

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



**INFORME DE TESIS**

**“INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y  
PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO  
SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA”**

**PARA OPTAR:**

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

Bach. Ever Rudy, ANCCO HUANACUNI

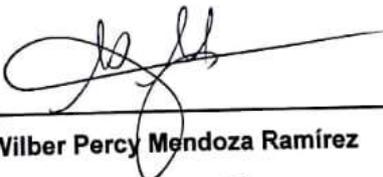
TACNA – PERÚ

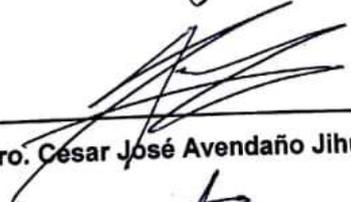
2018

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**

**Tesis**  
**"INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y**  
**PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO**  
**SÍSMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA"**

Tesis sustentada y aprobada el 04 de Diciembre del 2018; estando el jurado calificador integrado por:

**PRESIDENTE:**   
**Mtro. Wilber Percy Mendoza Ramírez**

**SECRETARIO:**   
**Mtro. Cesar José Avendaño Jihuallanga**

**VOCAL:**   
**Ing. Cesar Julio Cruz Espinoza**

**ASESOR:**   
**Mtro. Edgar Hipólito Chaparro Quispe**

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo Ever Rudy Ancco Huanacuni, en calidad de: Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil en la a Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 75676732

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor de la tesis titulada:  
"INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA"  
la misma que presento para optar:  
Título Profesional de Ingeniero Civil.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la Tesis, libro y/o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi

acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 04 de Diciembre del 2018



Ever Rudy Ancco Huanacuni

75676732

**DEDICATORIA:**

*A Dios, por darme el gran privilegio de poder ser hijo  
suyo y permitir que llegue hasta este punto de mi vida,  
además de darme la gran bendición de una profesión, así  
como el culminar este objetivo.*

*A mis padres Jimmy y Zenaida, por su apoyo,  
consejos, comprensión, amor y ayuda en los momentos  
difíciles, para ellos con todo mi amor y gratitud.*

*A mi hermana Nashely, por estar siempre a mi lado,  
quien me motiva a seguir adelante.*

*A mis amigos, con quienes tuve el agrado de compartir  
una formación profesional maravillosa: Rosali,  
Kimberly, Dulmis, Lorin, Glenda, Lizbeth,  
Steven, Jorge, Eduardo y Gustavo.*

*"El hierro se pule con el hierro,  
y el hombre se pule en el trato con su prójimo."  
Proverbios 27:17 (RVA)*

**AGRADECIMIENTOS:**

A Dios, “dando siempre gracias por todo al Dios y Padre, en el nombre de nuestro Señor Jesucristo”. Efesios 5:20 Reina-Valera 1960 (RVR1960)

A la Universidad Privada de Tacna, porque en sus aulas, recibimos el conocimiento intelectual y humano de cada uno de los docentes de la facultad de ingeniería.

Especial agradecimiento a mi asesor Mtro. Edgar Hipólito Chaparro Quispe por su esfuerzo, sus conocimientos y su motivación, ellos han sido fundamentales para la elaboración de esta Tesis.

A mis maestros de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil por su amistad y apoyo, resaltando el empeño que transmitieron en el desarrollo de la formación profesional de toda la promoción de egresados 2017-I. Fueron mis guías y son mi ejemplo. Tengo la plena seguridad que en estas aulas seguirán formándose dignos profesionales en la ingeniería, dejando en alto el nombre de nuestra Alma Mater.

## ÍNDICE GENERAL

|   | Pág. |
|---|------|
| DEDICATORIA: .....  | I    |
| AGRADECIMIENTOS:.....   | II   |
| ÍNDICE GENERAL .....  | III  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | VI   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | IX   |
| ÍNDICE DE ANEXOS.....   | XIII |
| RESUMEN.....  | XIV  |
| ABSTRACT .....  | XV   |
| CAPITULO I.....   | 1    |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                      | 1    |
| 1.1.  DESCRIPCION DEL PROBLEMA .....                                  | 1    |
| 1.2.  FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....                                   | 2    |
| 1.2.1.  FORMULACIÓN DEL PROBLEMA PRINCIPAL: .....                     | 2    |
| 1.2.2.  FORMULACIÓN DE LOS PROBLEMAS ESPECÍFICOS:.....                | 2    |
| 1.3.  JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....                                | 2    |
| 1.3.1.  JUSTIFICACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA CIENTÍFICO .....        | 2    |
| 1.3.2.  JUSTIFICACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA SOCIAL.....             | 3    |
| 1.4.  OBJETIVOS .....   | 3    |
| 1.4.1.  OBJETIVO GENERAL.....   | 3    |
| 1.4.2.  OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                    | 3    |
| 1.5.  FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....                               | 3    |
| 1.5.1.  HIPÓTESIS PRINCIPAL.....                                      | 3    |
| 1.5.2.  HIPÓTESIS SECUNDARIAS.....                                    | 4    |
| CAPITULO II.....  | 5    |
| MARCO TEÓRICO .....   | 5    |
| 2.1.  ANTECEDENTES DEL ESTUDIO .....                                  | 5    |
| 2.1.1.  A NIVEL INTERNACIONAL.....                                    | 5    |
| 2.1.2.  A NIVEL NACIONAL.....   | 6    |
| 2.2.  BASES TEÓRICAS .....  | 8    |
| 2.2.1.  SISMOTECTÓNICA .....  | 8    |
| 2.2.2.  SISMOLOGÍA REGIONAL.....                                      | 11   |
| 2.2.3.  FALLAS.....   | 13   |
| 2.2.4.  CLASIFICACIÓN DE SISMOS TECTÓNICOS SEGÚN SU<br>UBICACIÓN..... | 16   |
| 2.2.5.  ONDAS SÍSMICAS.....   | 18   |
| 2.2.6.  ONDAS DE CUERPO.....  | 18   |
| 2.2.7.  ONDAS SUPERFICIALES.....                                      | 20   |

