



**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA**

**CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**  
**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del título de:  
**INGENIERO CIVIL**

**MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TEMA:**

**ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL  
SITIO DEL NUEVO PROYECTO CONSTRUCTIVO DEL BENEMÉRITO  
CUERPO DE BOMBEROS DE MANTA, MANABÍ, ECUADOR,  
HACIENDO USO DEL SOFTWARE R-CRISIS Y SU COMPARACIÓN CON  
LA NEC-SE-DS 2015**

**ELABORADO POR:**

**JOSÉ ANTONIO VILLAO ZAMORA**

**TUTOR (A):**

**ING. ANGEL ABEL ZAMBRANO MEJÍA, MSC.**

**MANTA-MANABÍ – ECUADOR**

**Agosto 2025**

# CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

## CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Villao Zamora José Antonio, legalmente matriculado/a en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es **"ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL SITIO DEL NUEVO PROYECTO CONSTRUCTIVO DEL BENEMÉRITO CUERPO DE BOMBEROS DE MANTA, MANABÍ, ECUADOR, HACIENDO USO DEL SOFTWARE R-CRISIS Y SU COMPARACIÓN CON LA NEC-SE-DS 2015"**.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 13 de agosto de 2025.

Lo certifico,



Ing. Abel Zambrano Mejía, MSc.  
**Docente Tutor(a)**

## DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, José Antonio Villao Zamora con CC: 131525888-7, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema **"ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL SITIO DEL NUEVO PROYECTO CONSTRUCTIVO DEL BENEMÉRITO CUERPO DE BOMBEROS DE MANTA, MANABÍ, ECUADOR, HACIENDO USO DEL SOFTWARE R-CRISIS Y SU COMPARACIÓN CON LA NEC-SE-DS 2015"**, el cual fue dirigido por el tutor, Ing. Ángel Abel Zambrano Mejía, MSc.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 8 días del mes de septiembre de dos mil veinte y cinco.



---

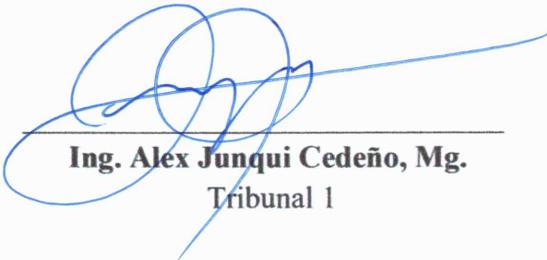
José Antonio Villao Zamora  
C.C. 131525888-7  
Autor

## CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En calidad de tribunales de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

Haber revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de Proyecto de Investigación, cuyo tema es " **ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL SITIO DEL NUEVO PROYECTO CONSTRUCTIVO DEL BENEMÉRITO CUERPO DE BOMBEROS DE MANTA, MANABÍ, ECUADOR, HACIENDO USO DEL SOFTWARE R-CRISIS Y SU COMPARACIÓN CON LA NEC-SE-DS 2015** " internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo APRUEBO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para proceder a la defensa correspondiente.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a salvo disposición de Ley en contrario. En la ciudad de Manta, a los 8 días del mes de septiembre de dos mil veinte y cinco.



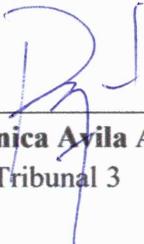
---

**Ing. Alex Junqui Cedeño, Mg.**  
Tribunal 1



---

**Ing. Yuri Rodríguez Andrade, Mg.**  
Tribunal 2



---

**Dra. Verónica Ayila Ayón.**  
Tribunal 3

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia para culminar esta meta que marca el inicio de nuevos retos en mi vida profesional.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y por enseñarme a nunca rendirme; todo lo que soy se lo debo a ustedes.

A mis hermanos, cuyo apoyo firme y constante ha sido pilar fundamental en mi formación y crecimiento.

A mi novia, por su comprensión, paciencia y apoyo inquebrantable, que me inspiraron a superar cada obstáculo.

Y a quienes, de una u otra forma, contribuyeron a que este sueño hoy se haga realidad.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y a la carrera de Ingeniería Civil, por ser el espacio donde adquirí los conocimientos y valores necesarios para mi formación profesional.

A mi docente tutor, por compartir su experiencia y por guiarme con paciencia y dedicación durante todo el proceso de investigación.

A mis amigos y compañeros de clase, con quienes compartí risas, aprendizajes y experiencias que enriquecieron y dieron un significado especial a mi recorrido académico.

A mi familia, por brindarme el apoyo moral y económico que hizo posible alcanzar esta meta.

A todos quienes, directa o indirectamente, contribuyeron a la culminación de este proyecto, muchas gracias.

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo realizar un estudio probabilístico de peligrosidad sísmica en el sitio de emplazamiento del nuevo proyecto constructivo del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Manta, provincia de Manabí, Ecuador. Para ello, se empleó el software R-CRISIS, programa especializado en la evaluación del peligro sísmico, y se efectuó una comparación con los parámetros establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS 2015.

La metodología se basó en la recopilación de información geológica, tectónica y sísmológica del área de estudio, así como en la definición de las principales fuentes sísmicas del país. Posteriormente, se configuró el programa con las coordenadas del sitio, parámetros sísmológicos y relaciones de atenuación aplicables, con el fin de generar mapas de zonificación sísmica, curvas de peligrosidad para distintas ordenadas espectrales, espectros de peligro uniforme (UHS) para diferentes periodos de retorno, y la desagregación de la amenaza sísmica considerando magnitud, distancia y tipo de fuente.

Los resultados obtenidos muestran que la ciudad de Manta presenta un nivel de amenaza sísmica intermedio, con valores de aceleración pico efectiva (PGA) en un rango aproximado de 0,36 g a 0,46 g. En la comparación entre el espectro local generado y el definido por la NEC 2015, se observaron diferencias importantes: el análisis probabilístico reflejó mayores demandas sísmicas en periodos cortos, que afectan principalmente a estructuras rígidas y de baja altura, mientras que la normativa estimó aceleraciones superiores en periodos largos, influyendo en edificaciones más flexibles o de gran altura.

Finalmente, la desagregación probabilística permitió identificar que la mayor contribución al peligro en el sitio corresponde a eventos de magnitudes comprendidas entre 6,9 y 7,4, a distancias epicentrales entre 75 y 100 km, principalmente asociados a la zona de subducción. Confirmando este estudio que el análisis probabilístico constituye una herramienta fundamental para obtener espectros de diseño más ajustados a la realidad sísmica local, aportando criterios técnicos que favorecen un diseño estructural seguro, eficiente y resiliente para la nueva estación del Cuerpo de Bomberos de Manta.

**Palabras clave:** Peligro sísmico, análisis probabilístico, espectro de peligro uniforme, R-CRISIS, NEC-SE-DS 2015, desagregación sísmica, relación de atenuación.

## **ABSTRACT**

The main objective of this study was to conduct a probabilistic seismic hazard analysis at the site of the new construction project of the Benemérito Fire Department of Manta, Manabí Province, Ecuador. The software R-CRISIS, specialized in seismic hazard assessment, was employed, and the results were compared with the parameters established by the Ecuadorian Construction Standard NEC-SE-DS 2015.

The methodology was based on the collection of geological, tectonic, and seismological information of the study area, as well as the definition of the main seismic sources in the country. The program was configured with the site coordinates, seismological parameters, and appropriate attenuation relationships in order to generate seismic zoning maps, hazard curves for different spectral ordinates, uniform hazard spectra (UHS) for several return periods, and hazard disaggregation considering magnitude, distance, and source type.

The results indicate that the city of Manta presents an intermediate level of seismic hazard, with peak ground acceleration (PGA) values ranging from approximately 0.36 g to 0.46 g. The comparison between the local spectrum and the NEC 2015 spectrum revealed significant differences: the probabilistic analysis estimated higher seismic demands at short periods, affecting mainly stiff and low-rise structures, while the code prescribed higher accelerations at longer periods, influencing more flexible and tall buildings.

Finally, the probabilistic disaggregation showed that the greatest contribution to the site hazard corresponds to seismic events with magnitudes between 6.9 and 7.4, at epicentral distances between 75 and 100 km, mainly associated with the subduction zone. This study confirms that probabilistic analysis is a fundamental tool to obtain design spectra more consistent with the local seismic reality, providing technical criteria that support a safer, more efficient, and resilient structural design for the new Fire Department station in Manta.

**Keywords:** Seismic hazard, probabilistic analysis, uniform hazard spectrum, R-CRISIS, NEC-SE-DS 2015, seismic disaggregation, attenuation relationship.

## TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORIA.....	iii
CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
TABLA DE CONTENIDOS.....	ix
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y GENERALIDADES .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. General .....	5
1.4.2. Específicos .....	5
1.5. Alcance del estudio .....	6
1.6. Área de estudio.....	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. El nuevo proyecto del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Manta .....	8
2.2. Conceptos básicos de sismicidad .....	9
2.2.1. Sismicidad .....	9
2.2.2. Fallas Geológicas .....	9
2.2.3. Escala de Richter.....	9
2.2.4. Cinturón de Fuego del Pacífico.....	10
2.2.5. Periodo de Retorno.....	10

2.2.6. Riesgo Sísmico.....	10
2.2.7. Vulnerabilidad sísmica.....	11
2.2.8. Peligro Sísmico .....	11
2.2.9. Atenuación de las ondas.....	12
2.2.10. Espectro de Amenaza Uniforme .....	13
2.3. Factores que conforman el espectro de respuesta de diseño en aceleraciones.....	13
2.3.1. Factor de Zona Sísmica.....	13
2.3.2. Coeficientes $F_a$ , $F_d$ y $F_s$ de acuerdo al perfil de suelo.....	15
2.3.3. Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico.....	17
2.3.4. Espectro Elástico de Aceleración NEC-SE-DS 2015 .....	18
2.4. Métodos de cálculo para el Peligro sísmico.....	20
2.4.1. Análisis determinístico (DSHA) .....	20
2.4.2. Análisis probabilístico (PSHA).....	21
2.4.3. Representación de resultados del peligro sísmico.....	23
2.4.4. Desagregación de la Peligrosidad .....	25
2.4.5. Ley de Gutenberg Richter .....	25
2.4.6. Microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Manta.....	27
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....	30
3.1. Método de análisis probabilístico del peligro sísmico .....	30
3.1.1. Fundamentos del análisis probabilístico .....	30
3.1.2. Comparación de enfoques probabilísticos con métodos deterministas.....	30
3.1.3. Aplicación del software R-CRISIS en el cálculo de PSHA.....	31
3.2. Clasificación del suelo en la ubicación del proyecto del Cuerpo de Bomberos .....	32
3.3. Parámetros de importancia para la implementación del programa “R-CRISIS” .....	33
3.3.1. Fuentes sismogénicas .....	33
3.3.2. Magnitud sísmica y zona de ruptura (variables K1 y K2) .....	36
3.3.3. Parámetros sismológicos.....	38

3.3.4. Ley de Atenuación .....	41
3.3.4.1. Fuentes intraplaca e interfase .....	41
3.3.4.2. Fuentes corticales .....	42
3.3.5. Ley de atenuación de Zhao (2006).....	42
3.4. Configuración del modelo en R-CRISIS.....	43
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
4.1. Mapas de amenaza sísmica para el sitio de estudio .....	55
4.2. Espectro de amenaza uniforme y curvas de peligro sísmico.....	58
4.2.1. Tasa anual de excedencia de las curvas de peligro uniforme para la ciudad Manta .....	59
4.2.2. Espectro de Amenaza Uniforme para el sitio del nuevo proyecto del Cuerpo de Bomberos Manta.....	61
4.3. Comparativa entre el espectro de amenaza sísmica establecido en la NEC-SE-DS 2015 y el obtenido mediante el software R-CRISIS .....	63
4.4. Desagregación de la peligrosidad.....	69
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
5.1. Conclusiones .....	70
5.2. Recomendaciones.....	71
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>76</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Ubicación del área de estudio: centro urbano de la ciudad de Manta, Manabí, Ecuador. ....	7
<b>Figura 2</b> Fachada del edificio antiguo del Cuerpo de Bomberos Manta.....	8
<b>Figura 3</b> Caracterización del movimiento sísmico.....	12
<b>Figura 4</b> Mapa de zonificación sísmica del Ecuador. ....	14
<b>Figura 5</b> Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.....	18
<b>Figura 6</b> Esquema general del análisis determinista del peligro sísmico.....	20
<b>Figura 7</b> Esquema del análisis probabilista del peligro sísmico. ....	21
<b>Figura 8</b> Curvas de Peligrosidad Sísmica para el sitio del Hospital de Muisne. ....	24
<b>Figura 9</b> Representación de resultados del cálculo de la peligrosidad del Hospital de Muisne. ....	24
<b>Figura 10</b> Relación de Gutenberg Richter .....	27
<b>Figura 11</b> Mapa de microzonas de Manta basado en la propuesta de la Dra. Dolly Delgado. ....	28
<b>Figura 12</b> Mapa de fuentes sismogénicas y sismicidad.....	34
<b>Figura 13</b> Tipos de fallas.....	36
<b>Figura 14</b> Ventana Inicial del software R-CRISIS. ....	43
<b>Figura 15</b> Archivo del mapa shapefile de Ecuador. ....	44
<b>Figura 16</b> Bloc de notas de las coordenadas de la ciudad de Manta. ....	44
<b>Figura 17</b> Ingreso de la data del mapa y coordenadas del sitio de análisis.....	45
<b>Figura 18</b> Delimitación de la grilla y polígono la zona de estudio.....	46
<b>Figura 19</b> Modelado de la geometría espacial de la fuente Esmeraldas. ....	47
<b>Figura 20</b> Modelado de todas las fuentes sismogénicas consideradas en el análisis. ....	48
<b>Figura 21</b> Data de la sismicidad de la fuente Esmeralda. ....	48
<b>Figura 22</b> Ordenadas espectrales. ....	49
<b>Figura 23</b> Ley de atenuación de Zhao 2006 para fuentes de interfase. ....	50
<b>Figura 24</b> Ley de atenuación de Zhao 2006 para fuentes de intraplaca.....	50
<b>Figura 25</b> Ley de atenuación de Zhao 2006 para fuentes de corticales. ....	51
<b>Figura 26</b> Ley de atenuación de Zhao 2006 para tipo de fuentes Cortical Reverse. ....	51
<b>Figura 27</b> Asignación a cada fuente una ley de atenuación. ....	52
<b>Figura 28</b> Parámetros globales.....	53

<b>Figura 29</b> Salida de archivos del análisis sísmico. ....	54
<b>Figura 30</b> Mapa de amenaza sísmica para caso aplicado (Manta). ....	55
<b>Figura 31</b> Punto de análisis. ....	55
<b>Figura 32</b> Mapa de amenaza sísmica para caso aplicado (Manta). $Tr=475$ años .....	56
<b>Figura 33</b> Mapa de amenaza sísmica para 2475 años. ....	57
<b>Figura 34</b> Ilustración de la curva de tasas de excedencia y del espectro de peligro uniforme generados en R-CRISIS. ....	58
<b>Figura 35</b> Curvas de peligro sísmico para Manta a diferentes periodos estructurales. ....	60
<b>Figura 36</b> Espectro de respuesta de aceleraciones generado con R-CRISIS para el sitio del nuevo proyecto. ....	62
<b>Figura 37</b> Espectro de respuesta de aceleraciones de la NEC-SE-DS para el nuevo proyecto.....	65
<b>Figura 38</b> Espectros de amenaza sísmica para la ciudad de Manta. ....	66
<b>Figura 39</b> Comparativa de los distintos espectros de peligro uniforme. ....	68
<b>Figura 40</b> Desagregación sísmica que muestra el software R-CRISIS $Tr=475$ años. ....	69
<b>Figura 41</b> Mapas de zonificación sísmica de Manta $Tr=475$ años para diferentes periodos.....	76
<b>Figura 42</b> Mapas de zonificación sísmica de Manta $Tr=2475$ años para diferentes periodos.....	77

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Factor de zona sísmica "Z". .....	15
<b>Tabla 2</b> Coeficiente de amplificación $F_a$ de acuerdo al perfil de suelo. ....	16
<b>Tabla 3</b> Coeficiente de amplificación $F_d$ de acuerdo al perfil de suelo. ....	16
<b>Tabla 4</b> Coeficiente de amplificación $F_s$ de acuerdo al perfil de suelo. ....	17
<b>Tabla 5</b> Tipos de perfil de suelo .....	17
<b>Tabla 6</b> Comparación de los métodos de análisis del peligro sísmico. ....	31
<b>Tabla 7</b> Fuentes sísmicas relevantes para el sitio de estudio. ....	35
<b>Tabla 8</b> Valores de $K_1$ Y $K_2$ de acuerdo a los autores. ....	37
<b>Tabla 9</b> Modelos de fuentes sismogénicas.....	37
<b>Tabla 10</b> Valores del modelo de recurrencia GR y datos adicionales a cada zona fuente (según el catálogo BSSA2013). ....	39
<b>Tabla 11</b> Parámetros sismológicos de las fuentes necesarios para el uso del software R CRISIS (con base en el catálogo BSSA2013) .....	40
<b>Tabla 12</b> Registro de valores de tasa de excedencia anual calculados por el programa R- CRISIS.....	59
<b>Tabla 13</b> Aceleraciones espectrales obtenidas del análisis realizado con R-CRISIS.....	61
<b>Tabla 14</b> Parámetros de acuerdo al perfil del suelo, en conformidad con la NEC-SE-DS 2015.....	64
<b>Tabla 15</b> Aceleraciones espectrales para el sitio del nuevo proyecto del Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Manta. ....	67
<b>Tabla 16</b> Parámetros geométricos de las fuentes sismogénicas del Ecuador.....	78

# **CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y GENERALIDADES**

## **1.1. Introducción**

Si se analiza el número de sismos de magnitud mayor o igual a Mw 7.0 registrados en Ecuador, se puede observar que, debido a su ubicación geográfica, el país ha experimentado numerosos eventos significativos a lo largo de su historia. Desde los inicios del siglo XX hasta la fecha actual, se han presentado varios sismos de gran magnitud, que consolidan a Ecuador como una región de alta actividad sísmica. Como ejemplo podemos mencionar el terremoto de 1906, con magnitud de Mw 8,8, catalogado como uno de los más grandes registrados en la región y que generó un devastador tsunami afectando a las costas de Ecuador. Complementa (Bourgois, 2013), “Esta alta actividad se debe al contacto tectónico entre las placas de Nazca y Sudamericana, donde la primera subduce bajo la segunda con una tasa de convergencia de aproximadamente 6-7 cm/año”, lo que genera una acumulación frecuente de esfuerzos y liberación de energía sísmica de forma periódica.

Esta problemática ha impulsado múltiples investigaciones sobre la peligrosidad sísmica vinculada a procesos de subducción en Ecuador, con especial atención a los terremotos interfase y se han identificado segmentos sísmicos y desarrollados estudios probabilísticos de amenaza sísmica zonificada, centrados en gran medida a este tipo de eventos. Aun así, al igual que en países con características tectónicas similares, como el caso de Chile, también se presentan sismos de origen superficial tipo corticales dentro de la placa continental. Cabe mencionar que, aunque su magnitud suele ser menor en comparación con los grandes sismos de subducción, la cercanía de estos eventos a centros poblados los convierte en un riesgo considerable.

Por tanto, el presente proyecto de investigación se centra en la aplicación del método de peligrosidad sísmica en forma probabilística (PSHA) en la zona de emplazamiento de la nueva estación del cuerpo de bomberos, considerando todas las fuentes sísmicas, es decir, que incluye en el análisis los eventos sísmicos asociados a la subducción, tanto interfase como intraplaca, así como los sismos corticales de origen superficial, con el objetivo de contribuir al diseño sismo-resistente para edificaciones esenciales como esta que lo requieren.

Este documento utilizó datos que nos facilitó el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, logrando así continuar con el trabajo de titulación para utilizarlos en la resolución del caso aplicado antes mencionado; respecto al ejercicio que se realizará con el programa “R-

CRISIS”, se demostrará cómo es posible analizar estructuras frente a distintas intensidades sísmicas. Para ello, se empleará la evaluación de la probabilidad de peligro sísmico, lo que permite trabajar con espectros de aceleración adaptados a diferentes periodos de retorno, ofreciendo una visión más completa del comportamiento esperado de las edificaciones ante diversos escenarios sísmicos.

Este trabajo de titulación tiene como fin elaborar, mapas de zonificación sísmica, curvas de peligrosidad (tasas de excedencia), espectros de peligro uniforme (UHS) específicos para el área de estudio (Manta), y por último la desagregación de la peligrosidad, considerando las contribuciones de las principales fuentes sísmicas y las leyes de atenuación de las ondas sísmicas; todo esto mediante un análisis probabilístico del peligro sísmico (PSHA) y su comparación con el espectro definido en la NEC-SE-DS 2015 con el UHS de las mismas condiciones.

## 1.2. Planteamiento del problema

En Ecuador, el diseño sísmo-resistente de edificaciones se encuentra regulado por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), específicamente en su capítulo NEC-SE-DS. Esta normativa incluye mapas de zonificación sísmica y establece parámetros generales para el diseño estructural a partir de estudios nacionales de peligrosidad. Sin embargo, dichos lineamientos fueron elaborados a escala regional y no contemplan con suficiente detalle las variaciones locales del peligro sísmico que pueden presentarse en ciudades específicas.

En cuanto a la sismicidad de la ciudad de Manta, la interacción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, hace a la zona costera susceptible a sismos de gran magnitud, por ejemplo, el sismo de Pedernales del año 2016, puso en evidencia la vulnerabilidad de la región y la necesidad de contar con parámetros actualizados para el diseño sísmo-resistente, dado que los daños fueron muy significativos. Además, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) se publicó en 2015, antes de que ocurriera este evento, por lo que los datos empleados para definir los parámetros de diseño sísmo-resistente en ese entonces, no podrían reflejar con exactitud las condiciones sísmicas.

Asimismo, la NEC-SE-DS se centra principalmente en los sismos vinculados a la subducción, sin considerar de manera explícita la influencia de los sismos corticales dado que estos son menos frecuentes, y por ello, poco representados en los espectros normativos, sin embargo, estos eventos de origen superficial pueden generar aceleraciones elevadas cerca de su epicentro, provocando daños importantes si no se consideran en el diseño.

Por lo anterior, se hace necesario implementar una metodología probabilística para estimar el peligro sísmico en el sitio donde se levantará la nueva estación del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Manta, que permitirá identificar con mayor exactitud las fuentes sísmicas más relevantes, generar mapas y espectros de peligro uniforme propios, y determinar el evento que represente el mayor riesgo para el área de estudio, con el fin de obtener parámetros representativos que complementen la normativa vigente y sean una base técnica sólida para el diseño de una infraestructura crítica para la ciudad.

### **1.3. Justificación**

La ubicación geográfica de Manta, en una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica del país, hace indispensable contar con estudios específicos que permitan diseñar infraestructuras esenciales capaces de resistir eventos sísmicos severos. Las normas vigentes, como la NEC-15, si bien constituyen una base técnica importante, se elaboran con criterios generales que no siempre reflejan las condiciones locales del suelo ni la influencia particular de las fuentes sísmicas que rodean el sitio de construcción.

En este contexto, para obtener estimaciones más precisas del riesgo sísmico se debe realizar un Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (PSHA) para el sitio donde se construirá la nueva estación del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Manta, abarcando tanto las fuentes de subducción como los sismos de origen superficial, además de incorporar las relaciones de atenuación del movimiento sísmico; con esto, los resultados, incluyendo mapas de peligro, espectros de peligro uniforme y la desagregación de la peligrosidad, servirán como complemento para definir un espectro de diseño adaptado a las condiciones reales de Manta.

Un edificio destinado a albergar al Cuerpo de Bomberos de Manta representa una infraestructura esencial para la seguridad y la capacidad de respuesta ante emergencias de la comunidad, su diseño debe considerarse sismorresistente y basarse en información actualizada sobre la peligrosidad sísmica local, asegurando que la edificación mantenga su operatividad durante y después de un evento sísmico. Dicho esto, el presente proyecto responde a esta necesidad, empleando el software R-CRISIS, una herramienta especializada que facilita el modelado y la validación de escenarios sísmicos específicos, contribuyendo a reducir la vulnerabilidad de la infraestructura frente a futuros eventos.

El valor de esta investigación radica en fortalecer la seguridad y resiliencia de una edificación esencial para la atención de emergencias. A su vez, contribuye al conocimiento actualizado sobre la amenaza sísmica en la ciudad de Manta, sirviendo como referencia para futuros proyectos de construcción en la región, puesto que, este tipo de estudios complementa los lineamientos generales de la normativa vigente y se constituye como una herramienta útil para la toma de decisiones informadas en planificación urbana y reducción del riesgo sísmico.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. General**

Analizar de forma probabilística el peligro sísmico en el sitio de construcción de la nueva estación del Cuerpo de Bomberos de Manta, empleando el software R-CRISIS, para generar espectros de peligro uniforme específicos y compararlos con los establecidos en la normativa ecuatoriana NEC-SE-DS.

