, como lo es la desviación estándar empleada en las curvas de fragilidad y la probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño, se obtuvieron mapas muy similares a los incluidos en la normativa vigente para Francia en aquel momento que seguía un enfoque de amenaza uniforme. En este estudio también se efectuó un análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada "libres" en la metodología,

y se llegó a la conclusión de que es necesario restringir dichos parámetros, antes de pensar en utilizar dicha metodología de manera rutinaria para el diseño, ya que se podía presentar una variabilidad significativa de los resultados en función de los valores establecidos para dichos parámetros.

Silva et al. [30], realizaron un estudio similar para otras regiones de Europa. Sin embargo, a diferencia de Francia, se encontraron zonas, como el Este de Rumania en donde los movimientos de diseño del suelo podrían reducirse, así como otras regiones, como el Sur de Turquía, donde, por el contrario, los movimientos de diseño del suelo podrían incrementarse. De esta manera, según los mapas mostrados en este estudio, el empleo de un enfoque por riesgo uniforme podría llevar a modificaciones de hasta un 30 % en los movimientos de diseño del suelo de algunas regiones de Europa.

Taherian y Kalantari [31] presentaron un mapa de diseño sísmico orientado al riesgo para Irán, con coeficientes de riesgo (RC) que varían de 0,75 a 1,26 (es decir, aumentos o disminuciones de las aceleraciones de hasta un 25%). Asimismo, Kharazian et al. [32] desarrollaron un mapa similar para España, en el cual se observó que, al emplear un enfoque por riesgo uniforme, se podrían dar aumentos de entre 4 % y 34 % del movimiento de diseño del suelo en algunas regiones de dicho país.

Estos hallazgos y las diferencias observadas resaltan la importancia de considerar un enfoque por riesgo uniforme para lograr un nivel más consistente de seguridad en el diseño estructural de edificaciones. Por lo que este trabajo busca ilustrar el impacto que podría llegar a obtenerse en las aceleraciones sísmicas si empleamos un enfoque orientado al riesgo en el país.

Es importante mencionar que para este trabajo se definieron los parámetros de entrada "libres" en la metodología de acuerdo a las referencias consultadas. Por lo tanto, no se pueden tomar los resultados de este trabajo como definitivos, ya que los parámetros de entrada pueden variar dependiendo de la importancia de las estructuras y de la realidad económica del país, por lo que deberían ser establecidos por los responsables de la toma de decisiones en la planificación del país [30].

1.2. Justificación

Como se ha comentado en la Sección 1.1, Costa Rica experimenta una compleja deformación de la corteza, resultado del movimiento relativo entre las placas y microplacas que interactúan en su territorio. Esta intensa actividad sísmica también se refleja en diversos eventos importantes registrados en su historia reciente, caracterizados por su alto poder destructivo y sus significativas consecuencias en términos de pérdidas humanas y daños a estructuras, como se detalla en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Sismos importantes recientes en Costa Rica, y víctimas humanas y daños experimentados. Adaptado de [33]

Año	Lugar	Magnitud (M_w)	Víctimas humanas	Daños
1910	Cartago	6,5	Aproximadamente 700 fallecidos	Destrucción de la ciudad
1983	Golfito	7,4	1 fallecido	Daños importantes en la Zona Sur
1991	Limón	7,6	651 heridos y 48 fallecidos	4 452 casas colapsadas y 7869 casas dañadas
2009	Cinchona	6,2	27 fallecidos	90% de destrucción en casas, escuelas, iglesias, negocios e industrias
2012	Nicoya	7,6	Ninguno	Daños importantes en la península de Nicoya

Según investigaciones sobre los daños causados por sismos [34], el colapso de estructuras es la principal fuente de víctimas y pérdidas materiales durante y después de un sismo importante. Por lo tanto, un objetivo fundamental de la ingeniería sísmica es garantizar la seguridad contra el colapso de las estructuras.

En el caso específico de Costa Rica, la sollicitación sísmica con potencial destructivo que es considerada para el diseño de estructuras normales en Costa Rica, según el Código Sísmico de Costa Rica – 2010, Revisión 2014 (mencionado de acá en adelante sólo como CSCR 2010/14) [1], es la sacudida del terreno correspondiente a una probabilidad de excedencia del 10 % para un tiempo de exposición de 50 años, o su equivalente, un período de retorno

de 475 años [1]. Este enfoque probabilístico implica el uso de aceleraciones para el diseño sísmico de estructuras obtenidas a partir del concepto de "amenaza sísmica uniforme", que proporciona valores del movimiento del suelo para diferentes regiones sísmicas con las mismas probabilidades de excedencia, denominados "movimientos del suelo orientados hacia la amenaza uniforme" [UHGM, por sus siglas en inglés (*uniform hazard ground motion*)].

El diseño de estructuras basado en este enfoque supone que la probabilidad de colapso de las edificaciones diseñadas para estas aceleraciones será igual a la probabilidad de que el movimiento del suelo para dicha región sea excedido [23]. Esto debería conducir a que todas las estructuras diseñadas para una misma aceleración posean una probabilidad uniforme de colapso o la misma probabilidad de falla, independientemente de la región sísmica en la que se encuentren. Sin embargo, esto no se cumple cuando se reconoce que realmente existe incertidumbre en la capacidad estructural de las edificaciones y variabilidad en las características propias del movimiento del suelo, también conocida como "variabilidad de registro a registro" [2], lo que conduce a diferentes probabilidades de colapso.

Aunque inicialmente este enfoque ha sido una buena manera de abordar el problema del diseño sismorresistente de estructuras, se ha demostrado que su alcance es limitado, pues no es suficiente para proporcionar una probabilidad de colapso uniforme o un mismo nivel de desempeño sísmico. Esto se traduce en estructuras con distintos niveles de seguridad a pesar de estar diseñadas bajo una misma normativa [30].

Debido a lo anterior, en los Estados Unidos se ha impulsado desde el año 2007 la implementación de nuevas disposiciones de diseño sísmico, que siguen un enfoque más novedoso conocido como "riesgo sísmico uniforme", el cual utiliza aceleraciones para el diseño sísmico de estructuras orientadas a proporcionar una misma probabilidad de colapso o mismo nivel de desempeño sísmico, independientemente de que los edificios estén ubicados en diferentes regiones sísmicas y estén expuestos a distintos niveles de amenaza. Estos valores son denominados "movimientos del suelo orientados al riesgo" [RTGM, por sus siglas en inglés (*risk targeted ground motion*)].

No obstante, a pesar del avance en las normativas implementadas en otros países, como es el caso de Estados Unidos con la normativa ASCE/SEI 7-22 [35], donde se han incluidos métodos de análisis basados en movimientos del suelo orientados al riesgo, en Costa Rica

aún no se han desarrollado investigaciones relacionadas con la determinación de aceleraciones de diseño obtenidas a través de un enfoque de riesgo sísmico uniforme.

Debido a los recientes avances en la identificación de diferentes fuentes sísmicas y la mejora significativa en la caracterización de sus respectivos modelos de recurrencia (Arroyo Solórzano & Linkimer, 2021), es posible visualizar la variabilidad de la amenaza respecto a la probabilidad de excedencia [36]. Esto permite obtener las aceleraciones sísmicas procedentes de un enfoque de riesgo sísmico uniforme, que permita incorporar niveles más consistentes de riesgo para el diseño de estructuras en el país.

Por lo tanto, esta investigación representa un primer paso fundamental que busca incentivar la discusión entre los valores del movimiento de suelo derivados de ambos enfoques estudiados (amenazas sísmicas uniforme y riesgo sísmico uniforme). Al proporcionar una comprensión más profunda de estas diferencias no solo informa sobre la necesidad de actualizar las normativas y estándares de diseño vigentes, sino que también fomentan la adopción de enfoques más avanzados que puedan garantizar un mayor nivel de seguridad de las edificaciones frente a futuros eventos sísmicos, mejorando así las prácticas de ingeniería sísmica en el país.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar aceleraciones sísmicas en Costa Rica, empleando un enfoque de riesgo uniforme, utilizando como base el más reciente estudio de amenaza sísmica para el país.

1.3.2. Objetivos específicos

- Sintetizar la metodología para el cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme (RTGM) propuesta por Luco et al. [2].
- Desarrollar un código de programación para calcular aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme (RTGM) y los coeficientes de riesgo (RC) correspondientes, siguiendo la metodología propuesta por Luco et al. [2].
- Recopilar la información de las curvas de amenaza sísmica disponibles para 10 541 sitios en todo el territorio nacional, incluyendo a la aceleración pico en el suelo (PGA por sus siglas en inglés) y aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s, obtenidas del estudio de amenaza sísmica más reciente publicado para el país.
- Utilizar el código de programación desarrollado para calcular las aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme (RTGM) y los coeficientes de riesgo (RC) correspondientes, utilizando como información de entrada las curvas de amenaza sísmica recopiladas para cada sitio.
- Generar mapas de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para aceleración pico en el suelo y aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s, así como los mapas de coeficientes de riesgo (RC) correspondientes.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los coeficientes de riesgo (RC) al modificar los valores de la desviación estándar β y de la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño $P(c|gm)$.

1.4. Alcance

- En este trabajo se presentan aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme (RTGM) y los coeficientes de riesgo (RC), utilizando el enfoque de cálculo propuesto por Luco et al. [2].
- Para calcular las aceleraciones orientadas hacia el riesgo uniforme (RTGM) y los coeficientes de riesgo (RC), se considerando dos escenarios:
 1. Se utilizaron como parámetros de entrada los valores establecidos por la norma ASCE 7-22 [35] para ajustar las aceleraciones asociadas a un período de retorno de 2475 años.
 2. Se utilizaron como parámetros de entrada los valores establecidos por la norma NZS 1170, según lo indicado en el artículo "*Risk-targeted hazard for seismic design in New Zealand considering individual and societal risk targets*"[37] para ajustar las aceleraciones asociadas a un período de retorno de 475 años.
- La información de curvas de amenaza y mapas de amenaza sísmica uniforme para Costa Rica se obtuvieron del proyecto de investigación "*Actualización de la Amenaza Sísmica para Costa Rica*", desarrollado entre 2019 y 2021 a través del Espacio Universitario de Estudios Avanzados (UCREA) de la Universidad de Costa Rica y publicados recientemente por Hidalgo et al. [3].
- No se realizaron modificaciones específicas para considerar la fragilidad asociadas a estructuras específicas de Costa Rica y en su lugar, se emplearon valores de referencia ya publicados y empleados en otras investigaciones.
- Para el análisis de sensibilidad realizado se utilizaron valores de la desviación estándar β y de la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño $P(c|gm)$ obtenidos de referencias ya publicados y empleadas en otras investigaciones.
- Dado que este trabajo representa un primer paso fundamental que busca incentivar la discusión entre los valores del movimiento de suelo derivados de ambos enfoques estudiados (UHGM y RTGM), no se proporcionan valores finales recomendados de aceleraciones o coeficientes de riesgo para su uso en futuras normativas de diseño.

1.5. Limitaciones

- No se identificaron publicaciones previas en Costa Rica orientadas al estudio de riesgo sísmico uniforme en el país, por lo que no se han definido valores particulares de desviación estándar de las curvas de fragilidad β , de la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño $P(c|gm)$ o del riesgo aceptable para el país, ni se posee un punto de comparación sobre las posibles variaciones en las aceleraciones sísmicas al emplear un enfoque de riesgo uniforme versus un enfoque de amenaza uniforme.
- La composición de los mapas a generar de intensidades sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme para Costa Rica, está sujeto a la cantidad de puntos disponibles para la realización del cálculo.

1.6. Metodología

El esquema general de la metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 1.14, en esta se observa que el desarrollo de la investigación se divide en seis etapas principales: 1) Investigación y revisión bibliográfica, 2) Recopilación de información de amenaza sísmica en Costa Rica, 3) Desarrollo de código de programación, 4) Cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme (RTGM) y coeficientes de riesgo (RC), 5) Generación de mapas en software GIS, 6) Análisis de sensibilidad y 7) Discusión de resultados.

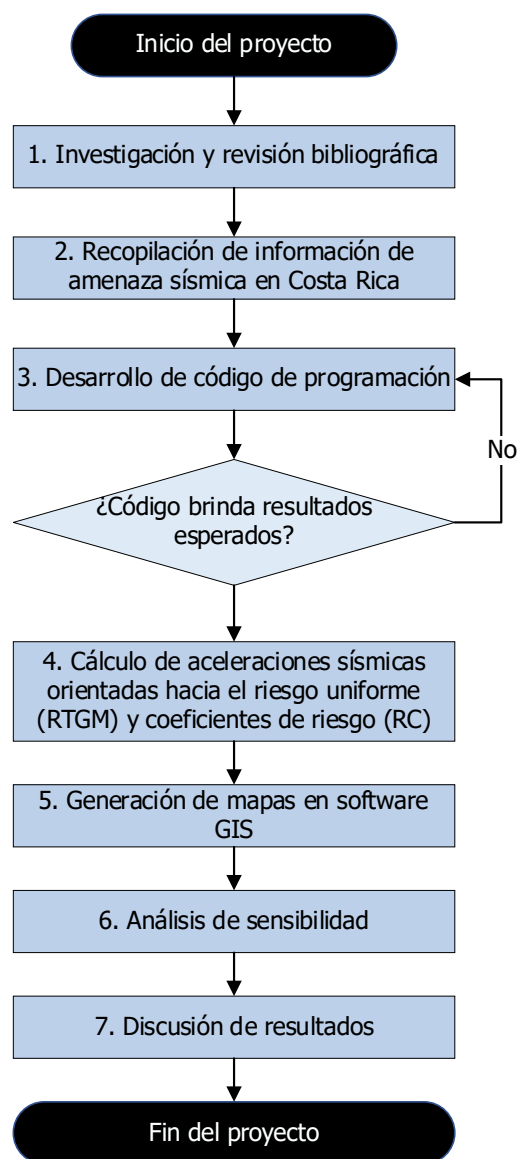


Figura 1.14. Metodología general seguida para el desarrollo de la investigación.

1.6.1. Investigación y revisión bibliográfica

En esta etapa se recopiló información correspondiente a los conceptos de amenaza sísmica y riesgo sísmico uniforme, cuya comprensión de los mismos era necesaria para abordar el problema específico planteado en este trabajo. Además, se sintetizó la metodología propuesta por Luco et al. [2] para el cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme (RTGM) y los coeficientes de riesgo (RC). Asimismo, se consultaron publicaciones relacionadas con la generación de mapas de aceleraciones orientadas al riesgo sísmico uniforme para distintos países y continentes empleando dicha metodología.

1.6.2. Recopilación de información de amenaza sísmica en Costa Rica

Dado que las curvas de amenaza representan información esencial para la implementación de la metodología planteada por Luco et al. [2], en la siguiente etapa se procedió a recopilar datos sobre las curvas de amenaza sísmica disponibles para 10 541 sitios en Costa Rica, los cuales corresponden a los puntos examinados a lo largo del territorio nacional por Hidalgo et al. [3]. Esta información incluyó curvas de amenaza para la aceleración pico en el suelo (PGA) y aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s. La razón por la cual se consideran aceleraciones espectrales correspondientes a estos períodos es que representan de manera estándar el comportamiento sísmico de estructuras con diferentes rangos de rigidez: 0,2 s se asocia comúnmente a edificaciones bajas y rígidas, mientras que 1,0 s corresponde a edificaciones más flexibles y de mayor altura.

Esta información se obtuvo del estudio de amenaza sísmica más reciente publicado para el país, realizado como parte del proyecto de investigación *"Actualización de la Amenaza Sísmica para Costa Rica"*, llevado a cabo a través del Espacio Universitario de Estudios Avanzados (UCREA) de la Universidad de Costa Rica entre el 2019 y 2021. Este proyecto fue recientemente publicado por Hidalgo et al. [3].

1.6.3. Desarrollo de código de programación

Posteriormente, se procedió a desarrollar un código de programación que facilitara el cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) conforme a la metodología propuesta por Luco et al. [2]. Para el desarrollo del código de programación se utilizó el programa computacional MATLAB de la compañía The MathWorks, Inc., del cual la Universidad de Costa Rica posee licencia para uso estudiantil. En el Anexo A de este documento se presenta el código en MATLAB utilizado para calcular las aceleraciones orientadas al riesgo sísmico (RTGM) en un sitio de interés y mostrar su correspondiente solución gráfica. Por su parte, en el Anexo C se incluye el código desarrollado para realizar el cálculo masivo de aceleraciones en los 10 541 sitios analizados.

Por otro lado, para validar el funcionamiento correcto del código de programación, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos a través de dichos códigos desarrollados y los resultados generados por la calculadora de movimiento del suelo orientado al riesgo disponible en el sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), accesible en: <https://earthquake.usgs.gov/designmaps/rtgm/>. Esta comparación se llevó a cabo para cuatro sitios de Costa Rica (ver diferencias porcentuales en Anexo B), utilizando las respectivas curvas de amenaza sísmica correspondientes a cada ubicación. La selección de estos sitios se realizó de manera arbitraria, con el único propósito de verificar la coherencia de los resultados del algoritmo en distintas ubicaciones. Para ello, se procuró incluir sitios espaciados geográficamente, sin que ello implicara una muestra estadísticamente representativa del país.

1.6.4. Cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas hacia el riesgo uniforme y coeficientes de riesgo

En esta etapa se utilizó el código de programación desarrollado para calcular las aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) y sus respectivos coeficientes de riesgo (RC). Este cálculo se realizó utilizando como información de entrada las curvas de amenaza sísmica recopiladas para cada sitio.

Como se indicó en el Apartado 1.6.3, el código de programación empleado para esta etapa se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Luco et al. [2], la cual consta de un proceso iterativo cuyos pasos se explican en los siguientes incisos.

1.6.4.1. Primera iteración

- Paso 1 – Curva de amenaza sísmica: La curva de amenaza sísmica para la región o sitio de interés corresponde a uno de los datos de entrada para el cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo (RTGM). Estas curvas relacionan aceleraciones para un sitio de estudio con una probabilidad de excedencia (ver Inciso 1.1.2.1). Como se mencionó anteriormente, para este trabajo se consideraron curvas para la aceleración pico en el suelo (PGA) y aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s.

La metodología propuesta por Luco et al. [2] requiere que las curvas de amenaza se expresen y utilicen en términos de frecuencia anual de excedencia en lugar de probabilidades de excedencia. Las curvas recopiladas del estudio publicado por Hidalgo et al. [3] se encuentran en término de probabilidades de excedencia. Debido a esto anterior, se realizó una conversión de todas las 10 541 curvas recopiladas despejando la frecuencia de excedencia para una ventana de tiempo de un año mediante la Ecuación 1-1:

$$PE = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Donde:

- PE: Probabilidad de que se presente el evento al menos una vez dentro de la ventana de tiempo considerada.
- t (años): Ventana de tiempo.
- λ : Frecuencia de excedencia del evento en la ventana de tiempo considerada.

Así, al despejar la Ecuación 1-1, se obtiene la expresión para la frecuencia anual de excedencia (ver la Ecuación 1-2).

$$\lambda = -\frac{\text{Ln}(1 - PE)}{t} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

La Figura 1.15 muestra un ejemplo de curva de amenaza sísmica para PGA en un sitio donde se ha realizado la conversión mencionada.

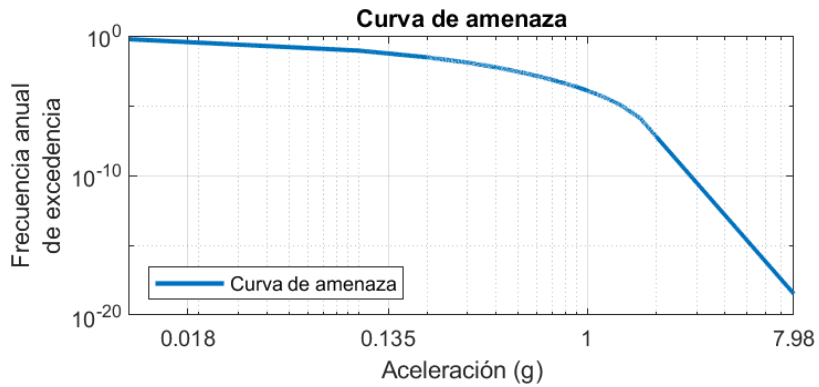


Figura 1.15. Ejemplo de curva de amenaza sísmica para PGA en términos de frecuencia anual de excedencia.

- Paso 2 – Valor de aceleración para la primera iteración: Se definió el valor de aceleración a utilizar en los siguientes pasos para cada curva de amenaza sísmica de cada sitio (es decir para las curvas para la aceleración pico en el suelo y curvas para aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s). Este valor de aceleración se definió como la aceleración orientada hacia la amenaza uniforme que se deseaba ajustar por riesgo (UHGM). Como se indicó anteriormente, para este trabajo en particular se ajustaron aceleraciones con períodos de retorno (TR) de 2475 años y 475 años.

En el Cuadro 1.2 se resumen los valores de probabilidad de excedencia (PE) y frecuencia anual de excedencia (λ) utilizados para obtener los valores de aceleración orientados hacia la amenaza uniforme (UHGM).

Cuadro 1.2. Probabilidad de excedencia (PE) y frecuencia anual de excedencia (λ) para cada período de retorno (TR) considerado.

TR	PE	λ
2475 años	2 % en 50 años	$4,0405 \times 10^{-4}$
475 años	10 % en 50 años	$2,1072 \times 10^{-4}$

La Figura 1.16 muestra como a partir de una frecuencia anual de excedencia de $4,0405 \times 10^{-4}$ se obtuvo un valor de aceleración orientado hacia la amenaza uniforme de 0,8 g para la curva de amenaza sísmica mostrada en la Figura 1.13.

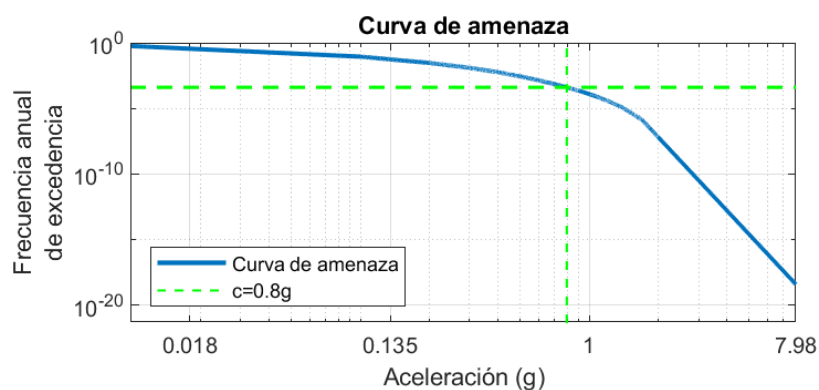


Figura 1.16. Definición de valor de aceleración orientado hacia la amenaza uniforme para un período de retorno de 2475 años para una curva de amenaza sísmica PGA.

- **Paso 3 – Curva de fragilidad acumulada:** Para cada una de las curvas de amenaza correspondientes a los 10 541 puntos distribuidos a lo largo del territorio nacional, se elaboró una curva de fragilidad acumulada genérica utilizando una distribución log-normal. Esta curva se definió a partir del valor de aceleración UHGM obtenido en el Paso 2, y se asumió una desviación estándar (β) igual a 0,6 conforme a lo recomendado por la normativa ASCE [35].