|                          |  |    |
|--------------------------|--|----|
| 2.2.8.                   | PARÁMETROS DEL TAMAÑO DE UN SISMO .....  | 21 |
| 2.2.9.                   | INTENSIDAD SÍSMICA .....   | 21 |
| 2.2.10.                  | MAGNITUD SÍSMICA.....  | 22 |
| 2.3.                     | PELIGRO SÍSMICO.....   | 26 |
| 2.3.1.                   | MÉTODOS PARA EVALUAR LA PELIGROSIDAD.....  | 27 |
| 2.3.2.                   | FUENTES SÍSMICAS.....  | 30 |
| 2.3.3.                   | RECURRENCIA SÍSMICA.....   | 31 |
| 2.3.4.                   | LEYES DE ATENUACIÓN.....   | 32 |
| 2.4.                     | ESPECTRO NORMATIVO DE DISEÑO SEGÚN LA NORMA TÉCNICA<br>E.030 "DISEÑO SISMORRESISTENTE" DEL PERÚ.....     | 34 |
| 2.5.                     | ESPECTRO NORMATIVO SEGÚN LA MINIMUM DESIGN LOADS FOR<br>BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES, ASCE/SEI 7 ..... | 36 |
| 2.6.                     | DEFINICION DE TERMINOS .....   | 38 |
| CAPITULO III.....        |  | 39 |
| MARCO METODOLÓGICO ..... |  | 39 |
| 3.1.                     | TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACION .....  | 39 |
| 3.1.1.                   | TIPO DE INVESTIGACIÓN .....  | 39 |
| 3.1.2.                   | DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....  | 39 |
| 3.1.3.                   | UNIDADES DE ESTUDIO .....  | 39 |
| 3.2.                     | POBLACIÓN Y MUESTRA .....  | 40 |
| 3.2.1.                   | POBLACIÓN.....   | 40 |
| 3.2.2.                   | MUESTRA.....   | 40 |
| 3.2.3.                   | CRITERIOS DE SELECCIÓN.....  | 40 |
| 3.3.                     | TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....  | 42 |
| 3.3.1.                   | PROCEDIMIENTO .....  | 42 |
| 3.4.                     | TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LOS DATOS.....  | 42 |
| 3.5.                     | PROCESAMIENTO, Y ANÁLISIS DE DATOS .....   | 42 |
| 3.6.                     | OPERACIONALIZACION DE VARIABLES.....   | 43 |
| 3.7.                     | INSTRUMENTOS DE PROCESAMIENTO DE DATOS .....   | 45 |
| CAPITULO IV .....        |  | 48 |
| DESARROLLO .....         |  | 48 |
| 4.1.                     | UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL LUGAR DE ANÁLISIS .....   | 48 |
| 4.2.                     | SISMICIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO. ....   | 48 |
| 4.3.                     | HOMOGENIZACIÓN DE DATOS: .....   | 51 |
| 4.4.                     | EVALUACION DE FUENTES SISMOGENICAS.....  | 52 |
| 4.4.1.                   | EVALUACIÓN DE FUENTES SISMOGÉNICAS PARA EL ÁREA DE<br>ESTUDIO.....                                       | 61 |
| 4.5.                     | LEYES DE ATENUACIÓN UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DEL<br>PELIGRO SÍSMICO.....                              | 65 |
| 4.5.1.                   | MODELO DE ATENUACIÓN SÍSMICA (Youngs, Chiou, Silva, &<br>Humphrey, 1997) .....                           | 66 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.5.2. MODELO DE ATENUACIÓN SÍSMICA (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997) ..... | 68  |
| 4.6. ANÁLISIS DE LA COMPLETITUD DE LA MUESTRA SÍSMICA .....                               | 70  |
| 4.7. RELACIÓN GUTENBERG-RICHTER .....   | 71  |
| CAPITULO V .....  | 73  |
| RESULTADOS .....  | 73  |
| 5.1. PELIGROSIDAD SÍSMICA DETERMINISTA .....  | 73  |
| 5.1.1. LEY DE ATENUACIÓN DE (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997)<br>74                |     |
| 5.1.2. ESPECTRO NORMATIVO SEGÚN LA NORMA DE DISEÑO SISMORRESISTENTE E-030 .....           | 75  |
| 5.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL PELIGRO SÍSMICO DETERMINÍSTICO .....                | 78  |
| 5.2. PELIGROSIDAD SÍSMICA PROBABILÍSTICA .....  | 78  |
| 5.2.1. ANÁLISIS DE LA COMPLETITUD DE LA MUESTRA SÍSMICA EN LAS ZONAS SELECCIONADAS .....  | 78  |
| 5.2.2. RELACIÓN GUTENBERG-RICHTER .....   | 95  |
| 5.2.3. PELIGROSIDAD SÍSMICA PROBABILÍSTICA EN EL CRISIS 2015 VER.4.198                    |     |
| CAPÍTULO VI .....   | 113 |
| DISCUSIÓN .....   | 113 |
| 6.1. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....   | 113 |
| CONCLUSIONES .....  | 117 |
| RECOMENDACIONES .....   | 118 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 119 |
| ANEXOS .....  | 121 |
| MATRIZ DE CONSISTENCIA .....  | 142 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 3. 1</b> Matriz de operacionalización de variables. Fuente: (Elaboración Propia).<br>.....   | 43 |
| <b>Tabla 3.2</b> Formato de procesamiento de datos para el registro de eventos sísmicos por intervalo de tiempo. Fuente: (Elaboración propia). .....                                | 45 |
| <b>Tabla 3.3</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 46 |
| <b>Tabla 3.4</b> Resumen del análisis de completitud para las fuentes sismogénicas de interés. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 46 |
| <br>  |    |
| <b>Tabla 4.1</b> Coordenadas geográficas de la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).        48   |    |
| <b>Tabla 4.2</b> Ubicación geográfica de las fuentes sismogénicas interface. Fuente: (SENCICO, 2016). .....   | 53 |
| <b>Tabla 4.3</b> Ubicación geográfica de las fuentes sismogénicas Interplaca. Fuente: (SENCICO, 2016). .....  | 54 |
| <b>Tabla 4.4</b> Ubicación geográfica de las fuentes sismogénicas superficiales. Fuente: (SENCICO, 2016). .....   | 56 |
| <b>Tabla 4.5</b> Coeficientes para la ley de atenuación Youngs et al en 1997. Fuente: (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997). .....   | 67 |
| <b>Tabla 4.6</b> Coeficientes para la ley de atenuación Youngs et al en 1997. Fuente: (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997). .....   | 67 |
| <b>Tabla 4.7</b> Coeficientes para la ley de atenuación de ordenadas espectrales en roca según Sadigh et al. (1997). Fuente: (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997). ..... | 68 |
| <b>Tabla 4.8</b> Coeficientes para la ley de atenuación de ordenadas espectrales en roca según Sadigh et al. (1997). Fuente: (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997). ..... | 69 |
| <br>  |    |
| <b>Tabla 5.1</b> Valores del espectro determinístico para la ley de atenuación de Youngs, para el sismo con magnitud 6.9 Mw en roca. Fuente: (Elaboración propia). .....            | 74 |
| <b>Tabla 5.2</b> Valores del espectro determinístico para la ley de atenuación de Youngs, para el sismo con magnitud 6.9 Mw en suelo. Fuente: (Elaboración propia). .....           | 74 |
| <b>Tabla 5.3</b> Registro de eventos sísmicos por intervalo de tiempo. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 79 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 5.4</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 5. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 80  |
| <b>Tabla 5.5</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 5. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 81  |
| <b>Tabla 5.6</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 11. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 83  |
| <b>Tabla 5.7</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 11. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 84  |
| <b>Tabla 5.8</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 12. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 86  |
| <b>Tabla 5.9</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 12. Fuente: (Elaboración propia) .....  | 87  |
| <b>Tabla 5.10</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 19. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 89  |
| <b>Tabla 5.11</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 19. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 90  |
| <b>Tabla 5.12</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 24. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 92  |
| <b>Tabla 5.13</b> Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 24. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 93  |
| <b>Tabla 5.14</b> Resumen del análisis de completitud para las fuentes sismogénicas de interés. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 95  |
| <b>Tabla 5.15</b> Resumen de los valores de la relación Gutenberg Richter. Fuente: (Elaboración propia).....  | 98  |
| <b>Tabla 5.16</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Tacna, Gregorio Albarracín y Alto de la Alianza. Fuente: (Elaboración propia). ..... | 105 |
| <b>Tabla 5.17</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Ciudad Nueva, Pocollay y Calana. Fuente: (Elaboración propia).....                   | 106 |
| <b>Tabla 5.18</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Ilabaya, Pachia y Palca. Fuente: (Elaboración propia). .....                         | 107 |
| <b>Tabla 5.19</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Tarata, Susapaya y Sitajara. Fuente: (Elaboración propia).....                       | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 5.20</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Ticaco, Chucatamani y Tarucachi. Fuente: (Elaboración propia).....           | 109 |
| <b>Tabla 5.21</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Estique Pamapa, Estique Pueblo y Camilaca. Fuente: (Elaboración propia)..... | 110 |
| <b>Tabla 5.22</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Quilahuani, Curibaya y Huanuara. Fuente: (Elaboración propia).....           | 111 |
| <b>Tabla 5.23</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Locumba e Ite. Fuente: (Elaboración propia).<br>.....                        | 112 |
| <br>  |     |
| <b>Tabla 6.1</b> Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 9475 años en el distrito de Pocollay. Fuente: (Elaboración propia). ....                                    | 114 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1</b> Principales placas tectónicas de Sudamérica. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).....   | 8  |
| <b>Figura 2.2</b> Límite de placa divergente situados a lo largo de las crestas de las dorsales oceánicas. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005). ....  | 9  |
| <b>Figura 2.3</b> Límite de placa en convergencia Océano-Continente. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).....   | 10 |
| <b>Figura 2.4</b> Límite de falla transformante. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).....   | 10 |
| <b>Figura 2.5</b> Unidades estructurales de Perú. Fuente: (Elaboración propia).....   | 13 |
| <b>Figura 2.6</b> Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla Inversa. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).....  | 14 |
| <b>Figura 2.7</b> Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla Normal. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).....   | 15 |
| <b>Figura 2.8</b> Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla Transcurrente. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005). ....   | 15 |
| <b>Figura 2.9</b> Tipos de sismos según su ubicación. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).<br>.....   | 17 |
| <b>Figura 2.10</b> Ondas Primarias. Fuente: (Elaboración propia).....   | 19 |
| <b>Figura 2.11</b> Ondas Secundarias. Fuente: (Elaboración propia). ....  | 19 |
| <b>Figura 2.12</b> Ondas Rayleigh. Fuente: (Elaboración propia). ....   | 20 |
| <b>Figura 2.13</b> Ondas Love. Fuente: (Elaboración propia). ....   | 21 |
| <b>Figura 2.14</b> Proceso para el análisis del peligro sísmico determinístico. Fuente: Adaptado (Kramer, 1996). ....   | 28 |
| <b>Figura 2.15</b> Proceso para el análisis del peligro sísmico probabilístico. Fuente: Adaptado (Kramer, 1996). ....   | 29 |
| <b>Figura 2.16</b> Ejemplos de distintas geometrías de fuentes sísmicas. Fuente: Adaptado (Kramer, 1996).....   | 30 |
| <b>Figura 2.17</b> Relación de recurrencia de Gutenberg y Richter. Fuente: (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004). ....   | 32 |
| <b>Figura 2.18</b> Mapa de zonificación sísmica con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. (TR=475 años). Fuente: (Ministerio de Vivienda Construcción y saneamiento, 2018). .... | 34 |
| <b>Figura 2.19</b> Forma del espectro de respuesta de diseño Fuente: (ASCE/SEI 7, 2016)<br>.....  | 37 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 3.1</b> Eventos sísmicos en todo el sector de América del Sur en el periodo 1965 hasta Mayo del 2018. Fuente: (Elaboración Propia). .....                       | 41 |
| <b>Figura 4.1</b> División Política de la región de Tacna, sus cuatro provincias. Fuente: (Elaboración propia).....   | 48 |
| <b>Figura 4.2</b> Parámetros de búsqueda para el área de estudio. Fuente: (Servicio Geológico de los Estados Unidos). .....   | 49 |
| <b>Figura 4.3</b> Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018. Fuente: (Elaboración propia).....  | 50 |
| <b>Figura 4.4</b> Diagrama de flujo de decisión para la homogenización de datos frente a magnitudes sísmicas. Fuente: (Elaboración propia).....                           | 52 |
| <b>Figura 4.5</b> Mapa de fuentes sismogénicas de Interface. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 58 |
| <b>Figura 4.6</b> Mapa de fuentes sismogénicas de Interplaca. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 59 |
| <b>Figura 4.7</b> Mapa de fuentes sismogénicas Superficiales. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 60 |
| <b>Figura 4.8</b> Eventos sísmicos en la fuente sismogénica de Interface (F5) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).....                                  | 61 |
| <b>Figura 4.9</b> Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interface (F5) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).....                               | 61 |
| <b>Figura 4.10</b> Eventos sísmicos en las fuentes sismogénicas de Interplaca (F11, F12, F19) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).....                  | 62 |
| <b>Figura 4.11</b> Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interplaca (F11) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia). .....                          | 62 |
| <b>Figura 4.12</b> Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interplaca (F12) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia). .....                          | 63 |
| <b>Figura 4.13</b> Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interplaca (F19) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia). .....                          | 63 |
| <b>Figura 4.14</b> Eventos sísmicos en la fuente sismogénica superficial (F24) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).....                                 | 64 |
| <b>Figura 4.15</b> Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica superficial (F24) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).....                              | 64 |
| <b>Figura 4.17</b> Resumen del plan de trabajo. Fuente: (Elaboración Propia).....   | 72 |
| <br>  |    |
| <b>Figura 5.1</b> Sismo del 25 de febrero de 1983 con una magnitud de 6.9 Mw en la división política distrital de la región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia). ..... | 73 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 5.2</b> Espectros sísmicos determinísticos para la ley de atenuación de Youngs en roca y suelo. Fuente: (Elaboración propia).....                | 75 |
| <b>Figura 5.3</b> Espectro sísmico según la norma técnica Sismoresistente E-030 en el software ETABS 2016. Fuente: (Elaboración propia). ....              | 75 |
| <b>Figura 5.4</b> Espectro sísmico según la norma técnica Sismoresistente E-030 en el software ETABS 2016. Fuente: (Elaboración propia).....               | 76 |
| <b>Figura 5.5</b> Comparación del espectro sísmico determinístico según ley de atenuación de Youngs para roca y E-030. Fuente: (Elaboración propia).....   | 77 |
| <b>Figura 5.6</b> Comparación del Espectro Sísmico Determinístico según Ley de Atenuación de Youngs para Suelo y E-030. Fuente: (Elaboración propia). .... | 77 |
| <b>Figura 5.7</b> Analisis de la completitud para la Fuente 5. Fuente: (Elaboración propia). ....  | 82 |
| <b>Figura 5.8</b> Analisis de la completitud para la Fuente 11. Fuente: (Elaboración propia). ....   | 85 |
| <b>Figura 5.9</b> Analisis de la completitud para la Fuente 12. Fuente: (Elaboración propia). ....   | 88 |
| <b>Figura 5.10</b> Analisis de la completitud para la Fuente 19. Fuente: (Elaboración propia). ....  | 91 |
| <b>Figura 5.11</b> Analisis de la completitud para la Fuente 24. Fuente: (Elaboración propia). ....  | 94 |
| <b>Figura 5.12</b> Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 5 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).....                                      | 96 |
| <b>Figura 5.13</b> Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 11 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).....                                     | 96 |
| <b>Figura 5.14</b> Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 12 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).....                                     | 97 |
| <b>Figura 5.15</b> Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 19 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).....                                     | 97 |
| <b>Figura 5.16</b> Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 24 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).....                                     | 97 |
| <b>Figura 5.17</b> Crisis 2015 Ver 4.1 Software para el cálculo del peligro sísmico. Fuente: (Crisis 2015 Ver 4.1). ....                                   | 98 |
| <b>Figura 5.18</b> Mapa del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).....   | 99 |
| <b>Figura 5.19</b> Malla de puntos del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).....                                | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 5.20</b> Fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia). .....  | 100 |
| <b>Figura 5.21</b> Triangulación de las fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).....   | 100 |
| <b>Figura 5.22</b> Intensidades por cada ordenada espectral. del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).....   | 101 |
| <b>Figura 5.23</b> Sismicidad de las fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).....  | 101 |
| <b>Figura 5.24</b> Leyes de atenuación en las fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).....   | 102 |
| <b>Figura 5.25</b> Resultados del peligro sísmico del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia). .....  | 102 |
| <b>Figura 5.26</b> Mapa de aceleraciones máximas del suelo en la región de Tacna para un periodo estructural de 0.0 segundos en 495 años. Fuente: (Elaboración propia). .....   | 103 |
| <b>Figura 5.27</b> Mapa de aceleraciones máximas del suelo en la región de Tacna para un periodo estructural de 0.2 segundos en 4975 años. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 103 |
| <b>Figura 5.28</b> Mapa de aceleraciones máximas del suelo en la región de Tacna para un periodo estructural de 1.0 segundos en 4975 años. Fuente: (Elaboración propia). .....  | 104 |
| <br>  |     |
| <b>Figura 6.1</b> Superposición de espectros probabilísticos para el distrito de Pocollay de acuerdo al peligro sísmico. Fuente: (Elaboración propia).....  | 113 |
| <b>Figura 6.2</b> Comparación de las normativas E-030 (2018) y ASCE/SEI 7 asumiendo la peligrosidad sísmica en los parámetros de aceleración del movimiento (para la ASCE/SEI 7). Fuente: (Elaboración propia). ..... | 115 |
| <b>Figura 6.3</b> Superposición de espectros de aceleración sísmica para el distrito de Pocollay (escalado). Fuente: (Elaboración propia). .....  | 116 |