### **1.4.2. Específicos**

- ✓ Revisar y sintetizar los principales enfoques metodológicos y normativos aplicados al análisis probabilístico del peligro sísmico.
- ✓ Caracterizar las condiciones geológicas, tectónicas y sismológicas del área de estudio, estableciendo las fuentes sísmicas relevantes.
- ✓ Configurar el software R-CRISIS con las coordenadas del sitio, la información geográfica y los parámetros sísmicos requeridos para el modelado.
- ✓ Generar los resultados del análisis probabilístico mediante: mapas de zonificación sísmica para períodos de retorno de 475 y 2475 años, curvas de peligrosidad para diferentes ordenadas espectrales  $SA(t)$  y espectros de peligro uniforme (UHS) para períodos de retorno de 72, 225, 475, 1000 y 2475 años.
- ✓ Comparar el espectro de peligro uniforme de 475 años con el espectro de diseño definido por la NEC-SE-DS 2015, proponiendo recomendaciones ajustadas a la realidad sísmica de Manta.
- ✓ Desagregar el peligro sísmico para identificar las combinaciones predominantes de magnitud, distancia y tipo de fuente que más contribuyen al peligro en el emplazamiento.

## 1.5. Alcance del estudio

El presente estudio se centra en la realización de un análisis probabilístico del peligro sísmico (PSHA) para el centro de la ciudad de Manta, Ecuador, con el objetivo de generar información técnica que permita desarrollar espectros de diseño sismo-resistente específicos para la nueva estación del Benemérito Cuerpo de Bomberos de la ciudad. El trabajo abarca la recopilación y análisis de información geológica, tectónica y sismológica de la zona, identificando tanto las fuentes sísmicas asociadas a la subducción (interfase e intraplaca) como las fallas corticales locales que podrían influir en el peligro sísmico de la región.

El estudio se realizará siguiendo un enfoque probabilístico, cuya influencia viene dada por las principales variables del movimiento del suelo que son: la magnitud de los sismos, la distancia fuente-emplazamiento, y las condiciones locales del terreno, todo esto gracias al uso del software R-CRISIS, que permitió modelar el peligro sísmico de manera específica y ajustada a las características particulares del emplazamiento.

Los productos de este estudio incluyen:

- Mapas de zonificación sísmica para diferentes períodos de retorno.
- Curvas de peligrosidad (tasas de excedencia) para varias ordenadas espectrales.
- Espectros de Peligro Uniforme (UHS) específicos para el sitio, considerando períodos de retorno de 72, 225, 475, 1000 y 2475 años.
- Análisis de desagregación de la peligrosidad, que permitirá identificar las combinaciones predominantes de magnitud, distancia y tipo de evento que más contribuyen al peligro sísmico en la zona.

Finalmente, los resultados obtenidos serán comparados con los espectros de diseño establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15), con el fin de evaluar las diferencias y proponer recomendaciones técnicas ajustadas a la realidad sísmica de Manta.

Este proyecto se centra en un área específica de la ciudad de Manta, por lo que sus resultados no pueden aplicarse directamente a otras zonas sin un análisis previo adicional, además, este tipo de estudios dependen de la información disponible sobre sismicidad y fallas activas, por lo que la falta de precisión y actualización de los datos puede conllevar ciertas incertidumbres.

## 1.6. Área de estudio

El área seleccionada para esta investigación corresponde al núcleo urbano de la ciudad de Manta, ubicada en la región costera de la provincia de Manabí, Ecuador. Esta ciudad constituye un punto estratégico por su importancia en el ámbito portuario, comercial y turístico a nivel nacional. Su ubicación geográfica, en la zona de convergencia entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, la sitúa dentro de un contexto de alta peligrosidad sísmica, expuesta a eventos de diversa magnitud.

La zona de estudio es el centro urbano de Manta, la cual presenta una alta densidad poblacional, infraestructura crítica, y una intensa actividad económica. Dentro de esta zona se proyecta la construcción de la nueva estación del Benemérito Cuerpo de Bomberos, considerada una edificación esencial para la atención de emergencias y desastres naturales. Por tanto, es primordial llevar a cabo un análisis detallado de la amenaza sísmica en la zona, que mejore su diseño sismorresistente y reduzca de forma efectiva el riesgo sísmico.

### *Figura 1*

*Ubicación del área de estudio: centro urbano de la ciudad de Manta, Manabí, Ecuador.*



Nota. Localización geográfica del núcleo urbano de Manta, donde se proyecta la construcción de la nueva estación del Cuerpo de Bomberos con coordenadas Latitud: -0.94806 Longitud: -80.72500

Fuente: Google Earth

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. El nuevo proyecto del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Manta

El terremoto ocurrido en abril de 2016 afectó de manera significativa a la ciudad de Manta, y el Cuerpo de Bomberos no fue la excepción. El edificio de la estación central ubicado en la avenida 11 entre las calles 11 y 12, donde operan las principales oficinas de atención al ciudadano y el servicio de respuesta a emergencias, sufrió daños estructurales considerables. En la actualidad, el edificio permanece en condiciones precarias, lo que no solo compromete la seguridad del personal que allí labora, sino también la de los transeúntes que circulan en sus inmediaciones, representando un riesgo permanente para ambos.

Ante esta situación, la institución decidió emprender la construcción de una nueva estación que sustituya al edificio afectado, con el objetivo de cubrir de manera adecuada las necesidades operativas y garantizar un diseño estructural más resistente, capaz de minimizar los daños en caso de futuros eventos sísmicos.

#### **Figura 2**

*Fachada del edificio antiguo del Cuerpo de Bomberos Manta.*



Fuente: (EL DIARIO, 2025)

Hasta el momento no se dispone de información definitiva sobre el diseño arquitectónico, ya que el proyecto se encuentra en proceso de revisión y aprobación por parte de la consultoría responsable. Sin embargo, de manera preliminar se conoce que el nuevo edificio contará con

aproximadamente tres o cuatro niveles (aún por definir), tendrá un área de implantación de 564 m<sup>2</sup>, un fondo de 22 metros y un frente de 21,7 metros.

## **2.2. Conceptos básicos de sismicidad**

### **2.2.1. Sismicidad**

Cuando hablamos de sismicidad nos referimos a la frecuencia, magnitud y distribución espacial de los terremotos en el mundo o en alguna región específica que sea tectónicamente activa, y se la considera muy importante dado que el estudio de la distribución geográfica de terremotos ayuda a establecer la teoría de la tectónica de placas, según la cual la superficie de la litosfera está dividida en placas cuyos bordes coinciden con las zonas sísmicamente activas.

Así mismo, según el (IGN, 1999) describe que la sismicidad viene a ser “el conjunto de parámetros que definen totalmente el fenómeno sísmico en el foco y se representa generalmente mediante distribuciones temporales, espaciales, de tamaño, de energía, entre otros”.

### **2.2.2. Fallas Geológicas**

Para (Astorga, 2013), se define como una falla o una zona de fallas cercanamente espaciadas a lo largo de las cuales las rocas de un lado han sido sometidas a un desplazamiento respecto de las rocas del otro lado.

Así mismo, una falla geológica corresponde a la fractura de grandes bloques de roca de la corteza terrestre cuando las fuerzas tectónicas exceden la resistencia del material. Estas fracturas pueden orientarse en distintas direcciones y generan una zona de ruptura que, en general, se define como el plano de falla, donde los bloques se desplazan entre sí originando los sismos. Las fallas se clasifican principalmente en cuatro tipos: normales (directas), inversas, transcurrentes y oblicuas

### **2.2.3. Escala de Richter**

La escala de Richter es un método utilizado para medir la magnitud de los sismos ocurridos en un determinado período, asignando un valor numérico que cuantifica la energía liberada durante el evento, así mismo, (TRUJILLO, OSPINA, & PARRA, 2010), refiere que la escala de Richter, establecida en 1935, “apunta a medir la cantidad de energía liberada y no crece de una manera lineal, es decir, un grado más puede significar una liberación de energía quince veces mayor que el anterior”.

Cabe mencionar que esta escala resulta adecuada para sismos cuya magnitud oscila aproximadamente entre 2 y 6,9 grados y que se originan a profundidades de entre 0 y 400 km. Sin embargo, cuando un terremoto alcanza o supera los 7 grados, la escala de Richter deja de ser precisa y se recurre a la escala de magnitud de momento, propuesta en 1979 por Thomas Hanks y Hiroo Kanamori, la cual permite una estimación más exacta de la energía liberada en eventos de gran magnitud. Por ello, los terremotos con magnitudes superiores a 6,9 no pueden ser evaluados adecuadamente mediante la escala de Richter.

#### **2.2.4. Cinturón de Fuego del Pacífico**

En el denominado Cinturón o Anillo de Fuego convergen varias placas tectónicas, grandes bloques rígidos de la corteza terrestre que se encuentran en constante movimiento, entre ellas la placa del Pacífico y las placas marítimas de Filipinas, Juan de Fuca, Cocos y Nazca.

El desplazamiento continuo de estas placas provoca que, al entrar en contacto con placas continentales, una se desplace por debajo de la otra en un proceso conocido en geología como subducción, generando terremotos y erupciones volcánicas que pueden impactar gravemente los territorios cercanos. De igual forma, estos choques y deslizamientos pueden ocurrir entre placas situadas bajo los océanos, originando actividad sísmica y volcánica en dichas zonas.

“Cerca del 90% de los terremotos ocurren en el Cinturón de Fuego del Pacífico, un área de aproximadamente unos 40.000 km” (CNN, 2024), por lo que es uno de los fenómenos naturales que despiertan un mayor miedo a nivel mundial por su capacidad destructiva.

#### **2.2.5. Periodo de Retorno**

Se entiende por período de retorno aquel intervalo de tiempo utilizado para estimar la probabilidad de que ocurra un sismo con magnitud igual o superior a un valor específico en un año cualquiera. Complementa (Chica Carvajal & Morán PARRALES, 2020), que el período de retorno de un evento representa el lapso durante el cual la probabilidad de que el evento suceda se distribuye de manera uniforme a lo largo de los años que comprende dicho intervalo”. Por ejemplo, un período de retorno de 100 años equivale a una probabilidad de excedencia de 1/100, es decir, un 1% en cualquier año dado.

#### **2.2.6. Riesgo Sísmico**

Para (Mena Hernández, 2002), “Son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por un terremoto”.

Estas consecuencias están vinculadas al nivel de exposición y vulnerabilidad de las estructuras, infraestructuras y comunidades frente a eventos sísmicos, así como a la peligrosidad del fenómeno. En términos técnicos, el riesgo sísmico puede expresarse como una función de dos factores clave:

$$RIESGO\ SISMICO = PELIGRO\ SISMICO \times VULNERABILIDAD\ SISMICA$$

Donde:

Peligrosidad sísmica (probabilidad de que ocurra un terremoto).

Vulnerabilidad sísmica (propensión de las estructuras y sistemas a sufrir daños).

### **2.2.7. Vulnerabilidad sísmica**

La vulnerabilidad Sísmica, según (Mena Hernández, 2002), “es un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las mismas, dentro de un rango de nada vulnerable a muy vulnerable ante la acción de un terremoto”.

La vulnerabilidad sísmica mide la propensión de los elementos expuestos (edificaciones, infraestructuras y población) a sufrir daños ante un terremoto. Este concepto depende principalmente de la calidad estructural, la tipología de las edificaciones y de las condiciones del terreno, puesto que, los materiales y métodos de construcción utilizados, el tipo de construcción (mampostería, concreto armado, acero, etc.), también la influencia de las propiedades geotécnicas en la amplificación de ondas sísmicas, influyen al comportamiento de la estructura frente a un sismo.

### **2.2.8. Peligro Sísmico**

El peligro sísmico en un sitio o zona específica, (Esteva, 1976) manifiesta que:

Puede describirse en términos de las probabilidades de ocurrencia de movimientos del terreno de diversas intensidades durante lapsos determinados. Esto implicaría describir las posibles historias de ocurrencias de sismos como un proceso de eventos con intensidades aleatorias, que ocurren en instantes aleatorios.

“Entre los factores que intervienen en el movimiento sísmico se encuentran el factor temporal, que indica la frecuencia entre los eventos, la magnitud, relacionada con la energía que se puede liberar en cada fuente, la distancia fuente-emplazamiento, la trayectoria y el efecto de sitio” (Parra, 2016).

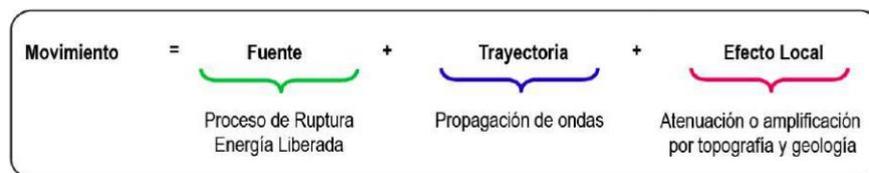
En cuanto a los factores “frecuencia y magnitud”, estos se relacionan mediante modelos de recurrencia que describen la sismicidad de cada fuente considerada en el análisis de peligrosidad sísmica. Para ello, se emplea una función de densidad de probabilidad de magnitudes  $f(m)$ , que frecuentemente utiliza la Ley de Gutenberg-Richter y el Modelo de Terremoto Característico.

Además, los factores como la distancia entre la fuente-emplazamiento, la trayectoria de propagación y la magnitud, influyen en el cálculo del movimiento sísmico a través de las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte o GMPE, permitiendo estimar parámetros como la máxima aceleración del suelo (PGA) y las aceleraciones Espectrales SA(t).

El movimiento sísmico esperado se modela como la interacción de tres componentes clave: la fuente sísmica, la atenuación de las ondas (o propagación del movimiento) y los efectos locales o de sitio (Figura 2). Cabe mencionar que, si no se consideran los efectos de sitio, el movimiento sísmico calculado refleja las condiciones características en roca.

**Figura 3**

Caracterización del movimiento sísmico.



Fuente: (Cabello, 2021)

### 2.2.9. Atenuación de las ondas

La energía de las ondas disminuye conforme se propagan desde la fuente hasta el lugar de interés, por lo que el movimiento del suelo en un sitio no solo está influenciado por la energía liberada en la fuente, sino también por el nivel de atenuación que experimentan las ondas durante su recorrido. Las fórmulas de atenuación permiten estimar el movimiento sísmico; a mayor magnitud, mayor será la amplitud de las ondas, mientras que, a mayor distancia, menor será dicha amplitud.

“La amplitud de las ondas se atenúa en su propagación como consecuencia de la expansión geométrica del frente de ondas y de la anelasticidad del medio” (Benito & Jimenez, 1999); cabe recalcar que, en la práctica, estas variables no pueden determinarse con exactitud, ya que resulta imposible conocer de manera detallada la composición del medio existente entre la fuente y el sitio de emplazamiento.

Cuando se dispone de una cantidad suficiente de registros de movimiento fuerte, es posible ajustar los datos observados a un modelo mediante análisis de regresión, permitiendo así la determinación de los coeficientes correspondientes. Este procedimiento constituye la estimación empírica de modelos.

#### **2.2.10. Espectro de Amenaza Uniforme**

Se define el espectro de aceleraciones de amenaza uniforme como la curva que une las aceleraciones espectrales asociadas independientemente a cada período estructural con una probabilidad de excedencia dada en un tiempo determinado y para un cierto factor de amortiguamiento con respecto al crítico. Es decir que es la curva que une las aceleraciones espectrales asociadas al mismo período de retorno, trabajando cada período estructural independientemente. (Jaramillo, 2002)

### **2.3. Factores que conforman el espectro de respuesta de diseño en aceleraciones**

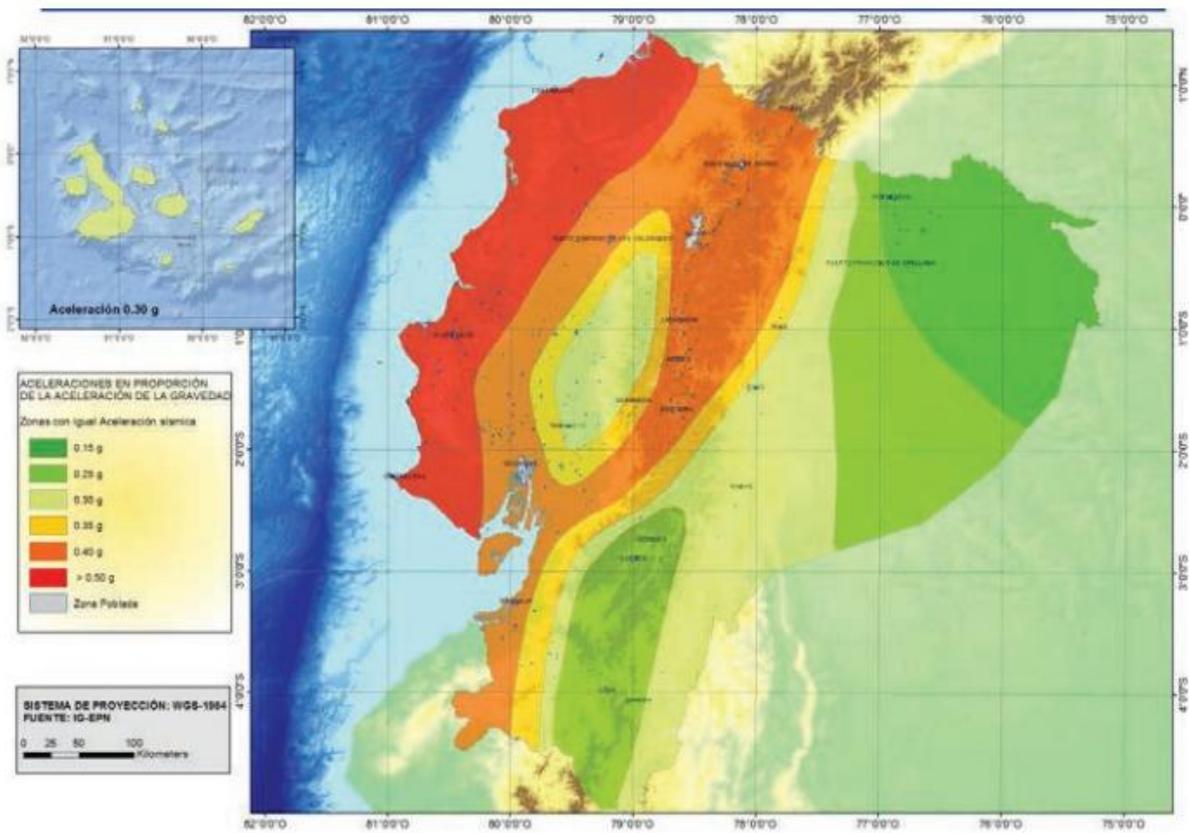
De acuerdo con la norma NEC-SE-DS (2015), el espectro de diseño está condicionado por factores como la zona sísmica, los coeficientes asociados a las características propias del sitio, la relación de amplificación y el factor de diseño elástico. Este espectro se establece considerando un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años, lo que equivale a un período de retorno de 475 años. A continuación, se detallan los valores recomendados por la normativa ecuatoriana para el diseño sismorresistente en el territorio nacional.

#### **2.3.1. Factor de Zona Sísmica**

(NEC-SE-DS, 2015), manifiesta que el factor de zona sísmica o constante  $z$  se define como la aceleración máxima en roca prevista para el sismo de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad. La normativa ecuatoriana proporciona valores de referencia previamente determinados para este parámetro, los cuales se encuentran diferenciados según las seis zonas sísmicas en las que se divide el territorio nacional, tal como se muestra a continuación.

**Figura 4**

*Mapa de zonificación sísmica del Ecuador.*



Nota. La figura ilustra la zonificación del Ecuador mediante una escala de colores que representa los valores del parámetro z en cada región. Este mapa de zonificación sísmica, utilizado para el diseño estructural, se obtuvo a partir de un estudio de peligro sísmico correspondiente a un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años (período de retorno de 475 años).

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015).

**Tabla 1**

Factor de zona sísmica "Z".

Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor z	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	$\geq 0,50$
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Nota. Muestra los valores de zona sísmica propuestos por la NEC-SE-DS apartado 3.1.1

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

### 2.3.2. Coeficientes $F_a$ , $F_d$ y $F_s$ de acuerdo al perfil de suelo

Para determinar la clasificación del perfil de suelo establecida en la NEC-SE-DS (2015), es indispensable realizar previamente estudios geotécnicos. Estos estudios permiten obtener información sobre la velocidad de propagación de ondas, el número de golpes resultante del ensayo SPT y la resistencia última del terreno. Con estos datos se procede a identificar los parámetros correspondientes como:

a) Factor  $F_a$ :

Corresponde al coeficiente de amplificación aplicado a las ordenadas espectrales de aceleración para el diseño en roca. Este valor varía en función del perfil de suelo del sitio. (Ver Tabla 2).

b) Factor  $F_d$ :

Representa el coeficiente de amplificación de las ordenadas espectrales de desplazamiento para el diseño en roca, determinado de acuerdo con el tipo de suelo presente en el emplazamiento. (Ver Tabla 3).

c) Factor  $F_s$ :

Coeficiente que incorpora los efectos del comportamiento no lineal del suelo, así como la degradación del período fundamental. Este factor se aplica tanto a los espectros de aceleración como a los de desplazamiento. (Ver Tabla 4).

**Tabla 2**

*Coefficiente de amplificación  $F_a$  de acuerdo al perfil de suelo.*

<b>Tipo de perfil del subsuelo</b>	<b>Zona I (Z=0,15)</b>	<b>Zona II (Z=0,25)</b>	<b>Zona III (Z=0,30)</b>	<b>Zona IV (Z=0,35)</b>	<b>Zona V (Z=0,40)</b>	<b>Zona VI (Z=0,50)</b>
<b>A</b>	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
<b>B</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>C</b>	1,40	1,30	1,25	1,23	1,20	1,18
<b>D</b>	1,60	1,40	1,30	1,25	1,20	1,12
<b>E</b>	1,80	1,40	1,25	1,10	1,00	0,85
<b>F</b>	Requiere evaluación en el sitio					

Nota. Establece la NEC-SE-DE en la sección 3.2. 2.a. los valores correspondientes de  $F_a$  atribuidos a cada perfil de suelo.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

**Tabla 3**

*Coefficiente de amplificación  $F_d$  de acuerdo al perfil de suelo.*

<b>Tipo de perfil del subsuelo</b>	<b>Zona I (Z=0,15)</b>	<b>Zona II (Z=0,25)</b>	<b>Zona III (Z=0,30)</b>	<b>Zona IV (Z=0,35)</b>	<b>Zona V (Z=0,40)</b>	<b>Zona VI (Z=0,50)</b>
<b>A</b>	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
<b>B</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>C</b>	1,36	1,28	1,19	1,15	1,11	1,06
<b>D</b>	1,62	1,45	1,36	1,28	1,19	1,11
<b>E</b>	2,10	1,75	1,70	1,65	1,60	1,50
<b>F</b>	Requiere evaluación en el sitio					

Nota. Estipula la NEC-SE-DS sección 3.2.2.b. los valores correspondientes de  $F_d$  asignados a cada perfil de suelo.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

**Tabla 4**

Coeficiente de amplificación  $F_s$  de acuerdo al perfil de suelo.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona I (Z=0,15)	Zona II (Z=0,25)	Zona III (Z=0,30)	Zona IV (Z=0,35)	Zona V (Z=0,40)	Zona VI (Z=0,50)
A	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
B	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
C	0,85	0,94	1,02	1,06	1,11	1,23
D	1,02	1,06	1,11	1,19	1,28	1,4
E	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
F	Requiere evaluación en el sitio					

Nota. Indica la NEC-SE-DS apartado 3.2.2.c los valores correspondientes de  $F_s$  propios de cada perfil de suelo.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

### 2.3.3. Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico

**Tabla 5**

Tipos de perfil de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500m/s$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500m/s > V_s \geq 760m/s$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante, o perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquier de los dos criterios	$760m/s > V_s \geq 360m/s$ $N \geq 50,0$ $S_u \geq 100KPa$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante	$360m/s > V_s \geq 180m/s$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15,0$ $100Kpa > S_u \geq 50KPa$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante	$V_s < 180m/s$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50KPa$

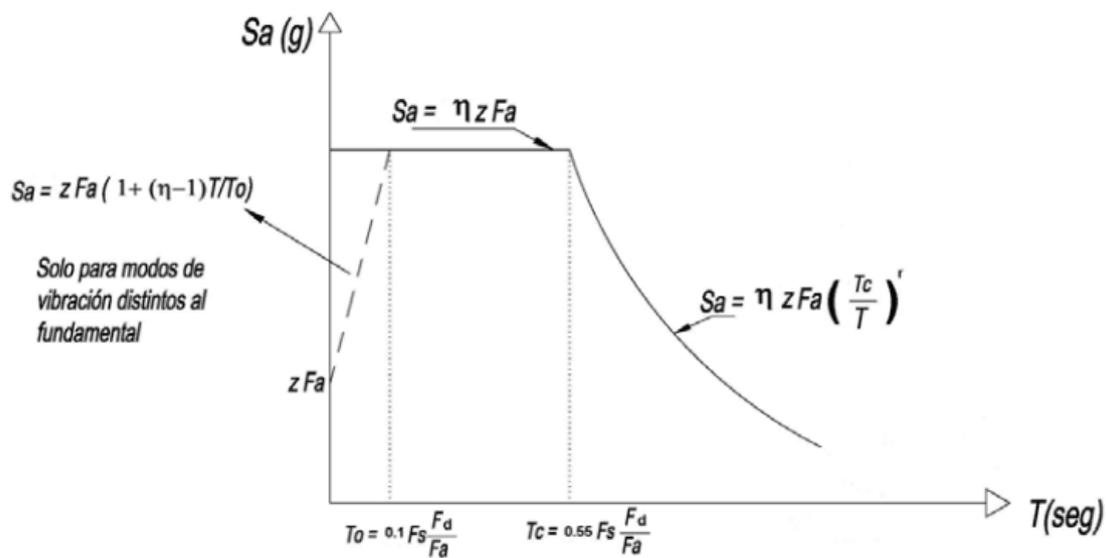
Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

### 2.3.4. Espectro Elástico de Aceleración NEC-SE-DS 2015

Con base en lo anteriormente expuesto, se procede a la representación gráfica del espectro definido en la NEC-SE-DS (2015), en la cual se incluyen las ecuaciones necesarias para su cálculo, evidenciando la influencia de los componentes propios de la naturaleza del suelo. Dicho espectro se presenta a continuación:

**Figura 5**

*Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.*



Nota. La NEC-SE-DS en la sección 3.3.1., establece la representación del espectro y los componentes que la conforman.