Según lo indica la metodología propuesta por Luco et al. [2], las curvas de fragilidad se elaboraron de manera tal que el punto correspondiente al valor de aceleración (UHGM) definido en el Paso 2 estuviera asociado con una probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño [$P(c|gm)$] según los valores mostrados en el Cuadro 1.3.

Cuadro 1.3. Probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño del [$P(c|gm)$] para cada período de retorno (TR) de referencia.

TR (de referencia)	P(c gm)	Referencia	Código
2475 años	10 %	Luco et. al [2]	ASCE 7-22 [35]
475 años	0,01 %	Horspool et. al [37]	NZS 1170

Es importante mencionar que las aceleraciones orientadas al riesgo uniforme (RTGM) no están asociadas directamente a un período de retorno específico, ya que se determinan con base en una probabilidad de colapso objetivo (por ejemplo, 1 % en 50 años), y no en la frecuencia de ocurrencia de un evento sísmico. Por esta razón, en el Cuadro 1.3 y en los cuadros posteriores se incluye el período de retorno únicamente como un elemento de referencia contextual, con el fin de indicar el nivel

de amenaza sísmica tradicionalmente considerado en cada sitio de origen de la normativa.

Para los fines de este trabajo, cuando se requirió ajustar aceleraciones equivalentes a un período de retorno de 2475 años, se emplean los valores establecidos por la norma ASCE 7-22 [35]; mientras que, para un período de retorno de 475 años, se utilizaron los valores definidos por la norma NZS 1170 [37]. Esta distinción permite mantener la consistencia en la comparación de resultados al emplear la metodología, garantizando una interpretación coherente del contexto de amenaza sísmica en cada escenario evaluado

Por lo tanto, continuando el ejemplo de la Figura 1.14, donde se propuso ajustar una aceleración orientada hacia la amenaza con un período de retorno de 2475 años, se puede observar que el valor de aceleración (UHGM) definido en el Paso 2, representado por una línea discontinúa en color verde, está asociado a una probabilidad de colapso acumulada del 10 % en la curva de fragilidad elaborada (según lo indica el Cuadro 1.3), tal como se muestra en la Figura 1.17.

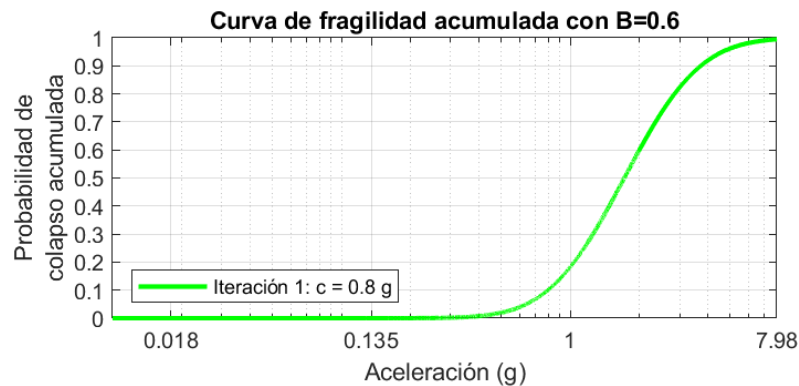


Figura 1.17. Ejemplo de curva de fragilidad acumulada elaborada.

Se recuerda que la decisión de utilizar valores de referencia de la desviación estándar (β) y la probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño [$P(c|gm)$] se fundamente en la ausencia de estudios previos en Costa Rica enfocados a la estimación de aceleraciones orientadas al riesgo uniforme (RTGM).

Finalmente, dado que los mapas de diseño sísmico se aplican a una amplia gama de estructuras cubiertas por mismo un código de diseño, esta metodología emplea curvas de fragilidad genéricas que en principio consideran la variabilidad en la

vulnerabilidad de estructuras de distintos materiales (por ejemplo, concreto reforzado y acero) y de diferentes geometrías [29].

- Paso 4 – Derivada de la curva de fragilidad acumulada: Se calculó la derivada numérica de cada curva de fragilidad acumulada construida en el Paso 3. Estas derivadas se realizaron respecto a la aceleración. A través de esta operación se obtuvieron las curvas de densidad de probabilidades de colapso (ver ejemplo en la Figura 1.18).

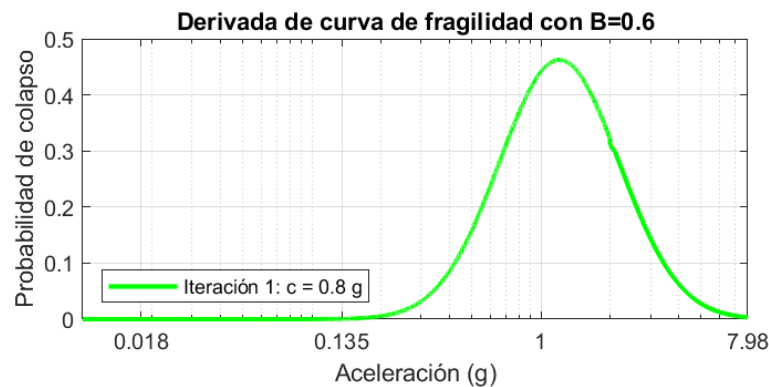


Figura 1.18. Ejemplo de derivada de la curva de fragilidad (curva de densidad de probabilidades de colapso).

- Paso 5 – Multiplicación punto a punto de la curva de amenaza con la derivada de la curva de fragilidad acumulada: Se combinó cada curva de amenaza sísmica (del Paso 1) con la derivada numérica de la curva de fragilidad acumulada asociada (del Paso 4). Esta operación dio como resultado la generación de nuevas curvas para cada caso estudiado, las cuales muestran la densidad de frecuencia de colapso anual de una estructura genérica (ver ejemplo en la Figura 1.19).

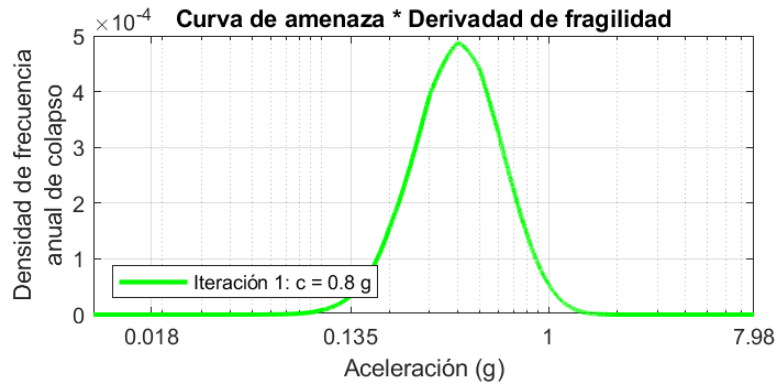


Figura 1.19. Ejemplo de multiplicación punto a punto de la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad (densidad de frecuencia de colapso anual de una estructura genérica).

- Paso 6 – Integral de riesgo: Para cada caso estudiado, se integró la multiplicación de la curva de amenaza y de la curva de fragilidad del Paso 5 (ver ejemplo en la Figura 1.20). Dicha operación es conocida como la “integral de riesgo” (ver Ecuación 1-3) y expresa la probabilidad de colapso anual.

$$P = \int_0^{\infty} \lambda(gm) \frac{P(c|gm)}{dgm} dgm \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Donde:

- $\lambda(gm)$: Representa la curva de amenaza del sitio estudiado.
- $P(c|gm)$: Representa la curva de fragilidad acumulada.

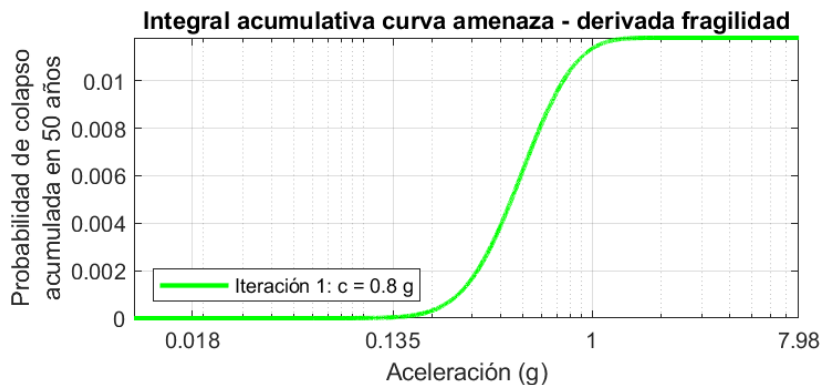


Figura 1.20. Ejemplo de integral acumulativa de la multiplicación punto a punto de la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad (“integral de riesgo”).

Cabe aclarar que para pasar de una probabilidad de colapso anual a una probabilidad de colapso en 50 años (según se muestra en la Figura 1.21) se hizo uso de la Ecuación 1-3.

$$P_c = 1 - (1 - P)^{50} \quad \text{Ecuación 1-4}$$

Donde:

- P_c : Probabilidad de colapso en 50 años.
- P : Probabilidad de colapso anual (obtenida en la Ecuación 1-3).

Paso 7 – Probabilidad de colapso aceptable: En este paso, se comparó la probabilidad de colapso acumulada obtenida con la probabilidad de colapso aceptable (P_c^T). En el Cuadro 1.4 se indica la probabilidad de colapso aceptable utilizada para ajustar las aceleraciones orientadas hacia la amenaza (UHGM) con períodos de retorno de 2475 años y 475.

Cuadro 1.4. Probabilidad de colapso aceptable (P_c^T) para cada período de retorno (TR) de referencia.

TR (de referencia)	P_c^T	Referencia	Código
2475 años	1 % en 50 años	Luco et. al [2]	ASCE 7-22 [35]
475 años	0,05 % en 50 años	Horspool et. al [37]	NZS 1170

Para este ejemplo (en el que iniciamos con un período de retorno de 2475 años) la probabilidad de colapso aceptable corresponde a un 1 % (0,01) en 50 años. En este caso, al no obtenerse este resultado (ver Figura 1.19) con un margen de error del 1 % (margen definido para este trabajo), se procedió a realizar una segunda iteración, según se detalla en el Inciso 1.6.4.2. Este procedimiento se llevó a cabo para cada curva de amenaza de cada sitio.

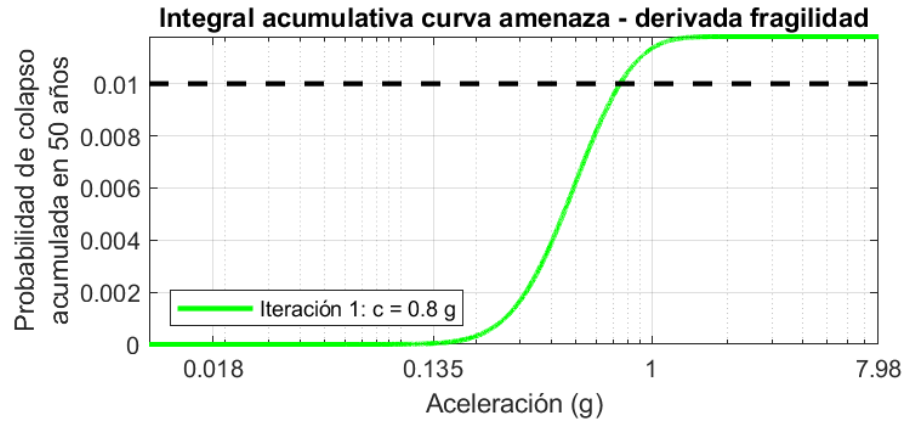


Figura 1.21. Ejemplo de comparación de la probabilidad de colapso acumulada contra la probabilidad de colapso aceptable para la primera iteración.

A modo de resumen, en el Cuadro 1.5 se muestran los parámetros de entrada utilizados en este trabajo para la metodología empleada.

Cuadro 1.5. Parámetros de entrada utilizados en este trabajo para cada período de retorno (TR).

TR (de referencia)	PE	λ	$P(c gm)$	P_C^T	Referencia	Código
2475 años	2 % en 50 años	$4,0405 \times 10^{-4}$	10 %	1 % en 50 años	Luco et. al [2]	ASCE 7-22 [35]
475 años	10 % en 50 años	$2,1072 \times 10^{-4}$	0,01 %	0,05 % en 50 años	Horspool et. al [37]	NZS 1170

Es importante destacar que la probabilidad de colapso aceptable puede variar dependiendo de la importancia de la estructura, y debería ser establecida por los responsables de la toma de decisiones en la planificación del país [30].

Asimismo, es necesario recalcar que, en este trabajo, ante la falta de valores de referencia específicos para Costa Rica, se optó por utilizar valor empleados en otras normas, como los indicados en el Cuadro 1.5.

1.6.4.2. Segunda iteración

En los casos donde la probabilidad de colapso obtenida en la primera iteración para cada caso estudiado fue superior a la probabilidad de colapso aceptable (como sucedió en la Figura 1.22), el valor de aceleración utilizado en el Paso 3 se aumentó (lo que implicó un desplazamiento de la curva de fragilidad a la derecha), en caso contrario, se disminuyó. Ya sea en cualquiera de los dos casos, posterior a modificar el valor de aceleración, se repitió el proceso descrito desde el Paso 3 hasta el Paso 7 (ver Inciso 1.6.4.1). Si después del Paso 7 la probabilidad de colapso obtenida aún difería de la probabilidad de colapso aceptable (P_C^T) de acuerdo al Cuadro 1.5 en más de un 1 % de margen de error, se realizó una tercera iteración. Asimismo, se continuó con iteraciones adicionales según fuera necesario (ver Inciso 1.6.4.3).

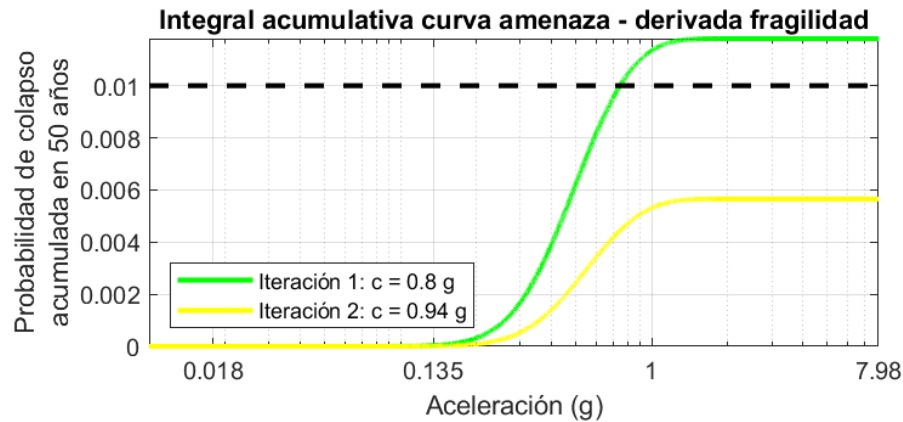


Figura 1.22. Ejemplo de comparación de la probabilidad de colapso acumulada contra la probabilidad de colapso aceptable para la segunda iteración.

1.6.4.3. Tercera iteración y otras iteraciones

A partir de las iteraciones realizadas, el movimiento del suelo a utilizar en la tercera iteración y otras iteraciones (en caso de ser necesarias), se eligió con mayor precisión, hasta obtener la probabilidad del colapso aceptable deseada (como por ejemplo 1% en 50 años, según se muestra en la Figura 1.23). Este valor final del movimiento del suelo, correspondiente a la probabilidad de colapso aceptable o riesgo aceptable, es el que se conoce en este trabajo como movimiento del suelo orientado al riesgo (RTGM).

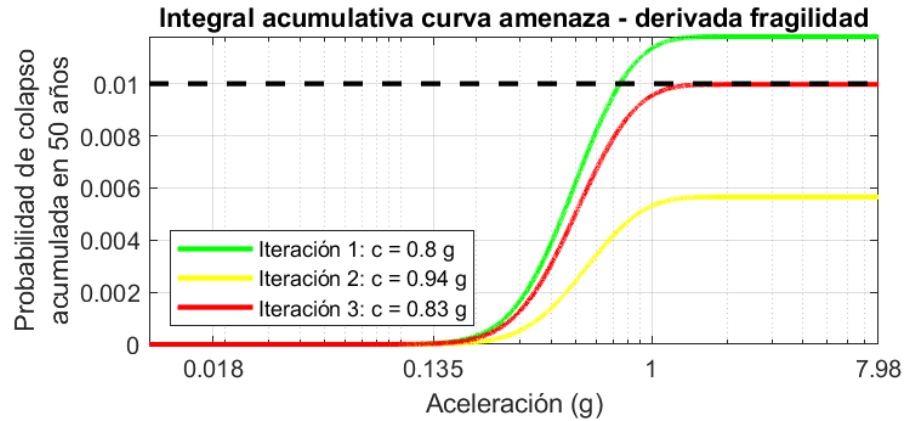


Figura 1.23. Ejemplo de comparación de la probabilidad de colapso acumulada contra la probabilidad de colapso aceptable para la tercera iteración.

Finalmente, los coeficientes de riesgo se calcularon según la Ecuación 1-4:

$$RC = \frac{RTGM}{UHGM} \quad \text{Ecuación 1-4}$$

Donde:

- RTGM: Aceleración sísmica orientada al riesgo uniforme, correspondiente con la probabilidad de colapso aceptable definida.
- UHGM: Aceleración sísmica obtenida en el Paso 2 de la primera iteración, proveniente de un enfoque de amenaza uniforme.

A manera de resumen, la Figura 1.24 muestra la metodología empleada para el cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) y los coeficientes de riesgo (RC) respectivos.

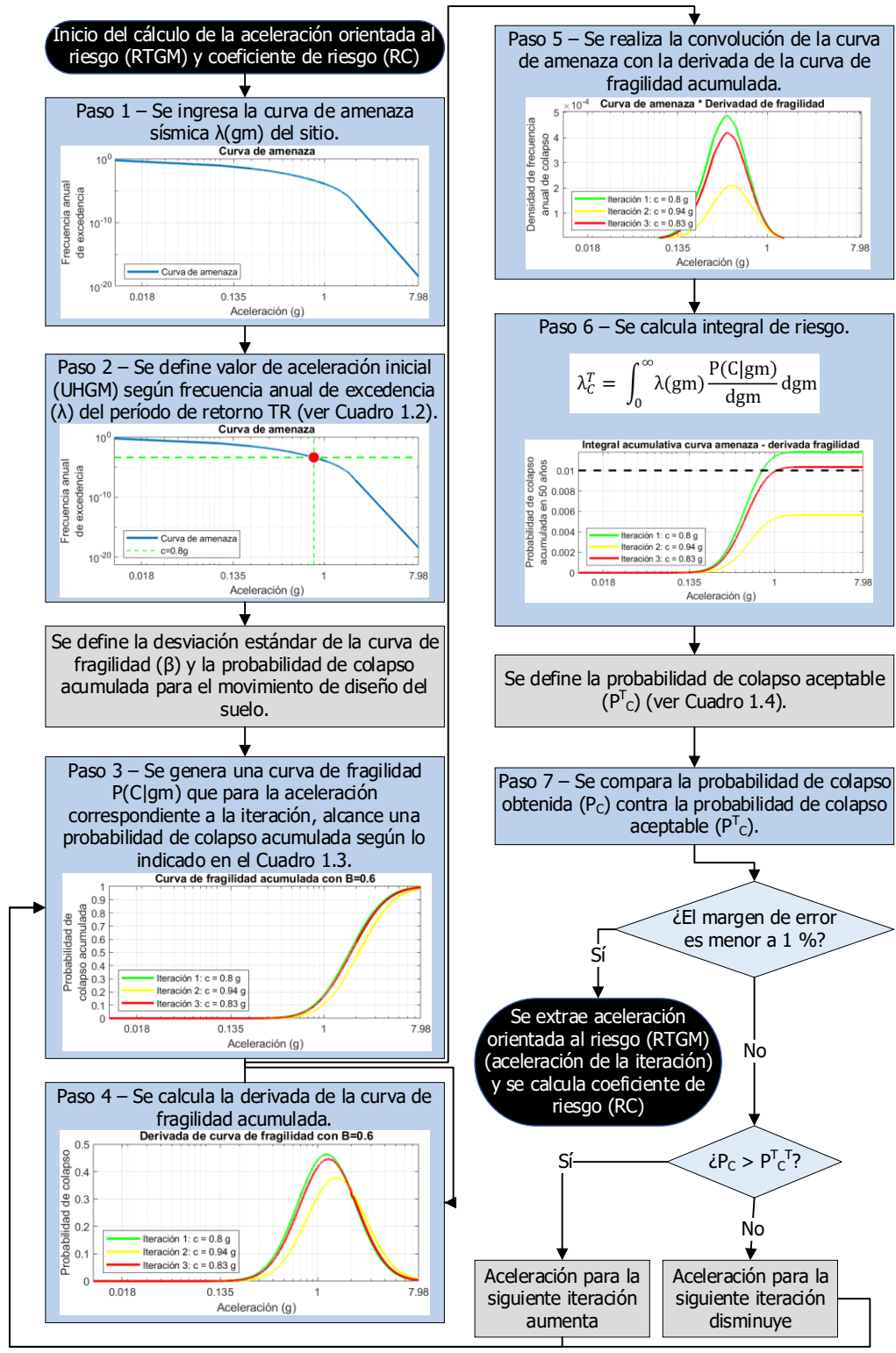


Figura 1.24. Resumen de metodología de cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) y coeficientes de riesgo (RC).

1.6.5. Generación de mapas en software GIS

A partir de aceleraciones orientadas al riesgo uniforme calculadas (RTGM) y los coeficientes de riesgo obtenidos (RC) para cada uno de los 10 451 puntos distribuidos a lo largo del territorio nacional, considerando sus diferentes curvas de amenaza (aceleración pico en el suelo y aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s), se generaron mapas de aceleraciones orientadas al riesgo uniforme (RTGM) y mapas de coeficientes de riesgo (RC) para Costa Rica.

Para la generación de estos mapas se hizo uso del programa computacional QGIS, el cual corresponde a un sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), de uso libre y código abierto. Con el objetivo de facilitar la generación de mapas, se desarrolló un código de programación en Python utilizando el entorno de QGIS para la automatización de tareas. El código mencionado anteriormente se incluye en el Anexo D.

1.6.6. Análisis de sensibilidad

Por otro lado, resultaba importante comprender cómo las variaciones de los parámetros de entrada de la metodología influyen en los mapas generados. Por lo tanto, en este trabajo, se efectuó un análisis de sensibilidad que consideró variaciones de la desviación estándar (β) y la probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño [$P(c|gm)$]. Este análisis se realizó utilizando únicamente las curvas de amenaza correspondientes a PGA (aceleración pico en el suelo) y para los mapas de coeficientes de riesgo (RC).

Las variaciones consideradas para la desviación estándar (β) y la probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño [$P(c|gm)$], según los períodos de retorno considerados, fueron obtenidas de referencias. Estas variaciones se resumen en el Cuadro 1.6.

Cuadro 1.6. Parámetros de entrada utilizados en el análisis de sensibilidad.

TR	β	P(c gm)	Referencia
2475 años	0,4	15 % ⁽¹⁾	ASCE [35]
	0,6	10 %	
	0,8	5 %	
475 años	0,4	0,1 %	Silva et. al [30]
	0,6	0,01 %	
	0,8	0,001 %	

Nota: ⁽¹⁾ De acuerdo con ASCE [35], para estructuras con categorías de riesgo de I y II, III, y IV, se utilizan valor de P(c|gm) 10 %, 5 % y 2,5 % respectivamente, sin embargo, para efectos de comparar un valor por encima del 10 %, se utilizó 15 %.