**ÍNDICE DE ANEXOS**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Anexo N° 1</b> Mapa de Isoaceleraciones en la región de Tacna con un periodo estructural $T=0$ segundos y un tiempo de retorno de 475 años.....    | 122 |
| <b>Anexo N° 2</b> Mapa de Isoaceleraciones en la región de Tacna con un periodo estructural $T=0.2$ segundos y un tiempo de retorno de 4975 años..... | 124 |
| <b>Anexo N° 3</b> Mapa de Isoaceleraciones en la región de Tacna con un periodo estructural $T=1.0$ segundo y un tiempo de retorno de 4975 años.....  | 126 |
| <b>Anexo N° 4</b> Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018 (Fuentes de interface).....                                     | 128 |
| <b>Anexo N° 5</b> Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018 (Fuentes de Interplaca).....                                    | 130 |
| <b>Anexo N° 6</b> Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018 (Fuentes superficiales).....                                    | 132 |
| <b>Anexo N° 7</b> Espectro normativo según la E-030 (sin sistema estructural). Fuente: (Elaboración propia).....                                      | 134 |
| <b>Anexo N° 8</b> Espectro normativo según la ASCE/SEI 7. Fuente: (Elaboración propia).<br>.....  | 136 |
| <b>Anexo N° 9</b> Espectro normativo según la E-030 (escalado). Fuente: (Elaboración propia).<br>.....  | 138 |
| <b>Anexo N° 10</b> Espectro normativo según la ASCE/SEI 7 (escalado). Fuente: (Elaboración propia).....   | 140 |

## RESUMEN

El peligro sísmico en la región de Tacna está estrechamente relacionado a su posición geográfica, debido a que se encuentra en una de las zonas sísmicas más activas del mundo. Los eventos sísmicos de gran intensidad ocurridos en esta región, han ocasionado la pérdida de vidas humanas, daños materiales y económicos. Bajo este concepto la confiabilidad estructural proporciona un campo de estudio para evaluar la importancia de las solicitaciones, la funcionabilidad, seguridad y durabilidad de las estructuras. Siendo los sismos en potencia, la principal amenaza para el análisis y diseño de estas estructuras. La presente investigación denominada "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA" establece un análisis de peligro sísmico para determinar espectros elásticos determinísticos y probabilísticos que, puedan representar la amenaza sísmica relacionada a dicha región. Teniendo como población de estudio los sismos registrados instrumentalmente desde el 01 de enero de 1965 hasta el 22 de mayo del 2018, comprendidos en el sur del Perú y norte de Chile. Siendo la principal fuente de información los catálogos sísmicos emitidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El resultado nos permitió inferir como es la atenuación de estos eventos sísmicos de una determinada magnitud a una determinada distancia, en base a un análisis determinístico y/o probabilístico, en cuyo caso este último es extrapolado con una determinada probabilidad anual de excedencia. Estableciendo de esta forma mapas de peligro sísmico en ordenadas espectrales de 0.0, 0.2 y 1.0 segundos de periodo estructural, exclusivos para la región de Tacna. Además de nuevos parámetros a tomar en cuenta para realizar un análisis sísmico estructural no convencional en dicha región.

**Palabras clave:** espectro, determinístico, probabilístico, atenuación, sismo, peligro, magnitud.

## ABSTRACT

The seismic hazard in the Tacna region is closely related to its geographical position, because it is located in one of the most active seismic zones in the world. The seismic events of great intensity occurred in this region, have caused the loss of human lives, material and economic damage. Under this concept the structural reliability provides a field of study to evaluate the importance of the stresses, the functionality, safety and durability of the structures. Being the potential earthquakes, the main threat for the analysis and design of these structures. The present investigation called "INFLUENCE OF DETERMINISTIC AND PROBABILISTIC SPECTERS FOR THE EVALUATION OF THE SEISMIC HAZARD IN STRUCTURES OF THE TACNA REGION" establishes a seismic hazard analysis to determine deterministic and probabilistic elastic spectra that may represent the seismic threat related to said region. Taking as a study population the earthquakes recorded instrumentally from January 1, 1965 to May 22, 2018, included in southern Peru and northern Chile. The main source of information is the seismic catalogs issued by the United States Geological Survey (USGS). The result allowed us to infer what is the attenuation of these seismic events of a given magnitude at a certain distance, based on a deterministic and / or probabilistic analysis, in which case the latter is extrapolated with a certain annual probability of exceedance. Establishing in this way seismic hazard maps in spectral ordinates of 0.0, 0.2 and 1.0 seconds of structural period, exclusive for the Tacna region. In addition to new parameters to take into account to perform a non-conventional structural seismic analysis in said region.

**Keywords:** spectrum, deterministic, probabilistic spectrum, attenuation, earthquake, hazard, magnitude.

## INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de todas las ciencias está involucrado la capacidad para el procesamiento de información y la veracidad con la que se sintetiza. Ya que, para lograr un determinado proceso o análisis de estudio, se debe recopilar una determinada cantidad de información que garantice su realidad, precisión y presentación; justificando de este modo su utilidad y aplicación.

La Región de Tacna ubicado el extremo sur occidental del Perú, entre las coordenadas geográficas  $16^{\circ}18'$  y  $18^{\circ}20'$  latitud sur y  $69^{\circ}28'$  y  $71^{\circ}02'$  de longitud oeste. Se encuentra en una de las zonas sísmicas más activas del mundo. Siendo los sismos en potencia, la principal amenaza para el análisis y diseño de estas estructuras. Distinguiendo esta necesidad se propone desarrollar en este trabajo de investigación un estudio basado espectros determinísticos y probabilísticos calculados mediante aceleraciones espectrales de sismos históricos. Y teniendo como resultado principal mapas que tengan definido la magnitud de la aceleración horizontal máxima (PGA) y aceleraciones asociados a distintos periodos estructurales para una cierta probabilidad de excedencia, en un determinado período de vida útil, que ayudara al diseño de obras civiles para proyectos en la Región de Tacna.

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El Riesgo sísmico presenta dos aspectos diferentes; uno científico y el otro económico, este último, aunque relacionado con el primero, excede las competencias tanto del sismólogo como del ingeniero. Dentro del aspecto científico existen, también dos puntos de vista, el del sismólogo, a quien le interesa la probabilidad de ocurrencia de un terremoto de ciertas características, y el del ingeniero a quien le interesa la probabilidad de que una estructura se comporte de una cierta forma bajo la acción de un terremoto dado. (Muñoz, 1989)

Para establecer la importancia del problema sísmico en el análisis de estructuras, a nivel mundial muchas normativas consideran factores adicionales de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo sísmico para el análisis de sus estructuras. Como la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles con el Instituto De Ingenieros Estructurales (ASCE/SEI) quienes han externado su preocupación por la aplicación de ingeniería sísmica basado en desempeño.

En el Perú, los estudios del peligro sísmico fueron iniciados por Casaverde y Vargas (1980) haciendo uso de datos de la red sísmica mundial para el periodo 1913-1976, siendo el trabajo realizado por Castillo y Alva (1993) con datos de la red sísmica mundial y de Ceresis para el periodo 1900-1991, el que tuvo una mayor aplicación en los estudios de ingeniería y en la norma de construcción sismorresistente aplicable en el Perú. Esta normativa peruana nace a partir de la publicación código estadounidense UBC (Uniform Building Code, 1997). Y a pesar de la existencia de nuevas actualizaciones realizadas en los años 2016 y 2018 no existen cambios significativos para la determinación del peligro sísmico. Debido a que aún se determina la demanda sísmica, en franjas de colores como se muestra en la Figura 2.18 (pág. 34). Este método ya es considerado obsoleto en normativas extranjeras como el de Estados Unidos, en donde aplican conceptos de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo sísmico en mapas de isoaceleraciones.

La Región de Tacna ubicado el extremo sur occidental del Perú, entre las coordenadas geográficas 16°18' y 18°20' latitud sur y 69°28' y 71°02' de longitud oeste. Se encuentra en una de las zonas sísmicas más activas del mundo debido a su posición geográfica. Los eventos sísmicos de gran intensidad ocurridos en esta región, han ocasionado la pérdida de vidas humanas, daños materiales y económicos. Bajo este concepto la confiabilidad estructural proporciona un campo de estudio para evaluar la importancia, funcionabilidad, seguridad y durabilidad de las estructuras ante la incertidumbre de amenazas existentes. Siendo los sismos en potencia, la principal amenaza para el análisis y diseño de estas estructuras.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA PRINCIPAL:**

- ¿Cómo determinar los espectros determinísticos y probabilísticos para la evaluación del peligro sísmico en estructuras de la región de Tacna?

### **1.2.2. FORMULACIÓN DE LOS PROBLEMAS ESPECÍFICOS:**

- ¿Cómo se establece la peligrosidad sísmica en la región de Tacna?
- ¿Por qué es necesario determinar espectros determinísticos y probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica para la región de Tacna?
- ¿Cuándo se justifica la peligrosidad sísmica para el análisis de estructuras en la región de Tacna?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

### **1.3.1. JUSTIFICACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA CIENTÍFICO**

El análisis sismo-resistente de toda estructura es quizás la más importante, porque de ella depende el éxito del diseño. Es la parte creativa de la ingeniería. Se decide en ella una estructura en función a sus cualidades, en tal sentido la instauración de espectros determinísticos y/o probabilísticos permitirá un análisis estructural dependiente de la zona y el riesgo sísmico al que se proyecta.

La investigación acerca de la peligrosidad sísmica en la región de Tacna, permitirá cuantificar la aceleración bajo condiciones probables de sismos. Esto podrá reducir el riesgo sísmico en las edificaciones propias de la zona, teniendo en cuenta los principios de la ingeniería estructural.

### **1.3.2. JUSTIFICACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA SOCIAL**

La identificación de la peligrosidad sísmica en toda la región de Tacna mediante mapas de Isoaceleraciones obtenidos en el proceso de esta investigación, permitirá el desarrollo de proyectos sociales, de emergencia, preventivos y de evaluación socio-económicos que pueden ser evaluados en cada distrito de la región de Tacna.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

- Determinar espectros determinísticos y probabilísticos para la evaluación del peligro sísmico en estructuras de la región de Tacna.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Establecer la peligrosidad sísmica en la región de Tacna.
- Determinar espectros determinísticos y probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica para la región de Tacna.
- Justificar la peligrosidad sísmica para el análisis de estructuras en la región de Tacna.

## **1.5. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS**

### **1.5.1. HIPÓTESIS PRINCIPAL**

- Es necesario determinar espectros determinísticos y probabilísticos para la evaluación del peligro sísmico en estructuras de la región de

Tacna, debido a que, con esta información los ingenieros civiles podrán realizar en sus proyectos, un análisis sísmico estructural con información propia de la zona.