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Dónde:

**T** = Periodo fundamental de vibración de la estructura

**T<sub>0</sub>** = Periodo límite de vibración en el espectro elástico de aceleraciones ( $T_0 = 0.1 F_s F_d F_a$ )

**T<sub>c</sub>** = Periodo límite de vibración en el espectro elástico de aceleraciones ( $T_c = 0.55 F_s F_d F_a$ )

**S<sub>a</sub>** = Aceleración espectral esperada, expresada en fracción de gravedad (g)  
**Z** = Factor de zona sísmica, expresada en fracción de gravedad (g)

**F<sub>a</sub>** = Coeficiente de amplificación de suelo, en ordenadas espectrales de aceleración

**F<sub>d</sub>** = Coeficiente de amplificación de suelo, en ordenadas espectrales de desplazamiento

**F<sub>s</sub>** = Coeficiente de amplificación de suelo, para espectro de aceleración y desplazamiento

**r** = Factor a emplear en el espectro de diseño elástico en base a la ubicación geográfica del proyecto, con los siguientes valores:

r = 1.0 Para todos los tipos suelos, excepto el suelo E

r = 1.5 Para suelo tipo E

**η** = Relación de amplificación espectral de acuerdo a la región de análisis, con los siguientes valores (NEC-SE-DS, 2015):

η = 1.80 Región Costa, excepto Esmeraldas.

η = 2.48 Región Sierra, Esmeraldas y Galápagos.

η = 2.60 Región oriente.

Además de los componentes previamente señalados, la (NEC-SE-DS, 2015) advierte que el cálculo de la aceleración espectral depende del rango (periodo límite de vibración) en el que se ubique el período fundamental de la estructura. Por tanto, establece las siguientes ecuaciones:

✓ Para:  $T = 0$

$$S_a = ZF_a \quad \text{Ecuación 1}$$

✓ Para:  $T \leq 0$

$$S_a = ZF_a(1 + (\eta - 1)T/T_0) \quad \text{Ecuación 2}$$

✓ Para:  $0 \leq T \leq T_c$

$$S_a = \eta ZF_a \quad \text{Ecuación 3}$$

✓ Para:  $T > T_c$

$$S_a = \eta ZF_a \left(\frac{T_c}{T}\right)^r \quad \text{Ecuación 4}$$

## 2.4. Métodos de cálculo para el Peligro sísmico

### 2.4.1. Análisis determinístico (DSHA)

“El análisis determinista del peligro sísmico (DSHA) evalúa el impacto de un evento sísmico máximo creíble para un área específica, basándose en los registros históricos más significativos o en la máxima magnitud esperada de las fuentes sísmicas” (Yepez, Barbat, & Canas, 1995). Es decir, que asume que los eventos sísmicos futuros serán similares a los del pasado y utiliza escenarios específicos para estimar los efectos máximos que un terremoto puede producir en una región.

Este enfoque se utiliza ampliamente para proyectos grandes o considerados “críticos”, como plantas nucleares, presas y hospitales, donde los márgenes de seguridad deben ser extremadamente altos. Sin embargo, su limitación principal es que no considera las probabilidades de ocurrencia ni la variabilidad inherente a los eventos sísmicos (incertidumbre).

#### Figura 6

*Esquema general del análisis determinista del peligro sísmico.*



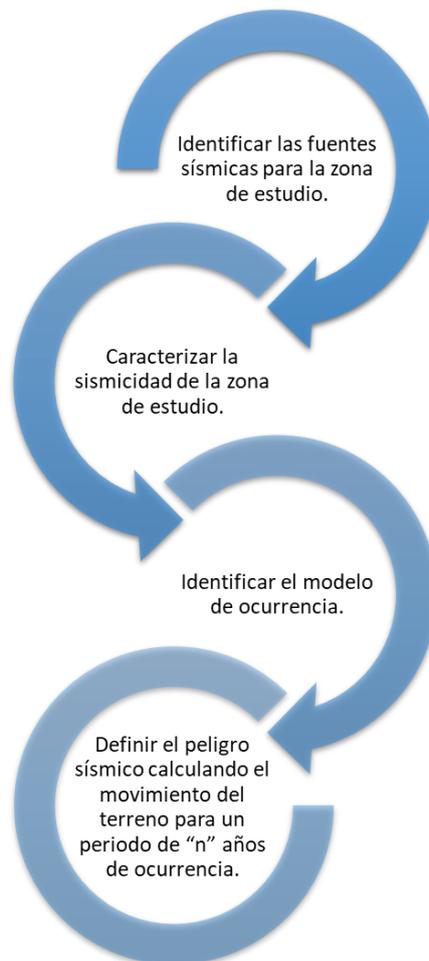
Fuente: (Kramer, 1996)

### 2.4.2. Análisis probabilístico (PSHA)

En el análisis probabilístico del peligro sísmico (PSHA), (Yepez, Barbat, & Canas, 1995), afirman que es un “enfoque metodológico desarrollado para cuantificar la amenaza sísmica en términos probabilísticos, incorporando la incertidumbre en la localización, frecuencia y magnitud de los terremotos”. Esta metodología toma en cuenta todas las fuentes sísmicas relevantes y modela la ocurrencia de sismos a través de una serie de parámetros (tasa de ocurrencia, magnitud máxima y distancia). Con esta información, se construye una curva de peligro sísmico, que describe la probabilidad de excedencia de un cierto nivel de aceleración del suelo en un período de tiempo específico.

**Figura 7**

*Esquema del análisis probabilista del peligro sísmico.*



Fuente: (Kramer, 1996)

La peligrosidad sísmica (H, del inglés Hazard) se entiende como la probabilidad (P) de que un determinado parámetro de movimiento del suelo ( $X_0$ ) alcance o supere un valor umbral en un tiempo específico o periodo de exposición (t), debido a los sismos que ocurren en un área de influencia. Este parámetro, representado como “ $x(s)$ ”, suele corresponder a la Máxima Aceleración del Suelo (PGA) o alguna Aceleración Espectral (SA(t)), según se detalla en la ecuación respectiva:

$$H = P[x(S) \geq x_0; t] \quad \text{Ecuación 5}$$

El movimiento sísmico se debe al conjunto de las fuentes sísmicas que afectan al emplazamiento, con sus diversas probabilidades de ocurrencia y distribuciones de magnitud; no se obtiene el movimiento producido para un evento concreto. Para obtener el resultado de la peligrosidad se debe resolver la triple integral de la amenaza según el planteamiento de Cornell (1968) y Esteva (1967, 1968), (Ecuación 5).

Este cálculo supone que la probabilidad de que un determinado movimiento del suelo sea excedido depende de tres variables consideradas independientes: la magnitud del sismo (m), la distancia al epicentro o fuente sísmica (r) y el término aleatorio  $\varepsilon$  (épsilon). Este último está relacionado con la variabilidad del modelo de predicción de movimiento fuerte y representa la cantidad de desviaciones estándar consideradas en la predicción sobre el valor medio que proporciona el modelo (Benito & Jiménez, 1999).

La estimación de la peligrosidad se obtiene multiplicando la probabilidad de excedencia del movimiento, condicionada a los valores asumidos por las variables r, m y  $\varepsilon$ , por las probabilidades individuales de cada una de estas variables (o sus funciones de densidad de probabilidad).

$$\begin{aligned} P_{\text{anual}}(y > Y) &= \lambda_{\text{anual}}(y > Y) \\ &= \tau \iiint P(y > Y|m, r, \varepsilon) * f_{M_i}(m) * f_{M_i}(r) * f_{M_i}(\varepsilon) dm dr d\varepsilon \quad (\text{Ecuación 6}) \end{aligned}$$

Donde:

“y” representa el parámetro de movimiento con el que se expresa la peligrosidad (PGA o SA(T)), e “Y” es el valor fijado de movimiento cuya excedencia se evalúa.

“ $f_M(m)$ ” se refiere a la función de densidad de probabilidad de la magnitud dentro de cada fuente. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una

determinada magnitud en la fuente sísmica y representa directamente el denominado “efecto de la fuente”.

“ $f_M(r)$ ” es la función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que, si se produce un terremoto una zona, su fuente se encuentre a una distancia “ $r$ ” del emplazamiento de cálculo. Esta función representa la posible localización de un sismo dentro de la zona sísmica y se relaciona con el “efecto de la atenuación del movimiento” a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento. Esta distribución no es uniforme para una misma zona y hay que calcularla para cada emplazamiento, no tiene una expresión analítica conocida.

“ $f_{Mi}(\varepsilon)$ ” es la función de densidad de probabilidad asociada a la incertidumbre del movimiento que puede registrarse en el emplazamiento debido a un sismo determinado. Así, dadas una magnitud “ $m$ ” y una distancia “ $r$ ”, cabe esperar distintos niveles de movimiento dada la aleatoriedad del mismo, considerando esa variabilidad mediante una distribución log-normal de “ $y$ ” en base a observaciones empíricas. El parámetro “ $\varepsilon$ ” indica el número de desviaciones estándar ( $\sigma$ ) que se consideran en la estimación o predicción de “ $y$ ”.

“ $P(y > Y|m, r, \varepsilon)$ ” es el término de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado al calcular el movimiento esperado para unas variables “ $m$ ”, “ $r$ ” y “ $\varepsilon$ ” determinadas. Es, por tanto, un término que toma dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario. (Rivas Medina, 2014)

### **2.4.3. Representación de resultados del peligro sísmico.**

Los resultados del cálculo de peligrosidad para un cierto emplazamiento pueden ser representados de dos formas, mediante curvas de peligrosidad y mediante Espectros de Peligrosidad Uniforme (UHS por sus siglas en inglés, “Uniform Hazard Spectrum”).

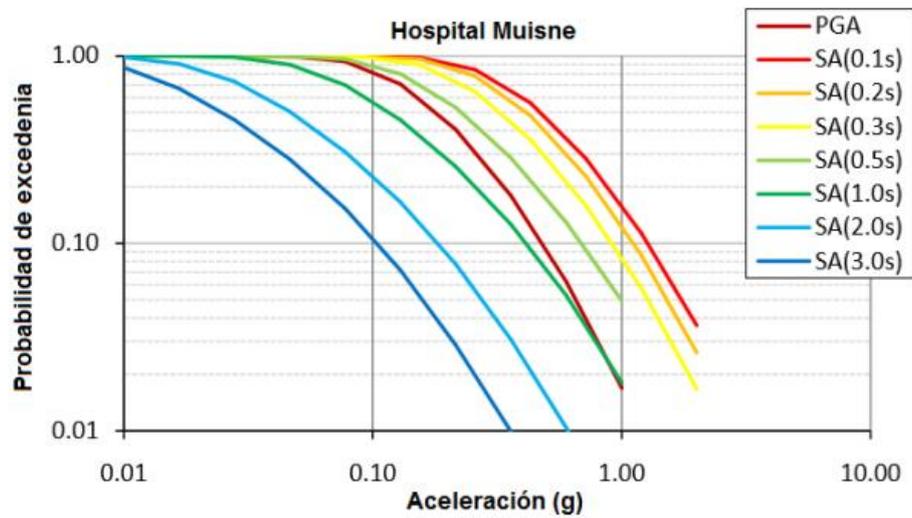
Las curvas de peligrosidad son representaciones gráficas derivadas del cálculo numérico de la triple integral de la peligrosidad, que ilustran la probabilidad de exceder distintos niveles del parámetro de movimiento seleccionado, ya sea la PGA o diferentes valores de SA(t) (Figura 7). Asimismo, estas curvas pueden expresarse en función del período de retorno, el cual es inversamente proporcional a la probabilidad anual de excedencia.

Los espectros UHS son utilizados para representar un cierto periodo de retorno escogido, el cual se construye a partir de las curvas de peligro sísmico de las distintas ordenadas espectrales para una misma probabilidad, deduciendo así los valores uno a uno en la intersección, como se

muestra en la figura 8. Este no corresponde a un espectro de un evento en particular, sino a todos los que puedan ocurrir dentro de un área de influencia.

**Figura 8**

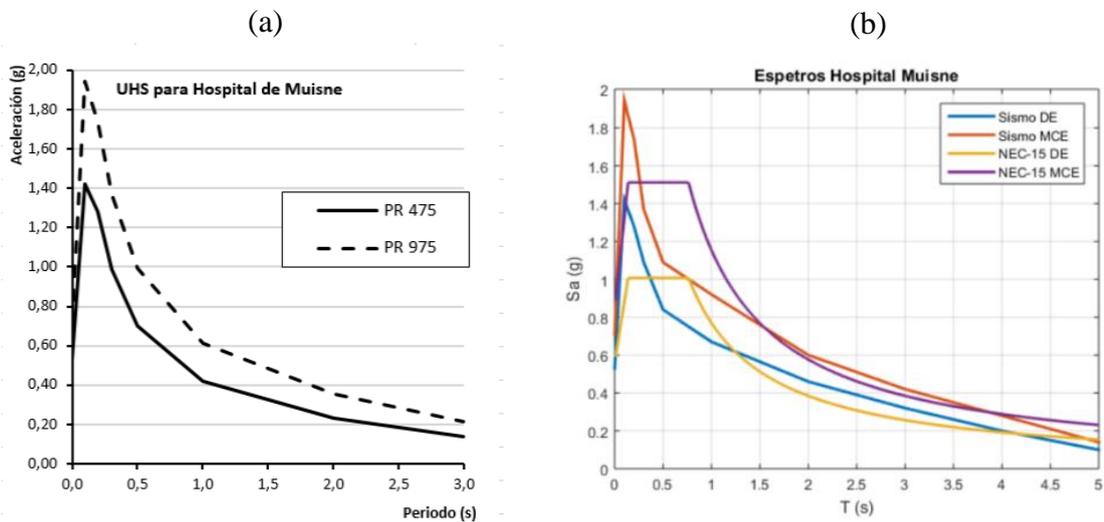
*Curvas de Peligrosidad Sísmica para el sitio del Hospital de Muisne.*



Fuente: (Aguiar, 2018)

**Figura 9**

*Representación de resultados del cálculo de la peligrosidad del Hospital de Muisne.*



Nota. a) Espectro de Peligrosidad Uniforme, (b) Comparación con la NEC.

Fuente: (Aguiar, 2018)

#### 2.4.4. Desagregación de la Peligrosidad

Este procedimiento consiste en el procesamiento de los resultados de la evaluación de la peligrosidad, mediante la recombinación de las contribuciones individuales a la misma, es decir, de las probabilidades anuales de excedencia asociadas a todas las combinaciones posibles de magnitud, distancia y épsilon.

La desagregación de la peligrosidad tiene como fin identificar el llamado “terremoto de control”, es decir, un evento sísmico que contribuye en mayor medida al nivel de peligrosidad asociado a un movimiento específico, definido para una probabilidad de excedencia determinada. Su proceso consiste en determinar la combinación de los parámetros de control: magnitud, distancia y épsilon ( $m, r, \epsilon$ ), que ejerce la mayor influencia sobre el movimiento de interés estimado en el análisis de peligrosidad.

#### 2.4.5. Ley de Gutenberg Richter

Uno de los parámetros fundamentales para realizar el análisis corresponde a los datos sismológicos, los cuales se derivan a partir de relaciones empíricas. Según (Gonzales Galindo, 2016), la ley de Gutenberg-Richter constituye una fórmula que describe la relación entre la frecuencia y la magnitud de los sismos en una zona determinada; en otras palabras, permite estimar cuántos eventos sísmicos ocurren en función de su magnitud. Esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\log N = a - b * M \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

- **M**: Magnitud
- **N**: Total de eventos sísmicos en un año con magnitud igual o superior a M.
- **a, b**: Constantes determinadas por la naturaleza propia de cada fuente.

Asimismo, la ecuación previamente mencionada puede formularse de dos formas alternativas:

$$\lambda(M) = 10^{a-b*m}$$

$$\lambda(M) = e^{\alpha-\beta*m}$$

La determinación de los parámetros sismológicos suele verse limitada por la escasez de información disponible, lo que hace necesario recurrir a métodos o procedimientos alternativos. En este sentido, (Gonzales Galindo, 2016) señala que:

Como consecuencia de esta dificultad y con el propósito de encontrar una solución, se recurre a una relación que, representada en una escala semilogarítmica, adopta la forma de una línea recta con una intersección en el eje  $a$  y una pendiente  $b$ . Dichas líneas se obtienen a partir de la combinación de datos sismológicos. La aplicación de la relación de Gutenberg-Richter supone que las magnitudes sísmicas siguen una distribución de tipo exponencial (p. 14).

La aplicación de este enfoque permite introducir nuevos términos que facilitan la determinación de las variables correspondientes a cada fuente sismogénica que se pretenda analizar.

$$N = \lambda(M) \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\alpha = \ln(10) * a \quad (\text{Ecuación 9})$$

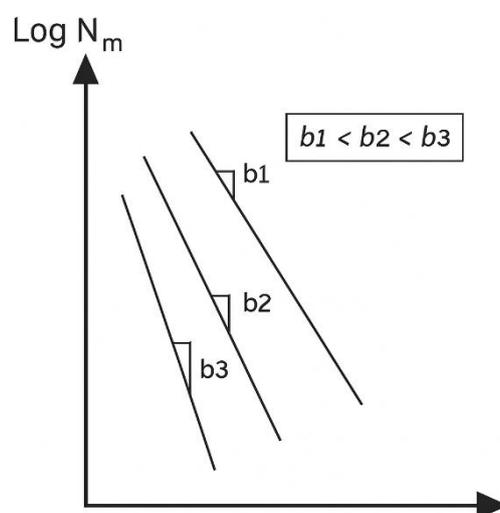
$$\beta = \ln(10) * b \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

- **N**: Numero de sismos  $\geq a$  M
- **$\alpha$** : Valor relacionado con el número total de eventos sísmicos ocurridos dentro de una zona específica.
- **$\beta$** : Refleja la relación entre la cantidad de sismos de gran magnitud y los de menor magnitud que ocurren en cada fuente.

## Figura 10

*Relación de Gutenberg Richter*



Nota. La figura representa, en una escala semilogarítmica, tres líneas con distintos valores del factor  $b$ , lo que indica que a medida que este coeficiente aumenta, disminuye la probabilidad de ocurrencia de sismos de gran magnitud.

Fuente: (Gonzales Galindo, 2016)

### 2.4.6. Microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Manta

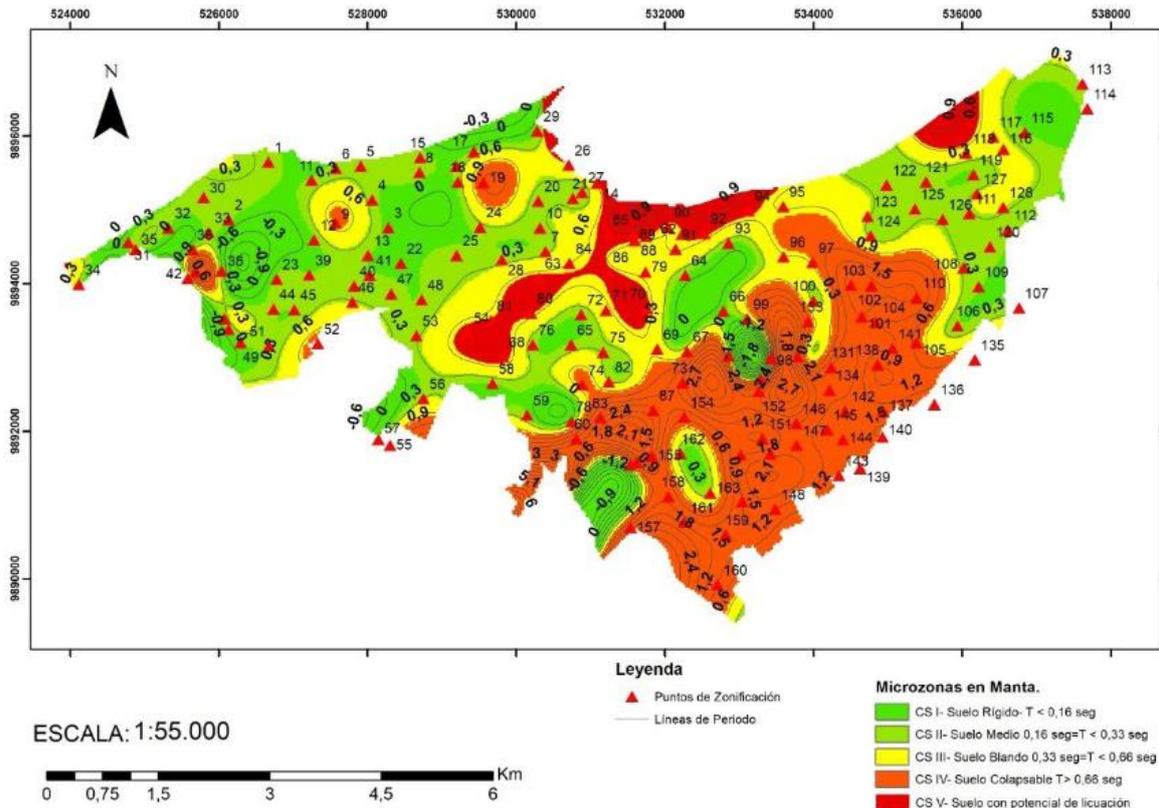
Un estudio realizado por la Dra. Dolly Delgado Toala, para el caso de Manta, Ecuador, donde se utilizó el método del cociente espectral H/V aplicado a registros de microtemores en 186 puntos de medición, de los cuales, 164 fueron útiles para calcular los periodos predominantes, lo que permitió elaborar el mapa de microzonificación sísmica.

En este estudio se definieron cinco microzonas que guardan relación con la geología local, además, se logró apreciar que en los sectores con afloramientos rocosos los periodos resultaron más cortos, mientras que en la parroquia Tarqui, donde predominan depósitos aluviales, los periodos fueron más largos. Esto coincide con los daños más severos que sufrió esa zona durante el terremoto de magnitud 7.8. Asimismo, se identificó que la variación de los periodos está asociada al espesor y la antigüedad de los sedimentos: los suelos aluviales más recientes tienden a presentar periodos mayores que los terrenos formados por rocas más antiguas. (Delgado Toala, 2024)

Este estudio resalta la importancia de contar con estimaciones confiables sobre el movimiento del suelo ante posibles sismos, ya que las condiciones locales del terreno influyen directamente en la forma en que se sienten los terremotos.

**Figura 11**

*Mapa de microzonas de Manta basado en la propuesta de la Dra. Dolly Delgado.*



Fuente: (Delgado Toala, 2024)

Las microzonas en Manta propuestas por (Delgado Toala, 2024), son las siguientes:

**Microzona I:** Se caracteriza por perfiles de sitio Tipo A y B, sin amplificación sísmica, compuesta por rocas competentes, rígidas y consolidadas. Las velocidades de onda de corte ( $V_{s30}$ ) superan los 760 m/s, y el período predominante del suelo es menor a 0,16 s. En el mapa de microzonificación se identifica con color verde intenso. Este tipo de material puede estar relacionado con las rocas calcáreas de la Formación Tablazo, visibles en las cercanías de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y los tanques de Petroecuador en Barbasquillo.