1.6.7. Discusión de resultados

Finalmente, se llevó a cabo una discusión de los resultados obtenidos siguiendo los procedimientos establecidos en los Apartados 1.6.5 y 1.6.6. Esta discusión se centró en la descripción de los mapas generados, destacando las tendencias, los valores máximos y mínimos, así como las variaciones observadas entre los diferentes mapas. En el análisis de sensibilidad realizado, se describió la influencia de los parámetros de entrada en los resultados obtenidos.

2. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en este trabajo. En la Sección 2.1 se muestran las aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) y los coeficientes de riesgo (RC); la Sección 2.2 incluye los resultados del análisis de sensibilidad; y la Sección 2.3, aspectos clave que deberían considerarse en caso de contemplarse la implementación de aceleraciones RTGM en el CSCR 2010/14 [1].

2.1. Aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo y coeficientes de riesgo

En la Figura 2.1, Figura 2.3, Figura 2.5, Figura 2.7, Figura 2.9 y Figura 2.11, se presentan los mapas de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de aceleraciones con períodos de retorno de 475 años y 2475 años. Estas corresponden a aceleraciones pico en el suelo (PGA) y aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s. Específicamente, la Figura 2.1 muestra las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA), orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica, ajustadas a partir de una aceleración con un periodo de retorno de 475 años, utilizando los parámetros de la norma NZS 1170 [37].

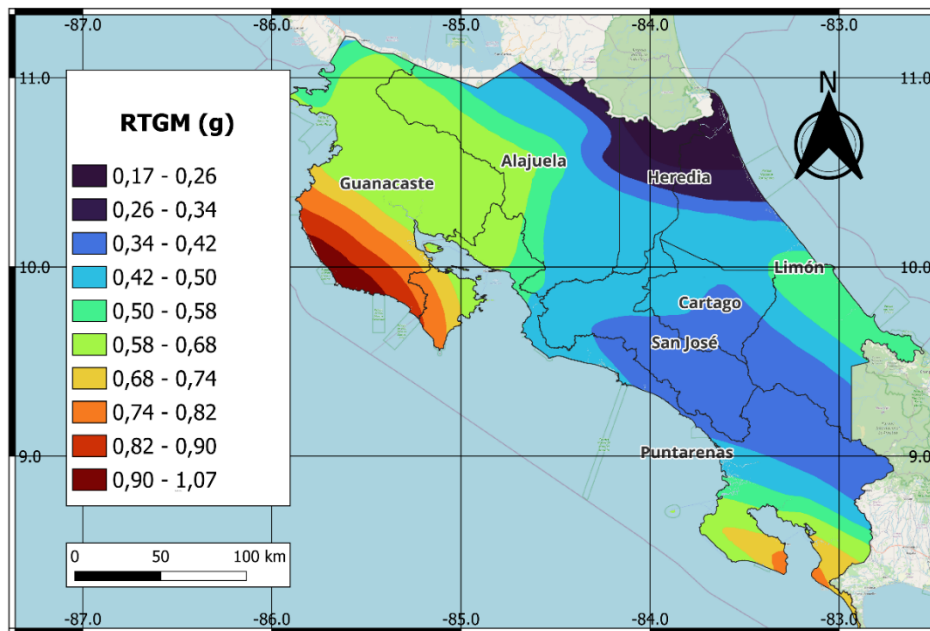


Figura 2.1. Mapa de aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

Como se puede observar en la Figura 2.1, este mapa sigue la misma forma de los mapas de amenaza elaborados por Hidalgo et al. (2021) y presentados en la Sección 1.1 (ver por ejemplo Figura 1.5). En la región del Pacífico Norte, especialmente en la península de Nicoya, se observan las aceleraciones más elevadas, con valores que oscilan entre 0,68 g y 1,07 g. Asimismo, al sur de Puntarenas, principalmente en la península de Osa y Punta Burica, también se observan aceleraciones importantes, con valores que varían entre 0,58 g y 0,82 g. Es evidente que en este mapa (al igual que en los mapas mostrados en la Figura 2.3, Figura 2.5, Figura 2.7, Figura 2.9 y Figura 2.1) también se resalta la marcada influencia de la actividad sísmica generada por la fuente de subducción en la región pacífica del país.

En contraste, las aceleraciones mínimas se presentan en el noreste del país, particularmente en el norte de las provincias de Heredia y Limón, donde los valores caen hasta valores de 0,17 g, aunque en el Caribe Sur existe un aumento significativo de las aceleraciones, con valores entre 0,50 g y 0,58 g.

Conocer las aceleraciones sísmicas en el Valle Central también es importante, ya que esta región alberga la mayor parte de la población de Costa Rica y de la infraestructura clave del país. En esta zona los valores de aceleración varían principalmente entre 0,34 g y 0,50 g.

Una de las características más notables del mapa es la disminución gradual de las aceleraciones a medida que se aleja del Pacífico y se adentra en el interior del país. Esta transición progresiva de colores, de rojo, amarillo y verde hacia azul, refleja la menor proximidad a las fuentes de subducción conforme se adentra en el país.

La similitud entre los mapas generados y los incluidos en la publicación de Hidalgo et al. (2022) era predecible, dado que la metodología empleada en este trabajo se basó en los mapas de amenaza proporcionados en dicha publicación.

Por otro lado, en la Figura 2.2, Figura 2.4, Figura 2.6, Figura 2.8, Figura 2.10 y Figura 2.12 se muestran los mapas de coeficientes de riesgo (RC) para Costa Rica. El mapa de coeficientes de riesgo (RC) muestra en qué proporción se modifican las aceleraciones orientadas hacia la amenaza (UHGM) al compararlas con las aceleraciones orientadas al riesgo (RTGM). Es decir, este mapa permite visualizar cómo varían las aceleraciones sísmicas requeridas para cumplir con la probabilidad de colapso aceptable definida según el Cuadro 1.4, al emplear un enfoque orientado hacia el riesgo.

De esta manera, si el coeficiente de riesgo (RC) es mayor a 1 en una región, las aceleraciones sísmicas de los modelos previos de amenaza deben incrementarse en esa magnitud para dicha zona. Por el contrario, en las regiones donde el coeficiente de riesgo (RC) es menor a 1, aceleraciones sísmicas de los modelos previos de amenaza deben disminuirse.

La Figura 2.2 muestra los coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA), ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

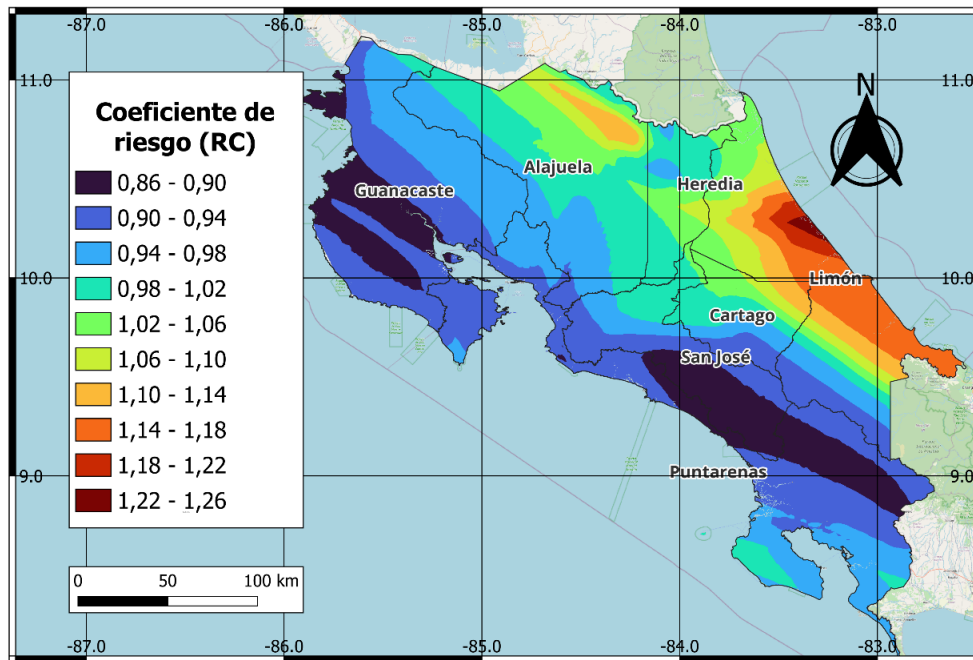


Figura 2.2. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

Según se muestra en la Figura 2.2, las zonas con los valores más altos de coeficiente se encuentran en la provincia de Limón, con valores que oscilan entre 1,06 y 1,26. En regiones como el Pacífico Sur, Central y Norte, los coeficientes muestran una disminución en las aceleraciones provenientes del modelo de amenaza, con reducciones que varían entre 0,86 y 0,98. En gran parte del Valle Central, los coeficientes de riesgo se encuentran cercanos a 1,00, principalmente con variaciones entre 0,98 y 1,02. Esto sugiere que las aceleraciones provenientes de ambos enfoques son comparables en esta región, y que los valores de aceleración previamente definidos se mantienen relativamente estables. Aunque en el sureste de San José se presentan coeficientes con valores entre 0,86 y 0,90.

El análisis de los coeficientes de riesgo tiene importantes implicaciones para el diseño estructural. De acuerdo a las probabilidades de colapso aceptable definidas en este trabajo, se podría indicar que las regiones con un coeficiente de riesgo (RC) mayor a 1,00, como en la provincia de Limón, se deberán emplear mayores aceleraciones de diseño para alcanzar los niveles de colapso aceptable, lo que implica que las estructuras en estas áreas necesitarán ser más resistentes a los movimientos sísmicos definidos en el estudio de amenaza utilizado como base [3], caso contrario a las zonas con un coeficiente de riesgo (RC) menor a 1,00, como el Pacífico Sur, Central y Norte, donde deberán utilizarse aceleraciones menores.

A modo de resumen de la Figura 2.1 y la Figura 2.2 se incluye el Cuadro 2.1 con los valores máximos y mínimos obtenidos para aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, así como los máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC) calculados.

Cuadro 2.1. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).

Valor	RTGM (g)	RC
Máximo	1,07	1,26
Mínimo	0,17	0,86
Amplitud	0,90	0,40

La Figura 2.3 muestra las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA), orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica, ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

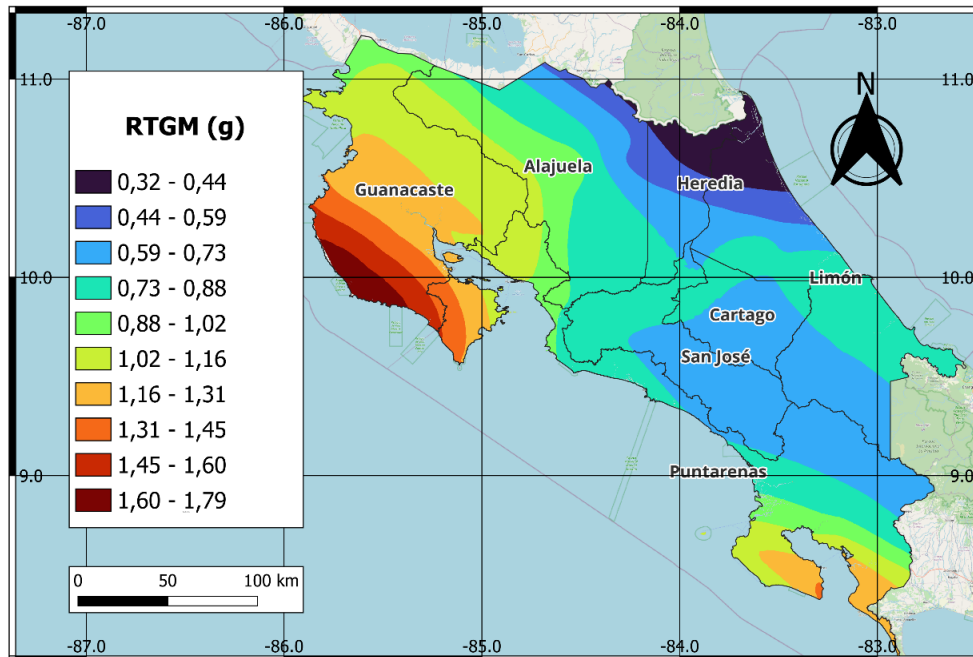


Figura 2.3. Mapa de aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

Como era de esperarse, la forma del mapa presentado en la Figura 2.3 es similar al de la Figura 2.1, ya que la información de entrada al modelo es la misma. La diferencia radica en que, en este caso, se han modificado los parámetros de entrada conforme a lo establecido en la norma ASCE 7-22 [35].

Al comparar la Figura 2.1 con la Figura 2.3, se observa que los valores de aceleración sísmica ajustados a partir de aceleraciones con un período de retorno de 2475 años son notablemente más altos en todas las regiones, en comparación con los obtenidos para el mapa ajustados a partir de aceleraciones con un período de 475 años. Esto, podría atribuirse a que un periodo de retorno más largo implica la consideración de eventos sísmicos más extremos. Si bien las aceleraciones orientadas al riesgo uniforme (RTGM) no están asociadas a un único período de retorno, el hecho de que esta metodología se haya desarrollado y calibrado para el contexto de Estados Unidos, sugiere que los parámetros involucrados utilizados en la metodología están alineados con las condiciones sísmicas de ese entorno.

Nuevamente, la Península de Nicoya es una de las regiones con mayores aceleraciones, pero ahora con valores que oscilan entre 1,16 g y 1,79 g. Asimismo, los valores menores se presentan al norte de Heredia y Limón, donde los valores de aceleración caen hasta 0,32 g.

La Figura 2.4 muestra los coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA), ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

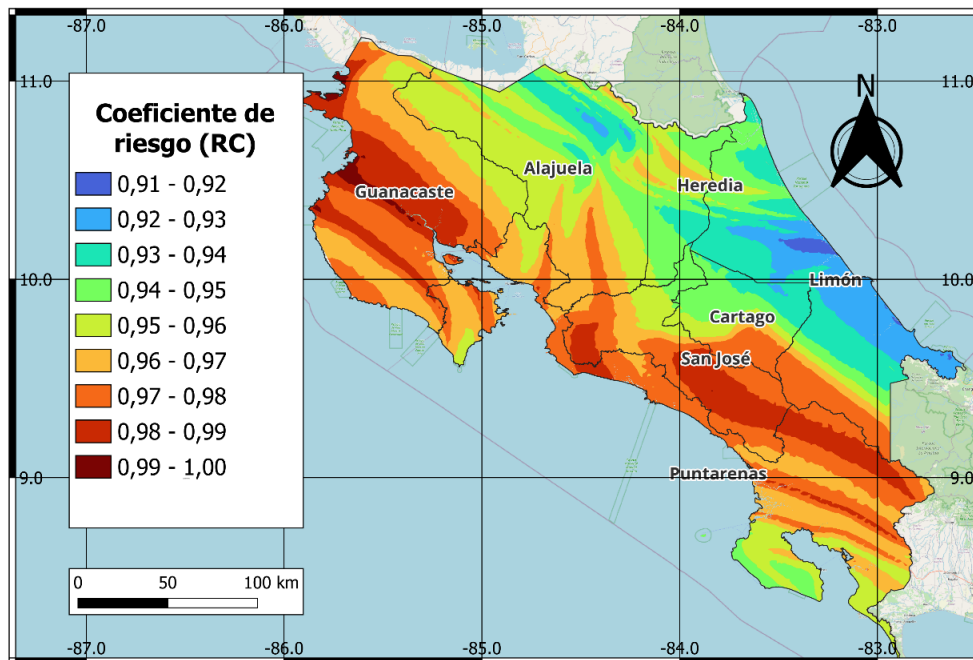


Figura 2.4. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

Según se muestra en la Figura 2.4, para las aceleraciones ajustadas a partir de un período de retorno de 2475 años y PGA, existe una menor variación de los coeficientes riesgo a lo largo del territorio nacional en comparación con el mapa ajustado a partir de aceleraciones con un período de retorno de 475 años. Esto indica que las aceleraciones sísmicas de los modelos previos de amenaza deben modificarse, en este caso disminuirse, en una menor proporción en comparación con los valores calculados para las aceleraciones a justadas a partir de un período de retorno de 475 años. Además, se evidencia una clara tendencia a la disminución del coeficiente desde el Pacífico del país hacia el Caribe con valores que van de 1,00 a 0,91.

El hecho de que los coeficientes de riesgo en este caso presenten una menor variación a lo largo del territorio y tiendan más hacia la uniformidad puede atribuirse a la forma en que se construye la curva de fragilidad acumulada. En la norma ASCE 7-22, dicha curva se define de manera que la aceleración orientada al riesgo corresponda a una probabilidad de colapso

del 10%, mientras que en la norma NZS 1170 este valor es significativamente menor, del 0,01%.

Al ser tan baja esta probabilidad, la curva de fragilidad acumulada construida en el Paso 3 de la metodología (ver Inciso 1.6.4.1) debe extenderse horizontalmente en una mayor proporción que la curva correspondiente a la curva generada a través de los parámetros de la norma ASCE. Esto implica que, incluso para valores altos de aceleración, la curva apenas acumula un 0,01% de probabilidad de colapso. En otras palabras, el principal aporte al colapso proviene de una pequeña porción en la cola derecha de la curva de densidad de probabilidad de colapso.

Como consecuencia, el colapso se acumula a menores valores de aceleración, y es necesario incrementar la aceleración para alcanzar la probabilidad de colapso aceptable establecida. Esta característica contribuye a que los coeficientes de riesgo tiendan a valores mayores cuando se ajustaron los mapas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

A modo de resumen de la Figura 2.3 y la Figura 2.4 se incluye el Cuadro 2.2 con los valores máximos y mínimos obtenidos para aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, así como los máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC) calculados.

Cuadro 2.2. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).

Valor	RTGM (g)	RC
Máximo	1,79	1,00
Mínimo	0,32	0,91
Amplitud	1,47	0,09

La Figura 2.5 muestra las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($S_{a 0,2 s}$), orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica, ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

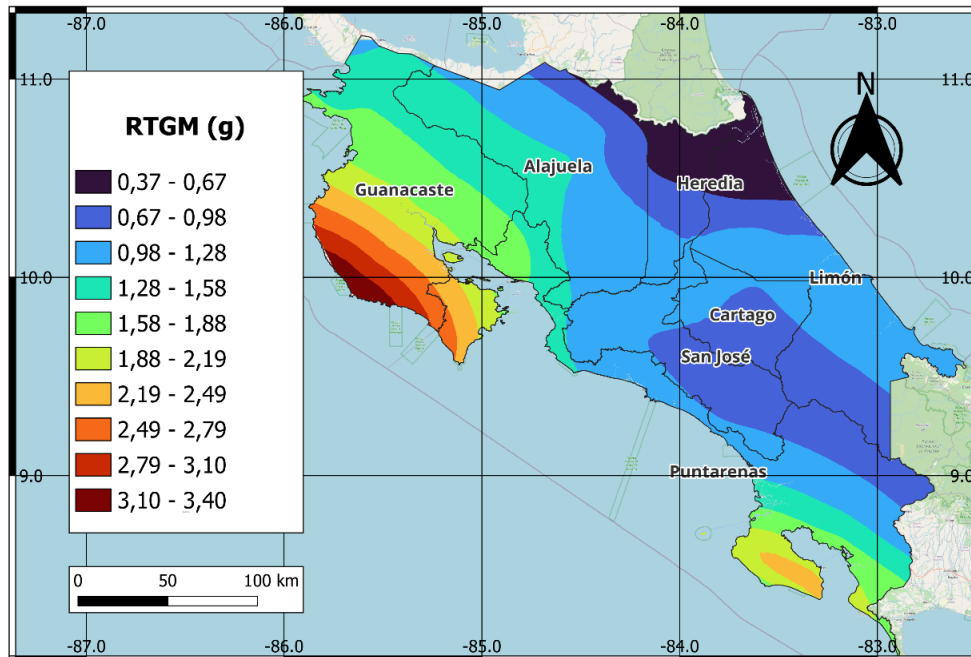


Figura 2.5. Mapa de aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

Como era de esperar, en la Figura 2.5 las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s son mayores en comparación a las aceleraciones pico del suelo (PGA) ajustadas a partir del mismo período de retorno de 475 años (ver Figura 2.1). Esto anterior se debe a que aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s se asocia típicamente con edificios bajos, los cuales, al ser más rígidos, tienden a amplificar la respuesta estructural ante componentes de alta frecuencia del movimiento sísmico, es decir, movimientos de corta duración.

Dado que la forma de los mapas de movimiento del suelo orientados al riesgo es la misma en cada caso, a partir de este punto solo se comentará el rango de aceleraciones espectrales obtenidos para estos mapas. En este caso particular, aceleraciones espectrales oscilan entre 0,37 g y 3,40 g, las cuales son evidentemente mayores en comparación con las aceleraciones obtenidas para el mapa de PGA (ver Figura 2.1).

La Figura 2.6 muestra los coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$), ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

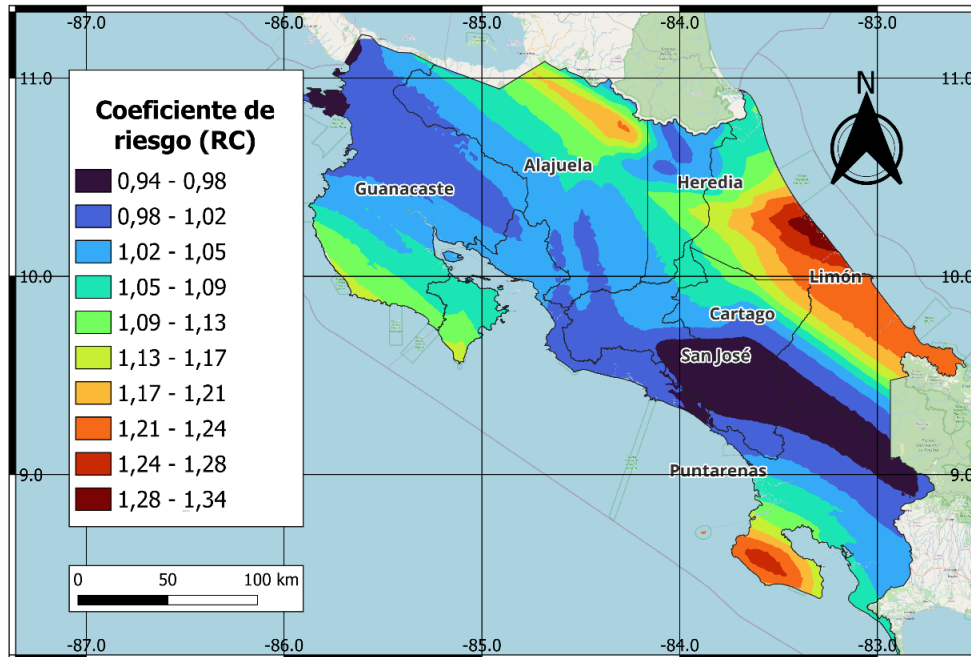


Figura 2.6. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

Según se observa en la Figura 2.6, la mayoría de las regiones presentan coeficientes por encima de 1,00, lo que sugiere que las aceleraciones espectrales provenientes del modelo de amenaza utilizado deben incrementarse, por ejemplo, en Limón se observan valores entre 1,17 y 1,34, así como en la Península de Osa. Solo unas pocas regiones, como en el Pacífico Sur, estos coeficientes se mantienen por debajo de 1,00, lo que podría justificar que en estos lugares las aceleraciones espectrales podrían considerarse más bajas.