### **1.5.2. HIPÓTESIS SECUNDARIAS**

- Establecer la peligrosidad sísmica, permitirá identificar focos de peligro sísmico, que necesiten una asistencia en particular para el análisis y diseño de estructuras en la región de Tacna.
- Determinar espectros determinísticos y probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica para la región de Tacna generará sollicitaciones propias de la zona para el análisis de estructuras.
- Para justificar la peligrosidad sísmica en el análisis de estructuras en la región de Tacna, será necesario evaluar las normativas que validen este tipo de investigación y esto constituirá un análisis sísmico no convencional para la región de Tacna.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

##### 2.1.1. A NIVEL INTERNACIONAL

###### ANTECEDENTE Nº 01

Norma técnica de cargas para diseño de edificios de los Estados Unidos

**Título:**

“MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES”

**Autor:**

Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles

**Resumen:**

Este documento es un código de diseño de los Estados Unidos; centrándose en los requisitos mínimos para el diseño estructural. Describe los medios para determinar las cargas de diseño incluyendo cargas muertas, vivas, suelos, inundaciones, tsunamis, nieve, lluvia, hielo atmosférico, terremotos, vientos e incendios, y cómo evaluar las combinaciones de estas.

###### ANTECEDENTE Nº 02

Trabajo de investigación

**Título:**

“LEY DE ATENUACIÓN DE ACELERACIÓN (PGA) Y ESCALAMIENTO DE FORMA ESPECTRAL SÍSMICA PARA QUERÉTARO, DEDUCIDOS POR ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS: APLICADA A GUERRERO-QUERÉTARO”

**Autor:**

Clemente Chávez, Alejandro

**Resumen:**

Este documento presenta una metodología de análisis y determinación de una ley de atenuación por trayectoria mediante regresiones lineales múltiples en función de las primeras señales sísmicas registradas en Querétaro. Partiendo del análisis de registros por trayectoria de tres sismos: dos eventos ocurridos durante el año 2009 y un tercero auxiliar ocurrido en 1993, además de otros 3 de menor magnitud del 2010 sólo con referencia en Querétaro. Además, se muestra una primera estimación, para obtener el espectro de respuesta basado en registros sísmicos del lugar, proporcionando una base para normar las construcciones de acuerdo a las condiciones locales, estudios no realizados a la fecha para Querétaro.

**2.1.2. A NIVEL NACIONAL****ANTECEDENTE Nº 03**

Trabajo de investigación

**Título:**

“DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE PELIGRO SÍSMICO UNIFORME PARA TACNA”

**Autor:**

Ortiz Salas, Carmen

**Resumen:**

En este trabajo, el espectro de peligro sísmico uniforme para Tacna se ha determinado a partir de un estudio de peligro sísmico el mismo que fue evaluado probabilísticamente con el método desarrollado por Cornell (1968). Este método probabilístico incorpora los efectos de todos los sismos de las fuentes sismogénicas considerando las características tectónicas en el entorno del sitio, los valores de magnitud máxima, la relación frecuencia-magnitud y las distancias al sitio medidas desde todos los puntos dentro de cada una de las fuentes, de esta forma se logra considerar la probabilidad de ocurrencia de diferentes sismos. Las aceleraciones así obtenidas no provienen de ningún sismo específico sino del efecto combinado de todos los sismos ubicados en las fuentes sismogénicas.

**ANTECEDENTE Nº 04**

Trabajo de investigación

**Título:**

“ESPECTROS DE PELIGRO SÍSMICO UNIFORME”

**Autor:**

Bolaños Luna, A. M., Monroy Concha, O. M

En este trabajo presenta una metodología para estimar la aceleración y las ordenadas espectrales asociados a un nivel de excedencia uniforme a lo largo del espectro. Se analizó la sismicidad del Perú, se actualizaron las fuentes sísmicas propuestas en trabajo anteriores, se empleó la magnitud momento ( $M_w$ ) y se usó por primera vez para todo el País una ley de atenuación que distinga sismos de subducción de interface e intraplaca.

**ANTECEDENTE Nº 05**

Trabajo de investigación

**Título:**

“OBTENCIÓN DEL FACTOR DE ZONA SÍSMICO "Z" MEDIANTE EL SOFTWARE CRISIS 2015 VER.4.1 EN LA CIUDAD DE HUÁNUCO 2017”

**Autor:**

Malpartida Pino, Kethny Justino

**Resumen:**

Esta investigación realiza un análisis de la región Huánuco de para obtener el factor de zona sísmica, con una información de datos sismológico disponibles hasta el 11 de mayo del 2017; y se utilizaron dos modelos de atenuación para ordenadas espectrales, las cuales hayan sido formuladas en base a procesos de subducción y reajuste tectónico. Una vez calculada la sismicidad de las fuentes sismogénicas, realizó la evaluación del peligro sísmico, y el cálculo del espectro uniforme de peligro en dicha región.

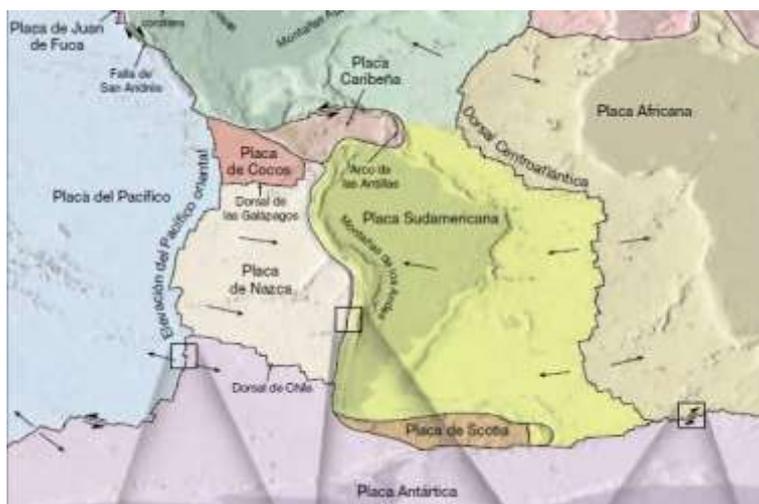
## 2.2. BASES TEÓRICAS

### 2.2.1. SISMOTECTÓNICA

Los sismos llamados tectónicos son aquellos producidos por rupturas de grandes dimensiones en la zona de contacto entre placas tectónicas. Según (Herraíz Sarachaga, 1997) la deformación del terreno y la acumulación de tensiones en la superficie de la Tierra está vinculada a la dinámica de la litosfera terrestre y, más en concreto, a la teoría de la tectónica de placas. Según ella, la litosfera está dividida en un conjunto de placas independientes que se desplazan arrastradas por las corrientes de convección de la astenosfera, con velocidades relativas de unos pocos centímetros al año. Se pueden distinguir unas seis placas se consideran principales. En todas ellas el interior es estable y los márgenes inestables.

#### 2.2.1.1. PLACAS TECTÓNICAS

La litósfera está dividida en seis placas continentales (Americana, Africana, Antártica, India-Australiana, Euroasiática y Pacífica) y alrededor de 17 placas subcontinentales (Nazca, Sudamericana, Cocos, etc.). Cada placa se desplaza horizontalmente con respecto a las placas adyacentes. La deformación relativa entre las placas ocurre únicamente en zonas cercanas a los bordes y puede ser lenta y continua (deformación asísmica) o puede ser esporádica en forma de sismos (deformación sísmica). Esto se puede apreciar en la Figura 2.1



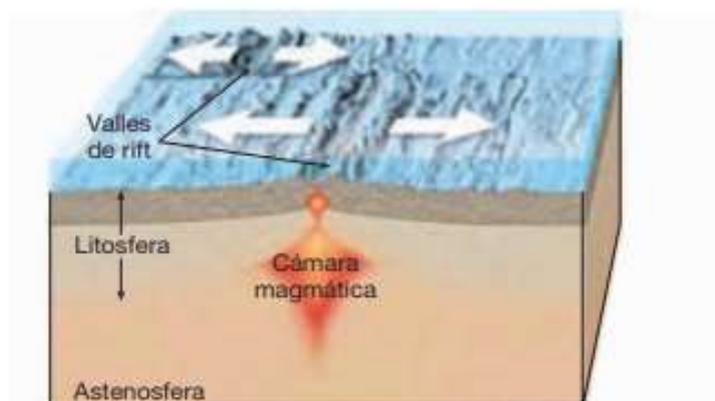
**Figura 2.1** Principales placas tectónicas de Sudamérica. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### 2.2.1.2. TIPOS DE LÍMITES EN LAS PLACAS

La comprensión de la dinámica terrestre asociado a la sismicidad está estrechamente relacionado al entendimiento de la tectónica de placas. Y para ello existen tres tipos de límites de placa: divergente, convergente y de transformación.

#### a) Límites divergentes (*di = aparte; vergere = moverse*)

También denominados límites constructivos o márgenes de extensión, donde dos placas tectónicas se desplazan en direcciones opuestas, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo suelo oceánico, como se aprecia en la Figura 2.2, esto hace posible la aparición de dorsales oceánicas y fosas tectónicas.

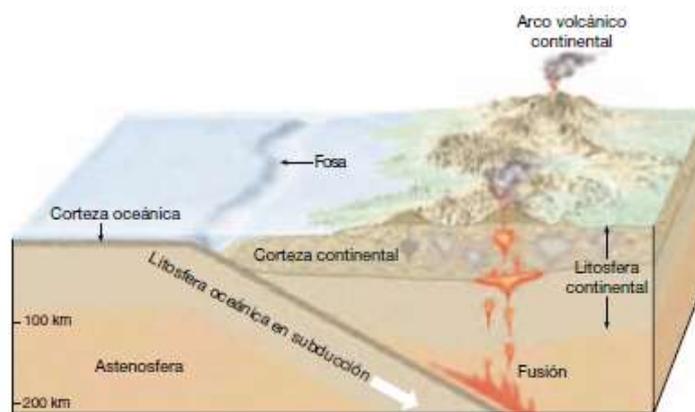


**Figura 2.2** Límite de placa divergente situados a lo largo de las crestas de las dorsales oceánicas. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

#### b) Límites Convergentes (*con = junto; vergere = moverse*)

Este límite se produce cuando dos placas se juntan provocando el descenso de la litosfera oceánica debajo de una placa superpuesta, que es finalmente reabsorbida en el manto, o posiblemente la colisión de dos bloques continentales para crear un sistema montañoso.(ver Figura 2.3) Se puede distinguir tres tipos de convergencia de placas:

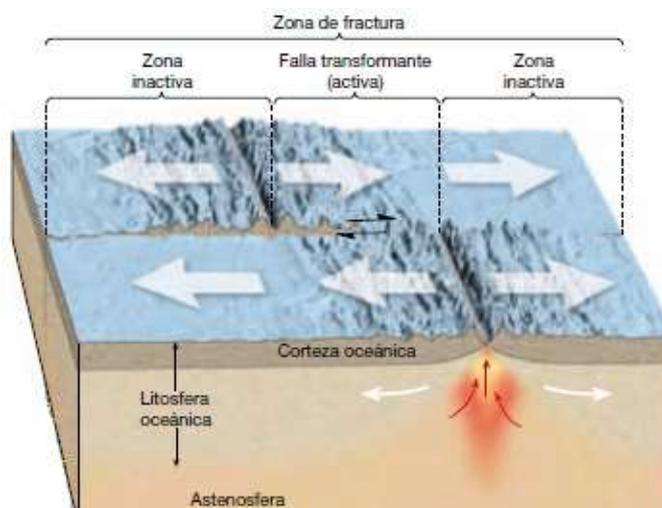
- Continental - Continental (Placa de la India y Euroasia),
- Oceánica - Continental (Placa de Nazca y Sudamérica)
- Oceánica - Oceánica (Placa de Nueva Guinea).