**Microzona II:** Posee un perfil de sitio Tipo C, con sedimentos detríticos de grano grueso compactados y rocas débilmente cementadas. La  $V_{s30}$  oscila entre 360 m/s y 760 m/s, con periodos predominantes entre 0,16 s y 0,33 s, representados en el mapa con color verde claro. La microzona está formada por lutitas bien consolidadas y suelos residuales, derivados de procesos erosivos prolongados en las Formaciones Tablazo y Tosagua. La profundidad del basamento varía entre 17 m y 25 m.

**Microzona III:** Caracterizada por un perfil de sitio Tipo D, presenta sedimentos detríticos finos a medios, como arenas, limos y arcillas, poco compactados. La  $V_{s30}$  varía entre 180 m/s y 360 m/s, con periodos predominantes de 0,33 s a 0,66 s, representados en el mapa con color amarillo. La geología de la zona incluye areniscas erosionadas de la Formación Tablazo y suelos similares en las planicies altas y bajas de Manta, con una profundidad del basamento entre 20 m y 50 m.

**Microzona IV:** Corresponde a un perfil de sitio Tipo E, con suelos muy blandos y no consolidados, susceptibles a falla durante sismos. La  $V_{s30}$  es menor a 180 m/s, con periodos predominantes superiores a 0,66 s, representados en el mapa con color naranja. Estos suelos aluviales o coluviales, relacionados con depósitos de más de 3 m de espesor, cubren lutitas rígidas de las Formaciones Tablazo y Tosagua, con espesores de sedimentos entre 40 m y 60 m.

**Microzona V:** Incluye suelos inestables durante sismos, como suelos licuables, arcillas sensitivas y suelos orgánicos, con un perfil de sitio Tipo F. Representada en el mapa con color rojo, esta microzona está relacionada con depósitos aluviales en las planicies de inundación de los ríos Manta y Burro. Estos suelos, de baja compacidad y capacidad portante, presentan un alto riesgo de licuefacción, como lo evidenció el estudio de la Zona Cero Tarqui tras el sismo, debido al predominio de arenas sueltas y saturadas.

## **CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1. Método de análisis probabilístico del peligro sísmico**

#### **3.1.1. Fundamentos del análisis probabilístico**

Se optó por la aplicación de un enfoque probabilístico para la evaluación del peligro sísmico, en razón de su capacidad para incorporar la variabilidad e incertidumbre propias de los procesos geodinámicos y del movimiento del suelo, puesto que, la metodología se ha consolidado como el estándar internacional para la caracterización del peligro sísmico en zonas urbanas, especialmente en contextos donde coexisten múltiples fuentes sísmicas activas, como es el caso de la región costera del Ecuador.

El objetivo es estimar de manera precisa los niveles de aceleración del terreno para probabilidades de excedencia específicas, teniendo considerando las condiciones tectónicas locales y regionales. Con este fin, se ha desarrollado un modelo probabilístico multifuente que incorpora eventos de subducción, sismos interfase e intraplaca y fallas corticales, lo que permite generar espectros de diseño adecuados a los niveles de riesgo aceptables según la normativa nacional.

Como parte complementaria del análisis, se elaboró un modelo regional de fuentes sísmicas, usando información recopilada por el Instituto Geofísico (IGEPN).

#### **3.1.2. Comparación de enfoques probabilísticos con métodos deterministas.**

Si bien el análisis determinista del peligro sísmico (DSHA) se ha utilizado tradicionalmente en proyectos de infraestructura, en este estudio se optó por un enfoque probabilístico (PSHA) por razones técnicas y metodológicas directamente vinculadas con los objetivos del proyecto. En particular, el diseño de una infraestructura crítica como una estación de bomberos requiere una caracterización integral del peligro, que no solo considere el evento más severo, sino también la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de movimiento sísmico a lo largo del tiempo.

El enfoque determinista, basado en un único escenario sísmico máximo (Magnitud Máxima Creíble), ofrece una estimación puntual del movimiento del suelo, pero no representa el nivel real de amenaza al que está expuesta una estructura a lo largo de su vida útil. Por otro lado, el enfoque probabilístico permite calcular espectros sísmicos para diferentes periodos de retorno (por ejemplo, 475 años para uso normal y 2475 años para infraestructura esencial), en

concordancia con los requerimientos de diseño establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15).

Por estas razones, la metodología adoptada en este estudio se basó exclusivamente en el análisis probabilístico, ya que permite:

- ✓ Incorporar múltiples fuentes sísmicas y escenarios posibles.
- ✓ Considerar la variabilidad de la magnitud, profundidad y distancia de los sismos.
- ✓ Integrar incertidumbre asociada a la recurrencia sísmica y a las ecuaciones de atenuación.
- ✓ Obtener resultados directamente comparables con los espectros definidos en la normativa vigente.

Esta decisión metodológica está alineada con las prácticas internacionales en la evaluación del peligro sísmico para edificaciones críticas, y con los estándares establecidos por organismos como la USGS, GEM (Global Earthquake Model) y el IGEPN.

**Tabla 6**

*Comparación de los métodos de análisis del peligro sísmico.*

<b>Comparación entre DSHA y PSHA</b>		
<b>Aspecto</b>	<b>DSHA</b>	<b>PSHA</b>
<b>Filosofía</b>	Escenario único y conservador	Probabilidad de excedencia
<b>Resultados</b>	Parámetros máximos	Parámetros esperados con cierto nivel de confianza
<b>Consideración de incertidumbre</b>	No considera	Considera
<b>Complejidad</b>	Baja	Alta
<b>Aplicaciones</b>	Infraestructuras críticas	Mapas de zonificación sísmica y espectros de diseño

Elaboración propia

### **3.1.3. Aplicación del software R-CRISIS en el cálculo de PSHA**

El análisis probabilístico del peligro sísmico fue implementado utilizando el software R-CRISIS (v20.3.0), una herramienta de código abierto ampliamente validada a nivel regional, desarrollada por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el grupo ERN. Este

software permite el modelado detallado de fuentes sísmicas, funciones de recurrencia, relaciones de atenuación y condiciones del sitio, y genera resultados en términos de curvas de peligro, espectros de respuesta y mapas de zonificación sísmica.

Las principales motivaciones para optar por R-CRISIS en este trabajo son:

- Capacidad de integrar modelos de diversas fuentes sísmicas (zonales, lineales o puntuales).
- Aplicación de relaciones de atenuación personalizadas para las condiciones sísmicas de la región costa del Ecuador.
- Generación de curvas de amenaza sísmica, que permiten identificar el valor de aceleración pico (PGA) y espectros de aceleración con probabilidades de excedencia definidas.

### **3.2. Clasificación del suelo en la ubicación del proyecto del Cuerpo de Bomberos**

En el lugar propuesto para la construcción de la nueva estación del Cuerpo de Bomberos de Manta aún permanecen en pie las instalaciones antiguas, motivo por el cual no se dispone de estudios directos sobre las características del suelo en el emplazamiento. Ante esta limitación, se recurrió a la información proveniente de los estudios de microzonificación sísmica realizados para la ciudad de Manta, cuyos resultados fueron facilitados por la Dra. Dolly Delgado. Dichos estudios permiten obtener una estimación más confiable del tipo de suelo presente en la zona, incorporando el efecto de sitio en el análisis y, en consecuencia, mejorando la precisión en la evaluación del peligro sísmico.

Al superponer la ubicación del proyecto con el mapa de microzonificación (Figura 10), se determinó que el emplazamiento corresponde a la microzona III, caracterizada por una velocidad de onda de corte  $V_{s30}$  entre 180 m/s y 360 m/s, y periodos de vibración comprendidos entre 0,33 s y 0,66 s. Según la clasificación de la NEC-SE-DS 2015, estas condiciones corresponden a un perfil de suelo tipo D.

En función de lo anterior, el modelo fue configurado considerando un suelo tipo D, tanto para el análisis probabilístico del peligro sísmico como para la comparación con el espectro de diseño establecido en la normativa ecuatoriana.

### **3.3. Parámetros de importancia para la implementación del programa “R-CRISIS”**

#### **3.3.1. Fuentes sismogénicas**

Uno de los aspectos más críticos del PSHA es la correcta identificación y modelado de las fuentes sísmicas relevantes para el sitio de estudio. Para este análisis, se definió un modelo regional basado en las características geotectónicas de la costa ecuatoriana, incorporando tres tipos de fuentes principales (IGEPN, 2023).

Subducción interfase: asociada al contacto entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Esta fuente es la principal generadora de terremotos de gran magnitud en la región costera (por ejemplo, el evento de Pedernales de 2016, Mw 7.8), y se caracteriza por una geometría de plano inclinado con sismos superficiales a moderados (10–70 km).

Fallas corticales locales: estructuras activas ubicadas en la corteza continental, capaces de generar eventos de magnitudes intermedias (Mw 5.5–7.0) pero con alto impacto debido a su cercanía.

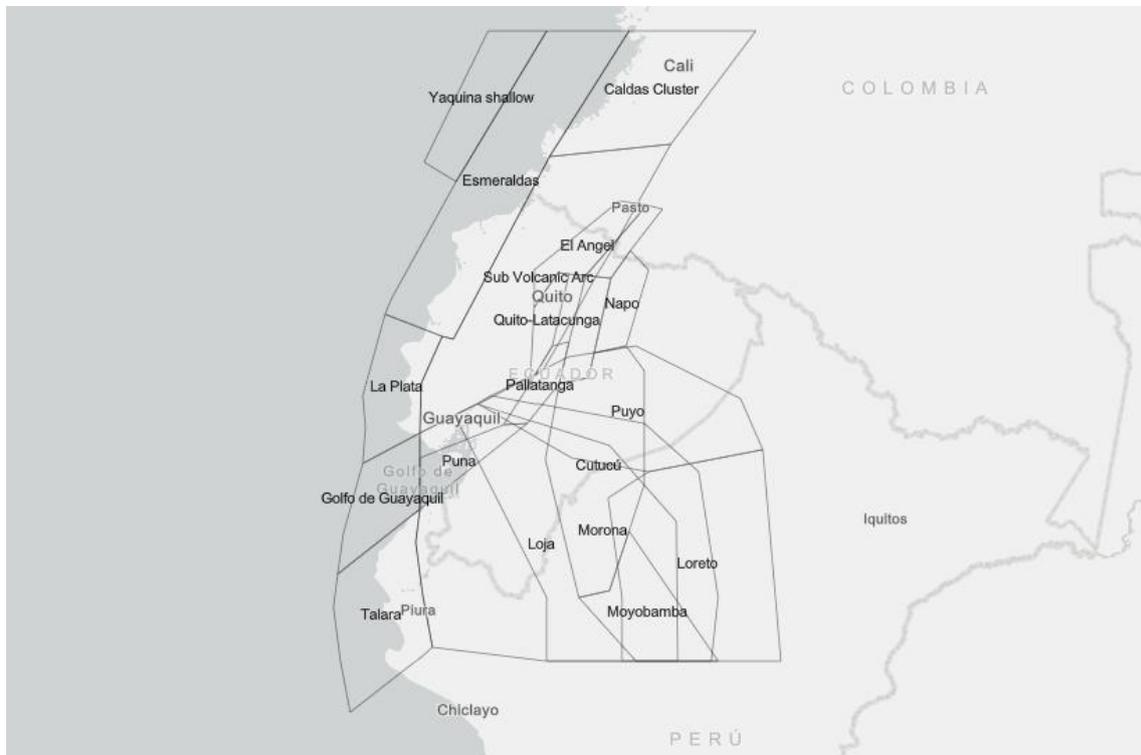
Zona intraplaca (intermedia): eventos que ocurren dentro de la Placa de Nazca a profundidades intermedias (70–150 km), cuya ocurrencia es menos frecuente, pero puede afectar amplias zonas del país.

Cada fuente fue representada en R-CRISIS como una zona sísmica con parámetros definidos, entre los cuales se incluye:

- La magnitud máxima (Mmax), determinada a partir del análisis del catálogo histórico e instrumental.
- Parámetros de recurrencia (a, b) calculados mediante ajuste a la ley de Gutenberg-Richter, con truncamiento superior.
- Mecanismo de ruptura y tipo de fuente, lo que permite la asignación diferenciada de relaciones de atenuación.
- Geometría espacial, definida con coordenadas, profundidad y orientación según datos geofísicos y tectónicos.

## Figura 12

*Mapa de fuentes sismogénicas y sismicidad.*



Fuente: (IGEPN, 2023)

La correcta caracterización de estas fuentes permitió desarrollar un modelo de amenaza sísmica robusto y representativo del entorno geodinámico de Manta, asegurando que los resultados obtenidos sean confiables y útiles para el diseño sismorresistente del proyecto.

**Tabla 7**

*Fuentes sísmicas relevantes para el sitio de estudio.*

<b>Fuente sismogénicas del Ecuador</b>	
Yaquina Shallow	Cosanga
Esmeraldas	Quito-Latacunga
La Plata	Pallatanga
Golfo de Guayaquil	Cutucú
Talara	Moyobamba
BGN	Caldas Cluster
Puna	Sub Volcanic Arc
BGS	Loja
El Ángel	Loreto
Chingual	Puyo
Napo	Morona Santiago

Nota. Fuentes sísmicas identificadas en el territorio ecuatoriano, se han caracterizado 22 fuentes sismogénicas que serán modeladas en R-C. Geometría espacial de las fuentes adjuntada en los anexos.

Elaboración propia. Datos obtenidos del (IGEPN, 2023)

### 3.3.2. Magnitud sísmica y zona de ruptura (variables K1 y K2)

Los términos K1 y K2 son constantes que varían en función del tipo de falla presente. Resulta fundamental comprender los términos que describen la orientación de las fallas, ya que a partir de ellos es posible clasificar su tipo o modelo de falla y, en consecuencia, asignar los coeficientes K1 y K2 correspondientes (Cronin, 2010). Los parámetros que definen la geometría y el movimiento de una falla son:

**Strike (Rumbo):** Corresponde a la orientación o dirección de la traza de la falla con respecto al norte geográfico, medida en el sentido de las manecillas del reloj dentro de un rango de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

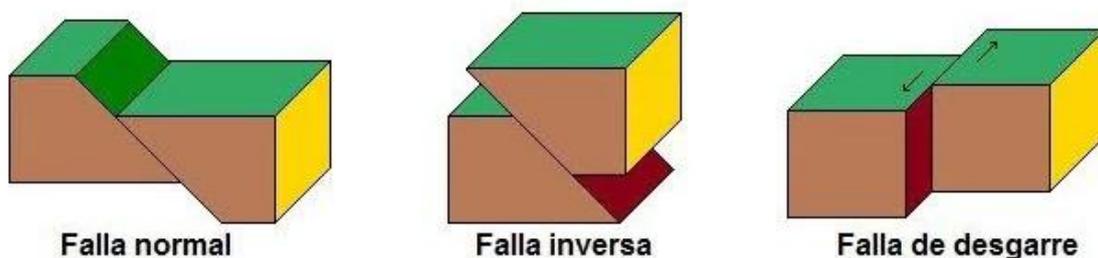
**Dip (Buzamiento):** Viene a ser el ángulo que se forma en el plano de falla con la horizontal, se expresa en grados decimales y tiene valores entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

**Rake (Deslizamiento):** Es la dirección del movimiento del bloque de roca durante la ruptura sísmica, se mide en grados decimales con valores desde  $180^\circ$  hasta  $180^\circ$ , en relación con el rumbo (strike) de la falla. El tipo de falla se clasifica de la siguiente manera, según su valor:

- Rake menor a  $0^\circ$ : Son fallas normales (el bloque superior se desplaza hacia abajo).
- Rake mayor a  $0^\circ$ : Consideradas fallas inversas (el bloque superior se mueve hacia arriba).
- Rake igual a  $0^\circ$  o  $180^\circ$ : Catalogadas fallas de tipo lateral, (movimiento horizontal izquierdo  $0^\circ$  o derecho  $180^\circ$ ).

**Figura 13**

*Tipos de fallas.*



Fuente: (Madrid, 2024)

Conocidos los parámetros K1 y K2, el software R-CRISIS proporciona valores de referencia para estos parámetros, basados en distintos autores y criterios, tal como se detalla a continuación:

**Tabla 8**

*Valores de K1 Y K2 de acuerdo a los autores.*

<b>Model</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>
Brune (1970)	0,00381	1,15130
Singh et al. (1980)	0,00564	1,15300
Wells and Coppersmith (1994) - Strike - slip	0,01100	1,03616
Wells and Coppersmith (1994) – Reverse	0,00571	1,12827
Wells and Coppersmith (1994) – Normal	0,02072	0,94406
Wells and Coppersmith (1994) – All	0,01015	1,04768

Nota. La tabla muestra los diferentes valores de K1 y K2 proporcionados para las fuentes insertadas según el tipo de falla.

Elaboración propia con datos obtenidos de (Aguilar, 2017).

**Tabla 9**

*Modelos de fuentes sismogénicas*

<b>Fuente</b>	<b>Dip</b>	<b>Rake</b>	<b>Strike</b>	<b>K1, K2</b>	<b>Tipo de Fuente</b>
Yaquina Shallow	20	180	90	Strike-Slip	Interfase
Esmeraldas	20	90	30	Reverse	Interfase
La Plata	20	90	30	Reverse	Interfase
Golfo de Guayaquil	12	90	0	Reverse	Interfase
Talara	15	90	0	Reverse	Interfase
BGN	12	180	90	Strike-Slip	Interfase
Puna	90	180	0	Strike-Slip	Cortical
BGS	15	180	90	Strike-Slip	Interfase
El Ángel	90	180	0	Strike-Slip	Cortical
Chingual	20	90	35	Reverse	Cortical
Napo	25	90	195	Reverse	Cortical Reverse

<b>Fuente</b>	<b>Dip</b>	<b>Rake</b>	<b>Strike</b>	<b>K1, K2</b>	<b>Tipo de Fuente</b>
Cosanga	25	90	195	Reverse	Cortical Reverse
Quito-Latacunga	30	90	180	Reverse	Cortical Reverse
Pallatanga	20	180	10	Strike-Slip	Cortical
Cutucú	25	90	80	Reverse	Cortical Reverse
Moyobamba	25	90	160	Reverse	Cortical Reverse
Caldas Cluster	50	-90	0	Normal	Intraplaca
Sub Volcanic Arc	40	-90	0	Normal	Intraplaca
Loja	50	-90	0	Normal	Intraplaca
Loreto	40	-90	0	Normal	Intraplaca
Puyo	40	-90	315	Normal	Intraplaca
Morona Santiago	40	-90	335	Normal	Intraplaca

Nota. Incluye los parámetros de ruptura asociados a las fuentes sismogénicas del Ecuador.

Fuente: (Ordoñez, Salazar, & Alviar, 2023). Datos obtenidos de “Improving earthquake forecast models for PSHA with geodetic data, applied on Ecuador”.

### **3.3.3. Parámetros sismológicos**

En el territorio ecuatoriano se han identificado 22 fuentes sismogénicas, para las cuales existe información registrada de algunos parámetros sismológicos. Según (Mariniere, 2020) (2020), a partir del análisis de diversos catálogos sísmicos se determinaron los parámetros de recurrencia (valores a y b) correspondientes, obteniendo tres alternativas para cada fuente. De estas opciones se seleccionaron aquellas que presentan una contribución significativa al nivel de peligro sísmico en el país.

A continuación, se muestran los valores resultantes obtenidos del catálogo BSSA2013:

**Tabla 10**

Valores del modelo de recurrencia GR y datos adicionales a cada zona fuente (según el catálogo BSSA2013).

Zona	A	B	$\lambda_{Mw \geq 4.5}$	Mo GR	No of Events $\geq Mo$	Mmaxobs	Mmax	Depth Range
Cosanga	2.7701	0.71	0.3866	4.8	13	7.1	7.8	0-35*
Moyobamba	4.4484	0.98	1.082	4.8	28	6.9	7.7	0-35*
Cutucu	5.4443	1.17	1.436	4.5	69	7.0	7.8	0-35*
Chingual	3.0831	0.98	0.386	4.5	3	7.4	7.6	0-35*
Napo	3.4369	0.98	0.406	4.5	5	5.6	7.8	0-35*
Pallatanga	2.8012	0.73	0.341	4.5	18	7.6	7.9	0-35*
Quito-Latacunga	2.6797	0.73	0.336	4.5	17	6.4	7.3	0-35*
Puna	3.5830	0.98	0.149	4.5	7	5.2	7.5	0-35*
El Angel	3.4503	0.98	0.127	4.5	9	7.2	7.7	0-35*
Yaquina Shallow	6.7516	1.39	3.012	4.8	55	6.1	6.8	0-50*
Esmeraldas	4.0002	0.81	2.341	4.5	85	8.8 (8.4)	8.8	3-40*
La Plata	3.5598	0.80	0.915	4.5	46	6.7	8.0	3-40*
Golfo de Guayaquil	3.4765	0.84	0.492	4.5	25	7.5	7.8	3-40*
Talara	4.3639	0.91	1.916	4.8	53	7.1	8.2	3-40*
Loja	6.8273	1.33	6.718	4.8	130	7.2	7.7	35-100*
Morona Santiago	4.4742	0.89	2.958	4.8	84	7.3	7.8	100-130*
Puyo	5.3015	1.05	3.6	4.8	88	7.5	8.0	130-300*
Sub Volcanic Arc	3.6012	1.01	1.141	4.5	35	6.7	7.2	35-180*
Caldas Cluster	4.7058	1.05	0.987	4.5	24	6.7	7.2	35-250*
Loreto	7.3727	1.62	1.279	4.8	20	7.5	8.0	130-180*
BGN	4.5245	1.09	0.428	4.8	10	6.4	7.0	0-35*
BGS	4.5428	1.04	0.697	4.5	36	7.2	7.5	0-35*

Nota. En esta tabla se detallan las fuentes sismogénicas del Ecuador junto con sus parámetros sismológicos. Los valores de a y b se obtuvieron a partir del modelo de Gutenberg–Richter (GR) utilizando el catálogo BSSA2013. Se incluye además  $\lambda_{Mw}$ , que representa la tasa de ocurrencia de sismos con magnitud superior a 4.5; Mo, correspondiente a la magnitud mínima considerada en la distribución Magnitud–Frecuencia; el número total de eventos registrados en el período analizado; la magnitud máxima observada; y la magnitud máxima adoptada como límite en el modelo de recurrencia.

Fuente: (Ordoñez, Salazar, & Alviar, 2023)

Además, a partir de la información previamente descrita y utilizando como base los datos empíricos disponibles, se determina el parámetro  $\beta$ , requerido por el programa junto con los demás datos indicados a continuación. Para calcular este valor se aplica la expresión  $\beta = \ln(10) \times b$ , la cual corresponde al desarrollo teórico de la ley de Gutenberg–Richter.

**Tabla 11**

*Parámetros sismológicos de las fuentes necesarios para el uso del software R CRISIS (con base en el catálogo BSSA2013)*

<b>Fuente</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>Mmin</b>	<b>Mmax</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
Yaquina Shallow	6.7516	1.39	4.8	6.6	3.012	3.2006
Esmeraldas	4.0002	0.81	4.8	8.8	2.341	1.8651
La Plata	3.5598	0.8	4.5	8	0.915	1.8421
Golfo de Guayaquil	3.4765	0.84	4.5	7.8	0.492	1.9342
Talara	4.3639	0.91	4.8	8.2	1.916	2.0954
BGN	4.5245	1.09	4.8	7	0.428	2.5098
Puná	3.583	0.98	4.5	7.5	0.149	2.2565
BGS	4.5428	1.04	4.5	7.5	0.697	2.3947
El Angel	3.4503	0.98	4.5	7.7	0.127	2.2565
Chingual	3.0831	0.98	4.2	7.6	0.046	2.2565
Napo	3.4369	0.98	4.5	7.8	0.106	2.2565
Cosanga	2.7701	0.71	4.8	7.8	0.3866	1.6348
Quito-Latacunga	2.6797	0.7	4.5	7.3	0.336	1.6118
Pallatanga	2.8012	0.73	4.5	7.9	0.341	1.6809
Cutucú	5.4443	1.17	4.5	7.8	1.436	2.6940
Moyobamba	4.4484	0.98	4.8	7.7	1.082	2.2565
Caldas Cluster	4.7058	1.05	4.8	7.2	0.987	2.4177
Sub Volcanic Arc	5.071	1.11	4.5	7.2	1.141	2.5559
Loja	6.8273	1.33	4.8	7.7	6.718	3.0624
Loreto	7.3757	1.62	4.8	8	1.279	3.7302
Puyo	5.3015	1.05	4.8	8	3.6	2.4177
Morona Santiago	4.4742	0.89	4.8	7.8	2.958	2.0493

Nota. Se presentan los valores obtenidos a partir de la Tabla 3, incluyendo el coeficiente  $\beta$  correspondiente a cada fuente.