A modo de resumen de la Figura 2.5 y la Figura 2.6 se incluye el Cuadro 2.3 con los valores máximos y mínimos obtenidos para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, así como los máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC) calculados.

Cuadro 2.3. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).

Valor	RTGM (g)	RC
Máximo	3,40	1,34
Mínimo	0,37	0,94
Amplitud	3,03	0,40

La Figura 2.7 muestra las a aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$), orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica, ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

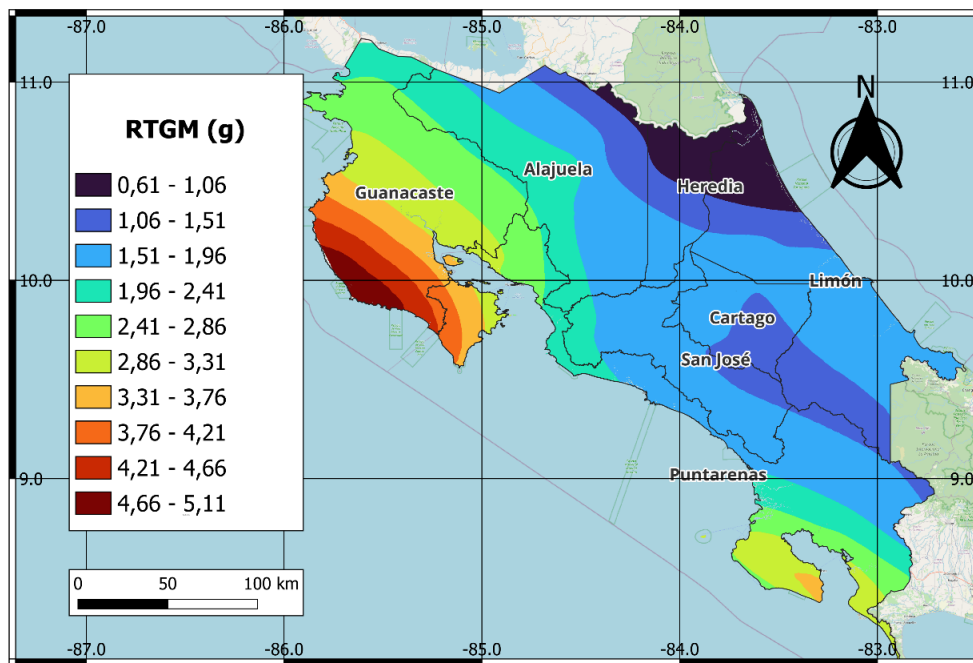


Figura 2.7. Mapa de aceleraciones sísmicas para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

De acuerdo con la Figura 2.7, para este caso de análisis las aceleraciones espectrales oscilan entre 0,61 g y 5,11 g, las cuales son evidentemente mayores en comparación con las aceleraciones espectrales ajustadas a partir de aceleraciones con un período de retorno de 475 años (ver Figura 2.5).

La Figura 2.8 muestra los coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$), ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

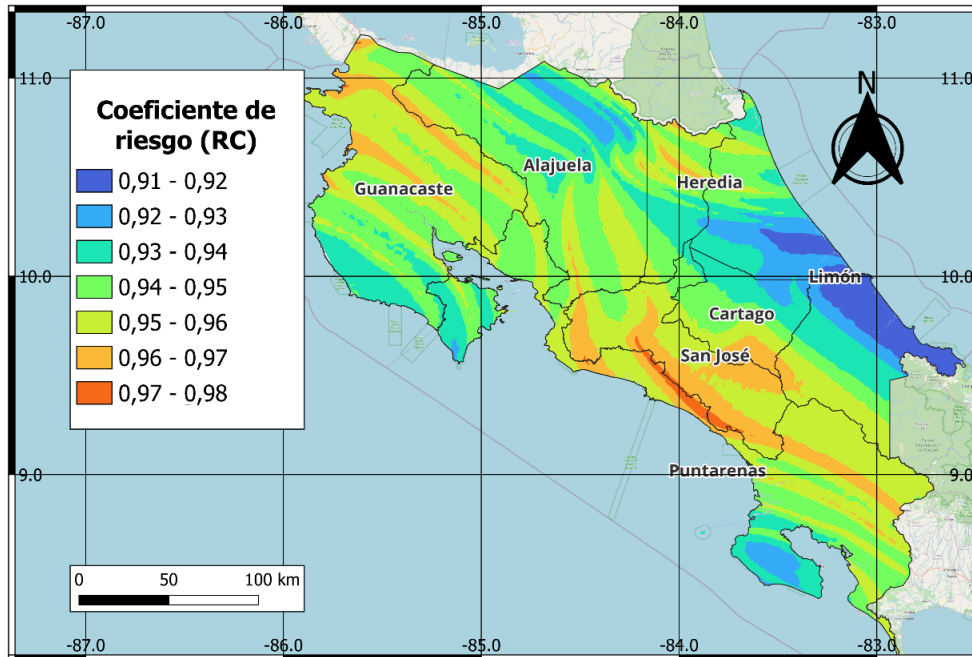


Figura 2.8. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

Según la Figura 2.8, de manera general para este caso los coeficientes de riesgo son menores a 1,00, lo que implica una reducción en las aceleraciones espectrales provenientes del modelo de amenaza empleado, llegando hasta valores de 0,91 en el Caribe Sur.

A modo de resumen de la Figura 2.7 y la Figura 2.8 se incluye el Cuadro 2.4 con los valores máximos y mínimos obtenidos para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, así como los máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC) calculados.

Cuadro 2.4. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).

Valor	RTGM (g)	RC
Máximo	5,11	0,98
Mínimo	0,61	0,91
Amplitud	4,50	0,07

La Figura 2.9 muestra las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$), orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica, ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

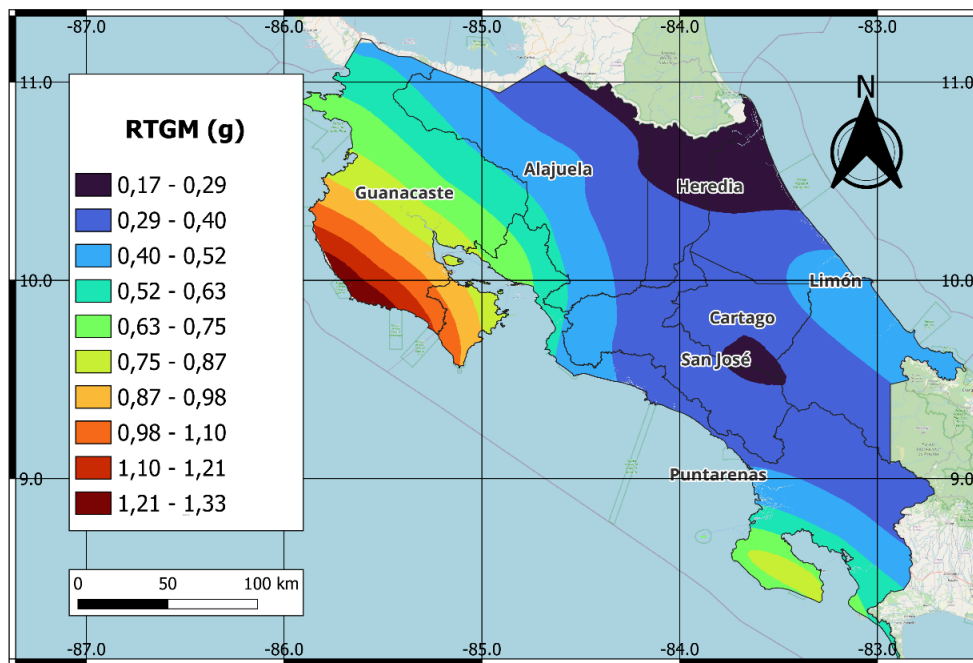


Figura 2.9. Mapa de aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

De acuerdo con la Figura 2.9, para este caso de análisis las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 varían entre 0,17 g y 1,33 g, las cuales son evidentemente menores en comparación con los valores obtenidos para el mapa de aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s y ajustado a partir de aceleraciones con un período de retorno de 475 años (ver Figura 2.5). Es importante recordar que una

aceleración espectral para un período de oscilación de 1,0s se asocia típicamente con edificios altos, los cuales, al ser más flexibles, responden con mayor amplitud a componentes sísmicas de baja frecuencia y mayor duración, pero son menos sensibles a los movimientos bruscos de alta frecuencia.

La Figura 2.10 muestra los coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$), ajustadas a partir de aceleraciones con periodo de retorno de 475 años.

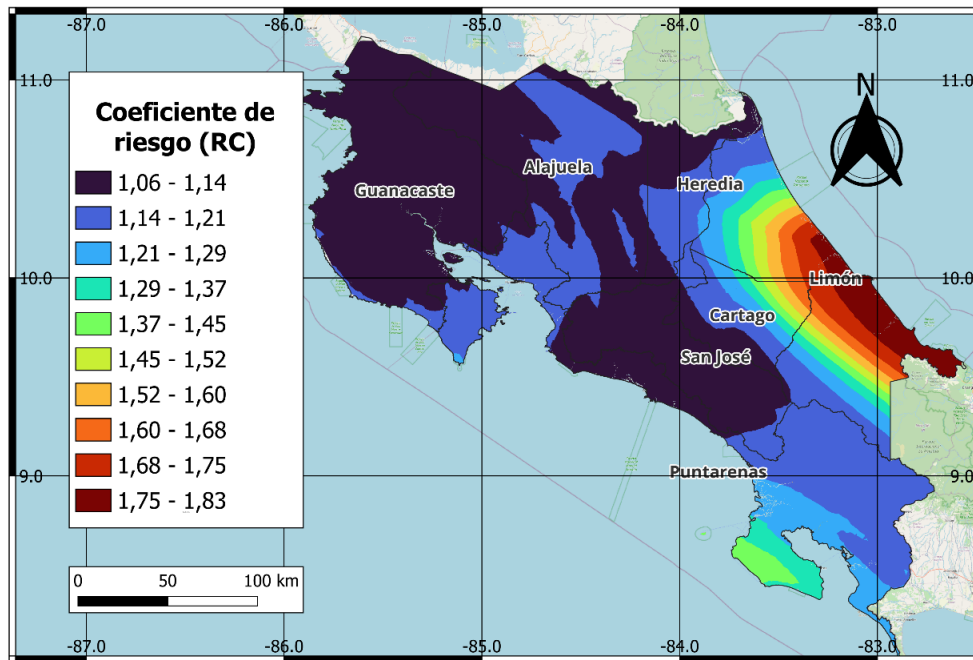


Figura 2.10. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años.

Según la Figura 2.10, para este caso todos los coeficientes de riesgo son mayores a 1,00, lo que implica aumentos en las aceleraciones espectrales provenientes del modelo de amenaza empleado, llegando a incrementos significativos en Limón, con valores entre 1,37 y 1,83, y en la Península de Osa, con valores entre 1,21 y 1,45.

A modo de resumen de la Figura 2.9 y la Figura 2.10 se incluye el Cuadro 2.5 con los valores máximos y mínimos obtenidos para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones

con un periodo de retorno de 475 años, así como los máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC) calculados.

Cuadro 2.5. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).

Valor	RTGM (g)	RC
Máximo	1,33	1,83
Mínimo	0,17	1,06
Amplitud	1,16	0,77

La Figura 2.11 muestra las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$), orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica, ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

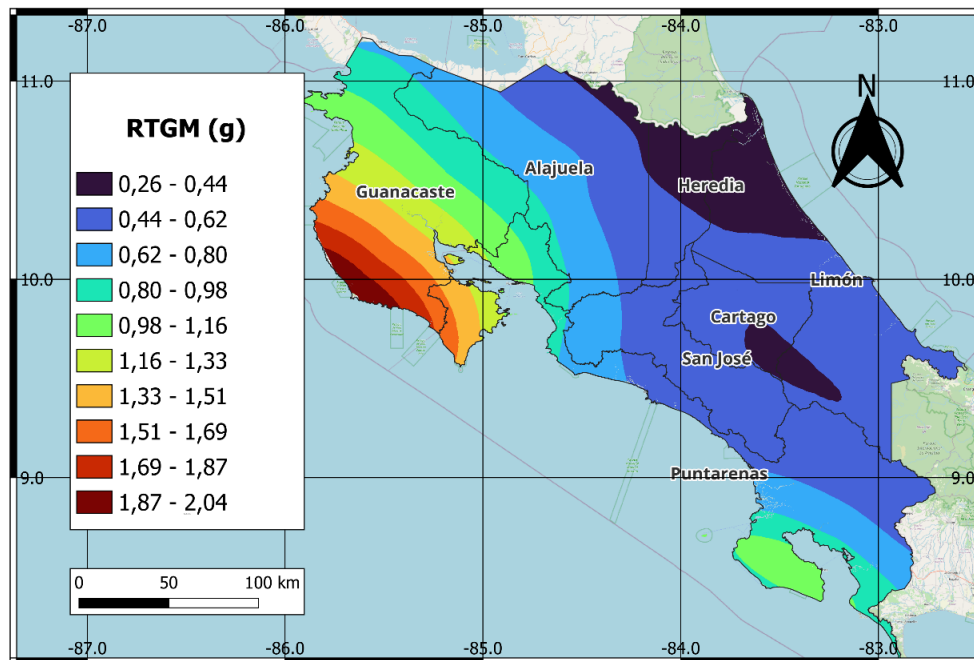


Figura 2.11. Mapa de aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) para Costa Rica ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

De acuerdo con la Figura 2.11, para este caso de análisis las aceleraciones espectrales oscilan entre 0,26 g y 2,04 g, las cuales son evidentemente mayores en comparación con

las aceleraciones espectrales obtenidos para el mapa ajustado a partir de aceleraciones con un período de retorno de 475 años (ver Figura 2.9).

La Figura 2.12 muestra los coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$), ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

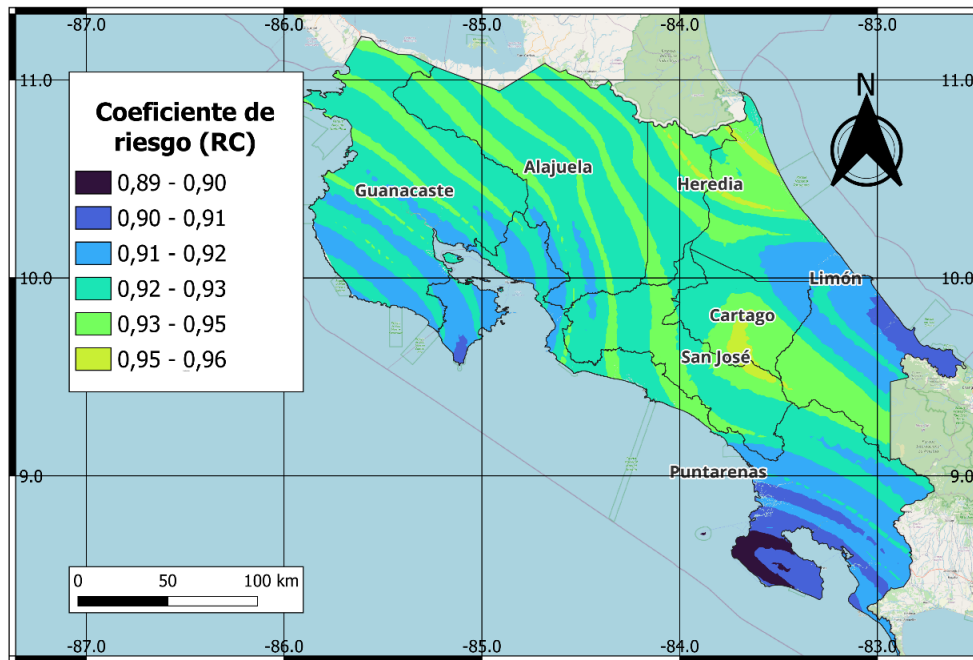


Figura 2.12. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años.

Según la Figura 2.12, para este caso todos los coeficientes de riesgo son menores a 1,00, lo que implica reducciones en las aceleraciones espectrales provenientes del modelo de amenaza empleado, llegando a reducciones entre 0,89 y 0,96.

A modo de resumen de la Figura 2.11 y la Figura 2.12 se incluye el Cuadro 2.6 con los valores máximos y mínimos obtenidos para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, así como los máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC) calculados.

Cuadro 2.6. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) orientadas al riesgo uniforme (RTGM) ajustadas a partir de aceleraciones con periodo de retorno de 2475 años, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).

Valor	RTGM (g)	RC
Máximo	2,04	0,96
Mínimo	0,26	0,89
Amplitud	1,78	0,07

Finalmente, el Cuadro 2.7 incluye un resumen de los valores máximos y mínimos obtenidos en cada mapa para las aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo (RTGM) y los valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC), ajustados a partir de aceleraciones con períodos de retorno de 475 años y 2475 años, y aceleraciones pico en el suelo (PGA) y aceleraciones espectrales para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s,

Cuadro 2.7. Valores máximos y mínimos de las aceleraciones sísmicas orientados al riesgo (RTGM) para Costa Rica, y valores máximos y mínimos de los coeficientes de riesgo (RC).

Parámetros utilizados	Aceleración ajustada	Referencia de figura	Valor	RTGM (g)	RC
NZS 1170 [37]	PGA (para 475 años)	Figura 2.1 y Figura 2.2	Máximo	1,07	1,26
			Mínimo	0,17	0,86
			Amplitud (máximo – mínimo)	0,90	0,40
ASCE 7-22 [35]	PGA (para 2475 años)	Figura 2.3 y Figura 2.4	Máximo	1,79	1,00
			Mínimo	0,32	0,91
			Amplitud (máximo – mínimo)	1,47	0,09
NZS 1170 [37]	$Sa_{0,2s}$ (para 475 años)	Figura 2.5 y Figura 2.6	Máximo	3,40	1,34
			Mínimo	0,37	0,94
			Amplitud (máximo – mínimo)	3,03	0,40
ASCE 7-22 [35]	$Sa_{0,2s}$ (para 2475 años)	Figura 2.7 y Figura 2.8	Máximo	5,11	0,98
			Mínimo	0,61	0,91
			Amplitud (máximo – mínimo)	4,50	0,07
NZS 1170 [37]	$Sa_{1,0s}$ (para 475 años)	Figura 2.9 y Figura 2.10	Máximo	1,33	1,83
			Mínimo	0,17	1,06
			Amplitud (máximo – mínimo)	1,16	0,77
ASCE 7-22 [35]	$Sa_{1,0s}$ (para 2475 años)	Figura 2.11 y Figura 2.12	Máximo	2,04	0,96
			Mínimo	0,26	0,89
			Amplitud (máximo – mínimo)	1,78	0,07

Del Cuadro 2.7 se resaltan algunos valores importantes. En primer lugar, se resalta en negrita y con la casilla en un tono de azul, el máximo y mínimo de los coeficientes de riesgo (RC), los cuales indican que las aceleraciones sísmicas proveniente de los modelos de amenaza podrían verse modificadas (según sea el caso) entre 0,89 y 1,83 al emplear un enfoque orientado al riesgo.

Asimismo, tomando como referencia la desviación estándar β , la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño $P(c|gm)$ y la probabilidad de colapso aceptable P_C^T utilizados en este trabajo, se puede concluir que, en términos generales, el riesgo sísmico está siendo subestimado, ya que el valor más bajo en el que se podrían ajustar las aceleraciones provenientes del estudio de amenaza es 0,89, mientras que el valor más alto es 1,83.

En segundo lugar, se destacan en negrita y con un recuadro en tono naranja los valores máximos de aceleración ajustados a partir de los períodos de retorno de 475 y 2475 años, siendo estos últimos consistentemente superiores, lo que evidencia la consideración de eventos sísmicos más extremos en su estimación.

En tercer lugar, se resalta en negrita y con casilla de tonalidad verde la amplitud de las aceleraciones y los coeficientes de riesgos para cada uno de los casos presentados. Como se observa, las aceleraciones orientadas al riesgo presentan mayores valores cuando se ajustan a partir de un período de retorno de 475 años, en comparación con aquellas ajustadas a un período de retorno de 2475 años. Esta diferencia refleja una mayor variabilidad geográfica en las aceleraciones para el primer caso, comportamiento que también se manifiesta en los coeficientes de riesgo. Como ya se indicó anteriormente, esta variación está relacionada con la forma en que se define la curva de fragilidad genérica en la norma NZS 1170, la cual difiere del enfoque adoptado en la ASCE 7-22, particularmente en cuanto a la ubicación del valor medio y la dispersión de la curva.

Otro aspecto interesante de analizar es la relación de la aceleración orientada al riesgo para aceleraciones ajustadas a partir de período de retorno de 2475 años y una aceleración correspondiente ajustadas a partir de un período de retorno de 475 años. A continuación, la Figura 2.13, Figura 2.14 y la Figura 2.14, muestran esta razón para PGA, $S_a_{0,2s}$ y $S_a_{1,0s}$. La razón por la cual este aspecto resulta interesante, es que según los comentarios al Código

Sísmico de Costa Rica – 2010 [1], un período de retorno de aproximadamente 2753 años corresponde a la sollicitación sísmica de estructuras normales (es decir, con un período de retorno de 500 años) multiplicada por un factor de importancia de 1,5.

Aunque el enfoque RTGM elimina el uso explícito del factor de importancia (I), al incorporar directamente el nivel de riesgo aceptable en el cálculo de las aceleraciones sísmicas, especialmente en normativas que tradicionalmente estimaban aceleraciones para diferentes períodos de retorno, el cociente entre las aceleraciones obtenidas bajo distintos parámetros de diseño puede interpretarse como una medida indirecta del efecto relativo de la importancia estructural asumida en cada normativa.

La Figura 2.13 muestra el mapa de las razones de las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de un período de retorno de 2475 años entre las aceleraciones ajustadas a partir de un período de retorno de 475 años.

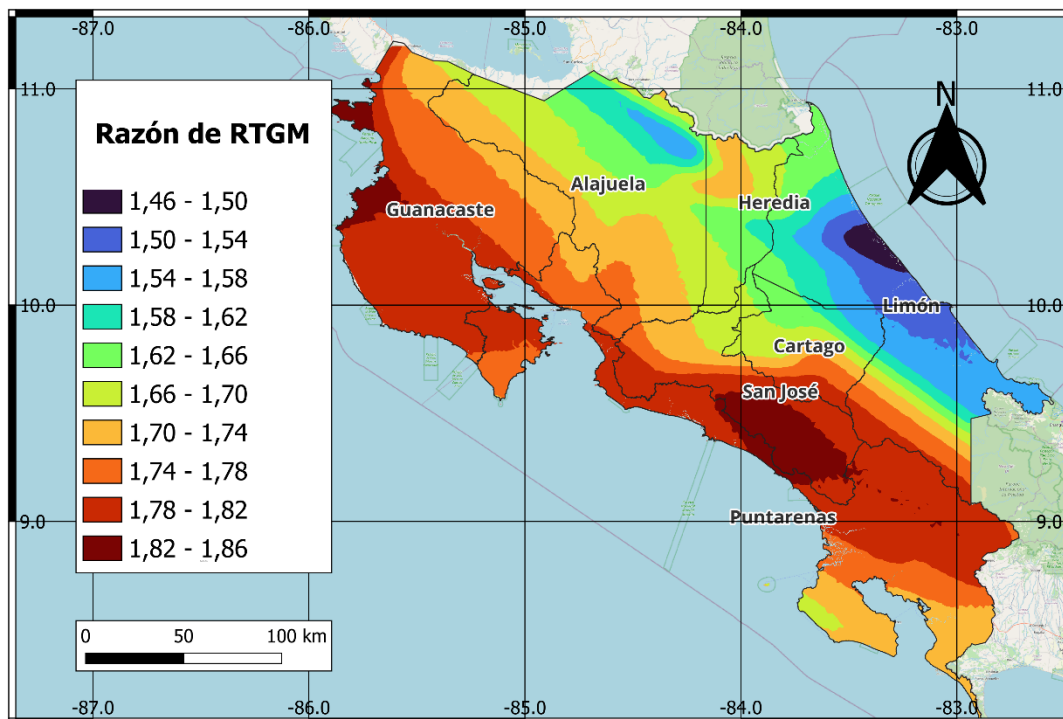


Figura 2.13. Mapa de las razones de las aceleraciones sísmicas pico en el suelo (PGA) ajustadas para períodos de retorno de 2475 y 475 años.