**Figura 2.3** Limite de placa en convergencia Océano-Continente. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

c) Límites de transformación (*trans = a través de; forma = forma*)

Los límites de transformación son conocidos también como deslizamientos horizontales donde dos placas se desplazan lateralmente una respecto de la otra sin la producción ni la destrucción de litosfera, a esto se le denomina efecto pasivo.



**Figura 2.4** Limite de falla transformante. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

En la Figura 2.4 se aprecia este tipo de límite. Identificados por diferencias en las mediciones magnéticas o por fallas visuales en la corteza terrestre. La Falla de San Andrés en California, Estados Unidos, es el ejemplo más famoso de este tipo de límite.

## 2.2.2. SISMOLOGÍA REGIONAL<sup>1</sup>

El borde occidental de América del Sur se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo. El Perú forma parte de esta región y su actividad sísmica más importante está asociada al proceso de subducción de la placa oceánica bajo la placa continental, generando terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia. Un segundo tipo de actividad sísmica está producida por las deformaciones corticales presentes a lo largo de la Cordillera Andina, con terremotos menores en magnitud y frecuencia. La distribución de la sismicidad en Perú, ha sido tema de diversos estudios utilizando datos telesísmicos y regionales a fin de estudiar la geometría de la subducción o bien para delinear las zonas de mayor deformación superficial en el interior del continente.

Los Andes son un claro ejemplo de cordillera formada como resultado del proceso de subducción de una placa oceánica bajo una continental. Esta cordillera se extiende a lo largo del continente Sudamericano, desde Venezuela hasta el Sur de Chile con una anchura que oscila entre 250 km en la región central de Perú y 500 km en la frontera Perú-Chile. En la Figura N° 5 se muestra un esquema de las principales unidades estructurales formadas como resultado de la evolución de esta cordillera. En esta figura y de izquierda a derecha se puede identificar las siguientes unidades: la franja costera (Z.C.), la Cordillera Occidental, la Cordillera Oriental, el Altiplano y la zona Subandina.

### a) La franja costera (Z.C.)

Es una zona estrecha de aproximadamente 40 km de ancho que se extiende de Norte a Sur y está constituida en su mayoría por suaves plegamientos volcánicos y rocas sedimentarias del Mesozoico. En la zona Sur, está formada por basamentos de rocas cristalinas fuertemente plegadas y sujetas a deformación desde el Precámbrico.

### b) La Cordillera Occidental.

Constituye el batolito plutónico andino de mayor volumen y continuo desde Venezuela hasta Tierra del Fuego en Chile. En Perú se distribuye de Norte a

---

<sup>1</sup> **Sismicidad y sismotectónica de Perú** [libro] / Aut. Hernando Johnny, TAVERA HUARACHE & Vicenta María Elisa, BUFORN PEIRÓ -1998. Pag. del N° 188-191

Sur paralelo a la línea de costa. La parte más elevada de esta cordillera (4200-4500 m) está formada por series del Mesozoico, más o menos plegadas y recubiertas de manera heterogénea por una capa volcánica del Cenozoico. Esta cordillera aumenta notablemente su anchura en la región Sur del Perú

c) El Altiplano

Se encuentra situada entre las cordilleras Occidental y Oriental. En la región Sur tiene un ancho de 200 km, extendiéndose hacia el Norte hasta 905 aproximadamente, en donde alcanza un ancho de 50 km y después desaparece. Esta unidad está formada por una serie de cuencas intramontañosas del Cenozoico que se prolongan hacia el altiplano boliviano. La zona Sur de esta unidad, está invadida por estructuras volcánicas activas del Terciario Superior.

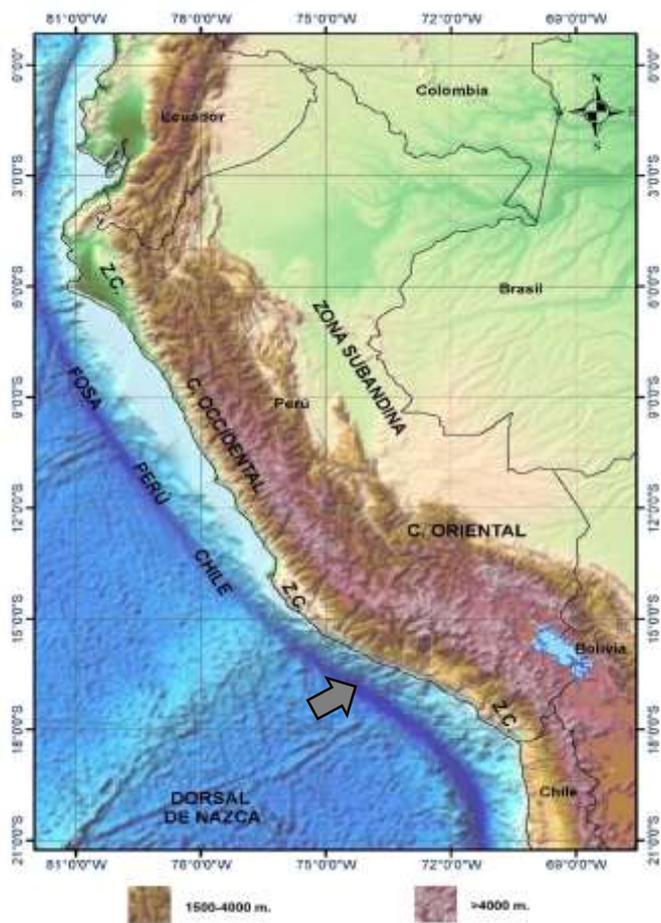
d) La Cordillera Oriental.

En promedio menos elevada que la Cordillera Occidental (3700-4000 m), corresponde principalmente a un extenso anticlinal, formado esencialmente por depósitos intrusivos del Precámbrico. En la región Sur, esta cordillera se curva en dirección E-W para luego continuar paralela a las unidades mencionadas anteriormente

e) La Zona Subandina

Esta es una zona de anchura variable, en donde se amortiguan las estructuras andinas. La zona Subandina se localiza entre la Cordillera Andina y la Llanura Amazónica y está formada por una cobertura de sedimentos del Mesozoico y Cenozoico, fuertemente afectadas por pliegues de gran longitud de onda.

Estas unidades, son el resultado de una tectónica activa puesta en evidencia por un alto índice de sismicidad y cuya principal fuente radica en el proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental.



**Figura 2.5** Unidades estructurales de Perú. Fuente: *(Elaboración propia)*.

En Figura 2.5 se aprecia la zona costera (Z.C.). La flecha indica la dirección de convergencia de las placas según Minster y Jordan (1978) y la topografía viene indicada por el color de fondo.

### 2.2.3. FALLAS

Según (Tarbuck & Lutgens, 2005) las fallas son fracturas en la corteza terrestre a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable. A veces, pueden reconocerse pequeñas fallas en los taludes de las carreteras, observándose estratos sedimentarios desplazados unos pocos metros. Las fallas de esta escala normalmente aparecen como pequeñas rupturas aisladas. Por el contrario, las grandes fallas, como la de San Andrés en California, tienen desplazamientos de centenares de kilómetros y consisten en muchas superficies falladas interconectadas. Estas zonas de falla pueden tener una anchura de varios kilómetros y a menudo son más fáciles de identificar a partir de fotografías aéreas que a nivel del suelo.

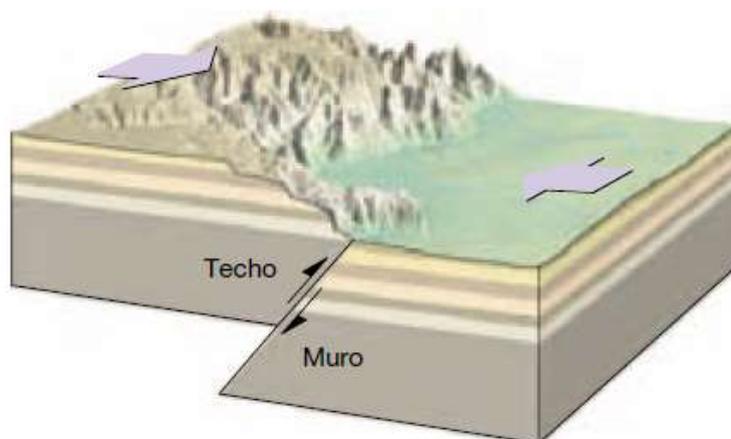
Los movimientos súbitos a lo largo de las fallas son la causa de la mayoría de los terremotos. Sin embargo, la gran mayoría de las fallas son inactivas. A lo largo de las fallas, las rocas suelen romperse y pulverizarse conforme los bloques de corteza situados en los lados opuestos de una falla se rozan unos con otros

### 2.2.3.1. TIPOS DE FALLAS

El desplazamiento de las fallas se puede clasificar por su orientación e inclinación. Los principales tipos de fallas son:

#### a) Falla Inversa

Este tipo de falla se caracteriza por el movimiento del bloque superior (Techo) hacia arriba con respecto al bloque inferior (Muro) y con un ángulo de buzamiento generalmente menor a  $45^\circ$  (ver Figura 2.6). Las fallas inversas están asociadas a esfuerzos de compresión que producen un acortamiento en la corteza. (Bolaños Luna & Monrroy Concha, 2004)

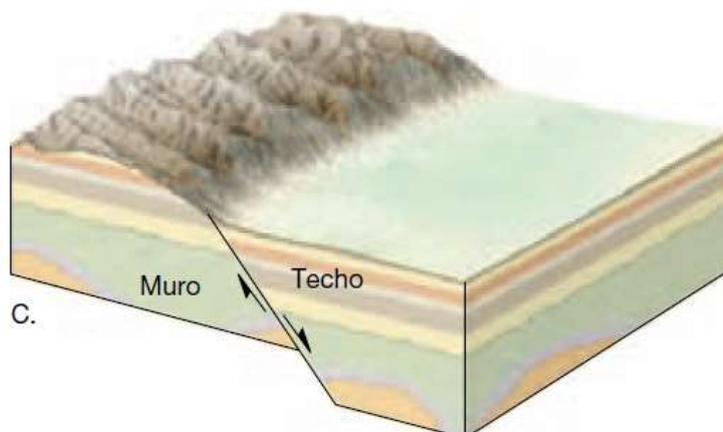


**Figura 2.6** Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla Inversa. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

#### a) Falla Normal

Este tipo de falla es producida por el movimiento del bloque superior (Techo) hacia abajo con respecto al bloque inferior (Muro) y suelen tener buzamientos de moderados a altos, con valores promedio de  $60^\circ$  (ver Figura 2.7 **Figura 2.7**). Las fallas normales están generalmente asociadas a esfuerzos de tensión que

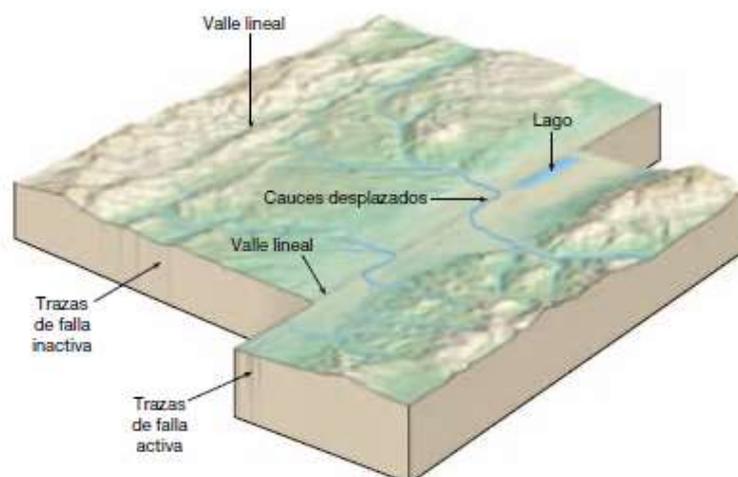
generan un estiramiento de la corteza. (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004).