Fuente: (Ordoñez, Salazar, & Alviar, 2023)

### **3.3.4. Ley de Atenuación**

Se presentan en función de las aceleraciones que puede experimentar el suelo y son fundamentales para su uso en estudios de peligrosidad sísmica. Una ley de atenuación describe la capacidad del terreno para reducir o amortiguar el movimiento producido por las ondas sísmicas a medida que estas se alejan del foco del evento. En consecuencia, es comprensible que la intensidad del movimiento disminuya con la distancia al epicentro, fenómeno conocido como atenuación del movimiento del suelo. Estas leyes se obtienen a partir de análisis estadísticos de registros de movimientos del suelo producidos por diferentes terremotos y se formulan de manera específica para cada región.

Para el desarrollo del presente análisis se emplea la ley de atenuación propuesta por Zhao (2006), aplicable tanto a sismos generados en zonas de subducción como a aquellos originados en la corteza superficial. Si bien existen múltiples modelos desarrollados por diversos autores, en este estudio se adopta este único criterio para el ejercicio aplicado.

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (2011) señala que, para representar la incertidumbre asociada a la predicción del movimiento del suelo, se emplean tres conjuntos de modelos de atenuación reconocidos y validados, seleccionados en función del ambiente geodinámico de las fuentes sísmicas.

#### **3.3.4.1. Fuentes intraplaca e interfase**

Para este tipo de fuentes sísmicas se cuenta con varias leyes de atenuación, entre las que se pueden mencionar:

- Abrahamson et al. (2016): considerado un referente en la industria, ya que actualiza y mejora muchas de las ecuaciones de atenuación anteriores.
- Montalva et al. (2017): basada en registros obtenidos principalmente en Chile y en menor medida en Perú, representando el contexto interplaca entre las placas de Nazca y Sudamérica, empleando la misma formulación funcional propuesta por Abrahamson.
- Zhao et al. (2006): cuyas predicciones han demostrado buena concordancia al ser contrastadas con registros reales de terremotos.

### **3.3.4.2. Fuentes corticales**

De igual manera, para los sismos que tienen su origen en la corteza superficial se han desarrollado distintas relaciones de atenuación propuestas por autores como Akkar, Zhao, Chiou y Youngs. Entre ellas se destacan:

- Akkar et al. (2014): elaborada a partir de registros sísmicos corticales obtenidos en la región del Mediterráneo y Oriente Medio, principalmente asociados a fallas transcurrentes y transgresivas.
- Chiou y Youngs (2014): basada en información proveniente del oeste de Estados Unidos y de otras zonas del mundo, incorporando la posibilidad de utilizar factores de bloque levantado, lo que permite su aplicación en las fallas inversas características del Callejón Interandino.
- Asimismo, se considera la relación de Zhao et al. (2006), desarrollada a partir de registros obtenidos en un entorno volcánico como el japonés, caracterizado por una tectónica compresiva, lo cual resulta análogo a las condiciones presentes en la Cordillera de los Andes.

### **3.3.5. Ley de atenuación de Zhao (2006)**

La ley de atenuación propuesta por Zhao (2006) fue desarrollada para zonas de subducción, considerando tanto sismos de interfase como intraplaca, así como para regiones de corteza somera en el caso de terremotos corticales e inversos, a partir de datos sísmicos obtenidos en Ecuador.

Esta ley contempla diferentes clasificaciones de sitio (roca dura, roca, suelo duro, suelo medio y suelo blando) y constituye un modelo para predecir el movimiento sísmico. Incorpora los efectos del sitio, el tipo de mecanismo de falla, principalmente por subducción (interfase e intraplaca), y también los registros de origen cortical. Para los eventos intraplaca de subducción, se añade un factor de corrección simple de la distancia con el fin de obtener predicciones coherentes y no sesgadas. Además, el modelo considera variables como la profundidad, el tipo de fuente tectónica y el mecanismo de ruptura (Cañizares Ortega, 2017, p. 95).

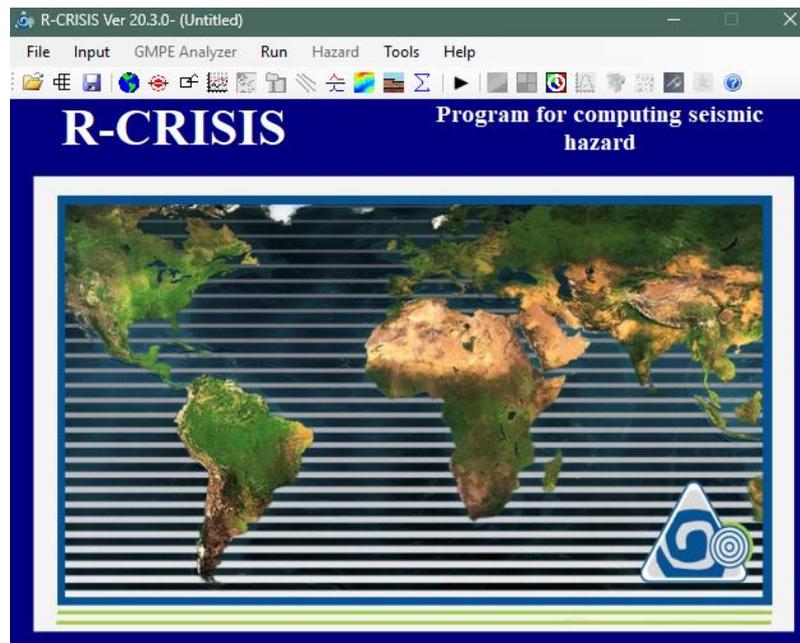
Por estas razones, esta misma ley de atenuación se aplicó para las tres fuentes sísmicas presentes en Ecuador.

### 3.4. Configuración del modelo en R-CRISIS.

El procedimiento que se detalla a continuación fue aplicado para el cálculo del peligro sísmico en la ciudad de Manta, utilizando el software R-CRISIS versión 20.3.0.

**Figura 14**

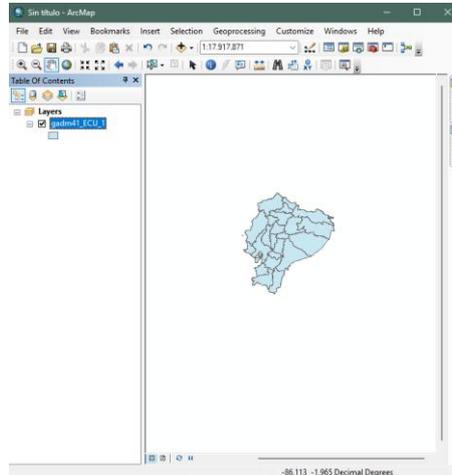
*Ventana Inicial del software R-CRISIS.*



**Paso 1.** Obtención del mapa en formato .shp y coordenadas del sitio de análisis (Manta) en formato \*.asc.

**Figura 15**

*Archivo del mapa shapefile de Ecuador.*



Nota. Junto con el uso del programa R-CRISIS, se empleó el software ArcGIS para obtener el mapa del área de estudio (Ecuador) en formato .shp, insumo esencial para la correcta ejecución del programa mencionado.

**Figura 16**

*Bloc de notas de las coordenadas de la ciudad de Manta.*

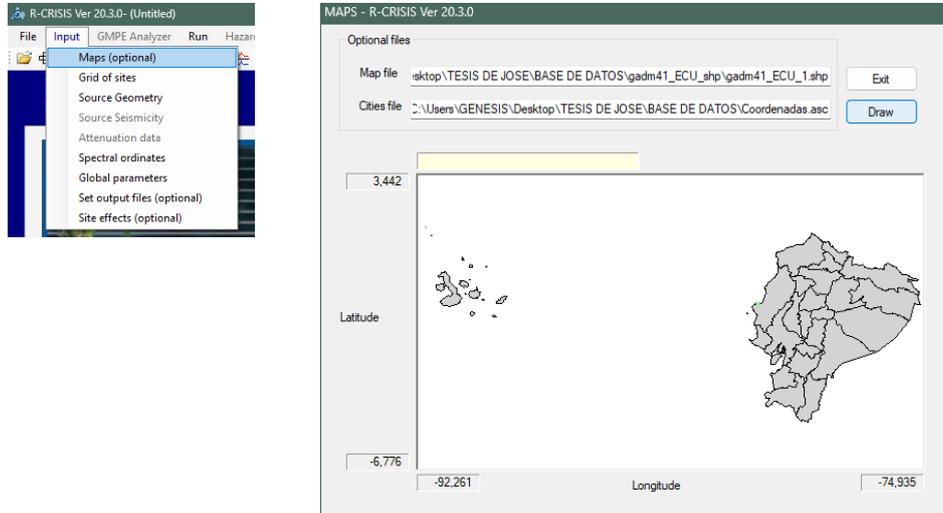


Nota. Archivo de texto creado de las coordenadas del sitio de estudio, en la primera fila se indica la cantidad de puntos que serán analizados, y en la segunda fila el nombre de la provincia, la ciudad y las coordenadas de longitud y latitud, separadas por comas.

**Paso 2.** Incorporar el mapa (polígono) y el sitio de análisis al programa R-Crisis.

**Figura 17**

*Ingreso de la data del mapa y coordenadas del sitio de análisis.*

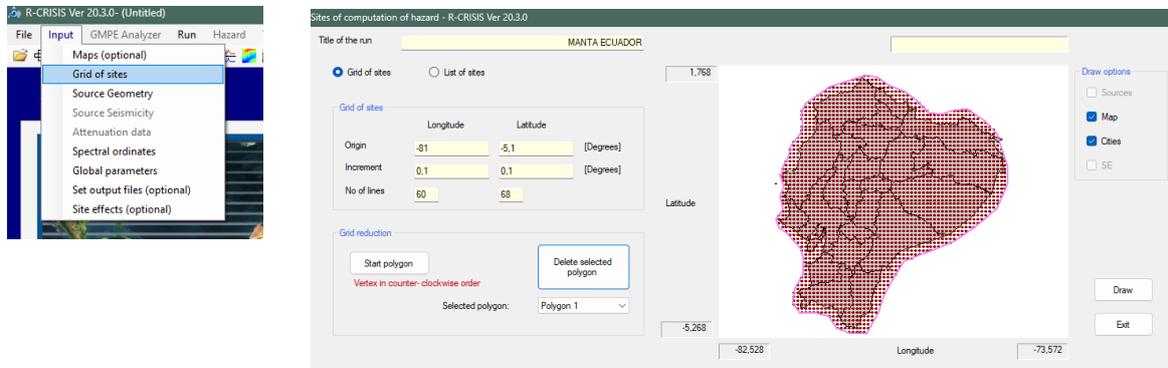


Nota. Se muestra el proceso para cargar la información requerida al modelo generado, tanto el mapa extraído del programa ArcGIS como las coordenadas del sitio de análisis se introdujeron correctamente.

### Paso 3. Delimitación de la zona de estudio.

**Figura 18**

*Delimitación de la grilla y polígono la zona de estudio.*

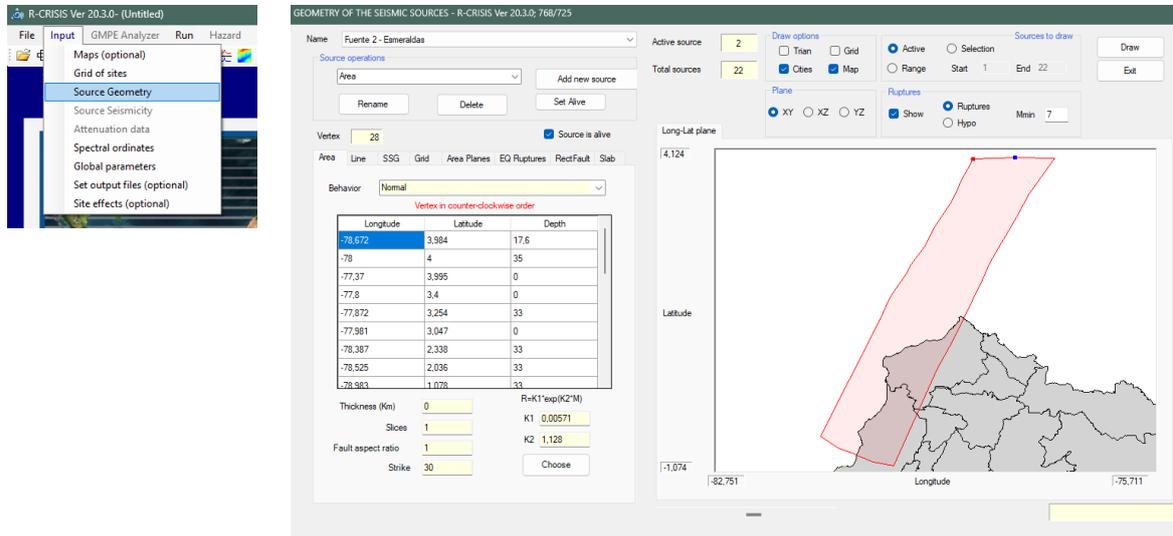


Nota. Este paso consiste en generar una grilla y trazar un polígono que abarque el mapa previamente generado. Los valores negativos en el campo “origen” corresponden al hemisferio occidental. El parámetro “incremento” debe definirse considerando ambas direcciones ortogonales, y finalmente, el valor asignado al “N.º de líneas” debe seleccionarse de manera que permita una distribución adecuada entre la longitud y la latitud.

**Paso 4.** Ingresar la geometría de cada fuente considerada en el modelo en cuestión.

**Figura 19**

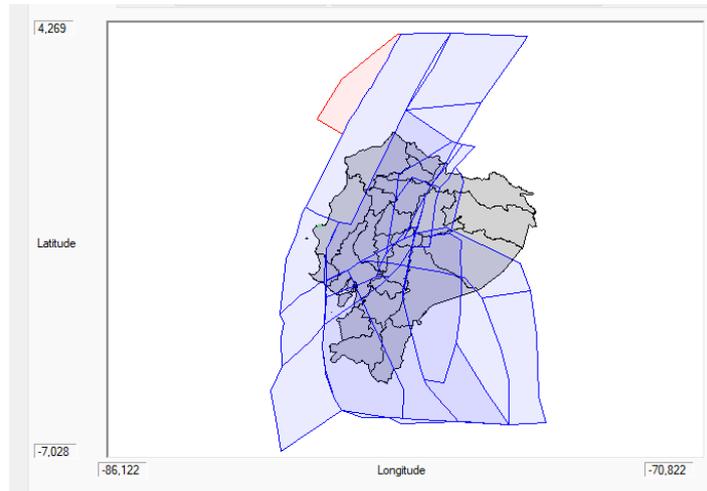
*Modelado de la geometría espacial de la fuente Esmeraldas.*



Nota. En esta etapa se incluye el nombre de la fuente, el tipo de fuente considerado (área), las coordenadas geográficas de cada vértice expresadas en grados de longitud y latitud, la profundidad en kilómetros y la selección de los parámetros  $k_1$  y  $k_2$  en función del tipo de falla al que pertenecen.

**Figura 20**

*Modelado de todas las fuentes sismogénicas consideradas*

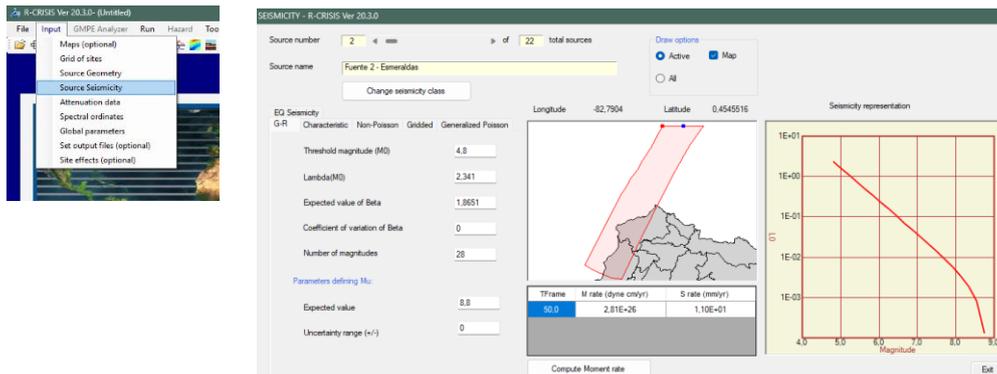


Nota. La figura muestra el resultado final de ingreso de la geometría de las 22 fuentes sismogénicas consideradas en el caso aplicado a Manta, Ecuador.

**Paso 5.** Ingreso de los parámetros de sismicidad por cada fuente modelada.

**Figura 21**

*Data de la sismicidad de la fuente Esmeralda.*

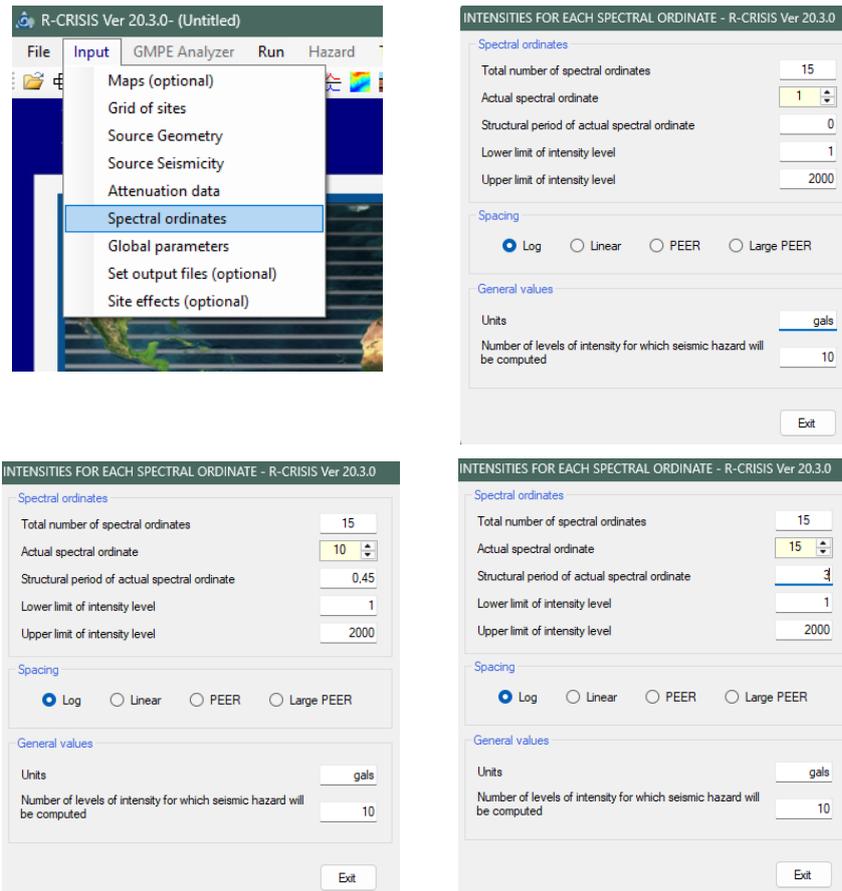


Nota. La figura presenta el registro de los parámetros sismológicos correspondientes a la fuente de Esmeraldas (repetitivo para cada fuente incorporada), entre los que se incluyen la magnitud mínima y máxima, el valor de la tasa de ocurrencia ( $\lambda$ ) y el valor estimado del parámetro beta. Estos datos provienen de los valores sources consignados en la Tabla 10

**Paso 6.** Se establece la cantidad de ordenadas espectrales que serán consideradas en el modelo y, a continuación, se definen los valores de período estructural correspondientes a cada una de ellas.

**Figura 22**

*Ordenadas espectrales.*

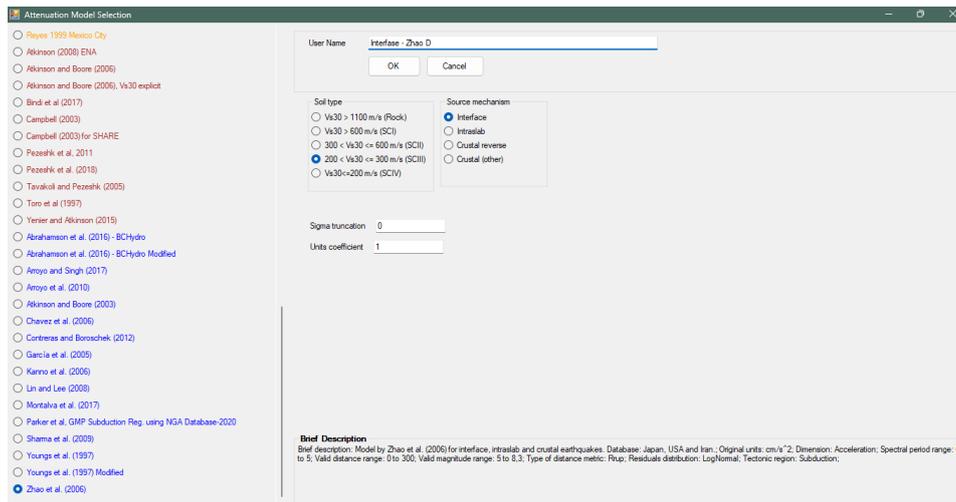


Nota. La figura presenta los valores utilizados en el modelo propuesto, en el cual se consideraron periodos de  $T = 0.0$  s,  $0.05$  s,  $0.1$  s,  $0.15$  s,  $0.20$  s,  $0.25$  s,  $0.30$  s,  $0.35$  s,  $0.40$  s,  $0.45$  s,  $0.5$  s,  $0.55$  s,  $1$  s,  $2$  s y  $3$  s, además de solicitar la estimación de aceleraciones espectrales dentro del rango de  $1$  a  $2000$  gals.

**Paso 7.** Seleccionar la ley de atenuación más adecuada para el modelo a ejecutar, de la base de datos que dispone el programa de modelos desarrollados por diversos autores, aplicados en función del tipo de fuente (interfase, intraplaca o cortical).

**Figura 23**

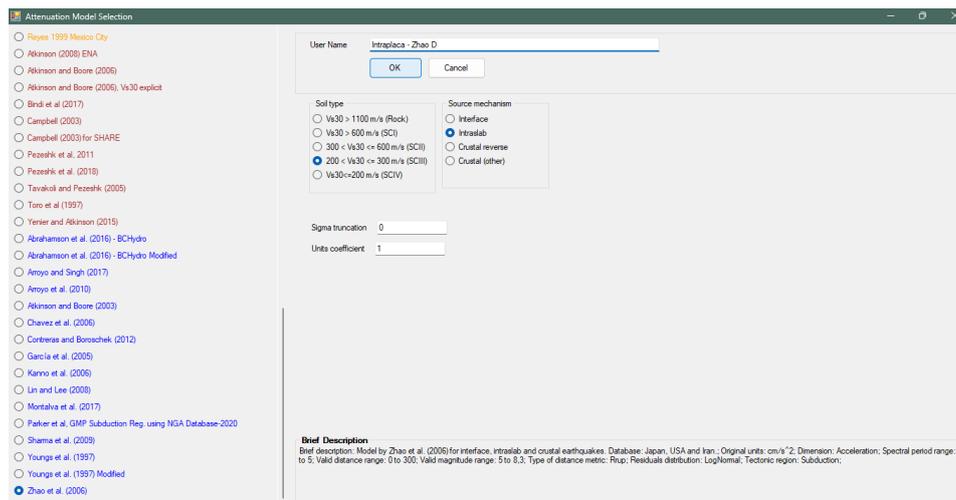
*Ley de atenuación de Zhao 2006 para fuentes de interfase.*



Nota. Integración del modelo de atenuación desarrollado por Zhao et al. (2006) para fuentes de interfase considerando velocidad de la onda cortante según suelo tipo D.

**Figura 24**

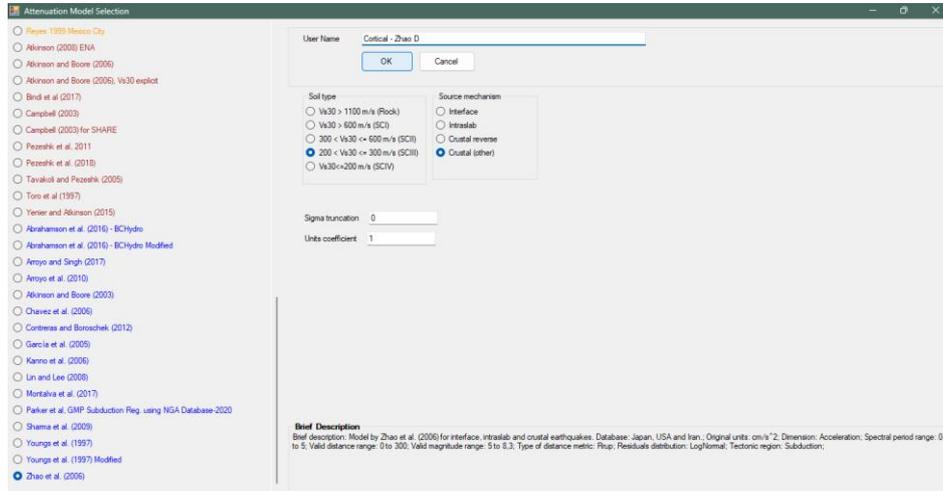
*Ley de atenuación de Zhao 2006 para fuentes de intraplaca.*



Nota. Integración del modelo de atenuación planteado por Zhao et al. (2006) para fuentes intraplaca considerando velocidad de la onda cortante según suelo tipo D.