En la Figura 2.13, se observa que para PGA, en el Caribe, la relación entre ambas aceleraciones se encuentra principalmente en el rango de 1,50 y 1,62, lo que es muy cercano al valor de 1,50 indicado en el CSCR 2010/14 [1]. Sin embargo, conforme se adentra al país y se acerca al Pacífico, estas razones aumentan inclusive hasta valores de 1,86, lo cual se encuentra significativamente por encima del valor especificado en el CSCR 2010/14.

La Figura 2.14 muestra el mapa de las razones de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) ajustadas a partir de un período de retorno de 2475 años entre las aceleraciones ajustadas a partir de un período de retorno de 475 años.

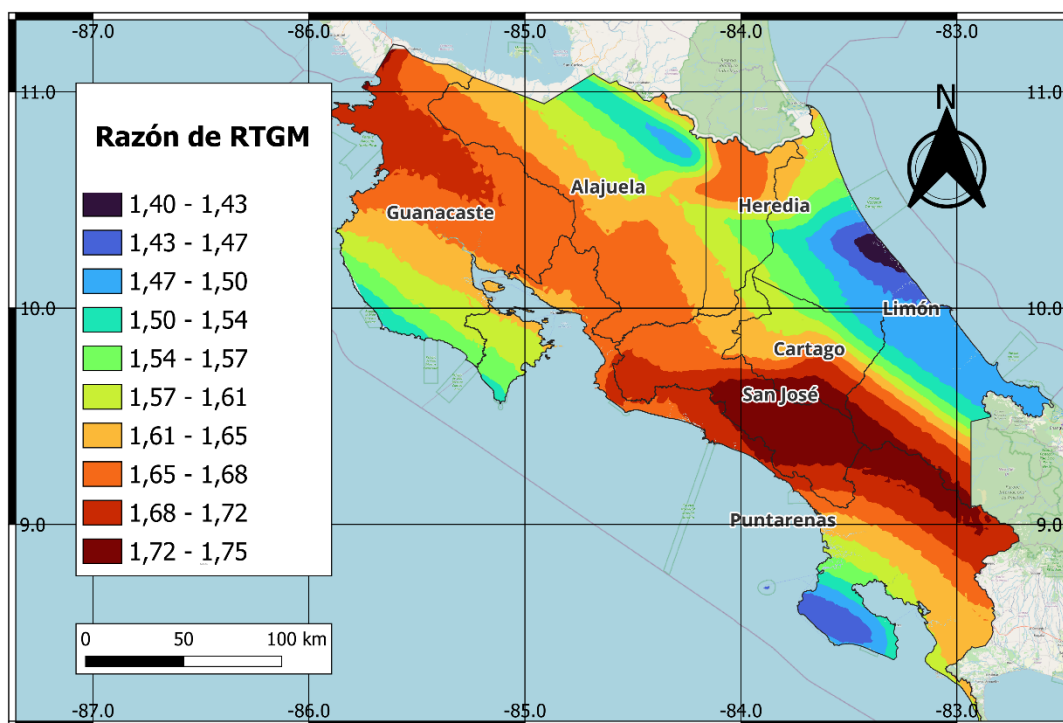


Figura 2.14. Mapa de las razones de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) ajustadas para períodos de retorno de 2475 y 475 años.

De la misma manera, en la Figura 2.14, se observa que para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 0,2 s ($Sa_{0,2s}$) la tendencia mostrada anteriormente para PGA (ver Figura 2.13) se mantiene, salvo que en este caso valores se encuentran entre 1,40 y 1,75. Otra diferencia, es que existen algunas zonas en el Pacífico, como, por ejemplo, la Península de Osa que presenta valores entre 1,43 y 1,47, más cercanos al valor de 1,50 establecido en el CSCR 2010/14.

Finalmente, la Figura 2.15 muestra el mapa de las razones de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) ajustadas a partir de un período de retorno de 2475 años entre las aceleraciones ajustadas a partir de un período de retorno de 475 años.

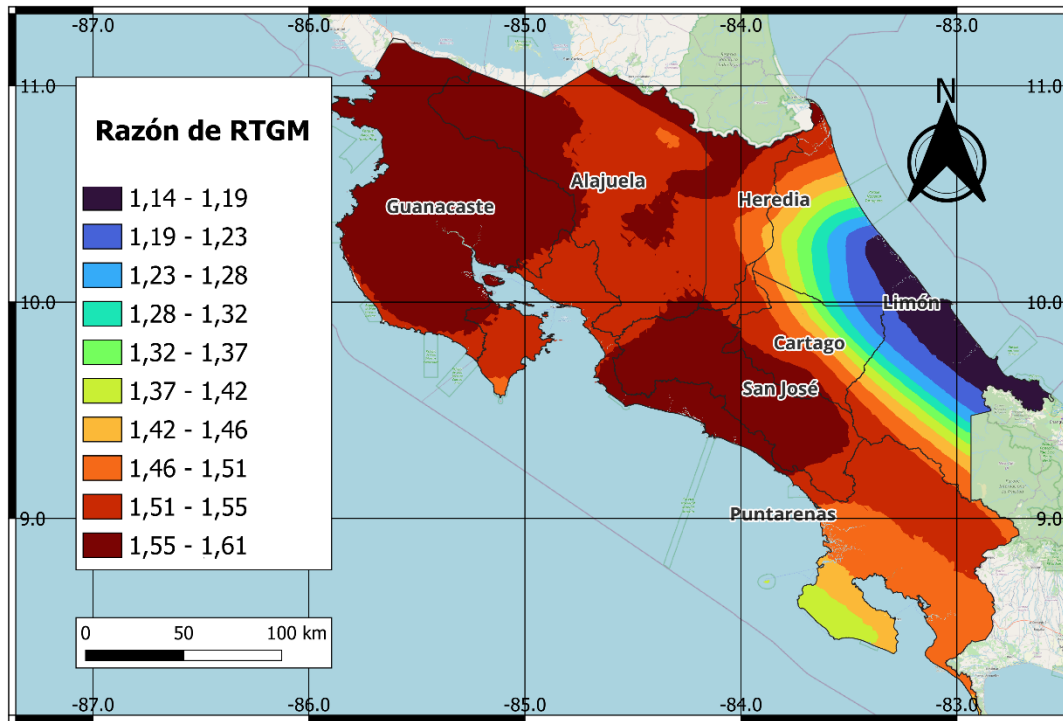


Figura 2.15. Mapa de las razones de las aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) ajustadas para períodos de retorno de 2475 y 475 años.

A diferencia de los mapas anteriores (Figura 2.13 y Figura 2.14), en la Figura 2.15, se observa que para aceleraciones espectrales para un período de oscilación de 1,0 s ($Sa_{1,0s}$) la mayoría del territorio presenta valores cercanos al 1,50 establecido en el CSCR 2010/14, con valores entre 1,47 y 1,61. Sin embargo, hacia el Caribe se observa valores que disminuyen hasta 1,14.

Los resultados anteriores también ponen en evidencia un enfoque más conservador en los valores obtenidos en este trabajo al adoptar los parámetros establecidos en la norma ASCE 7-22, en comparación con los definidos por la norma NZS 1170.

2.2. Análisis de sensibilidad de parámetros de entrada en la metodología

En esta sección se presentan los resultados del análisis de sensibilidad realizado para evaluar cómo las variaciones en la desviación estándar (β) y la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño [$P(c|gm)$] influyen en los mapas de coeficientes de riesgo (RC). Las variaciones de estos parámetros se incluyen en el Cuadro 1.3 y fueron aplicadas sistemáticamente (variando una a la vez) para observar sus efectos sobre los coeficientes de riesgo (RC).

Los resultados obtenidos permiten identificar la sensibilidad de la metodología empleada ante diferentes escenarios y proporcionan una comprensión más profunda de los posibles rangos de incertidumbre. A continuación, se presentan y discuten los hallazgos más relevantes de este análisis para estas dos variables [β y $P(c|gm)$].

2.2.1. Desviación estándar (β)

A continuación, en la Figura 2.16 y la Figura 2.17 se presentan los mapas de coeficientes de riesgo (RC) para Costa Rica, ajustados a partir de aceleraciones con períodos de retorno de 475 años y 2475 años, considerando la aceleración pico en el suelo (PGA) y diferentes valores de desviación estándar (β), específicamente 0.4, 0.6 y 0.8. Estos mapas ilustran cómo varía el riesgo sísmico en función de la desviación estándar (β).

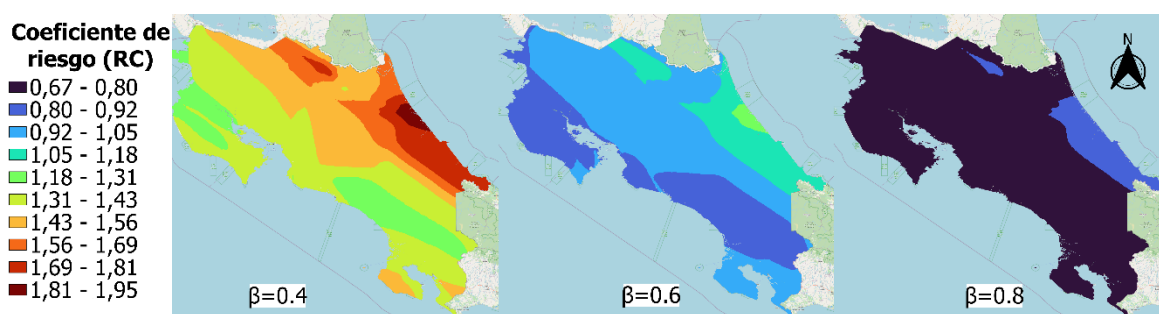


Figura 2.16. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, con $\beta=0.4$, 0.6 y 0.8.

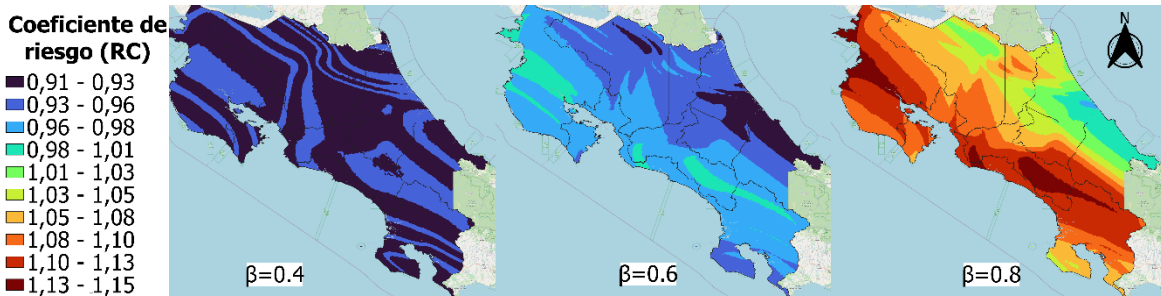


Figura 2.17. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, con $\beta=0.4$, 0.6 y 0.8.

En la Figura 2.16 se puede observar como para una desviación estándar de $\beta=0.4$ el mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustados a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años muestra una mayor variabilidad y contraste en los coeficientes de riesgo calculados, con valores que se encuentran entre 1,18 y 1,95. Para una desviación estándar de $\beta=0.6$ la variabilidad de los coeficientes de riesgo disminuye en comparación con $\beta=0.4$, con coeficientes entre 0,80 y 1,31. Finalmente, para $\beta=0.8$ el mapa muestra una homogeneización significativa en los valores de los coeficientes de riesgo y las diferencias son menores. En su mayoría dichos coeficientes se encuentran entre 0,67 y 0,92.

De estos resultados se puede concluir que a valores más bajos de la desviación estándar (β), hay una mayor variabilidad, resultando en un mapa de coeficientes de riesgo con mayores contrastes y diferenciación regional. Por otro lado, a valores más altos de β , la distribución de los coeficientes de riesgo se vuelve más uniforme.

Contrariamente, en la Figura 2.17 se puede observar como para una desviación estándar de $\beta=0.4$ el mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustados a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años muestra una menor variabilidad en comparación con $\beta=0.6$ y $\beta=0.8$, por lo que la influencia del parámetro β en los coeficientes de riesgo es totalmente opuesto al observado en la Figura 2.16. Para $\beta=0.4$ se tienen coeficientes de riesgo con valores entre 0,91 y 0,96, para $\beta=0.6$ valores entre 0,91 y 1,01, mientras que para $\beta=0.8$ valores entre 0,98 y 1,15.

La razón por la cual el comportamiento observado en la Figura 2.16 y la Figura 2.17 varía ante cambios en el parámetro β puede atribuirse a un aspecto ya mencionado anteriormente en la Sección 2.1 de este trabajo: la forma en que se define la curva de fragilidad acumulada en cada normativa.

En la norma ASCE 7-22 (utilizada para ajustar aceleraciones correspondientes a un período de retorno de 2475 años), esta curva se establece de modo que la aceleración orientada al riesgo corresponda a una probabilidad de colapso acumulada en la curva de fragilidad del 10 %, mientras que en la norma NZS 1170 (utilizada para ajustar aceleraciones correspondientes a un período de retorno de 475 años) dicha probabilidad es mucho menor, del 0,01 % [ver Figura 2.18 (b)].

Debido a esta probabilidad tan baja en la norma NZS 1170, la curva de fragilidad acumulada construida debe extenderse horizontalmente en una proporción mucho mayor que la curva generada mediante los parámetros de la ASCE. Esto significa que, incluso ante aceleraciones sísmicas elevadas, la curva apenas alcanza una acumulación del 0,01% de probabilidad de colapso. En otras palabras, la mayor contribución al colapso proviene de una porción muy reducida en la cola derecha de la curva de densidad de probabilidad de colapso [Figura 2.18 (c)].

Por lo tanto, al aumentar la desviación estándar β , se permite que aceleraciones menores contribuyan en mayor proporción a la probabilidad de colapso [ver Figura 2.18 (d)]. Como consecuencia, el riesgo objetivo se alcanza con aceleraciones progresivamente más bajas.

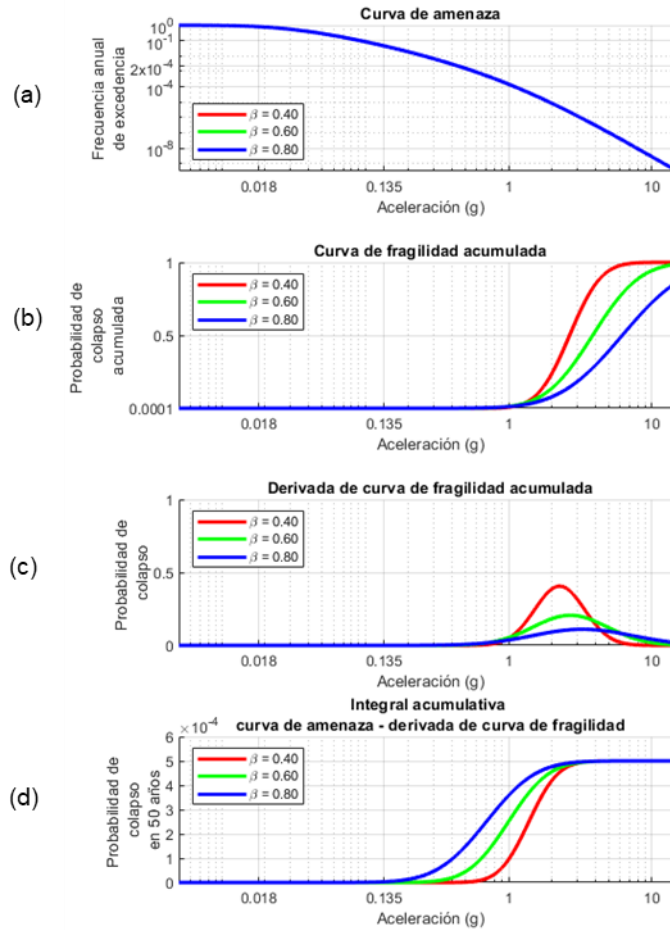


Figura 2.18. Variación β con parámetros normativos para ajuste de aceleraciones asociadas a un período de retorno de 475 años: (a) Curva de amenaza sísmica, (b) Curva de fragilidad acumulada, (c) Derivada de la curva de fragilidad y (d) Integral acumulada del producto entre la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad.

Por otro lado, en el caso de los parámetros definidos por la norma ASCE 7-22, utilizados para ajustar aceleraciones asociadas a un período de retorno de 2475 años, la curva de fragilidad se encuentra calibrada de modo que la aceleración obtenida corresponde a una probabilidad acumulada de colapso del 10% en dicha curva [ver Figura 2.19 (b)]. Esta configuración provoca que la cola derecha de la función de densidad de probabilidad asociada a la curva de fragilidad [ver Figura 2.19 (c)] permita una mayor contribución de la curva de amenaza al riesgo total [ver Figura 2.19 (d)], abarcando un rango más amplio de aceleraciones. En consecuencia, una mayor dispersión implica que, si bien se incorporan aceleraciones más bajas al aporte del colapso, también se reconoce una participación más

significativa de las aceleraciones elevadas en la probabilidad de colapso. Por esta razón, es necesario incrementar la aceleración de diseño para cumplir con el riesgo objetivo especificado.

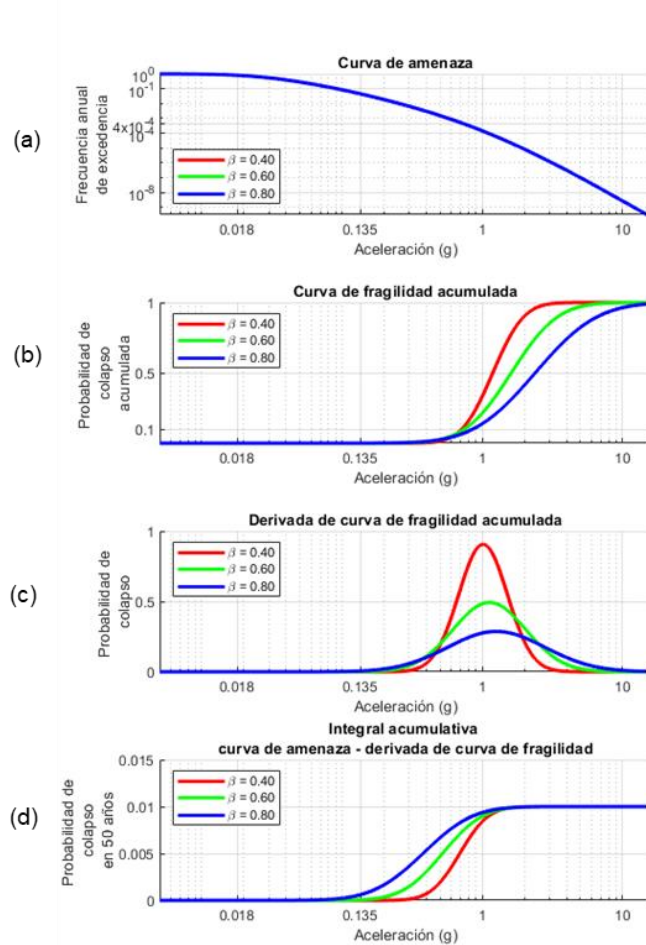


Figura 2.19. Variación β con parámetros normativos para ajuste de aceleraciones asociadas a un período de retorno de 475 años: (a) Curva de amenaza sísmica, (b) Curva de fragilidad acumulada, (c) Derivada de la curva de fragilidad y (d) Integral acumulada del producto entre la curva de amenaza y la derivada de la curva de fragilidad.

Como parte del análisis realizado en esta sección, se calcularon las variaciones en los coeficientes de riesgo en función del porcentaje de modificación del parámetro β . Los resultados correspondientes se presentan en el Cuadro 2.8.

Cuadro 2.8. Cambio relativo del coeficiente de riesgo (RC) por aumento porcentual del parámetro β al ajustar aceleraciones correspondientes a 475 años y 2475 año.

Parámetros utilizados	Período de retorno ajustado	Cambio relativo del RC por aumento % del parámetro
NZS 1170	475 años	-0,51 a -1,14
ASCE 7-22	2475 años	0 a 0,47

Del Cuadro 2.8 se concluye que la sensibilidad del coeficiente de riesgo (RC) al parámetro β varía en función del período de retorno ajustado y de la norma utilizada. Para un período de retorno de 475 años, un aumento en la dispersión tiende a reducir los coeficientes de riesgo (RC), mientras que, para un período de 2475 años, el efecto es opuesto, aunque menos pronunciado. Esto sugiere que la forma en que se define la curva de fragilidad en cada caso influye significativamente en cómo el parámetro β impacta las aceleraciones obtenidas para cumplir con el riesgo objetivo.

Adicionalmente, en términos generales, los resultados obtenidos y las diferencias observadas indican que la metodología es sensible al rango de valores de β considerado.

2.2.2. Probabilidad de colapso

A continuación, en la Figura 2.18 y la Figura 2.19 se presentan los mapas de coeficientes de riesgo (RC) para Costa Rica, ajustados a partir de aceleraciones con períodos de retorno de 475 años y 2475 años, considerando la aceleración pico en el suelo (PGA) y diferentes valores de probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño [$P(c|gm)$]. En el caso de aceleraciones ajustadas a partir de un período de retorno de 475 años se consideró 0,1 %, 0,01 % y 0,01 %, mientras que para aceleraciones ajustadas a partir de un período de retorno de 2475 años se consideró 15 %, 10 % y 5 %. Estos mapas ilustran cómo varía el riesgo sísmico en función de la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño [$P(c|gm)$].

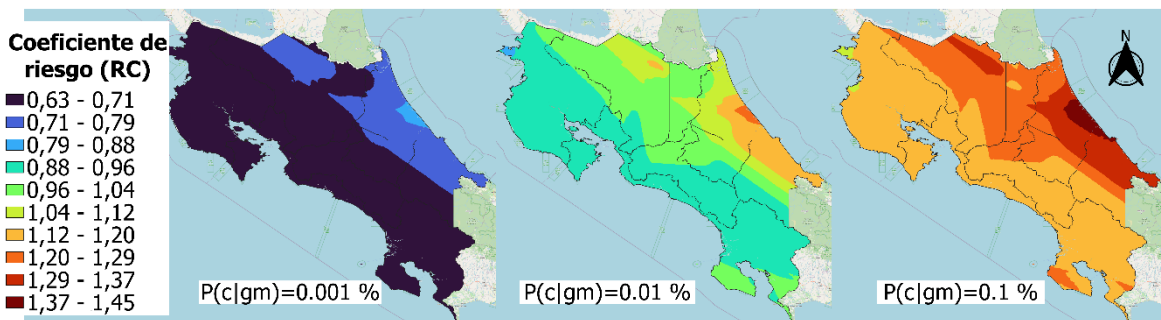


Figura 2.20. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, con $P(c|gm) = 0.001 \%$, 0.01% y 0.1% .