**Figura 2.7** Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla Normal. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

b) Falla Transcurrente.

Es aquella que se acomoda al movimiento horizontal de dos bloques adyacentes, dependiendo del movimiento relativo de un bloque con respecto al otro (ver Figura 2.8). Este tipo de falla presenta un buzamiento de  $90^\circ$ . (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004).



**Figura 2.8** Bloque diagrama que muestra el movimiento relativo a lo largo de una falla Transcurrente. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

## **2.2.4. CLASIFICACIÓN DE SISMOS TECTÓNICOS SEGÚN SU UBICACIÓN<sup>2</sup>**

### **2.2.4.1. SISMOS DE SUBDUCCIÓN DE INTERFACE**

Suelen producirse en zonas donde la concentración de fuerzas generadas por los límites de las placas tectónicas da lugar a movimientos de reajuste en el interior y en la superficie de la Tierra. Su influencia puede alcanzar desde pequeñas hasta grandes regiones, pero su hipocentro suele encontrarse localizado a profundidades mayores de 20 Km, a veces de hasta 70 kilómetros. Se caracterizan por tener una alta magnitud (>7), y una gran liberación de energía.

La zona de subducción de interface poco profunda en el Perú está caracterizada por el acoplamiento de las placas de Nazca y Sudamericana y posee mecanismos que obedecen a procesos compresivos. La mayor parte de los sismos a nivel mundial ocurren en esta zona y se presentan entre los 40 y 50 km de profundidad aproximadamente, con magnitudes de momento Mw inclusive de 9,0 (Heaton y Kanamori 1984).

### **2.2.4.2. SISMOS DE SUBDUCCIÓN DE INTERPLACA**

Su origen se da dentro de las placas tectónicas, en las denominadas fallas locales o geológicas. Se caracterizan por tener magnitudes pequeñas o moderadas, y porque su hipocentro es más superficial (>20km).

Debido a su proceso de enfriamiento, las capas más externas de la Tierra son quebradizas o de comportamiento frágil y frente a las fuerzas tectónicas responden mediante fracturamiento. Las fallas son fracturas en cizalla (corte) en las cuales el deslizamiento ocurre en una dirección paralela a la superficie de la fractura. Este deslizamiento es resistido por la fricción debido a que las paredes de la falla se encuentran pegadas, soldadas una contra la otra, como resultado del esfuerzo compresivo que existe al interior de la Tierra a profundidades mayores que 1 a 2 Km. Tomando en cuenta la diferencia en la cantidad de esfuerzos generados en los diferentes tipos de zona, es conocido que es en las Zona de Convergencia es donde ocurren los más grandes terremotos, en segundo lugar, en la Zona de Transformación (que, a pesar de ser muy destructivos, tienden a ser menos

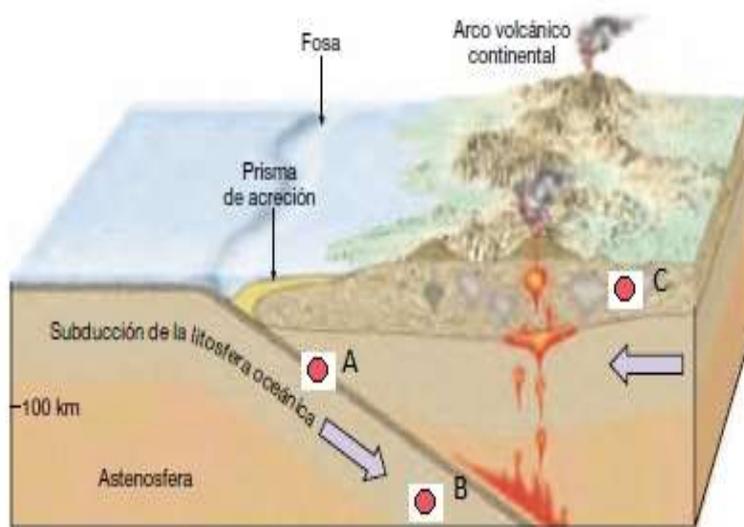
---

<sup>2</sup> Obtención Del Factor De Zona Sísmico "Z" Mediante El Software Crisis 2015 Ver.4.1 En La Ciudad De Huánuco 2017 [Tesis] / Aut. Kethny Justino MALPARTIDA PINO -2017. Pag. del N° 28-30

frecuentes) y al final en las de Divergencia. Terremotos tipo intraplaca pueden también ser destructivos, pero son menos frecuente.

### 2.2.4.3. SISMOS DE CORTEZA SUPERFICIAL

Su origen se da dentro de la placa tectónica continental en la cual por reajustes de procesos orogénesis resulta el arrugamiento y levantamiento continental, se caracterizan por tener magnitudes elevadas, y porque su hipocentro es más superficial (<45km)



**Figura 2.9** Tipos de sismos según su ubicación. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

En la Figura 2.9 se aprecia los sismos de interface (A), sismos de interplaca (b) y sismos de corteza superficial o continentales (C).

En el Perú los sismos de Corteza superficial o continentales se dan en la zona de corteza continental de la placa Sudamericana está sujeta a esfuerzos tectónicos compresionales debido a su convergencia con la placa de Nazca. Esto ha dado como resultado el arrugamiento y levantamiento del margen continental durante un proceso orogénico muy complejo, cuyo resultado final fue la formación de la cordillera de los Andes. La zona de la corteza está caracterizada por eventos moderados, con fallas con ángulo de buzamiento pequeño y con magnitudes  $M_w$  entre 6,0 y 7,5; presentadas a lo largo de los márgenes occidental y oriental de la cordillera de los Andes.

### **2.2.5. ONDAS SÍSMICAS**

La liberación de energía del interior de la tierra viaja a través de ondas sísmicas, en un medio sólido que causa vibración y con ella desastres en la superficie terrestre. Según (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004) las ondas sísmicas aumentan y cambian notablemente sus velocidades y direcciones al atravesar la tierra, variando de acuerdo al medio por donde avanzan. La densidad y la elasticidad del medio son las propiedades físicas que determinan las características del movimiento de las ondas.

Las ondas sísmicas pueden viajar grandes distancias a través del interior de la tierra. Motivo por el cual los investigadores decidieron clasificar a las ondas sísmicas de acuerdo a su comportamiento dinámico en ondas de cuerpo y ondas superficiales.

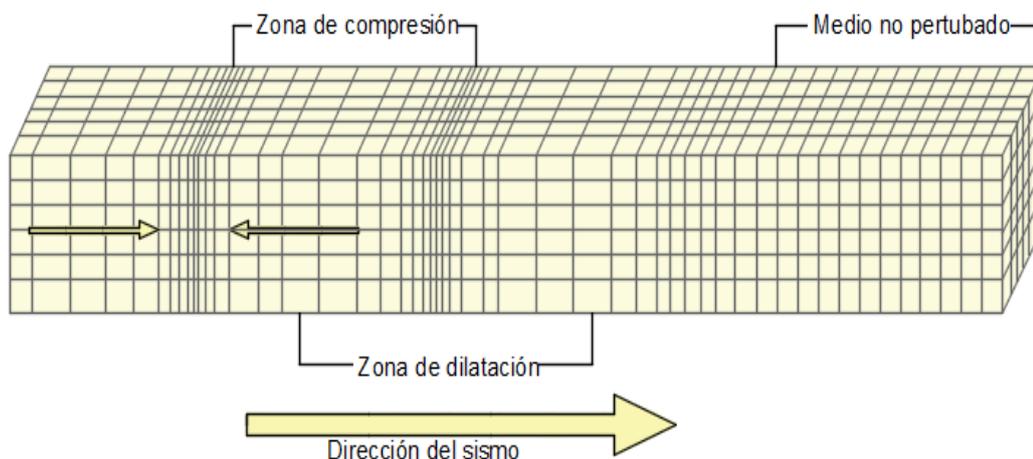
### **2.2.6. ONDAS DE CUERPO**

Las ondas de cuerpo generan una trayectoria de partículas en forma longitudinal y transversal en un plano de propagación y esta puede ser en medios sólidos, líquidos o gaseosos. Las ondas de cuerpo que están involucradas con la actividad sísmica son las ondas P (primarias) y las ondas S (secundarias).

#### **2.2.6.1. ONDAS “P” U ONDAS PRIMARIAS**

Son también conocidas como ondas compresionales, este tipo de ondas según (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004) se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio como se aprecia en la Figura 2.10.

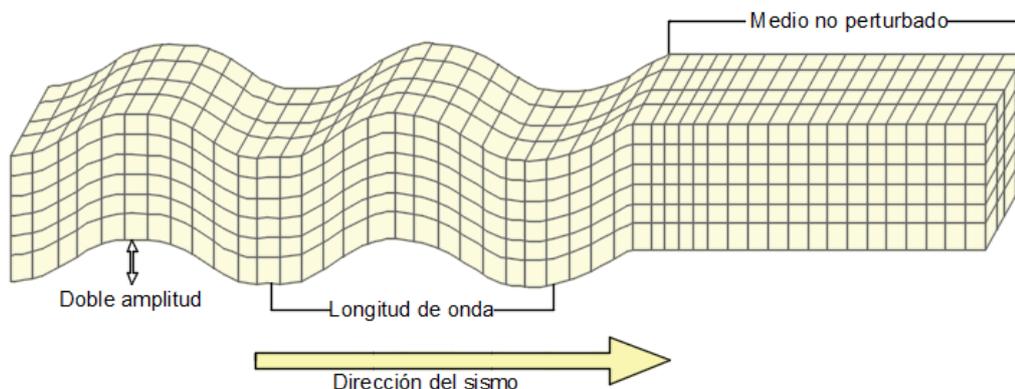
Las ondas P son las tienen más velocidad con respecto a las demás ondas sísmicas su movimiento produce la compresión y dilatación temporal de las rocas en la misma dirección que la propagación de la onda. Avanzan a más de 5 km/s en las rocas graníticas cercanas a la superficie, y alcanzan 11 km/s en el interior de la Tierra. Por lo tanto, son las primeras ondas en llegar, en ser sentidas y en ser registradas en los sismogramas.



**Figura 2.10** Ondas Primarias. Fuente: *(Elaboración propia)*.

### 2.2.6.2. ONDAS “S” U ONDAS SECUNDARIAS

Son conocidas como ondas de corte o cizalla, más lentas que las ondas P y se transmiten cuando las partículas se desplazan perpendicularmente en la dirección de propagación asumiendo una forma tipo sinusoidal (ver Figura 2.11) con velocidades en roca aproximadamente iguales al 70% de las velocidades de las ondas P.