**Figura 25**

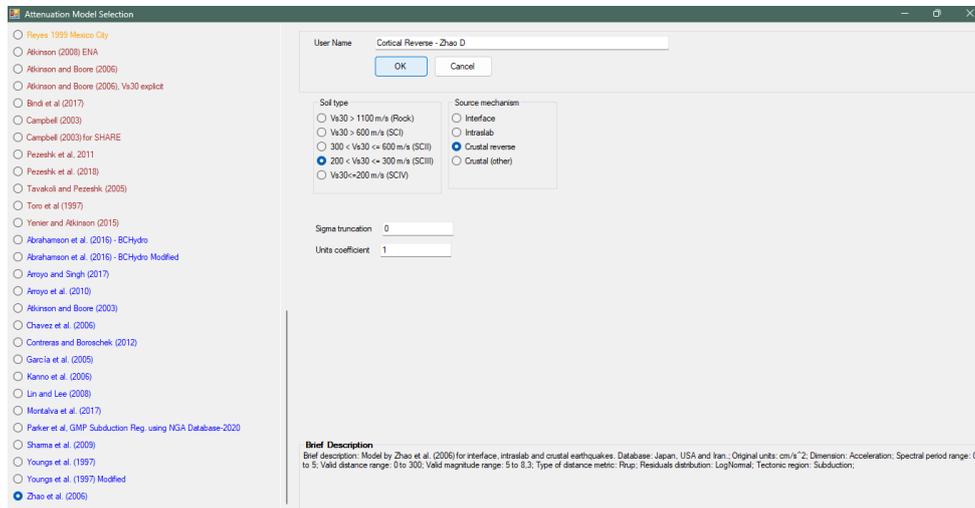
*Ley de atenuación de Zhao 2006 para fuentes de corticales.*



Nota. Integración del modelo de atenuación desarrollado por Zhao et al. (2006) para fuentes corticales considerando velocidad de la onda cortante según suelo tipo D.

**Figura 26**

*Ley de atenuación de Zhao 2006 para tipo de fuentes Cortical Reverse.*

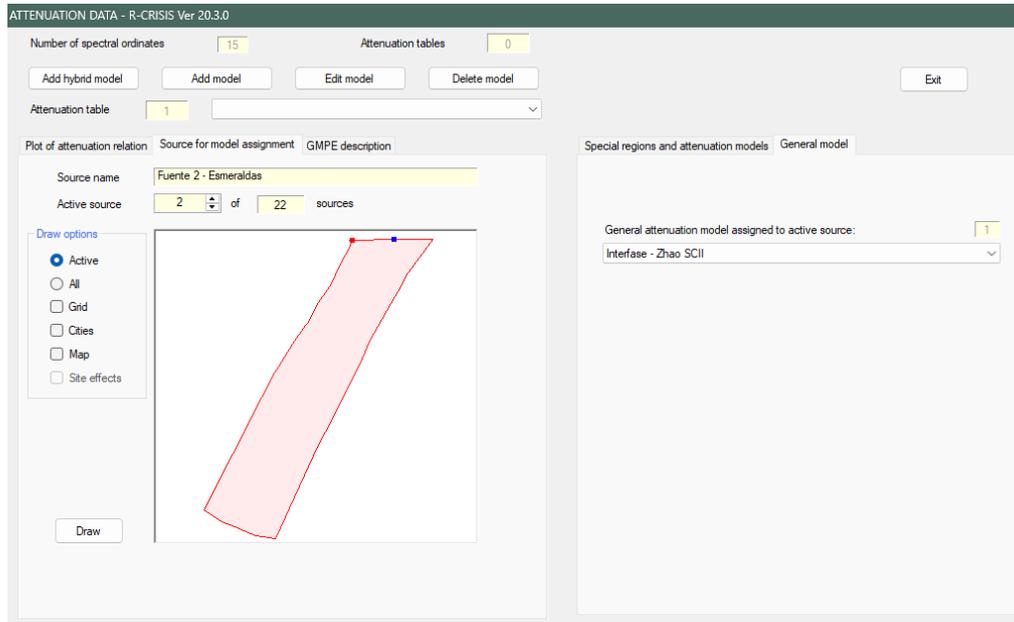


Nota. Nota. Integración del modelo de atenuación planteado por Zhao et al. (2006) para fuentes corticales reverse, considerando velocidad de la onda cortante según suelo tipo D.

**Paso 8.** Selección de la ley de atenuación correspondiente para cada una de las fuentes sismogénicas.

**Figura 27**

*Asignación a cada fuente una ley de atenuación.*



Nota. La figura presenta el procedimiento para incorporar el modelo de atenuación seleccionado según el autor correspondiente para la fuente definida en el modelo (Esmeraldas).

**Paso 9.** Introducir parámetros globales: distancia de influencia, triangulación y periodos de retorno para los resultados del peligro sísmico.

**Figura 28**

*Parámetros globales.*

The screenshot shows the 'GLOBAL PARAMETERS - R-CRISIS Ver 20.3.0' window. It contains several input fields and a table. The 'Integration parameters' section has three input fields: 'Maximum integration distance' (200 km), 'Minimum triangle size' (11 km), and 'Minimum Distance/Triangle Size ratio' (7). The 'CAV filter' section has a 'Filter type' dropdown menu set to 'None'. Below these are two tables. The first table, 'Time frame', has one row with the value '50'. The second table, 'Map return period (years)', has five rows with values 72, 225, 475, 1000, and 2475, and a corresponding 'PE in 50 years' column with values 5.01E-01, 1.99E-01, 9.99E-02, 4.88E-02, and 2.00E-02. An 'Exit' button is located at the bottom right.

Time frame
50

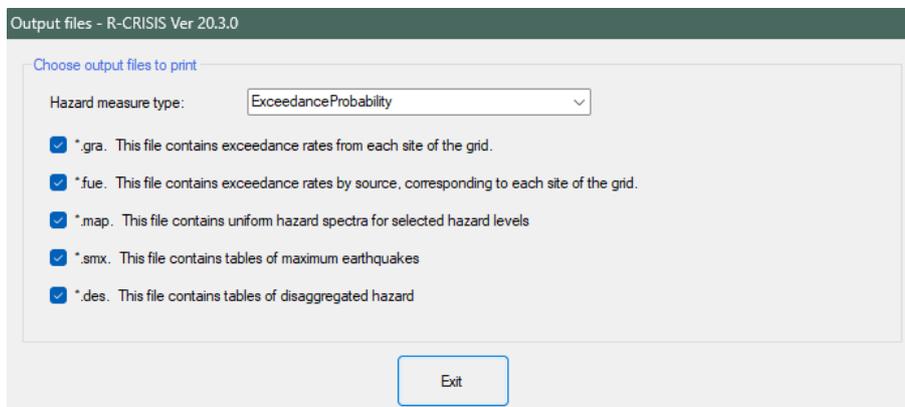
Map return period (years)	PE in 50 years
72	5.01E-01
225	1.99E-01
475	9.99E-02
1000	4.88E-02
2475	2.00E-02

Nota. Proceso de ingreso de parámetros en R-CRISIS: distancia de influencia (200 km), tamaño de triangulación (11 km), relación mínima (7) y periodos de retorno de 72, 225, 475, 1000 y 2475 años.

**Paso 10.** Marcar los archivos que desea imprimir para el análisis del peligro sísmico.

**Figura 29**

*Salida de archivos del análisis sísmico.*



Nota. Formatos de salida generados por R-CRISIS según el tipo de medida de peligro seleccionada y los registros solicitados.

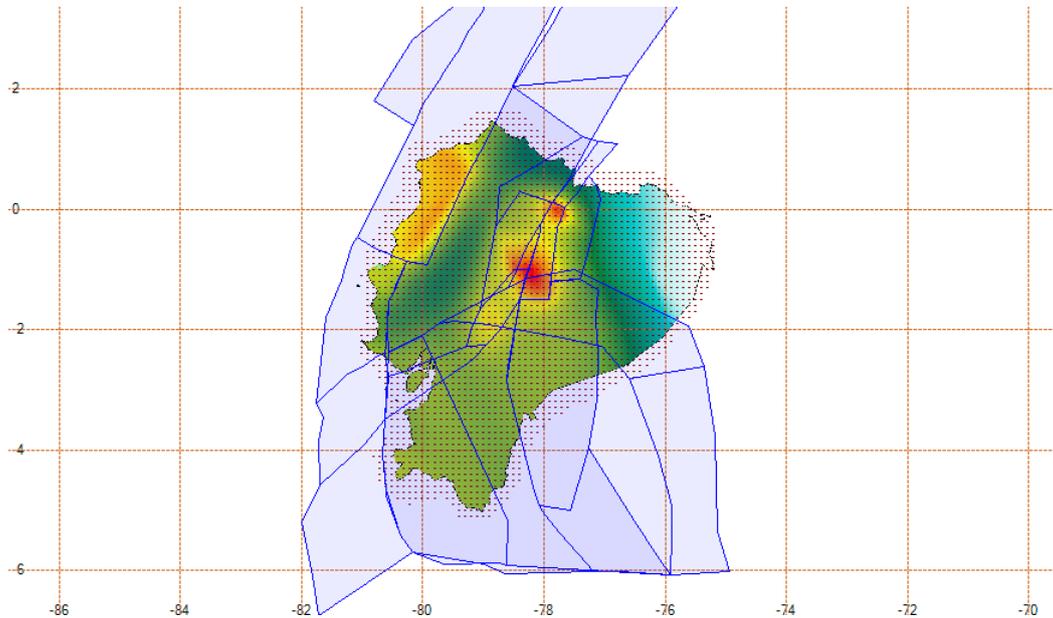
**Paso 11.** Finalmente ejecutar el modelo con la información ingresada para obtener los resultados de análisis del peligro sísmico probabilístico.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1. Mapas de amenaza sísmica para el sitio de estudio

**Figura 30**

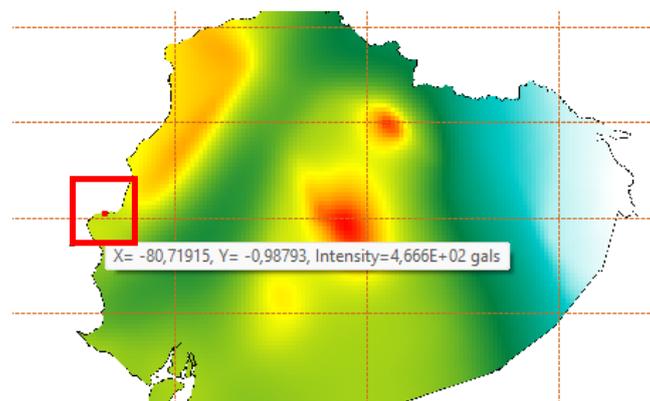
*Mapa de amenaza sísmica para caso aplicado (Manta).*



Nota. Mapa de amenaza sísmica generado en R-CRISIS que muestra las 22 fuentes sísmicas consideradas y los resultados representados en escala de colores.

**Figura 31**

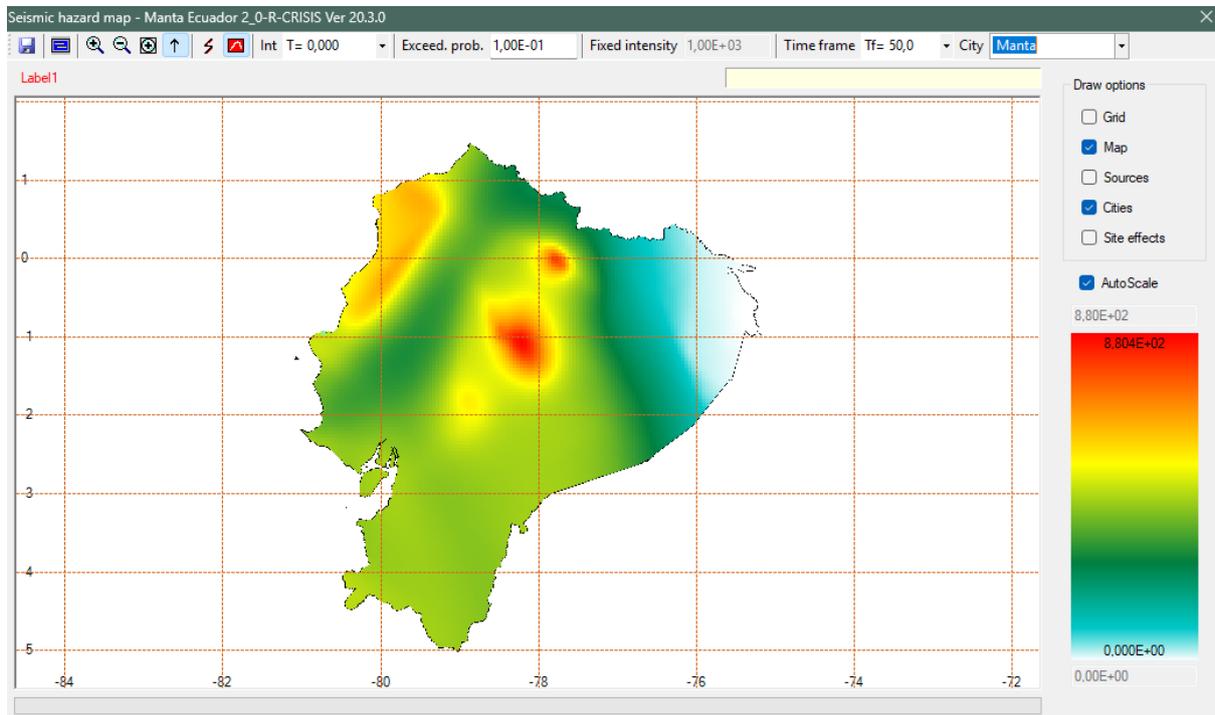
*Punto de análisis.*



Nota. Punto del sitio analizado (cuadro rojo) utilizado para acceder a los valores necesarios para generar el espectro de peligro uniforme y las curvas de excedencia.

**Figura 32**

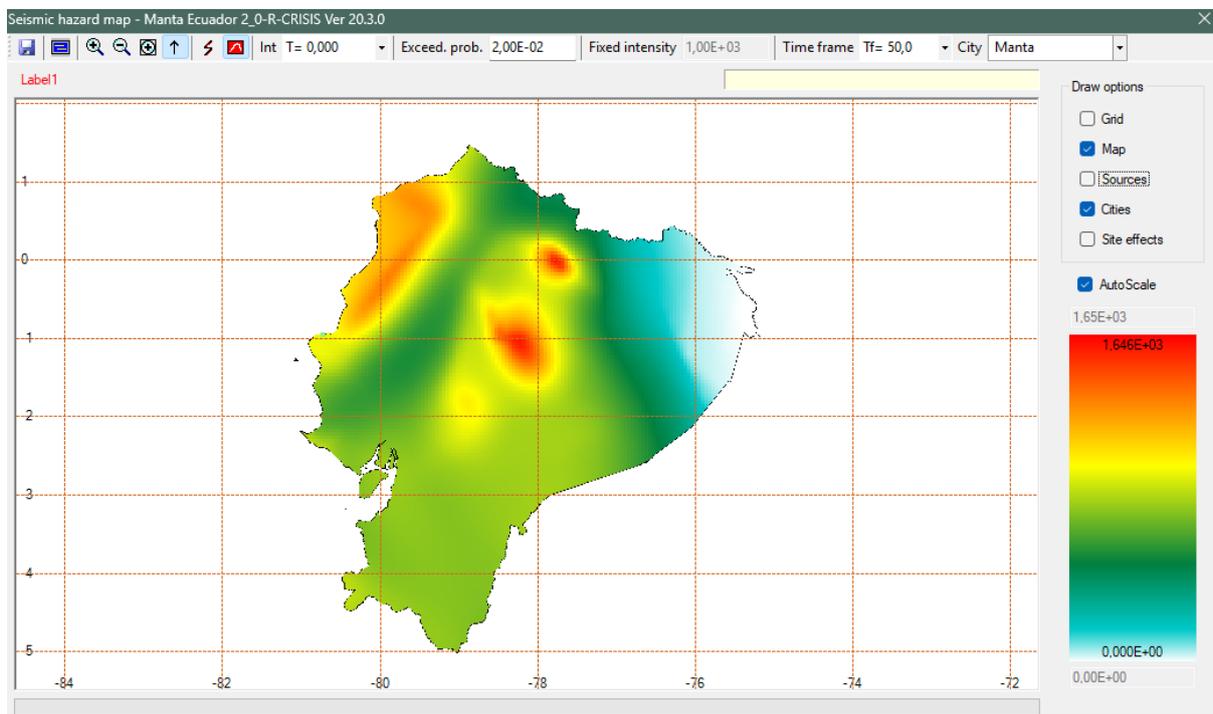
*Mapa de amenaza sísmica para caso aplicado (Manta).  $Tr=475$  años*



Nota. Mapa de amenaza sísmica para un periodo de retorno de 475 años y ordenada espectral de 0.0 s (PGA), mostrando intensidades de aceleración del suelo en escala de colores según la zona.

**Figura 33**

*Mapa de amenaza sísmica para 2475 años.*

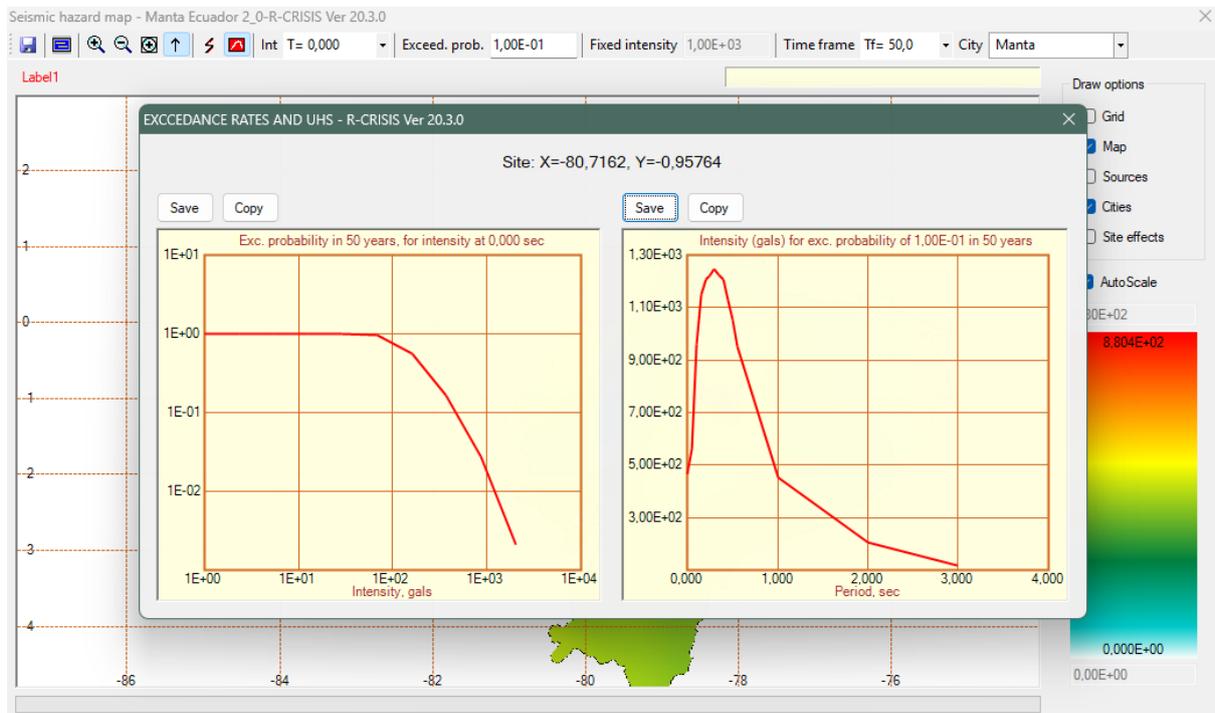


Nota. Representación del mapa de amenaza sísmica correspondiente a un periodo de retorno de 2475 años y ordenada espectral de 0.0 s, en el que se aprecian los niveles de aceleración del suelo mediante una escala de colores para cada zona.

## 4.2. Espectro de amenaza uniforme y curvas de peligro sísmico.

**Figura 34**

*Ilustración de la curva de tasas de excedencia y del espectro de peligro uniforme generados en R-CRISIS.*



Nota. Representación gráfica de la tasa de excedencia para un periodo de 0 segundos y el espectro de amenaza uniforme para un  $T_r=475$  años, generadas en R-CRISIS, visible tras seleccionar el punto específico de evaluación (Manta).

Además, dado que el software opera utilizando unidades de aceleración en gal, fue necesario extraer los valores del espectro generado y convertirlos posteriormente en Excel a unidades de gravedad (g), con el fin de facilitar la comparación con el espectro de diseño establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC-15

#### 4.2.1. Tasa anual de excedencia de las curvas de peligro uniforme para la ciudad Manta

**Tabla 12**

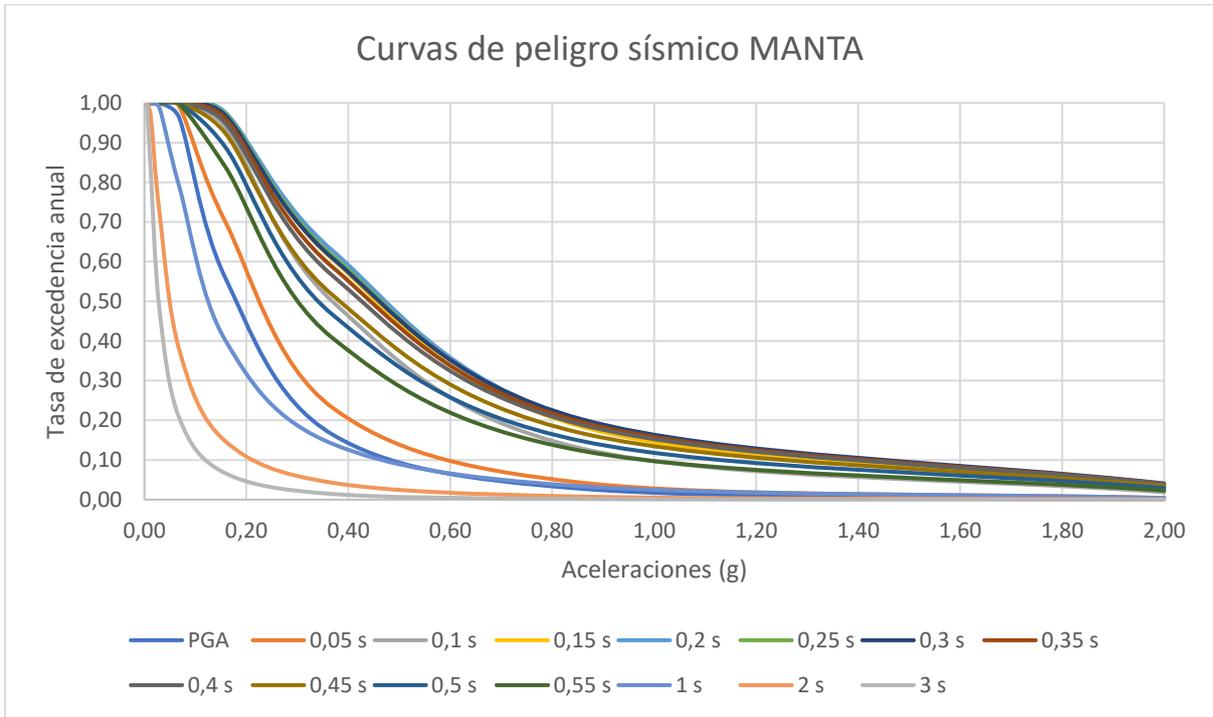
*Registro de valores de tasa de excedencia anual calculados por el programa R-CRISIS.*

Aceleración Espectral (gals)	Periodo (s)														
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	1	2	3
1E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
2E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
5E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	9,86E-01
1E+01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	9,65E-01	8,21E-01
3E+01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	9,88E-01	7,26E-01	4,81E-01
7E+01	9,63E-01	9,91E-01	1,00E+00	9,99E-01	9,97E-01	7,90E-01	3,78E-01	2,06E-01							
2E+02	5,59E-01	7,00E-01	9,39E-01	9,72E-01	9,76E-01	9,72E-01	9,69E-01	9,60E-01	9,49E-01	9,24E-01	8,89E-01	8,39E-01	4,01E-01	1,47E-01	6,66E-02
4E+02	1,64E-01	2,31E-01	4,99E-01	6,06E-01	6,27E-01	6,14E-01	6,08E-01	5,86E-01	5,64E-01	5,15E-01	4,66E-01	4,07E-01	1,40E-01	4,25E-02	1,43E-02
9E+02	2,73E-02	4,25E-02	1,28E-01	1,83E-01	1,99E-01	1,98E-01	2,02E-01	1,95E-01	1,88E-01	1,67E-01	1,47E-01	1,23E-01	3,35E-02	7,72E-03	1,63E-03
2E+03	2,07E-03	4,02E-03	1,87E-02	3,15E-02	3,61E-02	3,78E-02	4,08E-02	4,00E-02	3,92E-02	3,41E-02	2,93E-02	2,30E-02	4,48E-03	7,08E-04	7,94E-05

Nota. Datos derivados de la tabla de excedencia proyectada por R-CRISIS, para un periodo de 50 años de los 15 periodos espectrales seleccionados.