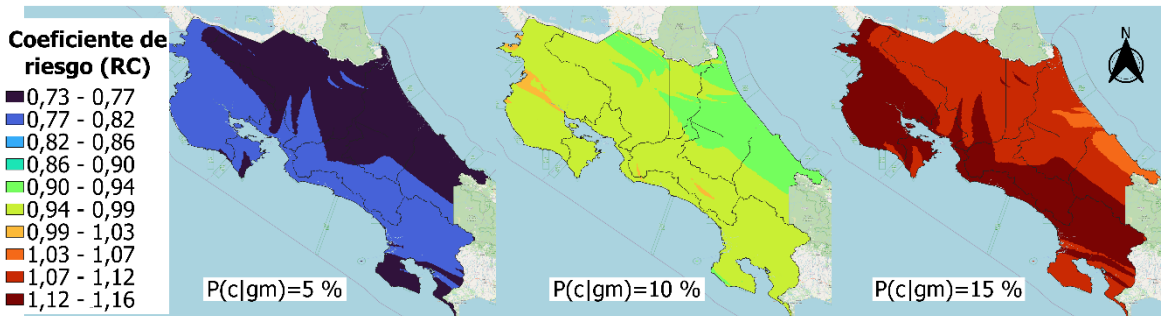


Figura 2.21. Mapa de coeficientes de riesgo para aceleraciones pico en el suelo (PGA) ajustadas a partir de aceleraciones con un periodo de retorno de 2475 años, con $P(c|gm) = 5 \%$, 10% y 15% .

Según se observa en la Figura 2.18, la tendencia general es que a medida que aumenta la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño, también lo hace el

coeficiente de riesgo. Para $P(c|gm) = 0.001 \%$, los coeficientes se encuentran entre 0,63 y 0,88, para $P(c|gm) = 0.01 \%$, los coeficientes se encuentran entre 0,88 y 1,29, mientras que para $P(c|gm) = 0.1 \%$, los coeficientes se encuentran entre 1,12 y 1,45.

De la misma manera, la Figura 2.19 sigue la misma tendencia. Para $P(c|gm) = 5 \%$, los coeficientes se encuentran entre 0,73 y 0,82, para $P(c|gm) = 10 \%$ los coeficientes se encuentran entre 0,90 y 1,03, mientras que para $P(c|gm) = 15 \%$, los coeficientes se encuentran entre 1,03 y 1,16.

Estos resultados son esperables, ya que, a mayor probabilidad de colapso acumulada en la curva de fragilidad, se permite que la estructura sea más frágil en relación con el valor de aceleración con el cual se inicia el proceso de cálculo. Esto implica un aumento en el riesgo, lo que a su vez requiere incrementar progresivamente las aceleraciones para alcanzar una probabilidad de colapso aceptable conforme al criterio de colapso aceptable establecido.

Como parte del análisis realizado en esta sección, se calcularon las variaciones en los coeficientes de riesgo en función del porcentaje de modificación del parámetro $P(c|gm)$. Los resultados correspondientes se presentan en el Cuadro 2.9.

Cuadro 2.9. Cambio relativo del coeficiente de riesgo (RC) por aumento porcentual del parámetro $P(c|gm)$ al ajustar aceleraciones correspondientes a 475 años y 2475 año.

Parámetros utilizados	Período de retorno ajustado	Cambio relativo del RC por aumento % del parámetro
NZS 1170	475 años	0 a 0,04
ASCE 7-22	2475 años	0 a 0,39

Nuevamente, los resultados obtenidos y las diferencias observadas indican que la metodología es sensible al rango de valores considerado para $P(c|gm)$, mostrando una mayor sensibilidad cuando se ajustan aceleraciones asociadas a períodos de retorno de 2475 años.

2.3. Aspectos a tomar en cuenta si se considerara la implementación de aceleraciones RTGM en el CSCR

Actualmente, el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010/14) [1] basa sus exigencias de diseño en un enfoque de amenaza sísmica uniforme. Por lo tanto, para si se deseara aplicar de manera coherente en el diseño sísmico de estructuras las aceleraciones obtenidas mediante la metodología analizada en este trabajo, es necesario realizar una serie de ajustes en esta normativa. En este contexto, de manera general, los pasos a seguir y los cambios normativos que serían requeridos son los siguientes:

- Definición de parámetros clave para el cálculo de aceleraciones: Los parámetros de entrada pueden variar dependiendo de la importancia de las estructuras y de la realidad económica y social de cada país, por lo que deberían ser establecidos por políticos, sociólogos y otros actores clave en la toma de decisiones, con la ayuda de ingenieros. En el caso de Costa Rica, se recomienda que este proceso sea liderado por una comisión nacional de expertos que articule los intereses técnicos y sociales del país. De manera específica, los parámetros que deben definirse son los siguientes:
 - a) Desviación estándar (β): Representa la variabilidad combinada de la respuesta estructural y del movimiento del terreno.
 - b) Probabilidad de colapso acumulada para el movimiento de diseño $P(c|gm)$: Es la probabilidad de que una estructura colapse cuando se ve sometida a un movimiento sísmico con una aceleración determinada.
 - c) Riesgo sísmico aceptable: Corresponde a una tasa de colapso estructural aceptable a lo largo de la vida útil de la estructura.
- Cambio en la forma de consideración de la importancia de las estructuras en el proceso de estimación de las exigencias de diseño: Cabe señalar que la definición de los parámetros anteriores representa una manera distinta de incorporar la importancia de las estructuras, ya que el nivel de exigencia para el diseño estructural (y, por tanto, las aceleraciones obtenidas) dependerá del nivel de riesgo aceptable asignado a cada categoría de edificación. De este modo, la importancia de las

estructuras queda implícita en el cálculo de las aceleraciones de diseño, a diferencia de la normativa vigente, en la cual se incorpora la importancia mediante un factor dentro de la fórmula del coeficiente sísmico.

- Sustitución del mapa de zonificación sísmica por mapas de aceleraciones RTGM y de los espectros de diseño actuales: Actualmente, los espectros de diseño utilizados en el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010/14) se derivan de un enfoque basado en amenaza sísmica uniforme (UHGM) y utilizan valores de aceleración espectral amplificados en función del tipo de suelo. Estos espectros son seleccionados a partir de la zonificación sísmica establecida en el Código.

Por lo tanto, como parte de la transición hacia un diseño sísmico orientado al riesgo, se propone sustituir los espectros normativos actuales por espectros de diseño derivados a partir de aceleraciones RTGM, calculados según los parámetros de entrada definidos específicamente para el país.

Esta sustitución puede abordarse en dos etapas:

- a) Publicación de mapas nacionales con aceleraciones RTGM: Como primer paso, se sugiere sustituir el mapa de zonificación sísmica por mapas oficiales con los valores RTGM para periodos específicos, tales como:

- PGA
- $Sa_{0,2s}$
- $Sa_{1,0s}$

Estos valores pueden utilizarse para construir espectros aproximados mediante técnicas de interpolación, mientras se consolida herramientas computacionales para la construcción de espectros RTGM completos.

- b) Desarrollo de una herramienta nacional para consulta y descarga de espectros RTGM: Como segundo paso, se recomienda desarrollar una calculadora sísmica nacional similar a la del USGS, que permita a los profesionales consultar o descargar el espectro completo de aceleraciones para cada ubicación dentro del territorio nacional.

- Implementación de factores para la consideración de efectos locales del sitio: Dado que las curvas de amenaza utilizadas para calcular las aceleraciones RTGM se generaron asumiendo una velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros (V_{s30}) de 760 m/s (condición de roca), es necesario incorporar la amplificación por condiciones locales de sitio. Para ello, se deben establecer tablas de factores de amplificación espectral en función de la clasificación del suelo, que permitan ajustar el espectro de diseño RTGM de roca a las condiciones particulares de cada ubicación.

En el Código Sísmico de Costa Rica vigente (CSCR 2010/14), los efectos locales del sitio se consideran de manera implícita en los mapas de zonificación sísmica, los cuales entregan aceleraciones y espectros ya amplificados para distintos tipos de suelo (S1, S2, S3 y S4). Es decir, el ingeniero no debe realizar ajustes adicionales por condiciones locales, dado que estos efectos ya se encuentran incorporados en los valores normativos de aceleración. En contraste, bajo el enfoque propuesto basado en aceleraciones RTGM, el espectro de diseño se genera inicialmente para condiciones de roca firme ($V_{s30} = 760$ m/s), por lo que resulta necesario aplicar factores de amplificación específicos para cada clasificación de suelo.

- Modificación de la fórmula del coeficiente sísmico: El enfoque actual del CSCR 2010/14 emplea una fórmula que incorpora de forma explícita factores como la importancia estructural, la sobrerresistencia, la amplificación del sitio y la ductilidad, ya sea mediante coeficientes específicos o porque están implícitamente considerados en los espectros de diseño definidos por la normativa. Sin embargo, bajo la metodología analizada en este trabajo, varios de estos aspectos se integran de manera implícita en el cálculo de las aceleraciones de diseño. En consecuencia, se hace necesario revisar y modificar la fórmula del coeficiente sísmico.

3. Conclusiones y recomendaciones

En esta sección se presentan las principales conclusiones derivadas del presente estudio, organizadas en cinco apartados clave que abordan los distintos ejes temáticos analizados a lo largo del trabajo. En primer lugar, se exponen las conclusiones relacionadas con la metodología empleada para el cálculo de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo (RTGM) y la estimación de coeficientes de riesgo (RC). En segundo lugar, se discuten los hallazgos asociados a los mapas generados de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo. En tercer lugar, se abordan los resultados obtenidos a partir de los mapas de coeficientes de riesgo generados para diferentes períodos de oscilación. Posteriormente, se analiza la razón entre aceleraciones asociadas a distintos períodos de retorno (475 y 2475 años), como medida comparativa entre enfoques tradicionales y orientados al riesgo.

Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas del análisis de sensibilidad, seguido de una discusión sobre los posibles cambios requeridos en el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) para implementar este enfoque, así como un conjunto de recomendaciones para investigaciones futuras y aplicaciones prácticas.

3.1.1. Sobre la metodología de cálculo

- La metodología se puede aplicar de manera efectiva aprovechando los datos disponibles de las curvas de amenaza sísmica del país del último estudio de amenaza [3].
- La metodología es adaptable a códigos de programación, lo que facilita su aplicación a gran escala en proyectos de cálculo de riesgo sísmico.
- Desde el inicio, la metodología presenta una limitación importante, ya que requiere asumir valores para la desviación estándar " β ", la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño " $P(c|gm)$ " y la probabilidad de colapso aceptable en 50 años " P_C^T ". Esta necesidad de asumir valores introduce una fuente adicional de incertidumbre que puede afectar la precisión del análisis. Por lo tanto, es necesario definir estos parámetros a nivel local para obtener resultados representativos y coherentes con la realidad estructural y sísmica de Costa Rica.

3.1.2. Sobre los mapas de aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo

- Los mapas de aceleraciones presentados en este documento siguen una distribución espacial similar a los mapas de amenaza elaborados por Hidalgo et al. (2021), lo cual era de esperarse, ya que la metodología utilizada en este trabajo se basa en los mapas de amenaza proporcionados en dicha publicación.
- La distribución geográfica de las aceleraciones sísmicas muestra que las zonas cercanas a la costa del Pacífico, como la península de Nicoya y la región sur del país, presentan las aceleraciones más altas, lo que resalta la marcada influencia de la actividad sísmica generada por la fuente de subducción en la región pacífica del país. Asimismo, las aceleraciones mínimas se presentan en el noreste del país, particularmente en el norte de las provincias de Heredia y Limón.
- Existe diferencia significativa en las magnitudes de aceleraciones sísmicas cuando se comparan los mapas ajustados a partir de aceleraciones con períodos de retorno de 475 años y 2475 años. Los valores de aceleración aumentan en los mapas ajustados a partir de un período de retorno de 2475 años, lo que refleja la inclusión de eventos sísmicos más extremos.
- La amplitud de las aceleraciones orientadas al riesgo es mayor en todos los casos cuando se consideran las aceleraciones ajustadas a partir de aceleraciones con un período de retorno de 475 años en comparación con aquellas ajustadas a partir de aceleraciones con un período de retorno de 2475 años, lo que refleja una mayor variabilidad geográfica de las aceleraciones para este caso.

3.1.3. Sobre los mapas de coeficientes de riesgo

- Los coeficientes de riesgo (RC), obtenidos al ajustar aceleraciones correspondientes a períodos de retorno de 475 y 2475 años, así como aceleraciones pico del suelo (PGA) y aceleraciones para períodos de oscilación de 0,2 s y 1,0 s, presentan valores que oscilan entre 0,89 y 1,83. Esto implica que las aceleraciones sísmicas derivadas de los modelos de amenaza podrían variar en ese rango, dependiendo del caso específico.
- De acuerdo con el rango de valores de los coeficientes de riesgo, que oscila entre 0,89 y 1,83, y tomando como referencia la desviación estándar β , la probabilidad de

colapso acumulada para la aceleración de diseño $P(c|gm)$ y la probabilidad de colapso aceptable P_C^T utilizados en este trabajo, se puede concluir que, en términos generales, el riesgo sísmico está siendo subestimado, ya que el valor más bajo en el que se podrían ajustar las aceleraciones provenientes del estudio de amenaza es 0,89, mientras que el valor más alto es 1,83.

- En todos los mapas de coeficientes de riesgo correspondientes a aceleraciones ajustadas a partir de un periodo de retorno de 475 años, se observa que el Caribe presenta coeficientes de riesgo superiores a 1, lo que indica que las aceleraciones sísmicas de los modelos previos de amenaza deben incrementarse en esta región, llegando a aumentos de hasta 1,83 de la aceleración sísmica orientada a la amenaza, para el caso de un período de oscilación de 1,0 s. Asimismo, al sur de Puntarenas, principalmente en la península de Osa y Punta Burica, se observan coeficientes de riesgo de hasta 1,45.
- La amplitud de los coeficientes de riesgo es menor en todos los casos cuando se consideran aceleraciones ajustadas a partir de aceleraciones con un período de retorno de 2475 años en comparación con aquellas ajustadas a partir de aceleraciones con un período de retorno de 475 años, lo que refleja una menor variabilidad geográfica de los coeficientes para este caso.

3.1.4. Sobre la razón de aceleraciones orientadas al riesgo para un período de retorno de 2475 años y 475 años

- Para las aceleraciones pico del suelo (PGA), la relación entre las aceleraciones orientadas al riesgo ajustadas a partir de un período de retorno de 2475 años y aquellas ajustadas con un período de retorno de 475 años se encuentra principalmente en el rango de 1,50 a 1,62. Este resultado es consistente con el valor de 1,50 establecido en el Código Sísmico de Costa Rica 2010/14 [1].
- Para las aceleraciones sísmicas para un período de oscilación de 0,2 s, la relación entre las aceleraciones orientadas al riesgo ajustadas a partir de un período de retorno de 2475 años y aquellas ajustadas con un período de retorno de 475 años se encuentra principalmente en el rango de 1,40 a 1,75.
- Para las aceleraciones sísmicas para un período de oscilación de 1,0 s, la relación entre las aceleraciones orientadas al riesgo ajustadas a partir de un período de

retorno de 2475 años y aquellas ajustadas con un período de retorno de 475 años presenta valores cercanos al 1,50 establecido en el CSCR 2010/14, con valores entre 1,47 y 1,61. Sin embargo, hacia el Caribe se observa valores que disminuyen hasta 1,14, siendo esta la mayor diferencia en todos los casos.

3.1.5. Sobre el análisis de sensibilidad

- Para los coeficientes obtenidos a partir del ajuste de aceleraciones con un período de retorno de 475 años, se observó que, a medida que la desviación estándar (β) disminuye (de 0.8 a 0.4), los mapas de coeficientes de riesgo muestran una mayor variabilidad y contraste en los valores, lo que indica una mayor sensibilidad del modelo a las fluctuaciones en este parámetro. Los coeficientes de riesgo varían significativamente entre 1,18 y 1,95 para $\beta=0.4$, mientras que para $\beta=0.8$ los valores se homogenizan, oscilando entre 0,67 y 0,92. Esto sugiere que valores más bajos de β conducen a una mayor diferenciación geográfica en los coeficientes de riesgo, mientras que valores más altos tienden a suavizar los contrastes geográficos.
- Para los coeficientes obtenidos a partir del ajuste de aceleraciones con un período de retorno de 2475 años, a diferencia del análisis para 475 años, la variabilidad en los coeficientes de riesgo disminuye cuando β es más bajo ($\beta=0.4$). Los coeficientes de riesgo permanecen más constantes entre 0,91 y 0,96 para $\beta=0.4$, mientras que aumentan ligeramente para valores mayores de β , alcanzando valores entre 0,98 y 1,15 para $\beta=0.8$. Este comportamiento sugiere que, al ajustar aceleraciones con periodos de retornos mayores (como 2475 años), el impacto de la desviación estándar β sobre los coeficientes de riesgo es menos pronunciado.
- La diferencia en el comportamiento frente a cambios en el parámetro β entre las aceleraciones ajustadas a partir de períodos de retorno de 475 años y de 2475 años puede atribuirse a la forma en que se define la curva de fragilidad acumulada en cada normativa. Específicamente, las diferencias en la ubicación del valor medio y en la dispersión de la curva influyen en la sensibilidad del cálculo frente a variaciones en β .
- Para los coeficientes obtenidos a partir del ajuste de aceleraciones con un período de retorno de 475 años, se observó que a medida que aumenta la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño $P(c|gm)$, el coeficiente de riesgo

también incrementa. Para valores bajos de $P(c|gm)$ (0,001 %), los coeficientes de riesgo son más bajos, con un rango entre 0,63 y 0,88. Sin embargo, a medida que $P(c|gm)$ aumenta (hasta 0,1 %), los coeficientes experimentan un notable incremento, alcanzando valores entre 1,12 y 1,45.

- Para los coeficientes obtenidos a partir del ajuste de aceleraciones con un período de retorno de 2475 años, se observa que los coeficientes de riesgo aumentan de forma consistente a medida que lo hace la probabilidad de colapso acumulada. Los valores para $P(c|gm)$ de 5 %, 10 % y 15 % varían entre 0,73 y 1,16, lo que refleja una tendencia coherente con los resultados obtenidos a partir del ajuste de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años. Esto confirma que la probabilidad de colapso tiene un impacto significativo sobre los coeficientes de riesgo, especialmente en escenarios con mayores probabilidades de colapso.
- La razón por la cual un mayor valor de probabilidad de colapso acumulada en la curva de fragilidad $P(c|gm)$ conduce a un incremento en las aceleraciones de diseño se debe a que, al aceptar una mayor fragilidad estructural frente a un mismo nivel de aceleración, el riesgo total de colapso acumulado también aumenta. En otras palabras, se requiere una demanda sísmica mayor para contrarrestar la menor capacidad asociada a una curva de fragilidad más conservadora.
- La metodología mostró ser sensible las variaciones realizadas en la desviación estándar β y la probabilidad de colapso acumulada $P(c|gm)$. Esto resalta la importancia de definir ambos parámetros con base en las condiciones y criterios propios del país, a fin de obtener resultados más representativos y confiables para la realidad nacional.

3.1.6. Sobre los aspectos a tomar en cuenta si se considerara la implementación de aceleraciones RTGM en el CSCR

- Se deben establecer valores como la desviación estándar (β), la probabilidad de colapso acumulada $P(c|gm)$ y el riesgo sísmico aceptable. Esta definición debe considerar la importancia de las estructuras y la realidad nacional, y estar liderada por una comisión técnica multisectorial.

- En lugar de aplicarse mediante un factor explícito (I), la importancia de las estructuras se integrará de forma implícita en los cálculos, ajustando los niveles de riesgo aceptable según la categoría de edificación.
- Se propone reemplazar el mapa de zonificación por mapas oficiales de aceleraciones RTGM (PGA, Sa 0,2 s, Sa 1,0 s) y sustituir los espectros normativos actuales por espectros derivados directamente de dichas aceleraciones. Esta transición se puede implementar en dos etapas: publicación de mapas y desarrollo de una calculadora nacional.
- Dado que los valores RTGM se calculan para condiciones de roca firme ($V_{s30} = 760$ m/s), será necesario aplicar factores de amplificación espectral por tipo de suelo, a diferencia del CSCR actual, donde estos efectos están incluidos en los valores normativos de aceleración.
- La fórmula actual incluye factores como la importancia estructural, sobrerresistencia y ductilidad de forma explícita. En el nuevo enfoque, muchos de estos aspectos se integran de forma implícita en los espectros RTGM, por lo que se recomienda revisar o sustituir la fórmula actual.
- La metodología es más sensible al parámetro β cuando se ajustan aceleraciones con un período de 475 años, y más sensible a $P(c|gm)$ cuando se utilizan aceleraciones asociadas a un período de 2475 años.

3.2. Recomendaciones

- Proponer líneas de investigación futuras que incorporen herramientas participativas como encuestas especializadas o mesas de trabajo interdisciplinarias, en las cuales los responsables de la toma de decisiones en la planificación del país colaboren activamente en la definición consensuada de rangos de valores específicos para Costa Rica. Estos valores incluirían la desviación estándar β , la probabilidad de colapso acumulada para la aceleración de diseño $P(c|gm)$ y la probabilidad de colapso aceptable P_C^T utilizadas en la metodología.
- Una vez establecidos los valores anteriores, se sugiere replicar el ejercicio realizado en este trabajo con tales parámetros para actualizar los resultados.
- En caso de que en el futuro se desee implementar esta metodología en las actualizaciones del CSCR, se recomienda desarrollar una herramienta oficial, similar

a la utilizada por el USGS en Estados Unidos, que permita a los profesionales consultar y descargar espectros de diseño completos basados en aceleraciones RTGM para cualquier ubicación del país. Esta calculadora debe considerar también factores de amplificación por tipo de suelo y permitir la selección de parámetros según el nivel de riesgo y tipo de estructura.

- Se recomienda establecer otras líneas de investigación para explorar cómo los mapas dirigidos al riesgo pueden aplicarse no solo a la prevención del colapso, como se hizo en este trabajo, sino también en relación con otros niveles de desempeño estructural, como la limitación de daños en componentes no estructurales o el cumplimiento de objetivos funcionales más exigentes, como la ocupación inmediata.
- Realizar simulaciones de escenarios sísmicos para evaluar el desempeño de edificaciones diseñadas de acuerdo con las aceleraciones obtenidas mediante la metodología empleada, en comparación con aquellas basadas en aceleraciones orientadas hacia la amenaza, con el fin de enriquecer la discusión y análisis entre ambos enfoques.