**Figura 2.11** Ondas Secundarias. Fuente: *(Elaboración propia)*.

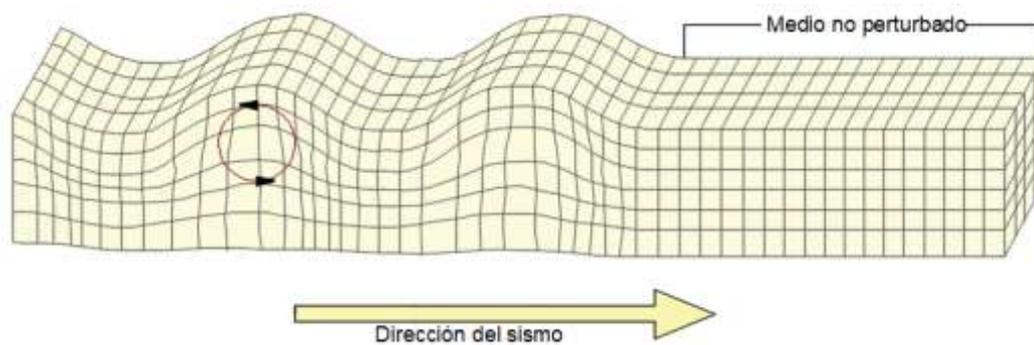
Como los líquidos no pueden soportar esfuerzos cortantes, las ondas S no se propagan a través de ellos. Usualmente las ondas S tienen mayor amplitud y son más destructivas que las ondas P. La componente vertical de las ondas S se denota a menudo por SV, mientras que la componente horizontal se denota por SH. (Bolaños Luna & Monrroy Concha, 2004)

## 2.2.7. ONDAS SUPERFICIALES

Este tipo de ondas son las más lentas, formadas por la interacción de las ondas de cuerpo que viajan en diferentes direcciones. Su amplitud es máxima en la superficie y nula a grandes profundidades. Debido sus características son las más destructivas, y se dividen en ondas Rayleigh y ondas Love

### 2.2.7.1. ONDAS RAYLEIGH

Denominadas así en honor al físico y matemático inglés Lord Rayleigh, que en 1885 demostró teóricamente su existencia. Usualmente son denotadas con la letra R y se deben a la combinación particular entre los desplazamientos de las partículas de las ondas P y S.



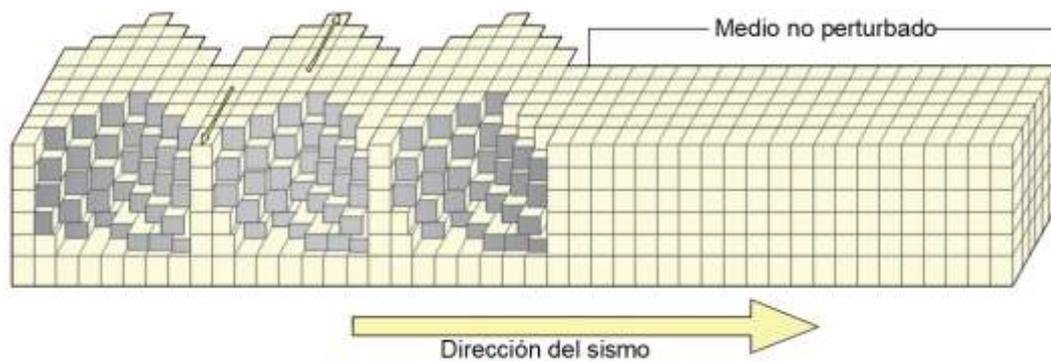
**Figura 2.12** Ondas Rayleigh. Fuente: *(Elaboración propia)*.

En la Figura 2.12 se aprecia las ondas Rayleigh, en donde las partículas se mueven en forma elipsoidal en el plano vertical que pasa por la dirección de propagación.

### 2.2.7.2. ONDAS LOVE

Son ondas de cizalla donde las partículas oscilan sólo en la dirección perpendicular al plano de propagación, similares a las ondas S que no tiene desplazamiento vertical (ver Figura 2.13). Estas ondas toman el nombre del matemático británico A. E. H. Love que en 1911 logró crear un modelo matemático de las mismas. Según (Bolaños Luna & Monrroy Concha, 2004) estas ondas hacen que la superficie se mueva de lado a lado en un plano horizontal pero con ángulos

rectos a la dirección de propagación. Estas ondas son dañinas a las cimentaciones de las estructuras.



**Figura 2.13** Ondas Love. Fuente: *(Elaboración propia)*.

### 2.2.8. PARÁMETROS DEL TAMAÑO DE UN SISMO

Desde que la sismología alcanzó un carácter plenamente científico, los sismólogos intentan establecer criterios que puedan ser los más precisos posibles para determinar la importancia de los sismos. En la actualidad, estos pueden ser medidos mediante diferentes parámetros de evaluación de su tamaño entre ellos uno más objetivo que mide la cantidad de energía liberada, denominada Magnitud y otro más subjetivo que es medido en función del grado de destrucción que los sismos causan en el área afectada, denominado intensidad.

### 2.2.9. INTENSIDAD SÍSMICA

Se entiende por intensidad sísmica a la fuerza con que, en él, se experimentan los efectos del sismo. Es un parámetro de interés en la Ingeniería y se obtiene estimando cualitativamente los daños producidos durante el dicho evento.

Las escalas más utilizadas son la Mercalli Modificada (MM) y la MSK. La primera propuesta por Mercalli en 1902, modificada por Wood y Newman en 1931 y Richter en 1956. La segunda se debe a los trabajos de Medvedev, Sponheuer y Kernik en 1967.

En la estimación de la intensidad sísmica se puede utilizar dos parámetros: la intensidad máxima y la intensidad epicentral. Estos parámetros no siempre coinciden especialmente ya que los máximos de intensidad observada pueden situarse fuera

de la región epicentral y suele ser tomado como la medida del terremoto. La inmensa mayoría del daño ocasionado por los terremotos corresponde a sismos con intensidad superior a VII en la escala MM. La intensidad es de gran interés para el Ingeniero, en cuanto es una medida de la fuerza del movimiento del terreno y el grado con que la vibración es sentida. Además, es el único parámetro de tamaño aplicable directamente a la época no instrumental. (Herraíz Sarachaga, 1997, págs. 54-55)

#### **2.2.10. MAGNITUD SÍSMICA**

La magnitud es una medición cuantitativa según (Herraíz Sarachaga, 1997) se relaciona con la energía sísmica liberada en el foco y transmitida por ondas sísmicas. La magnitud es un valor que no depende del lugar de observación. Como mide la energía transmitida por las ondas sísmicas, este parámetro, en sus diferentes escalas, se relaciona directa o indirectamente con las amplitudes de las fases registradas. Para lo cual es necesario utilizar instrumentos adecuados como sismógrafos y acelerógrafos.

Cualquiera sea la ubicación de estos instrumentos con respecto al lugar del sismo el valor de la magnitud es aproximadamente el mismo. Sin embargo, un terremoto con una sola magnitud puede tener muchas intensidades que irán disminuyendo a medida que se alejen del epicentro sísmico.

Existen varias escalas para medir la magnitud de los sismos. Entre las principales están la magnitud local, la magnitud superficial, la magnitud de ondas de cuerpo y la magnitud momento. (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004)

##### **2.2.10.1. LA MAGNITUD LOCAL (ML)**

Fue inicialmente definida por Richter (1935) para los terremotos del Sur de California, como el logaritmo decimal de la máxima amplitud expresada en micrones ( $10^{-6}$  m), del registro obtenido en un sismógrafo Wood-Anderson a una distancia de 100 km. Matemáticamente es la diferencia entre los logaritmos de la máxima amplitud de la traza y del término de corrección de la distancia, que se deduce empíricamente. El sismógrafo de torsión Wood-Anderson tiene un periodo propio de 0.85 s, una amplificación de 2800 y un factor de amortiguamiento del 0.80 (Herraíz Sarachaga, 1997)

La magnitud local puede ser expresada como:

$$ML = \text{Log } A - \text{Log } A_0$$

Donde:

- A: Amplitud máxima registrada en una estación por un sismógrafo de torsión Wood-Anderson (amplificación 2800, período 0.85 s y un factor de amortiguamiento igual a 0.8).
- A<sub>0</sub>: Amplitud correspondiente a calibración de la escala se hizo tomando M = 3 para el terremoto que a 100 km de distancia se registra con A = 1 mm

Esta magnitud denominada Magnitud de Richter es la más conocida pero no siempre la más apropiada para describir el tamaño de un sismo. La magnitud de Richter no distingue entre diferentes tipos de ondas.

#### **2.2.10.2. MAGNITUD DE ONDAS SUPERFICIALES (M<sub>s</sub>)**

Para distancias epicentrales grandes, las ondas de cuerpo han sido usualmente atenuados y esparcidos suficientemente, tal que el movimiento resultante es dominado por ondas superficiales y debido a que la magnitud Richter no distingue los diferentes tipos de ondas sísmicas, su uso es muchas veces poco adecuado. Una escala de magnitud basada en la amplitud de las ondas Rayleigh es la magnitud de ondas superficiales. (Bolaños Luna & Monrroy Concha, 2004)

La magnitud de ondas de superficiales puede ser expresada como:

$$M_s = \text{Log } (A) + 1.66 \text{ Log } (D) + 2.0$$

Donde:

- A: Amplitud del desplazamiento del suelo en micrómetros
- D: Distancia epicentral del sismómetro medida en grados (360° correspondiente a la circunferencia de la tierra).

Debido a que la magnitud superficial está basada en la amplitud máxima del desplazamiento del suelo en vez que, en la amplitud del sismógrafo, su valor puede ser determinado de cualquier sismógrafo. Esta fórmula es válida para distancias comprendidas entre  $20^\circ < D < 90^\circ$  y para terremotos con focos localizados a profundidades menores a 70 km.

### **2.2.10.3. MAGNITUD DE ONDAS DE CUERPO (Mb)**

En sismos ocurrentes a grandes profundidades, las ondas superficiales pueden ser pequeñas como para permitir una evaluación confiable de la magnitud de ondas de superficie. La magnitud de ondas de cuerpo (Gutenberg 1945) es una magnitud basada en la amplitud de los primeros ciclos de las ondas P. (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004)

La magnitud de ondas de cuerpo puede ser expresada como:

$$M_b = \text{Log}(A) - \text{Log}(T) + 0.01D + 5.9$$

Donde:

- A: Amplitud de onda P en micrómetros.
- T: Periodo de la onda P (usualmente un segundo).
- D: Distancia epicentral medida en grados.

### **2.2.10.4. MAGNITUD DE MOMENTO (Mw)**

Las escalas de magnitudes anteriores son escalas empíricas basadas en medidas instrumentales de las características del movimiento del suelo. El incremento de la energía liberada durante un sismo no siempre representa un incremento de las características del movimiento del suelo a la misma razón que el incremento de la energía.

En sismos fuertes, las medidas de las características del movimiento del suelo se hacen menos sensibles al tamaño del sismo, lo que hacen que estas características se saturen en ciertas magnitudes. La magnitud de Richter y la magnitud mb se saturan a magnitudes entre 6 y 7, mientras que la magnitud de superficie se satura a una magnitud de 8.

Para describir la medida de sismos grandes, es preferible utilizar una magnitud que no dependa del nivel del movimiento del suelo (y, por lo tanto, que no se sature). La única escala que no se satura es la magnitud momento (Kanamori 1977, Hanks y Kanamori 1979). La magnitud  $M_w$  está basada en el momento sísmico, que es una medida directa de los factores que producen la ruptura a lo largo de una falla. (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004)

La magnitud de momento puede ser expresada como:

$$M_w = (2/3) \log M_0 - 10.7$$

Donde el momento sísmico escalar,  $M_0$  se determina a partir del espectro de amplitudes para bajas frecuencias (zona plana del espectro de amplitudes). Esta escala de magnitud es válida para todo el rango de valores, mientras que las demás se saturan, es decir, no dan valores fiables a partir de un cierto valor.