**Figura 35**

*Curvas de peligro sísmico para Manta a diferentes periodos estructurales.*



Nota. La figura muestra las curvas de peligro sísmico de los datos derivados de la tabla 11, de los 15 periodos espectrales seleccionados para la ciudad de Manta.

#### 4.2.2. Espectro de Amenaza Uniforme para el sitio del nuevo proyecto del Cuerpo de Bomberos Manta

A partir de los valores de tasa de excedencia anual presentados previamente en la tabla 13, se puede determinar la aceleración espectral asociada a una misma tasa de excedencia para diferentes periodos. El resultado se representa en una gráfica conocida como espectro de peligro uniforme, correspondiente al sitio analizado para un periodo de retorno de 475 años.

**Tabla 13**

*Aceleraciones espectrales obtenidas del análisis realizado con R-CRISIS*

<b>Espectro de respuesta de aceleraciones</b>		
<b>R-CRISIS – MANTA</b>		
<b>T (s)</b>	<b>Sa (gals)</b>	<b>Sa (g)</b>
0,0	458,200	0,458
0,05	583,830	0,584
0,1	1048,400	1,048
0,15	1277,200	1,277
0,2	1302,800	1,303
0,25	1210,000	1,210
0,3	1095,800	1,096
0,35	978,090	0,978
0,4	867,370	0,867
0,45	776,350	0,776
0,5	688,060	0,688
0,55	618,540	0,619
1,0	353,770	0,354
2,0	174,560	0,175
3,0	95,111	0,095

Nota. Representa la aceleración estimada para el sitio, calculada a partir de las distintas ordenadas espectrales incluidas en el modelo, correspondiente a un periodo de retorno de 475 años.

**Figura 36**

*Espectro de respuesta de aceleraciones generado con R-CRISIS para el sitio del nuevo proyecto.*



Nota. La figura muestra el espectro de peligro sísmico obtenido para el sitio del edificio del cuerpo de bomberos, con un periodo de retorno de 475 años.

### **4.3. Comparativa entre el espectro de amenaza sísmica establecido en la NEC-SE-DS 2015 y el obtenido mediante el software R-CRISIS**

La comparación entre el espectro definido por la normativa NEC-SE-DS y el generado mediante el análisis con el software R-CRISIS resulta esencial, ya que permite evaluar si los resultados obtenidos con el programa cumplen con los parámetros establecidos en la normativa ecuatoriana. En este caso, el espectro de diseño elástico horizontal de aceleraciones de la NEC se ha considerado para un suelo tipo "D", el cual, según la clasificación de la norma, corresponde a un perfil de suelo blando, con menor rigidez y una mayor amplificación de las ondas sísmicas respecto a suelos más rígidos. La elección de este tipo de suelo se debe a los datos ingresados en el software, especialmente relacionados con las características del sitio de análisis, la profundidad de las fuentes sísmicas, las fallas sismogénicas modeladas y las leyes de atenuación aplicadas para condiciones de suelo tipo D. Por tanto, los resultados proporcionados por R-CRISIS representan la respuesta sísmica en superficie considerando las propiedades y el comportamiento dinámico propio de dicho perfil de suelo.

**Tabla 14**

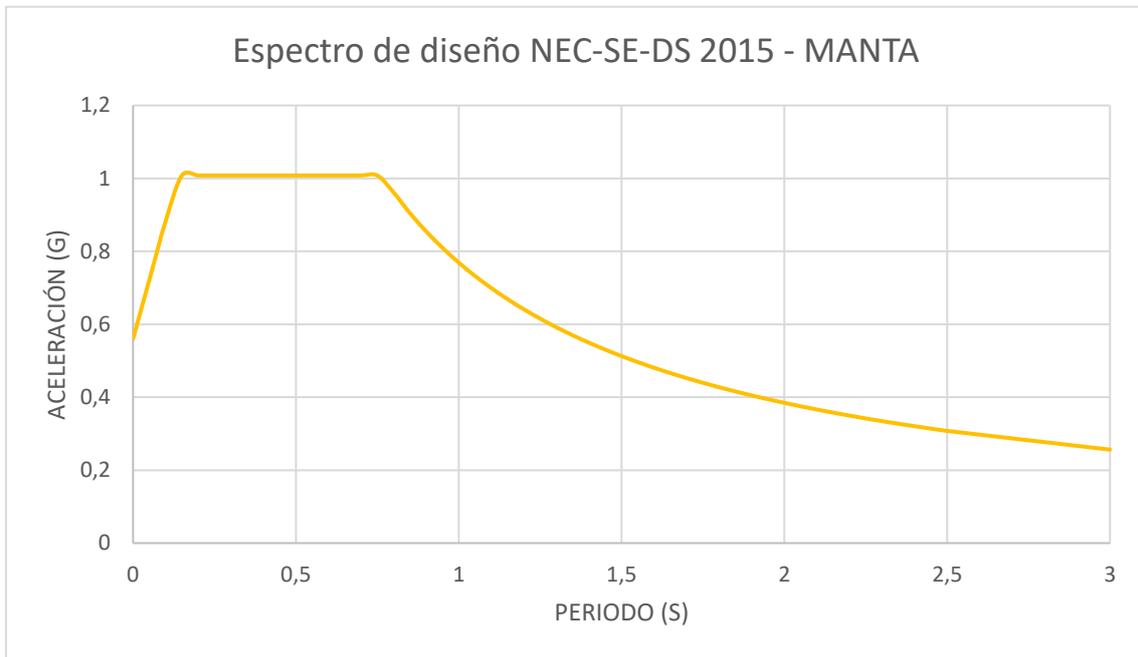
*Parámetros de acuerdo al perfil del suelo, en conformidad con la NEC-SE-DS 2015.*

<b>Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones (NEC-SE-DS)</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Región del Ecuador		Costa	
Zona Sísmica		VI	
Caracterización del peligro sísmico		Muy alta	
Aceleración máxima esperada en roca	<b>Z</b>	0,5	
Tipo de perfil de suelo		D	
Factor de sitio Fa	<b>Fa</b>	1,12	
Factor de sitio Fd	<b>Fd</b>	1,11	
Factor de comportamiento inelástico	<b>Fs</b>	1,4	
Factor de amplificación espectral	<b><math>\eta</math></b>	1,8	
Factor asociado al periodo de retorno	<b>R</b>	1	
Periodo límite de vibración	<b>To</b>	0,139	(s)
Periodo límite de vibración	<b>Tc</b>	0,763	(s)
Aceleración en T=0	<b>Sa</b>	0,560	(g)
Aceleración en $T_0 < T < T_c$	<b>Sa</b>	1,008	(g)

Nota. Valores determinados conforme a los lineamientos de la NEC-SE-DS 2015, considerando un factor de zona sísmica  $Z=0.5$  para el sitio del edificio del Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Manta.

**Figura 37**

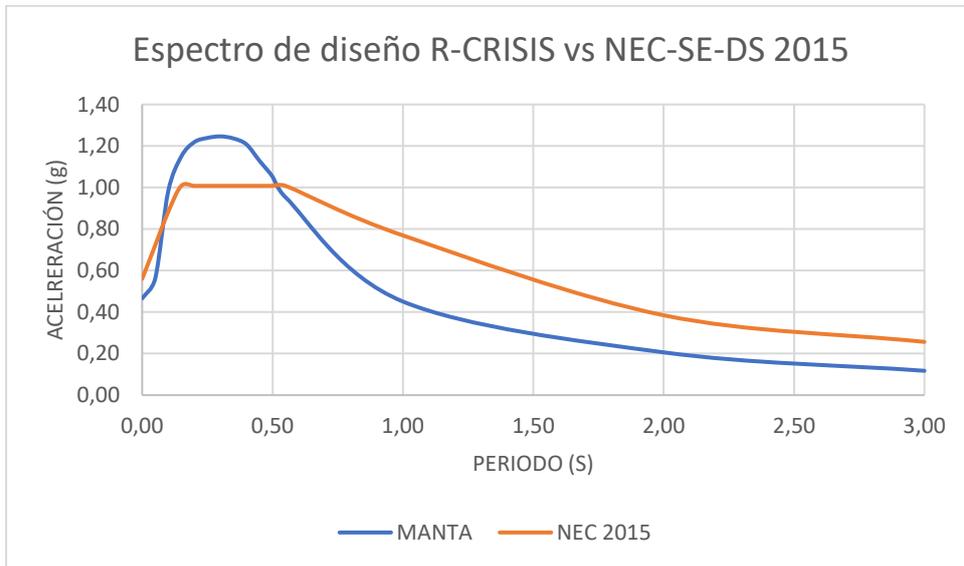
*Espectro de respuesta de aceleraciones de la NEC-SE-DS para el nuevo proyecto*



Nota. Curva de peligro sísmico establecida por la normativa NEC-SE-DS 2015 para el sitio del edificio del Cuerpo de Bomberos Manta, con base en un horizonte de 475 años.

**Figura 38**

*Espectros de amenaza sísmica para la ciudad de Manta.*



Nota. Se presenta la comparativa entre el espectro sísmico de diseño obtenido con el software R-CRISIS para la ciudad de Manta y el propuesto por la NEC-SE-DS 2015, ambos correspondientes a un periodo de retorno de 475 años. Estos resultados reflejan que el espectro propio para Manta (color azul) presenta aceleraciones espectrales superiores en periodos cortos, mientras que el espectro normativo (color naranja) alcanza valores mayores en periodos intermedios y largos.

**Tabla 15**

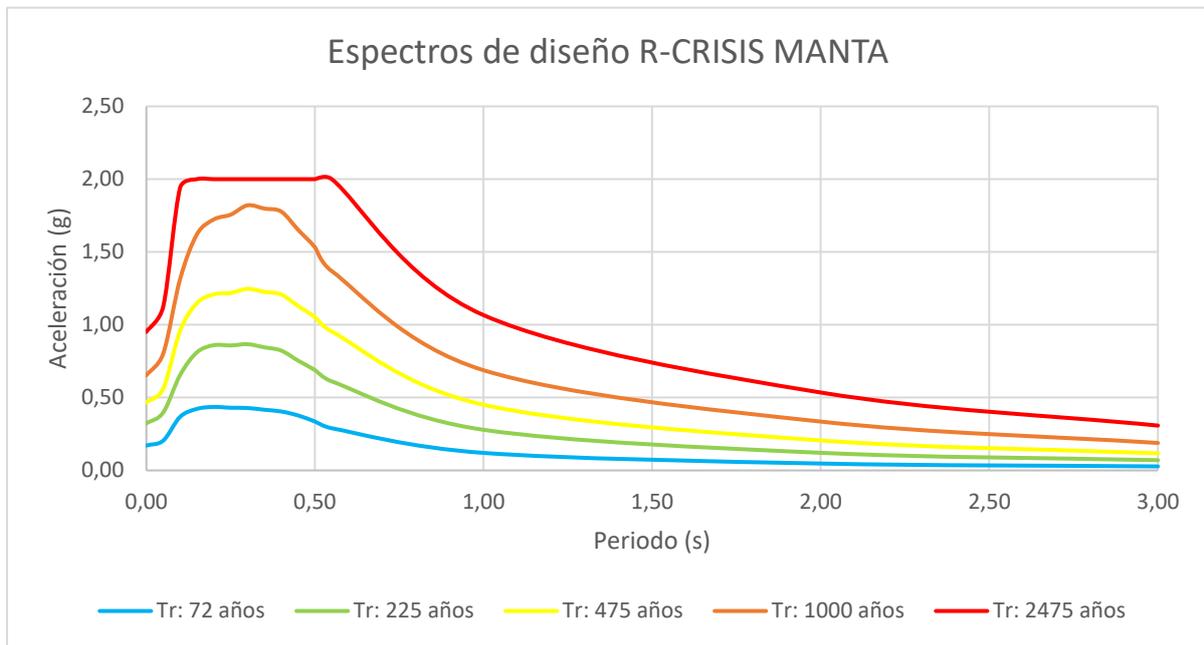
*Aceleraciones espectrales para el sitio del nuevo proyecto del Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Manta.*

T(s)	Tr: 72 años		Tr: 225 años		Tr: 475 años		Tr: 1000 años		Tr: 2475 años	
	Sa (gals)	Sa(g)	Sa (gals)	Sa(g)	Sa (gals)	Sa(g)	Sa (gals)	Sa(g)	Sa (gals)	Sa(g)
0,00	171,1	0,17	323,0	0,32	466,0	0,47	653,4	0,65	951,5	0,95
0,05	204,9	0,20	398,1	0,40	561,1	0,56	802,4	0,80	1125,8	1,13
0,10	367,9	0,37	655,2	0,66	959,8	0,96	1313,9	1,31	1941,4	1,94
0,15	422,4	0,42	811,0	0,81	1149,3	1,15	1621,2	1,62	2000,0	2,00
0,20	435,8	0,44	859,9	0,86	1208,6	1,21	1723,4	1,72	2000,0	2,00
0,25	430,2	0,43	858,1	0,86	1218,7	1,22	1756,1	1,76	2000,0	2,00
0,30	428,6	0,43	866,6	0,87	1246,3	1,25	1820,4	1,82	2000,0	2,00
0,35	416,4	0,42	845,3	0,85	1226,3	1,23	1798,0	1,80	2000,0	2,00
0,40	404,6	0,40	822,7	0,82	1207,7	1,21	1777,6	1,78	2000,0	2,00
0,45	377,2	0,38	753,7	0,75	1128,7	1,13	1652,2	1,65	2000,0	2,00
0,50	335,7	0,34	689,1	0,69	1052,4	1,05	1531,9	1,53	2000,0	2,00
0,55	289,6	0,29	611,2	0,61	952,9	0,95	1368,5	1,37	2000,0	2,00
1,00	120,3	0,12	278,8	0,28	450,8	0,45	688,0	0,69	1066,3	1,07
2,00	47,3	0,05	120,9	0,12	206,0	0,21	335,3	0,34	535,0	0,54
3,00	27,5	0,03	70,1	0,07	117,3	0,12	188,5	0,19	307,8	0,31

Nota. La tabla presenta las aceleraciones espectrales asociadas a los diversos periodos de retorno considerados.

**Figura 39**

*Comparativa de los distintos espectros de peligro uniforme.*

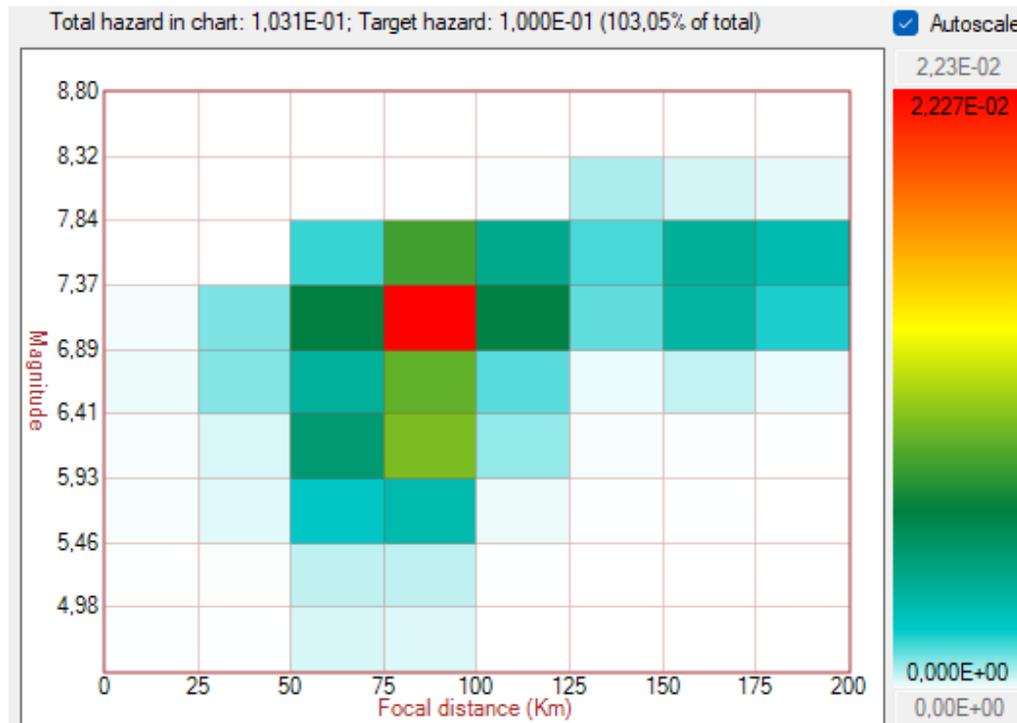


Nota. Muestra los espectros obtenidos en función de cada uno de los periodos de retorno considerados en el análisis realizado con el software R-CRISIS.

#### 4.4. Desagregación de la peligrosidad

**Figura 40**

*Desagregación sísmica que muestra el software R-CRISIS Tr=475 años.*



Nota. Se muestra el análisis de desagregación realizado con el software R-CRISIS, identificando la mayor contribución al peligro sísmico en el sitio en términos de magnitud y distancia focal.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

El mapa de amenaza sísmica mostrado en la Figura 32 fue generado mediante el software R-CRISIS, considerando un periodo espectral de 0,0 segundos (PGA), una probabilidad de excedencia del 10 por ciento en 50 años, equivalente a un periodo de retorno de 475 años. Los resultados muestran que las zonas de mayor amenaza sísmica se localizan principalmente en el centro-norte del país, donde se identifican áreas en color rojo que alcanzan aceleraciones máximas cercanas a los 880 gal ( $\approx 0.90$  g). En contraste, la ciudad de Manta presenta un nivel de amenaza sísmica intermedio, con valores de PGA estimados entre 350–450 gal ( $\approx 0.36$  g y 0.46 g), de acuerdo con la escala de colores del mapa.

Al contrastar los resultados obtenidos con los espectros definidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS 2015), se logró apreciar que la normativa adopta un criterio más conservador en determinados rangos, asignando aceleraciones superiores a las calculadas mediante el análisis probabilístico local. Esta diferencia responde a que la NEC se basa en espectros generalizados por zonificación sísmica y tipo de suelo, mientras que el cálculo con R-CRISIS considera las condiciones particulares del sitio. En este sentido, el diseño de la nueva estación del Cuerpo de Bomberos podría beneficiarse de la utilización del espectro local, ya que permitiría un dimensionamiento más ajustado a la realidad sísmica del sitio, optimizando los recursos presupuestarios sin comprometer el nivel de seguridad estructural requerido para una edificación esencial.

En la comparación entre el espectro de diseño generado con R-CRISIS y el definido por la NEC-SE-DS 2015 para el sitio del nuevo proyecto del Cuerpo de Bomberos (Figura 38), se identifican variaciones significativas. Para periodos cortos, en torno a 0,2 s, el espectro local alcanza aceleraciones máximas cercanas a 1,25 g, superando los valores aproximados de 1,0 g de la NEC 2015. Sin embargo, a partir de periodos mayores a 0,5 s, la curva normativa presenta aceleraciones más elevadas que las obtenidas con R-CRISIS, con una pendiente de disminución más suave. Esto indica que, mientras el análisis probabilístico local estima una mayor demanda sísmica en el rango de periodos cortos, afectando principalmente a estructuras rígidas y de baja altura, la NEC establece mayores exigencias para periodos largos, lo que repercute en el diseño de edificaciones más flexibles o de gran altura.

Por tanto, para el proyecto del nuevo edificio del Cuerpo de Bomberos que se prevé de 3 o 4 pisos ( $0,397s < t_n < 0,515s$ ) se debe emplear un espectro envolvente (mayor de las dos curvas

por periodo), además, estimar con precisión el periodo fundamental de la estructura y acompañar estos resultados con un análisis modal y un análisis time-history para confirmar fuerzas y desplazamientos, puesto que, el carácter esencial de la edificación hacen que las decisiones de diseño deban priorizar seguridad operativa y minimizar el riesgo de resonancia.

Asimismo, el análisis de desagregación probabilística del peligro sísmico realizado con R-CRISIS (figura 40) identificó que la mayor contribución al peligro (zona roja) en el sitio del nuevo proyecto del Cuerpo de Bomberos corresponde a eventos sísmicos con una magnitud aproximada de entre 6.9 a 7.4, a una distancia epicentral entre los 75 y 100 km. Esta combinación modal de parámetros define el escenario sísmico dominante y constituye una referencia crítica para el diseño estructural del nuevo edificio. Además, el gráfico cubre el 103.94% del peligro objetivo, es decir, los rangos de magnitud y distancia representados explican completamente el nivel de amenaza esperado para ese periodo de retorno.

En síntesis, estos resultados muestran que el análisis probabilístico del peligro sísmico resultó ser una herramienta fundamental para generar mapas de zonificación sísmica y espectros de diseño, representando con mayor exactitud la amenaza sísmica real de la zona estudiada. Su aplicación resultó valiosa para superar las limitaciones de las normativas generalizadas, ya que proporcionó criterios más precisos para el diseño del nuevo proyecto del Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Manta, un edificio que debe mantener su operatividad frente a sismos de gran magnitud.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda emplear espectros de diseño obtenidos mediante análisis probabilísticos del peligro sísmico por sitio en proyectos de infraestructura esenciales, como estaciones de bomberos, hospitales o centros de gestión de riesgos, permitiendo considerar con mayor precisión las condiciones locales del terreno, la sismicidad regional y las características propias de los movimientos esperados, reduciendo la incertidumbre asociada al diseño estructural.

Para mejorar aún más la representatividad de los espectros de diseño, se recomienda complementar el análisis del peligro sísmico con estudios de respuesta dinámica de suelos (análisis de efectos de sitio), dado que, estos permiten evaluar la amplificación de ondas sísmicas debido a las condiciones estratigráficas del subsuelo, especialmente en suelos blandos o depósitos aluviales, que pueden incrementar considerablemente la demanda sísmica sobre las estructuras.