4. Referencias bibliográficas

- [1] CFIA, Código Sísmico de Costa Rica 2010: Revisión 2014, San José: Colegio Federado de Ingeniero y Arquitectos de Costa Rica, 2016.
- [2] N. Luco, B. R. Ellingwood y R. O. Hamburger, Risk-Targeted versus Current Seismic Design Maps for the Conterminous United States, EUA: SEAOC 2007, 2007.
- [3] D. Hidalgo Leiva, V. Schmidt Díaz, L. C. Esquivel, L. Linkimer Abarca, I. Arroyo Hidalgo and M. Arroyo Solórzano, Actualización de la Amenaza Sísmica para Costa Rica - Proyecto UCREA, San José Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2021.
- [4] G. E. Alvarado, B. Benito, A. Staller, A. Climent, E. Camacho, W. Rojas, G. Marroquín, E. Molina, J. E. Talavera, S. Martínez-Cuevas and C. Lindholm, "The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up to day seismotectonic framework," *Tectonophysics*, vol. 721, pp. 462-476, 2017.
- [5] M. Arroyo Solórzano y L. Linkimer, «Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica,» *Tectonophysics*, vol. 814, 2021.
- [6] OPS, Mitigación de desastres en las Instalaciones de la salud, vol. 4, Washington, D.C., EUA: Organización Panamericana de la Salud, 1993.
- [7] V. Schenk, «Achievements and probable trends in seismic hazard assessment,» *Tectonophysics*, vol. 167, pp. 157-169, 1988.
- [8] SGC & GEM, Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano & Fundación Global Earthquake, 2018.

- [9] C. P. Mortgat, T. C. Zsutty, H. C. Shah and L. Lubetkin, A study of seismic risk for Costa Rica, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, 1977.
- [10] M. Laporte, C. Lindholm, H. Bungum y A. Dahle, NORSAR Tech. Report 2-14: Seismic Hazard for Costa Rica, 1994.
- [11] A. Climent, W. Rojas, G. Alvarado y M. B. Benito, Proyecto Resis II Evaluación de la amenaza sísmica, 2008.
- [12] M. B. Benito, C. Lindholm, E. Camacho, A. Climent, G. Marroquin, E. Molina, W. Rojas, J. J. Escobar, E. Talavera, G. E. Alvarado and Y. Torres, "A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012.
- [13] L. Linkimer, I. Arroyo Hidalgo, G. Alvarado, M. Arroyo and H. Bakkar, "An Overview and Recent Developments," *Seismological Research Letters*, pp. 392-398, 2018.
- [14] A. Moya, «Sistema de monitoreo acelerográfico del Laboratorio de Ingeniería Sísmica,» *Ingeniería*, pp. 96-114, 2018.
- [15] U. Barckhausen, C. R. Ranero, R. von Huene, S. C. Cande and H. A. Roeser, "Revised tectonic boundaries in the Cocos Plate off Costa Rica: Implications for the segmentation of the convergent margin and for plate tectonic models," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, p. 19207–19220, 2001.
- [16] C. Kyriakopoulo, A. V. Newman, A. M. Thomas, M. Moore-Driskell and G. T. Farmer, "A new seismically constrained subduction interface model for Central America," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, p. 5535–5548, 2015.

- [17] O. H. Lücke and I. Arroyo Hidalgo, "Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zone from 3-D gravity modeling and local earthquake data," *Solid Earth*, p. 1169–1183, 2015.
- [18] A. H. Barbat, El riesgo sísmico en el diseño de edificios, vol. Volumen 3 de Cuadernos técnicos, España: Calidad Siderúrgica, 1998.
- [19] I. Garvs Martínez, Desarrollo de curvas de fragilidad para sistemas de distribución de agua en Chile, Santiago, Chile: Universidad de Chile, 2020.
- [20] R. León, Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios: Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada, Barcelona, España: Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica, 2003.
- [21] J. Velásquez y M. Blondet, «Estimaci[on de pérdidas sísmica mediante curvas de fragilidad analíticas,» *Research Gate*, 2005.
- [22] R. Moreno González y J. M. Bairán García, «Curvas de fragilidad para evaluar el daño sísmico en edificios de concreto armado con losas reticulares,» *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 25, nº 4, 2010.
- [23] A. P. Oviedo Castaño y L. F. Huertas Medina, Investigación preliminar de la implementación de nuevos enfoques de diseño sísmico en Colombia: diseño estructural por riesgo uniforme de colapso, Chile: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, 2019.
- [24] Applied Technology Council, Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings: ATC-3-06, Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1978.

- [25] FEMA, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, FEMA 450-1/2003 Edition, Part 1: Provisions, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2004.
- [26] FEMA, NEHRP recommended seismic provisions for new buildings, Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, 2009.
- [27] ASCE, ASCE/SEI7–10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [28] IBC, International Building Code, Birmingham, AL: International Code Council, 2015.
- [29] J. Douglas, T. Ulrich y C. Negulescu, «Risk-targeted seismic design maps for mainland France,» *Nat Hazards*, p. 1999–2013, 2013.
- [30] V. Silva, H. Crowley y P. Bazzurro, «Exploring Risk-targeted Hazard Maps for Europe,» *Earthquake Spectra*, 2015.
- [31] A. Kalantari y A. R. Taherian, «Risk-targeted seismic design maps for Iran,» *Journal of Seismology*, p. 1299–1311, 2019.
- [32] A. Kharazian, S. Molina, J. J. Galiana-Merino y N. Agea-Medina, Risk-targeted hazard maps for Spain, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2021.
- [33] RSN, «Sismos históricos,» 07 06 2021. [En línea]. Available: <https://rsn.ucr.ac.cr/actividad-sismica/sismos-historicos>. [Último acceso: 04 07 2022].
- [34] S. Wei, L. XinZheng y Y. LiePing, «Uniform-risk-targeted seismic design for collapse safety of building structures,» *SCIENCE CHINA: Technological Sciences*, vol. 55, nº 6, p. 1481–1488, 2012.

- [35] ASCE, ASCE/SEI 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2022.
- [36] D. Hidalgo Leiva, L. Linkimer, I. G. Arroyo, M. Arroyo-Solórzano, R. Piedra, A. Climent, V. Schmidt Díaz, L. C. Esquivel, G. E. Alvarado, R. Castillo, S. Lobo, M. J. Rodríguez, W. Rojas, M. E. Carranza-Morales, L. Cerdas-Guntanis and J. Escalante-Meza, "The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica," *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 1-18, 2022.
- [37] N. Horspool, A. Hulse, K. Elwood y M. Gerstenberger, «Risk-targeted hazard for seismic design in New Zealand considering individual and societal risk targets,» *Earthquake Spectra*, p. 1007–1036, 2023.
- [38] FEMA, Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450): Part 2: Commentary, Washington, D.C, EUA: Building Seismic Safety Council , 2003.
- [39] P. K. Goli, Basic principles of risk-targeted design and regional applications, Alemania: Bauhaus-Universität Weimar, 2017.
- [40] E. Miranda, H. Krawinkler, D. Lignos y L. Eads, «An efficient method for estimating the collapse risk of structures in seismic regions,» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, pp. 42:25-41, 2012.
- [41] CAPRA, Informe Técnico ERN-CAPRA-T2-7: Riesgo sísmico de San José, Costa Rica: Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina, s.f..
- [42] SHI Wei, LU XinZheng & YE LiePing, «Uniform-risk-targeted seismic design for collapse safety of building structures,» *SCIENCE CHINA: Technological Sciences*, vol. 55, nº 6, p. 1481–1488, 2012.

- [43] L. Eads y E. Miranda, «An efficient method for estimating the collapse risk of structures in seismic regions,» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 42, pp. 25-41, 2012.
- [44] A. Ali y J. Hassan, «Shear wall analysis using framework method: comparison with shell element method and column analogy,» *Engineering and tech journal*, vol. 31, pp. 3-13, 2011.
- [45] R. Sedgh y C. A, «State of the art: challenges in analytical modelling of multi-storey shear wall buildings,» de *Annual Technical Conference.*, Rotorua, 2015.
- [46] O. Chelariu y M. Budescu, *Errors in concrete shear wall elastic structural modeling*, Iași: Institutio Politécnico de Iași, 2011.
- [47] M. Tan y J. Kubin, «Comparison of practical approaches for modelling shearwalls in structural analyses of buildings,» de *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, 2008.
- [48] A. Chocano, *Análisis estructural por el método matricial. Conceptos y aplicaciones*, San José. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2003.
- [49] R. Cook, D. Malkus y M. Plesha, *Concepts and applications of finite element analysis*, Wisconsin: Wiley, 1988.
- [50] ATC, *Tentative provisions for the development of seismic*, Redwood City, CA: Applied Technology Council, 1978.
- [51] ASCE, *ASCE/SEI 43-05 Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities*, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2005.

- [52] ICBO, «Uniform Building Code, Structural Engineering,» vol. 2, pp. 2-161, 1997.
- [53] Á. Climent, W. Rojas, ., B. Benito, . and G. E. Alvarado, Proyecto Resis II: Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica, San José, Costa Rica, 2008.
- [54] E. Bojórquez Mora, R. Chávez López, ., S. Ruiz Gómez, ., . and A. Reyes Salazar, "Una medida de intensidad sísmica que predice el comportamiento no lineal y el efecto de los modos superiores," *Ingeniería sísmica*, vol. 90, pp. 1-33, 2014.
- [55] Red Sismológica Nacional, «Sismos históricos,» [En línea]. Available: <https://rsn.ucr.ac.cr/actividad-sismica/sismos-historicos>.

5. Anexos

5.1. Anexo A: Código de MATLAB de cálculo de aceleraciones orientadas al riesgo sísmico para un sitio de interés con gráficas incluidas

```
clear all
close
clc
format long

%Se define tamaño de la ventana para la gráfica
set(gcf, 'position', [50,50,1150,750]);

%Se define número de iteraciones (máximo 7, considerando la definición de
colores que se incluyó, pero se podría aumentar)
iteraciones=4;

%Se define vector para graficar en colores las iteraciones (máximo 7)
coloresi=["g--", "y--", "r--", "b--", "k--", "c--", "m--"];
coloresg=["g", "y", "r", "b", "k", "c", "m"];

%Se define ventana de tiempo y probabilidad de excedencia para el calculo

%Parámetros ASCE 7-22
years=50; %ventana de tiempo
PE=0.02; %probabilidad de excedencia
prob_colap=0.01; %riesgo objetivo
percentil=0.1; %percentil 10 de la función de densidad de probabilidad de
colapso
B=0.6; %desviación estándar

%Parámetros NZS 1170 (si se desea emplear estos parámetros se debe quitar
comentarios)
years=50; %ventana de tiempo
%PE=0.1; %probabilidad de excedencia
%prob_colap=0.0005; %riesgo objetivo
%percentil=0.0001; %percentil 10 de la función de densidad de
probabilidad de colapso
B=0.6; %desviación estándar

%Se calcula la probabilidad de excedencia en 50 años
p=log(1-PE)/(-years);

%Se define de la cantidad de punto a interpolar entre cada punto de la
curva
```

```

%de amenaza con el fin de discretizarla
discretizar_cuva=800;

%Se define la cantidad de punto a extrapolar la curva de amenaza en caso
de
%que se requiera según el condicional definido más adelante en el código
ext_curva=50;

%Se define el paso para extrapolar en x
paso=0.05;

    %Se define matriz de ceros para almacenar valores de iteracionnes
    rtgm=zeros(2,iteraciones);

    %-----Curva de amenaza-----%

    %Valores de curva de amenaza (se puede reemplazar por la extracción
de datos de un archivo CSV o de otra naturaleza)

hazard_x=( [0.01,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,1.1,1.2,1.4,1.7,2]
;
    hazard_y=( [0.5696,0.088335,0.02925,0.01229725,0.00564925,0.00275075,0
.001385175,0.000733875,0.0003984225,0.0002205625,0.0001235975,0.00006
881825,0.0000382493775,0.0000113329875,0.00000134645,0.00000064884]
;

    %-----Interpolación de curva de amenaza-----
-----%

    %Se calcula logaritmo de ambos vectores
    hazard_y=log(hazard_y);
    hazard_x=log(hazard_x);

    %Se define el primer punto del vector nuevo para almacenar los puntos
de interpolación como el primer punto del vector original
    hazard_x_nuevo(1)=hazard_x(1);
    hazard_y_nuevo(1)=hazard_y(1);

    %Se genera un ciclo para iterar entre cada segmento de la curva de
%amenaza
    for cont=1:length(hazard_x)-1
        %Para cada segmento se calcula la pendiente

```

```

        pend=(hazard_y(cont+1)-hazard_y(cont))/(hazard_x(cont+1)-
hazard_x(cont));
        %Se calcula a cada cuando interpolar según el número de
        %puntos a discretizar cada segmento de la curva definido
        %inicialmente
        division=(hazard_x(cont+1)-hazard_x(cont))/discretizar_cuva;

        %Se genera ciclo para almacenar los nuevos puntos entre cada
        %segmento
        for g=1:discretizar_cuva;

hazard_x_nuevo(length(hazard_x_nuevo)+1)=hazard_x_nuevo(length(hazard_x_n
uevo))+division;

hazard_y_nuevo(length(hazard_y_nuevo)+1)=hazard_y_nuevo(length(hazard_y_n
uevo))+division*pend;

        end
    end

    %Se hace sustituyen los valores del vector original por los nuevos
    %interpolados
    hazard_x_nuevo2=(hazard_x_nuevo);
    hazard_y_nuevo3=(hazard_y_nuevo);

    hazard_x_nuevo=exp(hazard_x_nuevo);
    hazard_y_nuevo=exp(hazard_y_nuevo);

    hazard_x=hazard_x_nuevo;
    hazard_y=hazard_y_nuevo;
    clear hazard_y_nuevo
    clear hazard_x_nuevo

    %Se obtiene valor de aceleración de la curva de amenaza asociado a
    la probabilidad de
    % excedencia en 50 años mediante interpolación
    it=find(hazard_y(:)<p,1);
    x2=hazard_x(it-1);
    x1=hazard_x(it);
    y2=hazard_y(it-1);
    y1=hazard_y(it);

    %Se almacena primer valor para iterar en la posición (1,1) del vector
    de
    %ceros
    rtgm(1,1)=10^(((log10(x2)-log10(x1))/(log10(y2)-log10(y1)))*(log10(p)-
log10(y1))+log10(x1));

```

```

%-----1era, 2da y 3era, etc. iteración en el procedimiento de
calculo-----

for n=1:iteraciones;
    %Para la primera iteración se utiliza el valor de la curva de
amenaza
    if n==1
        rtgm_n=rtgm(1,1);

        %Para la segunda iteración se calcular la diferencia porcentual
logarítmica para
        %modificar el valor a utilizar en la segunda iteración
        elseif n==2
            if rtgm(2,n-1)>prob_colap
                rtgm(1,n)=((rtgm(2,n-1)-
prob_colap)/prob_colap+1)*rtgm(1,n-1);
                rtgm_n=rtgm(1,n);
            elseif rtgm(2,n-1)<prob_colap
                rtgm(1,n)=((rtgm(2,n-1)-
prob_colap)/prob_colap+1)*rtgm(1,n-1);
                rtgm_n=rtgm(1,n);
            end

            %A partir de la tercera iteración se comienza a interpolar
logarítmicamente entre los
            %valores generados, acercando el valor a 1%

            elseif n>2

                %Se general un condicional, en caso de que la diferencia sea
                %menor a 0.0001 se toma el valor generado

                if abs(rtgm(2,2)-prob_colap)<0.00001;
                    rtgm(1,n)=rtgm(1,2);
                    rtgm_n=rtgm(1,n);

                    %Caso contrario se interpola logarítmicamente entre los
valores obtenidos
                    else

position_menor=find((rtgm(2,:))==max(rtgm(2,(rtgm(2,:)<=prob_colap))));
position_mayor=find((rtgm(2,:))==min(rtgm(2,(rtgm(2,:)>=prob_colap))));

                    y1=(rtgm(2,position_menor));
                    y2=(rtgm(2,position_mayor));
                    x1=(rtgm(1,position_menor));
                    x2=(rtgm(1,position_mayor));

```

```

rtgm(1,n)=10^((log10(x2)-log10(x1))/(log10(y2)-
log10(y1))*(log10(prob_colap)-log10(y1))+log10(x1));

rtgm_n=rtgm(1,n);
end
end

%-----Curva de fragilidad-----
%Se construye curva de probabilidad de colapso acumulada
xx=cdf('lognormal',rtgm_n,log(hazard_x),B);

%Se busca el valor de aceleracion para el cual la probabilidad de
%colaso es 10%
xf=find(xx<percentil,1);

%Si la función de densidad de probabilidad de colapso según los
%valores de la curva de amenaza y el rtmg_n para la iteración no
%alcanza valores menores a riesgo objetivo es necesario
extrapolar la curva
%de amenaza siguiendo la pendiente del último segmento
if xx(length(hazard_x))>percentil*0.01
for cont=1:ext_curva;
%Se calcula logaritmo de ambos vectores
hazard_y=log(hazard_y);
hazard_x=log(hazard_x);
%Se calcula la pendiente del último segmento de la curva
de
%amenaza
pend=(hazard_y(length(hazard_y))-
hazard_y(length(hazard_y)-1))/(hazard_x(length(hazard_x))-
hazard_x(length(hazard_x)-1));

%Se extrapolan los valores

hazard_x(length(hazard_x)+1)=hazard_x(length(hazard_x))+paso;

hazard_y(length(hazard_y)+1)=hazard_y(length(hazard_y))+paso*pend;
hazard_x=exp(hazard_x);
hazard_y=exp(hazard_y);
end

%Se construye curva de probabilidad de colapso acumulada con
%los valores extrapolados
xx=cdf('lognormal',rtgm_n,log(hazard_x),B);
xf=find(xx<percentil,1);
med=hazard_x(xf);
else

```

```

        med=hazard_x(xf);
end

%Se construye la curva de probabilidad de colapso con el valor
%encontrado
cdf1=logncdf(hazard_x,log(med),B);

% Se caclula la derivada de la curva de fragilidad acumulada
d_cdf1=diff(cdf1)./diff(hazard_x);
dg_cdf1=gradient(cdf1,hazard_x);

%-----Curva de amenaza multiplicada por curva de densidad---
-----%
%Se multiplican ambas curvas
pdf_hazard=dg_cdf1.*hazard_y;

%Se hace la sumatoria para sacar la probabilidad acumulada
cdf_hazard_y=0;
cdf_hazard=[];

for s=1:length(hazard_x)-1;
    %Definimos el vector x y vector y para cada curva de amenaza
cdf_hazard_y=cdf_hazard_y+((pdf_hazard(s+1)+pdf_hazard(s))/2)*(abs(hazard
_x(s+1))-abs(hazard_x(s)));
    cdf_hazard(1,s+1)=cdf_hazard_y;
end

%Se convierte la curva a probabilidad en 50 anos

cdf_hazard=1-exp(-cdf_hazard(1,:)*50);

%Se almacena el valor del riesgo obtenido para cada iteración
rtgm(2,n)=cdf_hazard(1,length(hazard_x));

%-----Se construyen las graficas-----
subplot(3,2,5),semilogx(hazard_x,dg_cdf1,coloresg(1,n),'LineWidth',2),tit
le(['Derivada de curva de fragilidad con ', 'B=', num2str(B)]);
xlabel('Aceleración (g)');
ylabel('Probabilidad de colapso');
xticks([0.018 0.135 1 max(hazard_x)]);
xlim([0 max(hazard_x)]);
grid on
hold on

```

```

subplot(3,2,3),semilogx(hazard_x,cdf1,coloresg(1,n),'LineWidth',2),title(
['Curva de fragilidad acumulada con ', 'B=', num2str(B)]);
xlabel('Aceleración (g)');
ylabel(sprintf('Probabilidad de\ncolapso acumulada'));
xlim([0 max(hazard_x)]);
xlim([0 max(hazard_x)]);
xticks([0.018 0.135 1 max(hazard_x)])
yticks([0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1])
grid on
hold on
yticks([0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1])

```

```

subplot(3,2,2),semilogx(hazard_x,pdf_hazard,coloresg(1,n),'LineWidth',2),
title('Curva de amenaza * Derivada de fragilidad');
xlabel('Aceleración (g)');
ylabel(sprintf('Densidad de frecuencia\nanual de colapso'));
xticks([0.018 0.135 1 max(hazard_x)]);
xlim([0 max(hazard_x)]);
grid on
hold on

```

```

cdf_hazard_y=0;
cdf_hazard=[];
i=1;

```

```

for i=1:length(hazard_x)-1;
    %Definimos el vector x y vector y para cada curva de amenaza

```

```

cdf_hazard_y=cdf_hazard_y+((pdf_hazard(i+1)+pdf_hazard(i))/2)*(abs(hazard
_x(i+1))-abs(hazard_x(i)));
    cdf_hazard(1,i+1)=cdf_hazard_y;
end

```

```

cdf_hazard=1-exp(-cdf_hazard(1,:)*years);

```

```

%Generamos graficas en una misma ventana

```

```

subplot(3,2,4),semilogx(hazard_x,cdf_hazard,coloresg(1,n),'LineWidth',2),
title('Integral acumulativa curva amenaza - derivada fragilidad');
xlabel('Aceleración (g)');
ylabel(sprintf('Probabilidad de colapso\nacumulada en 50 años'));
xlim([0 max(hazard_x)]);
hold on
xlim([0 max(hazard_x)]);
xticks([0.018 0.135 1 max(hazard_x)])

```

```

        grid on
        hold on
    end

subplot(3,2,1),loglog(hazard_x,hazard_y,'LineWidth',2),title('Curva de
amenaza');
xlabel('Aceleración (g)');
ylabel(sprintf('Frecuencia anual\nde excedencia'))
grid on
xticks([0.018 0.135 1 max(hazard_x)]);
xlim([0 max(hazard_x)]);
hold on

leyenda1=["Iteracion 1","Iteracion 2","Iteracion 3","Iteracion
4","Iteracion 5","Iteracion 6","Iteracion 7"];
leyenda1(iteraciones+1:7)=[];

leyenda2 = ""; % Inicializa como string vacío
for i = 1:iteraciones
    leg = strcat("c=", num2str(round(rtgm(1,i), 2)), "g");
    leyenda2 = strcat(leyenda2, " ", leg);
end
% Limpia espacios, divide y transpone
leyenda2 = transpose(split(strtrim(leyenda2)));

for i=1:iteraciones
    subplot(3,2,1),loglog([rtgm(1,i) rtgm(1,i)],[min(hazard_y)
1E0],coloresi(1,i),'LineWidth',1);
    hold on
end

for i=1:iteraciones
    leyenda1(i)=[num2str(i)];
end

leyenda1 = cell(1, iteraciones);

for i=1:iteraciones
    leyenda1{i} = ['Iteración ', num2str(i), ': ', 'c = ',
num2str(round(rtgm(1,i), 2)), ' g'];
end

subplot(3,2,1), loglog([0.01 12], [4.0405e-4 4.0405e-4], 'g--',
'LineWidth', 1.5)

```

```

subplot(3,2,4),plot([min(hazard_x) max(hazard_x)],[0.01 0.01],"k--",
'LineWidth',2);
leyenda3=['1% de probabilidad'];
subplot(3,2,1),legend(['Curva de
amenaza',leyenda2],'Location','southwest');
subplot(3,2,2),legend(leyenda1,'Location','southwest');
subplot(3,2,5),legend(leyenda1,'Location','southwest');
subplot(3,2,4),legend(leyenda1,'Location','southwest');
subplot(3,2,3),legend(leyenda1,'Location','southwest');

xlim_val = [0.01 7.98];
xtick_vals = [0.018 0.135 1 7.98];

for sp = 1:5
    subplot(3,2,sp);
    xlim(xlim_val);
    xticks(xtick_vals);
end

```

5.2. Anexo B: Validación de resultados obtenidos a través del código desarrollado con MATLAB

Según se indicó en la Sección 1.6, para efectos de validar el funcionamiento correcto del código de programación desarrollado en MATLAB, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos a través del código y los generados por la calculadora de movimiento del suelo orientado al riesgo disponible en el sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), accesible en: <https://earthquake.usgs.gov/designmaps/rtgm/>. Esta comparación se llevó a cabo para cuatro sitios de Costa Rica (ver las ubicaciones de los sitios en las Figura 5.1 y las diferencias porcentuales obtenidas en Cuadro 5.1), utilizando las respectivas curvas de amenaza sísmica correspondientes a cada ubicación.