Dado que normas nacionales como la NEC SE DS 2015 se basan en zonificaciones generales, resulta recomendable que las entidades reguladoras consideren la incorporación de metodologías de análisis probabilístico del peligro sísmico a escala de sitio como una alternativa válida para proyectos estratégicos. Esta medida favorecería un diseño más preciso, contextualizado y alineado con la amenaza sísmica específica de cada ubicación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, R. (2015). *Upcommons. Espectros de control para ciudad de Quito-Ecuador*.  
Obtenido de  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76213/MIS72.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aguiar, R. (15 de Marzo de 2018). *UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE*.  
Obtenido de <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/view/543>
- Aguilar, A. A. (2017). *Program for computing seismic hazard*. Obtenido de <http://www.r-crisis.com/>
- Ancco Huanacuni, E. R., & Chaparro Quispe, E. H. (2020). *Universidad Privada de Tacna (UPT)*. Obtenido de  
<https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/view/292>
- Astorga, A. (26 de noviembre de 2013). *SCIELO. La definición de usos del suelo en las cercanías de fallas geológicas: explicación del Protocolo Técnico del Decreto Ejecutivo 32967 - MINAE, Anexo 3*. Obtenido de  
[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0256-70242013000200013](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242013000200013)
- Benito, B., & Jimenez, E. (1999). *Peligrosidad Sísmica. Física de la Tierra*. Obtenido de  
[http://redgeomatrica.rediris.es/sismo/pdf/pub\\_014.pdf](http://redgeomatrica.rediris.es/sismo/pdf/pub_014.pdf)
- Bourgois, J. (24 de Mayo de 2013). *Scientific Research Publishing. A Review on Tectonic Record of Strain Buildup and Stress Release across the Andean Forearc along the Gulf of Guayaquil-Tumbes Basin (GGTB) near Ecuador-Peru Border*. Obtenido de  
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=31774#return55>
- Cabello, C. (julio de 2021). *CÁLCULO PROBABILISTA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN CHILE*. Obtenido de [https://blogs.upm.es/masterriesgosismico/wp-content/uploads/sites/704/2021/11/TFM\\_CatalinaCabello\\_final\\_compressed.pdf](https://blogs.upm.es/masterriesgosismico/wp-content/uploads/sites/704/2021/11/TFM_CatalinaCabello_final_compressed.pdf)
- Cañizares, F. (noviembre de 2017). *Selección de Ecuaciones de Atenuación (GMPES) Compatibles con el Sistema de Fallas de Quito [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]*. Obtenido de  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18981/1/CD-8377.pdf>

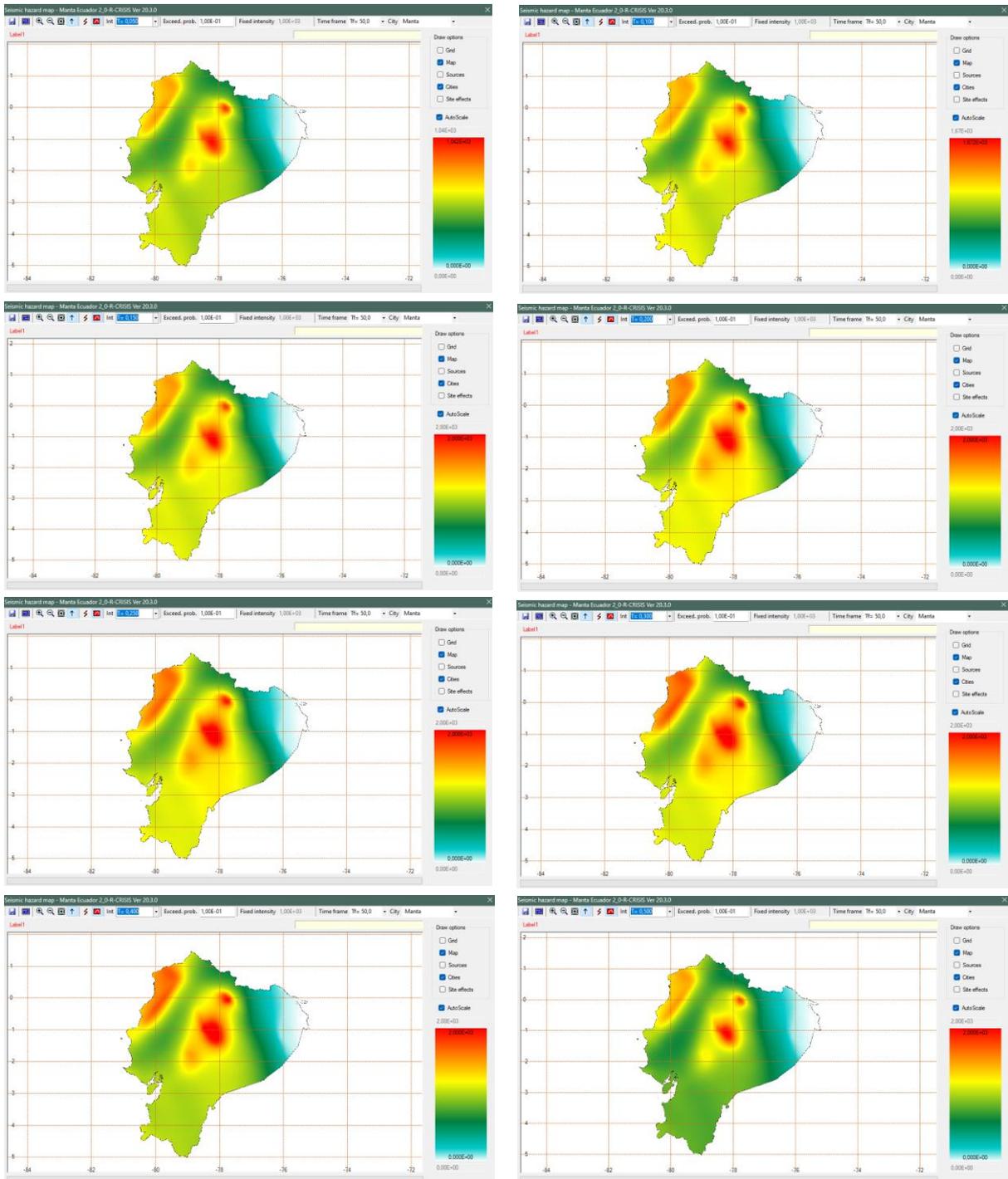
- Chica Carvajal, C., & Morán Parrales, R. (14 de septiembre de 2020). *UCSG DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DE SISMOS HISTÓRICOS EN ECUADOR*. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15745/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-372.pdf.pdf>
- CNN. (2024). *CNN*. Obtenido de <https://cnnespanol.cnn.com/2024/04/02/cinturon-fuego-pacifico-explainer-orix>
- Cronin, B. (3 de Mayo de 2010). *Researchgate. A Primer on Focal Mechanism Solutions for Geologists*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/261913153\\_A\\_primer\\_on\\_focal\\_mechanism\\_solutions\\_for\\_geologists](https://www.researchgate.net/publication/261913153_A_primer_on_focal_mechanism_solutions_for_geologists)
- Delgado Toala, D. (2024). *AJEA UTN*. Obtenido de <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1737/1560>
- Esteva, L. (1976). *Revista Ciencia*. Obtenido de [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/69\\_3/PDF/PeligroSismos.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/69_3/PDF/PeligroSismos.pdf)
- Gonzales Galindo, L. (2016). *Evaluación de Peligro Sísmico en La Ciudad de Arequipa y el Distrito de Cabanaconde, Provincia de Caylloma, Región Arequipa y su Aplicación en el Diagnostico de Riesgo Sísmico de Cabanaconde*. Obtenido de <https://1library.co/document/qokvj35y-evaluacion-sismico-arequipa-cabanaconde-provincia-aplicacion-diagnostico-cabanaconde.html>
- IGEPN. (1 de Noviembre de 2023). *Mapa digital interactivo de peligro sísmico para Ecuador*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/mapas/peligro-sismico/mapa-peligro-sismico.html>
- IGN. (1999). *Instituto Geografico Nacional*. Obtenido de <https://www.ign.es/resources/docs/IGNCnig/SIS-Teoria-Sismologia.pdf>
- Jaramillo, J. (01 de enero de 2002). *MODELO PARA LA RAMA DESCENDENTE DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO Y APLICACIONES AL CASO DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN*. Obtenido de <https://doi.org/10.18867/ris.68.212>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: MEG WEIST. Obtenido de <https://istasazeh-co.com/wp-content/uploads/2022/05/Geotechnical-Earthquake-Engineering.pdf>

- Madrid, M. (2024). *Geología Estructural: Deformación, Pliegues y Fallas*. Obtenido de <https://portaldelpetroleo.com/geologia-estructural/>
- Mariniere, J. (2020). *Improving earthquake forecast models for PSHA with geodetic data, applied on Ecuador*. Obtenido de <https://theses.hal.science/tel-03276307>
- Mena Hernández, U. (2002). *Catalan Open Research Area (CORA)*. Obtenido de [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6222/03CAPITULO\\_2.pdf](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6222/03CAPITULO_2.pdf)
- NEC-SE-DS. (2015). *Cargas Sísmicas Diseño Sismo Resistente. Habitat y vivienda*. Obtenido de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Ordoñez, G., Salazar, M., & Alviar, J. (2023). *ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA "R-CRISIS" Y SU APLICACIÓN EN EL CASO DE AMENAZAS SÍSMICAS EN EL CANTÓN QUITO, PROVINCIA PICHINCHA*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24178/1/TTS1129.pdf>
- Parra, H. (2016). *Red Geomatica*. Obtenido de [http://redgeomatrica.rediris.es/redlatingeo/2015/HUMBERTO\\_PARRA\\_CARDENAS\\_V-2.pdf](http://redgeomatrica.rediris.es/redlatingeo/2015/HUMBERTO_PARRA_CARDENAS_V-2.pdf)
- Rivas Medina, A. (2014). *Determinación del período de recurrencia y magnitud máxima para el control de*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/279205623\\_Determinacion\\_el\\_periodo\\_de\\_recurrencia\\_y\\_magnitud\\_maxima\\_para\\_el\\_control\\_de\\_las\\_estructuras\\_en\\_el\\_rango\\_elastico\\_ante\\_un\\_sismo\\_asociado\\_a\\_las\\_fallas\\_inversas\\_de\\_Quito](https://www.researchgate.net/publication/279205623_Determinacion_el_periodo_de_recurrencia_y_magnitud_maxima_para_el_control_de_las_estructuras_en_el_rango_elastico_ante_un_sismo_asociado_a_las_fallas_inversas_de_Quito)
- TRUJILLO, C., OSPINA, R., & PARRA, H. (agosto de 2010). *Redalyc. The earthquakes: a natural latent threat*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84917249056.pdf>
- Yepez, F., Barbat, A. H., & Canas, J. A. (1995). *Researchgate, Monografía de Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Alex-Barbat/publication/271586771\\_Riesgo\\_peligrosidad\\_y\\_vulnerabilidad\\_sismica\\_de\\_edificios\\_de\\_mamposteria/links/54cd0ae60cf29ca810f7456b/Riesgo-peligrosidad-y-vulnerabilidad-sismica-de-edificios-de-mamposteria.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alex-Barbat/publication/271586771_Riesgo_peligrosidad_y_vulnerabilidad_sismica_de_edificios_de_mamposteria/links/54cd0ae60cf29ca810f7456b/Riesgo-peligrosidad-y-vulnerabilidad-sismica-de-edificios-de-mamposteria.pdf)

# ANEXOS

## Figura 41

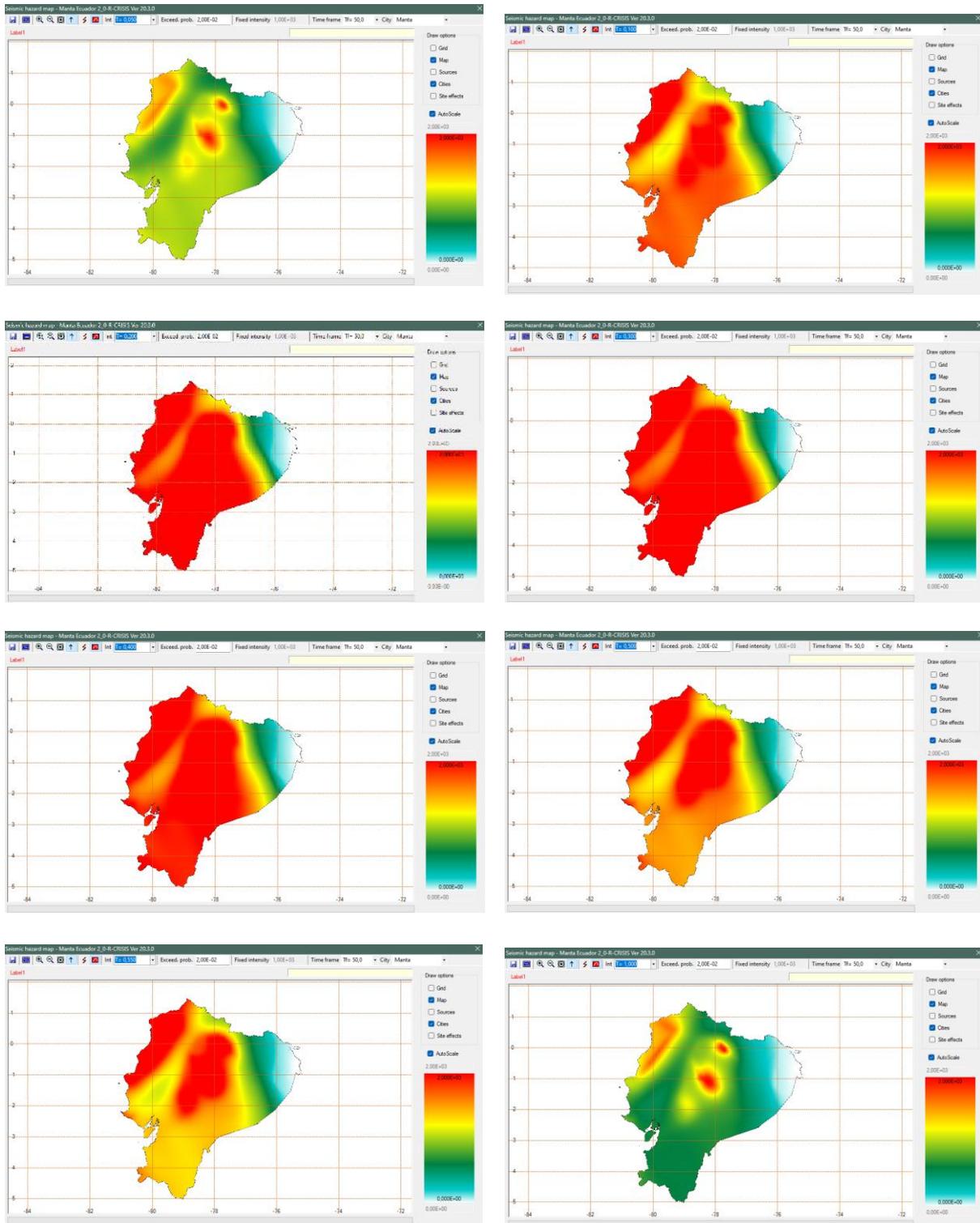
Mapas de zonificación sísmica de Manta  $Tr=475$  años para diferentes periodos.



Fuente: R-CRISIS.

**Figura 42**

*Mapas de zonificación sísmica de Manta  $T_r=2475$  años para diferentes periodos.*



Fuente: R-CRISIS.

**Tabla 16***Parámetros geométricos de las fuentes sismogénicas del Ecuador.*

<b>Fuente</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Tipo de Fuente</b>
<b>Yaquina Shallow</b>	-78,749	3,974	10	<b>INTERFASE</b>
	-78,672	3,984	17,6	
	-78,751	3,821	35	
	-78,847	3,656	33	
	-78,948	3,417	33	
	-79,027	3,261	26,9	
	-79,271	2,905	33	
	-79,417	2,616	19,1	
	-79,448	2,579	33	
	-79,66	2,279	33	
	-79,733	2,142	10	
	-79,886	1,906	33	
	-79,984	1,759	33	
	-80,155	1,39	17	
	-80,809	1,795	33	
	-80,169	2,814	15	
	-79,303	3,522	33	
<b>Esmeralda</b>	-78,672	3,984	17,6	<b>INTERFASE</b>
	-78	4	35	
	-77,37	3,995	0	
	-77,8	3,4	0	
	-77,872	3,254	33	
	-77,981	3,047	0	
	-78,387	2,338	33	
	-78,525	2,036	33	
	-78,983	1,078	33	
	-79,234	0,617	6	
	-79,924	-0,929	52,8	
	-80,259	-0,867	10,8	
	-80,524	-0,761	12	
	-80,596	-0,726	20	
	-80,799	-0,644	33	
	-81,092	-0,459	9,8	
	-80,155	1,39	17	
-79,984	1,759	33		
-79,886	1,906	33		
-79,733	2,142	10		
-79,66	2,279	33		
-79,448	2,579	33		

	-79,417	2,616	19,1	
	-79,271	2,905	33	
	-79,027	3,261	26,9	
	-78,948	3,417	33	
	-78,847	3,656	33	
	-78,751	3,821	35	
	-81,092	-0,459	9,8	
	-80,799	-0,644	33	
	-80,596	-0,726	20	
	-80,524	-0,761	12	
	-80,259	-0,867	10,8	
	-80,44	-1,265	12	
	-80,49	-1,408	12	
	-80,57	-1,528	20	
	-80,611	-2,21	33	
<b>La plata</b>	-80,606	-2,256	12	<b>INTERFASE</b>
	-80,617	-2,373	12	
	-80,796	-2,473	12	
	-80,97	-2,601	34	
	-81,257	-2,749	8,5	
	-81,755	-3,224	33	
	-81,603	-1,802	10	
	-81,338	-1,19	12	
	-81,275	-0,971	7	
	-81,165	-0,595	12	
	-81,755	-3,224	33	
	-81,257	-2,749	8,5	
	-80,97	-2,601	34	
	-80,796	-2,473	12	
	-80,617	-2,373	12	
<b>Golfo de Guayaquil</b>	-80,574	-2,778	12	<b>INTERFASE</b>
	-80,596	-3,244	33	
	-80,63	-3,5	29	
	-80,972	-3,912	26	
	-81,706	-4,576	33	
	-81,728	-3,849	33	
	-81,635	-3,459	34,8	
	-81,706	-4,576	33	
	-80,972	-3,912	26	
	-80,63	-3,5	29	
<b>Talara</b>	-80,658	-4,08	19,5	<b>INTERFASE</b>
	-80,6	-4,67	33	
	-80,363	-5,423	34	
	-80,16	-5,701	41,1	

	-81,721	-6,759	16,5	
	-81,826	-6,086	35	
	-82	-5,2	33	
	-78,525	2,036	33	
	-77,359	1,203	12	
	-77,847	0,899	26	
	-78,02	0,784	24	
	-78,729	0,377	9,5	
	-78,773	-0,131	14,4	
	-78,798	-0,28	11,2	
	-79,05	-1,67	10	
	-79,215	-2,026	20	
	-79,271	-2,269	19	
	-79,624	-2,426	19,2	
	-79,836	-2,486	26,6	
<b>BGN</b>	-80,029	-2,573	12	<b>INTERFASE</b>
	-80,286	-2,692	27	
	-80,574	-2,778	12	
	-80,617	-2,373	12	
	-80,606	-2,256	12	
	-80,611	-2,21	33	
	-80,57	-1,528	20	
	-80,49	-1,408	12	
	-80,44	-1,265	12	
	-80,259	-0,867	10,8	
	-79,924	-0,929	52,8	
	-79,234	0,617	6	
	-78,983	1,078	33	
	-80,574	-2,778	12	
	-80,286	-2,692	27	
	-80,029	-2,573	12	
	-79,836	-2,486	26,6	
	-79,624	-2,426	19,2	
<b>Puna</b>	-79,271	-2,269	19	<b>CORTICAL</b>
	-78,963	-2,255	12	
	-79,163	-2,484	19	
	-79,323	-2,586	12	
	-79,758	-2,897	16	
	-80,63	-3,5	29	
	-80,596	-3,244	33	
	-80,63	-3,5	29	
	-79,758	-2,897	16	
<b>BGS</b>	-79,323	-2,586	12	<b>INTERFASE</b>
	-79,163	-2,484	19	
	-78,963	-2,255	12	

	-78,732	-2,012	12,1	
	-78,393	-1,504	33	
	-78,541	-2,29	12	
	-78,605	-2,608	12	
	-78,614	-2,846	33	
	-78,152	-4,681	7,5	
	-78,075	-4,913	23,3	
	-77,984	-5,08	33	
	-77,741	-5,376	35,8	
	-77,276	-5,888	10	
	-77,191	-6,012	31,6	
	-78,639	-6,059	30,9	
	-78,992	-5,905	33	
	-80,16	-5,701	71,1	
	-80,363	-5,423	34	
	-80,6	-4,67	33	
	-80,658	-4,08	19,5	
	-77,359	1,203	12	
	-77,098	1,128	29,3	
	-77,435	0,652	9,5	
	-77,869	0,109	6	
<b>El Angel</b>	-78,39	0,28	10	<b>CORTICAL</b>
	-78,798	-0,28	11,2	
	-78,773	-0,131	14,4	
	-78,729	0,377	9,5	
	-78,02	0,784	24	
	-77,847	0,899	26	
	-77,098	1,128	29,3	
	-76,786	1,074	0	
<b>Chingual</b>	-77,273	0,543	10	<b>CORTICAL</b>
	-77,46	0,246	10	
	-77,667	0,039	12,9	
	-77,869	0,109	6	
	-77,435	0,652	9,5	
	-77,667	0,039	12,9	
	-77,46	0,246	10	
	-77,273	0,543	10	
	-77,148	0,404	6,6	
<b>Napo</b>	-77,073	0,178	24,9	<b>CORTICAL REVERSE</b>
	-77,214	-0,447	6,8	
	-77,3	-0,82	33	
	-77,401	-1,165	13,8	
	-77,782	-1,186	22,4	
	-77,876	-1,202	12	

	-77,872	-1,131	24	
	-77,775	-0,316	35	
	-77,692	-0,065	2,5	
	-77,869	0,109	6	
	-77,667	0,039	12,9	
	-77,692	-0,065	2,5	
	-77,775	-0,316	35	
	-77,872	-1,131	24	
<b>Cosanga</b>	-77,92	-1,5	17,8	<b>CORTICAL REVERSE</b>
	-78,393	-1,504	33	
	-78,292	-1,088	8,9	
	-78,255	-1,01	9	
	-78,257	-1,051	5,8	
	-78,067	-0,358	33	
	-78,056	-0,242	33	
	-78,798	-0,28	11,2	
	-78,39	0,28	10	
	-77,869	0,109	6	
<b>Quito Latacunga</b>	-78,056	-0,242	33	<b>CORTICAL REVERSE</b>
	-78,067	-0,358	33	
	-78,255	-1,01	9	
	-78,472	-1	2	
	-78,55	-1,089	33	
	-79,05	-1,67	10	
	-79,271	-2,269	19	
	-79,215	-2,026	20	
	-79,05	-1,67	10	
	-78,55	-1,089	33	
<b>Pallatanga</b>	-78,472	-1	2	<b>CORTICAL</b>
	-78,255	-1,01	9	
	-78,393	-1,504	33	
	-78,732	-2,012	12,1	
	-78,963	-2,255	12	
	-78,393	-1,504	33	
	-77,92	-1,5	17,8	
	-77,876	-1,202	12	
	-77,401	-1,165	13,8	
	-77,115	-1,347	29,8	
<b>Cutucú</b>	-77,137	-1,781	25,2	<b>CORTICAL REVERSE</b>
	-77,129	-2,185	18,0	
	-77,114	-2,324	33	
	-77,134	-3,178	17,9	
	-77,26	-3,968	11,82	
	-77,563	-4,992	18,7	
	-78,075	-4,913	23,3	

	-78,152	-4,681	7,5	
	-78,614	-2,846	33	
	-78,075	-4,913	23,3	
	-77,563	-4,992	18,7	
	-77,26	-3,968	11,82	
	-76,512	-5,176	19,3	
	-76,124	-5,765	21,1	
<b>Moyobamba</b>	-75,916	-6,067	29,4	<b>CORTICAL REVERSE</b>
	-76,732	-6,018	28,1	
	-77,044	-6,012	34,7	
	-77,191	-6,012	31,6	
	-77,276	-5,888	10	
	-77,741	-5,376	26,8	
	-77,984	-5,08	33	
	-77,37	3,995	35	
	-75,438	3,928	68	
<b>Caldas cluster</b>	-75,564	3,717	48,9	<b>INTRAPLACA</b>
	-76,617	2,211	57,9	
	-78,525	2,036	68	
	-77,922	2,977	66	
	-77,852	3,078	65,7	
	-78,525	2,036	68	
	-76,617	2,211	57,9	
	-77,314	1,002	51	
	-77,605	0,469	36,4	
	-77,869	0,109	41	
	-78,056	-0,242	68	
	-78,296	-0,655	41,8	
	-78,459	-1,02	36,6	
<b>Sub Volcanic ARC</b>	-78,597	-1,293	68,2	<b>INTRAPLACA</b>
	-79,728	-1,903	66,4	
	-80,005	-2,104	49	
	-80,568	-2,377	49	
	-80,577	-1,996	55,9	
	-80,57	-1,528	55	
	-80,49	-1,408	47	
	-80,259	-0,867	45,8	
	-79,924	-0,929	87,8	
	-79,234	0,617	41	
	-78,983	1,078	68	
	-80,568	-2,377	49	
	-80,112	-2,133	55,5	
<b>Loja</b>	-80,005	-2,104	49	<b>INTRAPLACA</b>
	-78,6	-5,19	68	
	-78,615	-5,913	63,4	

	-78,74	-5,884	68,7	
	-79,642	-5,906	68	
	-80,16	-5,701	91,1	
	-80,363	-5,423	69	
	-80,596	-4,756	68	
	-80,6	-4,67	68	
	-80,625	-4,425	89,5	
	-80,658	-4,08	54,5	
	-80,63	-3,5	64	
	-76,583	-2,808	172,8	
	-75,347	-2,619	158,4	
	-75,185	-3,763	162,6	
	-75,135	-5,364	173,3	
<b>Loreto</b>	-74,944	-6,019	152,8	<b>INTRAPLACA</b>
	-75,916	-6,067	159,4	
	-75,9	-5,4	163	
	-75,892	-4,925	173	
	-76,118	-4,115	157	
	-79,728	-1,903	161,4	
	-78,597	-1,293	163,2	
	-78,338	-1,181	140,8	
	-78,275	-1,152	130,6	
	-78,036	-1,106	163	
	-77,513	-0,995	150,9	
<b>Puyo</b>	-75,621	-1,931	282,5	<b>INTRAPLACA</b>
	-75,347	-2,619	158,4	
	-76,583	-2,808	262,8	
	-77,039	-2,277	140	
	-77,712	-2,143	142	
	-78,234	-2,041	151,8	
	-78,912	-1,919	134,3	
	-79,485	-1,865	146	
	-80,005	-2,104	114	
	-79,728	-1,903	131,4	
	-79,485	-1,865	116	
	-78,912	-1,919	104,3	
	-78,234	-2,041	121,8	
	-77,712	-2,143	112	
<b>Morona Santiago</b>	-77,039	-2,277	110	<b>INTRAPLACA</b>
	-76,583	-2,808	132,8	
	-76,118	-4,115	127	
	-75,892	-4,925	130	
	-75,9	-5,4	130	
	-75,916	-6,067	129,4	
	-78,615	-5,913	128,4	

	-78,6	-5,19	130
--	-------	-------	-----

Nota. Contiene la geometría de cada fuente sismogénica modelada en el análisis.

Fuente: IGEPN.