Figura 5.1. Ubicación de los cuatro sitios comparados para validar el funcionamiento correcto del código de programación desarrollado en MATLAB.

Cuadro 5.1. Diferencias porcentuales obtenidas entre aceleraciones sísmicas orientadas al riesgo calculadas con el código desarrollado en MATLAB y con la calculadora web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Sitio	RTGM (g)		Diferencia porcentual
	Código MATLAB	Calculadora web	
Punta Santa Elena	1,1267	1,126	0,06 %
Santa Rita	0,52572	0,526	-0,05 %
El Coyolito	1,5687	1,568	0,04 %
Portalón	0,73692	0,737	-0,01 %

Según el Cuadro 5.1, para los cuatro sitios comparados en Costa Rica, los resultados obtenidos mediante el código desarrollado en MATLAB presentan una diferencia máxima de 0,06 % en comparación con los valores generados por la calculadora web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Esto evidencia que el código desarrollado produce resultados consistentes con lo esperado.

5.3. Anexo C: Código de MATLAB de cálculo de aceleraciones orientadas al riesgo sísmico para un conjunto de sitios

```
clear all
close
clc
format long

%-----Importar curva de amenaza-----%

%Se importan datos de hoja de excel en formato csv
tabla = csvread('C:\Users\s Alvarez\Dropbox\01 Personales\01 Estudios\01
Ingeniería Civil\03 Maestría\01 Tesis\01 TFG\03 MATLAB\01 Códigos\01
Datos a utilizar\Curvas de PGA, 0.2 s y 1.0 s\hazard_curve-mean-
PGA_79.csv',1,0);

%Transponemos la tabla
tabla = transpose(tabla);

%Extraemos coordenadas geográficas de la tabla
coordenadas(1,:)=tabla(1,:);
coordenadas(2,:)=tabla(2,:);
coordenadas(:,1)=[];
tabla(1:3,:)=[];

%Se define el tamaño de la tabla
[numRows,numCols]=size(tabla);

%Parámetros ASCE 7-22
years=50; %ventana de tiempo
PE=0.02; %probabilidad de excedencia
prob_colap=0.01; %riesgo objetivo
percentil=0.1; %percentil 10 de la función de densidad de probabilidad de
colapso
B=0.6; %desviación estándar

%Parámetros NZS 1170 (si se desea emplear estos parámetros se debe quitar
comentarios)
years=50; %ventana de tiempo
%PE=0.1; %probabilidad de excedencia
%prob_colap=0.0005; %riesgo objetivo
%percentil=0.0001; %percentil 10 de la función de densidad de probabilidad de
colapso
B=0.6; %desviación estándar

%Se calcula la probabilidad de excedencia en 1 año igual a X% de
%probabilidad en 50 años
p=log(1-PE)/(-years);
```

```

%Se define la cantidad de punto a interpolar entre cada punto de la curva
%de amenaza con el fin de discretizarla
discretizar_cuva=80;

%Se define la cantidad de punto a extrapolar la curva de amenaza en caso
de
%que se requiera según el condicional definido más adelante en el código
ext_curva=250;
%Se define el paso para extrapolar en x
paso=0.005;

%numCols=13;

for q=2:numCols;
    %Se define numero de iteraciones
    iteraciones=4;

    %Se define matriz de ceros para almacenar valores de iteraciones
    rtgm=zeros(2,iteraciones);

    hazard_x=transpose(tabla(:,1));

    %Se convierte de probabilidad de excedencia a tasa anual de
    excedencia
    hazard_y=log(1-transpose(tabla(:,q)))/-1;

    %-----Interpolación de curva de amenaza-----
    -----%
    %Se calcula logaritmo de ambos vectores
    hazard_y=log(hazard_y);
    hazard_x=log(hazard_x);

    %Se define el primer punto del vector nuevo para almacenar los puntos
    de interpolación como el primer punto del vector original
    hazard_x_nuevo(1)=hazard_x(1);
    hazard_y_nuevo(1)=hazard_y(1);

    %Se genera un ciclo para iterar entre cada segmento de la curva de
    %amenaza
    for cont=1:length(hazard_x)-1
        %Para cada segmento se calcula la pendiente
        pend=(hazard_y(cont+1)-hazard_y(cont))/(hazard_x(cont+1)-
hazard_x(cont));
        %Se calcula a cada cuando interpolar según el número de
        %puntos a discretizar cada segmento de la curva definido
        %inicialmente
        division=(hazard_x(cont+1)-hazard_x(cont))/discretizar_cuva;

        %Se genera ciclo para almacenar los nuevos puntos entre cada

```

```

    %segmento
    for g=1:discretizar_cuva;

hazard_x_nuevo(length(hazard_x_nuevo)+1)=hazard_x_nuevo(length(hazard_x_nuevo))+division;

hazard_y_nuevo(length(hazard_y_nuevo)+1)=hazard_y_nuevo(length(hazard_y_nuevo))+division*pend;

        end
    end

    %Se hace sustituyen los valores del vector original por los nuevos
    %interpolados
    hazard_x_nuevo=exp(hazard_x_nuevo);
    hazard_y_nuevo=exp(hazard_y_nuevo);
    hazard_x=hazard_x_nuevo;
    hazard_y=hazard_y_nuevo;
    clear hazard_y_nuevo
    clear hazard_x_nuevo

    %Se obtiene valor de aceleración de la curva de amenaza asociado a la
    probabilidad de
    % excedencia en 50 años mediante interpolación
    it=find(hazard_y(:)<p,1);
    x2=hazard_x(it-1);
    x1=hazard_x(it);
    y2=hazard_y(it-1);
    y1=hazard_y(it);

    %Se almacena primer valor para iterar en la posición (1,1) del vector
    de
    %ceros
    rtgm(1,1)=10^(((log10(x2)-log10(x1))/(log10(y2)-log10(y1)))*(log10(p)-
log10(y1))+log10(x1));

    %-----1era, 2da y 3era, etc. iteración en el procedimiento de
    calculo-----

    for n=1:iteraciones;
        %Para la primer iteración se utiliza el valor de la curva de
    amenaza
        if n==1
            rtgm_n=rtgm(1,1);

            %Para la segunda iteración se calcular la diferencia porcentual
    logarítmica para
            %modificar el valor a utilizar en la segunda iteración
        elseif n==2

```

```

        if rtgm(2,n-1)>prob_colap
            rtgm(1,n)=((rtgm(2,n-1)-
prob_colap)/prob_colap+1.2)*rtgm(1,n-1);
            rtgm_n=rtgm(1,n);
        elseif rtgm(2,n-1)<prob_colap
            rtgm(1,n)=((rtgm(2,n-1)-
prob_colap)/prob_colap+0.8)*rtgm(1,n-1);
            rtgm_n=rtgm(1,n);
        end

        %A partir de la tercera iteración se comienza a interpolar
logarítmicamente entre los
        %valores generados, acercando el valor a 1%

        elseif n>=3

            %Se general un condicional, en caso de que la diferencia sea
            %menor a 1% se toma el valor generado
            if abs((rtgm(2,n-1)-prob_colap)/rtgm(2,n-1))*100<0.01;
                rtgm(1,n)=rtgm(1,n-1);
                rtgm_n=rtgm(1,n-1);

                %Caso contrario se interpola logarítmicamente entre los
valores obtenidos
            else

                position_menor = find(rtgm(2,:) == max(rtgm(2, rtgm(2,:))
<= prob_colap)), 1, 'last');
                position_mayor = find(rtgm(2,:) == min(rtgm(2, rtgm(2,:))
>= prob_colap)), 1, 'last');
                y1=(rtgm(2,position_menor));
                y2=(rtgm(2,position_mayor));
                x1=(rtgm(1,position_menor));
                x2=(rtgm(1,position_mayor));
                log_x1 = log(x1);
                log_x2 = log(x2);
                log_y1 = log(y1);
                log_y2 = log(y2);
                log_prob_colap = log(prob_colap);
                log_interpolated_y = ((log_prob_colap - log_y1) / (log_y2
- log_y1)) * (log_x2 - log_x1) + log_x1;
                interpolated_y = exp(log_interpolated_y);
                rtgm(1,n)=interpolated_y;
                rtgm_n=rtgm(1,n);
            end

        end

    end
end

```

```

%-----Curva de fragilidad-----
%Se construye curva de probabilidad de colapso acumulada
xx=cdf('lognormal',rtgm_n,log(hazard_x),B);
%
%   %Se busca el valor de aceleración para el cual la probabilidad
de
%   %colaso es 10%
xf=find(xx<percentil,1);
%
%   %Si la función de densidad de probabilidad de colapso según los
%   %valores de la curva de amenaza y el rtgm_n para la iteración
no
%   %alcanza valores menores a 0.001 es necesario extrapolar la
curva
%   %de amenaza siguiendo la pendiente del último segmento
if xx(length(hazard_x))>percentil*0.001
    for cont=1:ext_curva;
        %Se calcula logaritmo de ambos vectores
        hazard_y=log(hazard_y);
        hazard_x=log(hazard_x);
        %Se calcula la pendiente del último segmento de la curva
de
            %amenaza
            pend=(hazard_y(length(hazard_y))-
hazard_y(length(hazard_y)-1))/(hazard_x(length(hazard_x))-
hazard_x(length(hazard_x)-1));

            %Se extrapolan los valores

hazard_x(length(hazard_x)+1)=hazard_x(length(hazard_x))+paso;

hazard_y(length(hazard_y)+1)=hazard_y(length(hazard_y))+paso*pend;
        hazard_x=exp(hazard_x);
        hazard_y=exp(hazard_y);
    end
%       n
%       rtgm_n

%Se construye curva de probabilidad de colapso acumulada con
%los valores extrapolados
xx=cdf('lognormal',rtgm_n,log(hazard_x),B);
xf=find(xx<percentil,1);
med=hazard_x(xf);
else
    med=hazard_x(xf);
end

%Se construye la curva de probabilidad de colapso con el valor
%encontrado
cdf1=logncdf(hazard_x,log(med),B);

```

```

c=hazard_x;

% Se calcula la derivada de la curva de fragilidad acumulada
d_cdf1=diff(cdf1)./diff(hazard_x);
dg_cdf1=gradient(cdf1,hazard_x);

%-----Curva de amenaza multiplicada por curva de densidad---
-----
pdf_hazard=dg_cdf1.*hazard_y;

cdf_hazard_y=0;
cdf_hazard=[];

for s=1:length(c)-1;
    %Definimos el vector x y vector y para cada curva de amenaza
cdf_hazard_y=cdf_hazard_y+((pdf_hazard(s+1)+pdf_hazard(s))/2)*(abs(c(s+1)
)-abs(c(s)));
    cdf_hazard(1,s+1)=cdf_hazard_y;
end

cdf_hazard=1-exp(-cdf_hazard(1,:)*years);

rtgm(2,n)=cdf_hazard(1,length(c));

rtgm_sites(1,q-1)=rtgm(2,n);
rtgm_sites(2,q-1)=rtgm(1,n);
rtgm_sites(3,q-1)=(rtgm(2,n)-prob_colap)/rtgm(2,n)*100;
end

end

resultado=transpose(rtgm_sites);

tabla2=tabla;
tabla2(:,1) = [];
tabla2=log((1-tabla2))/-1;
lambda=log(1-PE)/-50;

for q=2:numCols;
    tabla2=tabla(:,q);
    it=find(tabla2(:)<lambda,1);
    ux1=tabla(it-1,1);
    ux2=tabla(it,1);
    uy1=tabla2(it-1,1);
    uy2=tabla2(it,1);

```

```

    uhgm_sites(1,q-1)=(ux2-ux1)/(uy2-uy1)*(lambda-uy1)+ux1;
end

for q=2:numCols;
    rc(1,q-1)=rtgm_sites(2,q-1);
    rc(2,q-1)=uhgm_sites(1,q-1);
    rc(3,q-1)=rc(1,q-1)/rc(2,q-1);
    rc(4,q-1)=coordenadas(1,q-1);
    rc(5,q-1)=coordenadas(2,q-1);
end

rc=transpose(rc);
encabezado={'UHGM', 'RTGM', 'RC', 'X', 'Y'};
encabezado=[1,2,3,4,5];

resultados = [encabezado;rc];

writematrix(resultados,'C:\Users\salvarez\Dropbox\03 Resultados\7
Sensibilidad\2 PC\3 0.001_475\Resultados_475.txt','Delimiter',';')

tabla = transpose(tabla);

max_valor = max(rtgm_sites(3,:));
indice_max_valor = find(rtgm_sites(3,:) == max_valor);

```

5.4. Anexo D: Código de PYTHON para generación de mapas de aceleraciones sísmicas y coeficientes de riesgo de manera automatizada

```
# Define la ruta al nuevo archivo de texto que contiene los puntos
ruta_txt = r'C:\Users\s Alvarez\Dropbox\03 Resultados\1
PGA_475\Resultados_475.txt'

# Define el delimitador utilizado en tu archivo de texto
delimitador = ';'

# Define los nombres de campo para X, Y y Z
campo_x = '4'
campo_y = '5'
campo_z = '3'

# Define la URI para el archivo de texto delimitado
uri =
f"file:/// {ruta_txt}?delimiter={delimitador}&xField={campo_x}&yField={cam
po_y}&zField={campo_z}"

# Crea la capa de puntos a partir del archivo de texto
capa_puntos = QgsVectorLayer(uri, 'capa_puntos', 'delimitedtext')

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not capa_puntos.isValid():
    print("Error al crear la capa de puntos.")
else:
    # Establece el sistema de referencia espacial (CRS) de la capa
    capa_puntos.setCrs(QgsCoordinateReferenceSystem('EPSG:4326')) #
    Ajusta el CRS según tu caso

    # Agrega la capa de puntos al mapa
    QgsProject.instance().addMapLayer(capa_puntos)

processing.run("qgis:tininterpolation",
{'INTERPOLATION_DATA': 'file:///C:\\Users\\s Alvarez\\Dropbox\\03
Resultados\\1
PGA_475\\Resultados_475.txt?delimiter=;&xField=4&yField=5&zField=3::~:0:
::~:2::~:0', 'METHOD': 0, 'EXTENT': '-85.934860000,-
82.574860000,8.056920000,11.196920000
[EPSG:4326]', 'PIXEL_SIZE': 0.000628, 'OUTPUT': 'C:/Users/s Alvarez/Dropbox/03
Resultados/1 PGA_475/Resultado.tif'})

# Carga la capa interpolada
resultado_interpolado = QgsRasterLayer(r'C:\Users\s Alvarez\Dropbox\03
Resultados\1 PGA_475\Resultado.tif', 'Resultado')
```

```

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not resultado_interpolado.isValid():
    print("Error al cargar la capa interpolada.")
else:
# Agrega la capa interpolada al proyecto de QGIS
    QgsProject.instance().addMapLayer(resultado_interpolado)

# Ruta al archivo shapefile
ruta_shapefile = "C:/Users/salvarez/Dropbox/01 Personales/01 Estudios/01
Ingeniería Civil/03 Maestría/01 Tesis/01 TFG/04 Mapas/Capa Costa
Rica/crborde150000polycrtm05.shp"

# Carga la capa shapefile
capa_shapefile = QgsVectorLayer(ruta_shapefile, "Capa Costa Rica", "ogr")

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not capa_shapefile.isValid():
    print("Error al cargar la capa shapefile.")
else:
# Agrega la capa al proyecto de QGIS
    QgsProject.instance().addMapLayer(capa_shapefile)

processing.run("gdal:cliprasterbymasklayer",
{'INPUT':'C:/Users/salvarez/Dropbox/03 Resultados/1
PGA_475/Resultado.tif','MASK':'C:/Users/salvarez/Dropbox/01 Personales/01
Estudios/01 Ingeniería Civil/03 Maestría/01 Tesis/01 TFG/04 Mapas/Capa
Costa
Rica/crborde150000polycrtm05.shp','SOURCE_CRS':None,'TARGET_CRS':None,'TA
RGET_EXTENT':None,'NODATA':None,'ALPHA_BAND':False,'CROP_TO_CUTLINE':True
,'KEEP_RESOLUTION':False,'SET_RESOLUTION':False,'X_RESOLUTION':None,'Y_RE
SOLUTION':None,'MULTITHREADING':False,'OPTIONS':'','DATA_TYPE':0,'EXTRA':
','OUTPUT':'C:/Users/salvarez/Dropbox/03 Resultados/1
PGA_475/Resultado_cortado_RC.tif'})

# Carga la capa recortada
capa_recortada = QgsRasterLayer('C:/Users/salvarez/Dropbox/03
Resultados/1 PGA_475/Resultado_cortado_RC.tif', 'CR')

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not capa_recortada.isValid():
    print("Error al cargar la capa recortada.")
else:
# Agrega la capa recortada al proyecto de QGIS
    QgsProject.instance().addMapLayer(capa_recortada)

# Eliminar la capa de resultados
QgsProject.instance().removeMapLayer(resultado_interpolado)

# Eliminar la capa de Costa Rica

```

```

QgsProject.instance().removeMapLayer(capa_shapefile)

# Carga el estilo de simbología desde el archivo QML
ruta_estilo2 = "C:/Users/salvarez/Desktop/Estilo.qml" # Ruta al archivo
de estilo QML

# Carga el estilo de simbología desde el archivo QML para la capa
resultado_cortado
capa_recortada.loadNamedStyle(ruta_estilo2)

QgsProject.instance().removeMapLayer(capa_puntos)

# Define la ruta al nuevo archivo de texto que contiene los puntos
ruta_txt = r'C:\Users\salvarez\Dropbox\03 Resultados\1
PGA_475\Resultados_475.txt'

# Define el delimitador utilizado en tu archivo de texto
delimitador = ';'

# Define los nombres de campo para X, Y y Z
campo_x = '4'
campo_y = '5'
campo_z = '1'

# Define la URI para el archivo de texto delimitado
uri =
f"file:/// {ruta_txt}?delimiter={delimitador}&xField={campo_x}&yField={cam
po_y}&zField={campo_z}"

# Crea la capa de puntos a partir del archivo de texto
capa_puntos = QgsVectorLayer(uri, 'capa_puntos', 'delimitedtext')

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not capa_puntos.isValid():
    print("Error al crear la capa de puntos.")
else:
    # Establece el sistema de referencia espacial (CRS) de la capa
    capa_puntos.setCrs(QgsCoordinateReferenceSystem('EPSG:4326')) #
Ajusta el CRS según tu caso

    # Agrega la capa de puntos al mapa
    QgsProject.instance().addMapLayer(capa_puntos)

processing.run("qgis:tininterpolation",
{'INTERPOLATION_DATA': 'file:///C:\\Users\\salvarez\\Dropbox\\03
Resultados\\1
PGA_475\\Resultados_475.txt?delimiter=;&xField=4&yField=5&zField=1::~:0:

```

```

::~:0::~:0', 'METHOD':0, 'EXTENT': '-85.934860000, -
82.574860000, 8.056920000, 11.196920000
[EPSG:4326]', 'PIXEL_SIZE':0.000628, 'OUTPUT': 'C:/Users/salvarez/Dropbox/03
Resultados/1 PGA_475/Resultado.tif'})

# Carga la capa interpolada
resultado_interpolado = QgsRasterLayer(r'C:\Users\s Alvarez\Dropbox\03
Resultados\1 PGA_475\Resultado.tif', 'Resultado')

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not resultado_interpolado.isValid():
    print("Error al cargar la capa interpolada.")
else:
# Agrega la capa interpolada al proyecto de QGIS
    QgsProject.instance().addMapLayer(resultado_interpolado)

# Ruta al archivo shapefile
ruta_shapefile = "C:/Users/salvarez/Dropbox/01 Personales/01 Estudios/01
Ingeniería Civil/03 Maestría/01 Tesis/01 TFG/04 Mapas/Capa Costa
Rica/crborde150000polycrctm05.shp"

# Carga la capa shapefile
capa_shapefile = QgsVectorLayer(ruta_shapefile, "Capa Costa Rica", "ogr")

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not capa_shapefile.isValid():
    print("Error al cargar la capa shapefile.")
else:
    # Agrega la capa al proyecto de QGIS
    QgsProject.instance().addMapLayer(capa_shapefile)

processing.run("gdal:cliprasterbymasklayer",
{'INPUT': 'C:/Users/salvarez/Dropbox/03 Resultados/1
PGA_475/Resultado.tif', 'MASK': 'C:/Users/salvarez/Dropbox/01 Personales/01
Estudios/01 Ingeniería Civil/03 Maestría/01 Tesis/01 TFG/04 Mapas/Capa
Costa
Rica/crborde150000polycrctm05.shp', 'SOURCE_CRS':None, 'TARGET_CRS':None, 'TA
RGET_EXTENT':None, 'NODATA':None, 'ALPHA_BAND':False, 'CROP_TO_CUTLINE':True
, 'KEEP_RESOLUTION':False, 'SET_RESOLUTION':False, 'X_RESOLUTION':None, 'Y_RE
SOLUTION':None, 'MULTITHREADING':False, 'OPTIONS': '', 'DATA_TYPE':0, 'EXTRA':
'', 'OUTPUT': 'C:/Users/salvarez/Dropbox/03 Resultados/1
PGA_475/Resultado_cortado_RTGM.tif'})

# Carga la capa recortada
capa_recortada = QgsRasterLayer('C:/Users/salvarez/Dropbox/03
Resultados/1 PGA_475/Resultado_cortado_RTGM.tif', 'RTGM')

# Verifica si la capa se ha creado correctamente
if not capa_recortada.isValid():
    print("Error al cargar la capa recortada.")

```

```

else:
    # Agrega la capa recortada al proyecto de QGIS
    QgsProject.instance().addMapLayer(capa_recortada)

# Eliminar la capa de resultados
QgsProject.instance().removeMapLayer(resultado_interpolado)

# Eliminar la capa de Costa Rica
QgsProject.instance().removeMapLayer(capa_shapefile)

# Carga el estilo de simbología desde el archivo QML
ruta_estilo2 = "C:/Users/salvarez/Desktop/Estilo.qml" # Ruta al archivo
de estilo QML

# Carga el estilo de simbología desde el archivo QML para la capa
resultado_cortado
capa_recortada.loadNamedStyle(ruta_estilo2)

# Ruta al archivo .dbf
ruta_archivo_dbf = r"\\marte\Puentes\05 INSPECCION DE PUENTES\08 BASES DE
DATOS DE PUENTES\SNIT\limiteprovincial_5k_17_12_18.dbf"

# Agregar el archivo .dbf como una capa vectorial a QGIS
capa_vectorial = iface.addVectorLayer(ruta_archivo_dbf, "1", "ogr")

# Comprobar si la capa se ha cargado correctamente
if not capa_vectorial:
    print("No se pudo cargar la capa")
else:
    print("La capa se ha cargado correctamente")

# Carga el estilo de simbología desde el archivo QML
ruta_estilo3 = "C:/Users/salvarez/Desktop/Estilo4.qml" # Ruta al archivo
de estilo QML

# Carga el estilo de simbología desde el archivo QML para la capa
resultado_cortado
capa_vectorial.loadNamedStyle(ruta_estilo3)

```