El momento sísmico escalar  $M_0$  (en N-m y dyn-cm) puede ser expresada como:

$$M_0 = \mu D u_s$$

Donde:

- Du: Valor medio de la dislocación (desplazamiento relativo de la fractura).
- T: Área de la fractura.
- D: Coeficiente de rigidez del medio en que se ha producido.

#### **2.2.10.5. ENERGÍA SÍSMICA**

La Energía sísmica es la suma de las energías disipadas en forma térmica por la deformación en la zona de ruptura y la energía emitida como ondas sísmicas.

La energía sísmica puede ser expresada como:

$$\log (E) = a + bM$$

Donde a y b dependen de la escala de magnitud utilizada.

Entonces un aumento de magnitud, de una unidad se traduce en la multiplicación de la energía liberada por un factor aproximadamente de 31.5 esto según (Herraíz Sarachaga, 1997)

Según (Bolt, 2005), la magnitud es Ms, la energía sísmica puede ser:

$$\text{Log}(E) = 4.8 + 1.5M$$

Donde E, está expresada en Joules

### 2.3. PELIGRO SÍSMICO

El peligro sísmico se define como la “probabilidad de excedencia de un cierto valor de la intensidad del movimiento del suelo producido por sismos, en un determinado emplazamiento y durante un periodo de tiempo dado.” (Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, 1980) Siendo esta además una medida de la magnitud física del grado de exposición de una región geográfica ante el sismo más fuerte que pueda ocurrir en dicha región.

Indudablemente el interés de los ingenieros se dirige a los parámetros que miden el daño producido por un sismo o que puede sufrir una estructura. Por ello, la intensidad y la aceleración máxima son los conceptos que más aceptación han recibido en los análisis de peligrosidad.

El valor de esta última, corresponde a una probabilidad dada en el emplazamiento o zona de estudio, será el dato fundamental para elaborar el espectro escalado de respuesta y el espectro de diseño. (Herraíz Sarachaga, 1997)

- Peligro:  
“Circunstancia en la que es posible que suceda algún mal.” (Real Academia Española, 2014)
- Sismos:  
“Sacudida de la corteza terrestre.” (Real Academia Española, 2014)

### 2.3.1. MÉTODOS PARA EVALUAR LA PELIGROSIDAD<sup>3</sup>

Los métodos utilizados para evaluar la peligrosidad sísmica pueden ser determinísticas y probabilísticas. Ambos consideran la sismicidad como un fenómeno estacionario, y suponen que los sismos que ocurrirán en el futuro serán de las mismas características que los sucedidos en el pasado

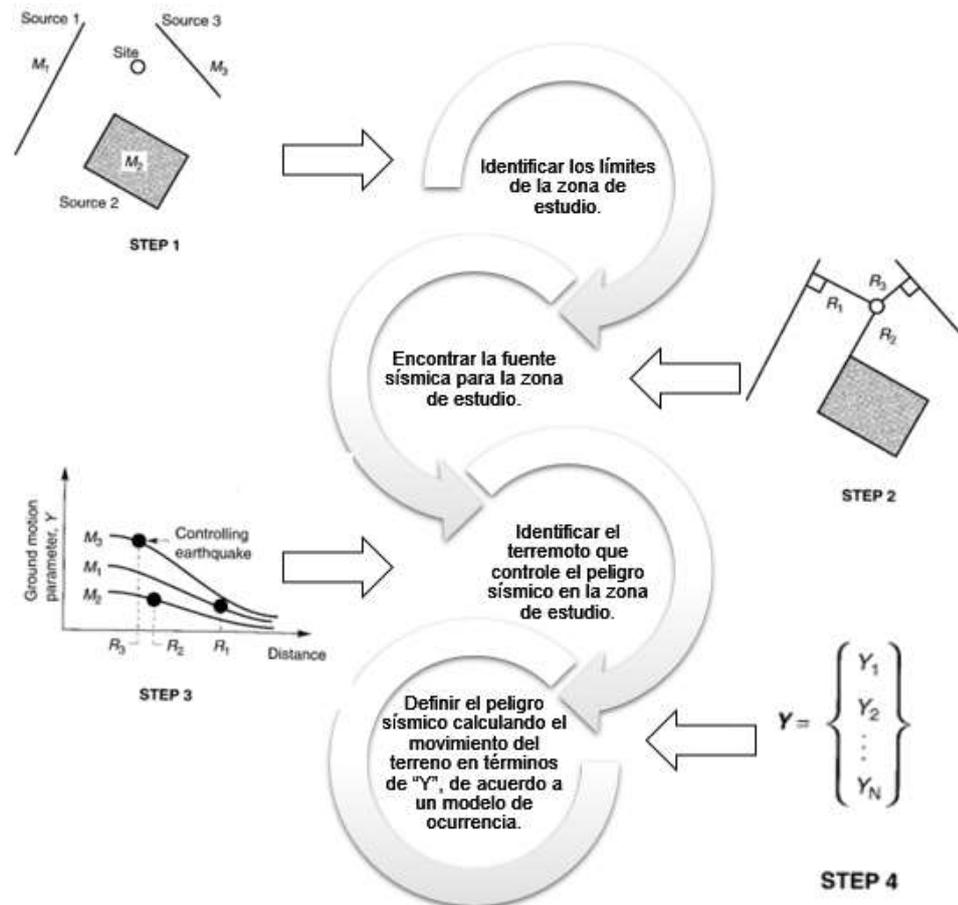
#### 2.3.1.1. PELIGRO SÍSMICO DETERMINÍSTICO

Los métodos deterministas analizan la sismicidad de cada zona sismogénica que afecta al lugar cuya peligrosidad se estudia, con objeto de estimar el máximo sismo potencial o que razonablemente se puede esperar en cada una de ellas. Este es el único terremoto considerado en el análisis y se acepta que volverá a repetirse en el futuro. Por ello mide la contribución de la zona al peligro sísmico en el emplazamiento. Para estimar su tamaño, normalmente se consideran datos de paleosismicidad; sismicidad histórica (dada solo por documentos y referencias, y evaluada únicamente por la intensidad) y de sismicidad instrumental (que incluyen registros y que pueden ser medida también con escalas de magnitud). Con efecto de hacer más segura la estimación, muchas veces la magnitud y la intensidad obtenidas se aumentan en medio grado y un grado, respectivamente. Este máximo terremoto potencial, o razonable esperable, se sitúa en el lugar de cada zona sismogénica más próximo al emplazamiento, punto al que, mediante una ley de atenuación, se traslada el parámetro (velocidad, aceleración, etc.) que expresa el efecto del terremoto. La peligrosidad final se toma como el máximo de las acciones correspondientes a todas las zonas sismogénicas. Si estas no han sido definidas, el proceso se realiza considerando directamente los efectos de cada terremoto de la región que rodea al emplazamiento.

En la Figura 2.14 se aprecia la esquematización en cuatro pasos para determinar el peligro sísmico determinístico según la adaptación de (Kramer, 1996).

---

<sup>3</sup> **Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros** [Libro] / Aut. Miguel HERRAIZ SARACHAGA -1997.  
Pag. Nº 102



**Figura 2.14** Proceso para el análisis del peligro sísmico determinístico. Fuente: Adaptado (Kramer, 1996).

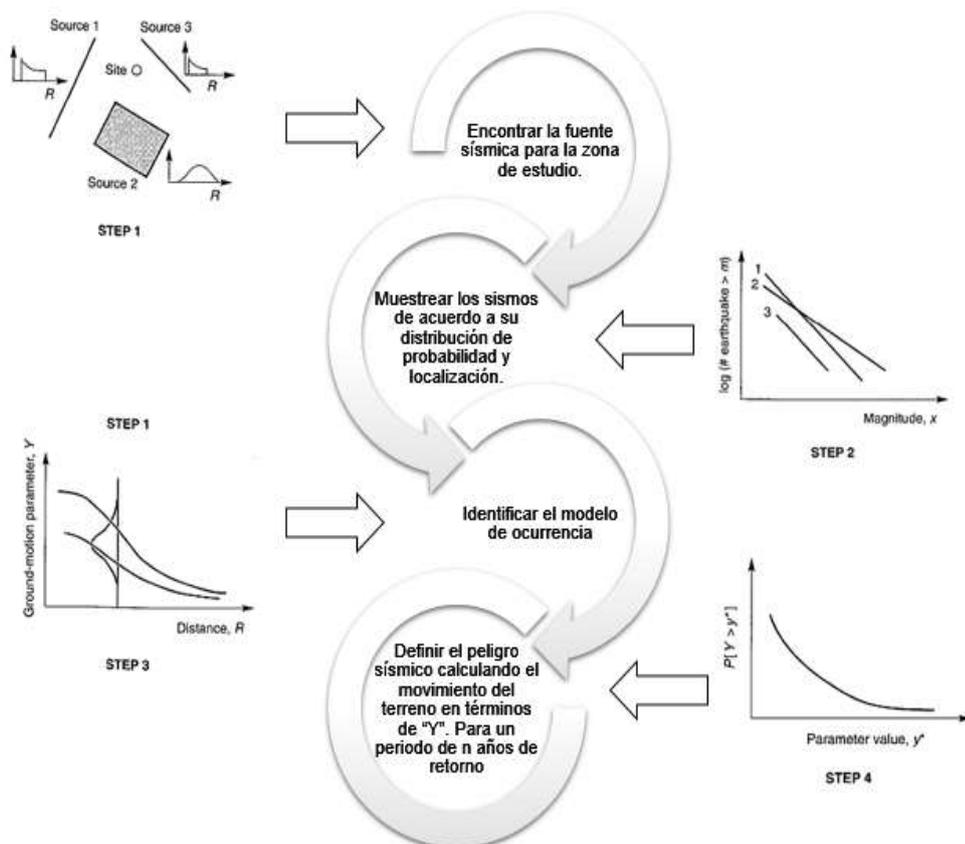
### 2.3.1.2. PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO

Los métodos probabilistas parten del conocimiento de la sismicidad pasada para deducir las leyes estadísticas que regirán la actividad sísmica futura. Con ello se estima la probabilidad de que los distintos niveles de movimiento del suelo sean superados en un plazo dado. En este caso, una vez determinada las zonas sismogénicas, la sismicidad de cada una de ellas se expresa con una ley de ocurrencia de la forma Gutenberg – Richter. Así cada zona queda caracterizada por los parámetros  $a$ ,  $b$  y las magnitudes máxima y mínima que acotan la línea de ajuste. Igual que en los estudios deterministas, una ley de atenuación adecuada traslada la influencia de cada zona al punto de análisis y la peligrosidad se evalúa sumando la influencia de cada zona al punto de análisis y la peligrosidad se evalúa sumando la influencia de todas las fuentes consideradas.

Esto proporciona una curva de probabilidad anual de superación de diferentes valores del parámetro elegido. A partir de ella se obtiene la probabilidad

correspondiente al tiempo de vida útil de la estructura. El inverso de la probabilidad anual de excedencia se llama periodo de retorno e indica el número de años en el que se espera, con una probabilidad de aproximadamente al 63% la superación del nivel elegido.

A diferencia de los deterministas, que sólo indican la probabilidad del valor máximo, estos métodos proporcionan la probabilidad correspondiente a supuestos muy variados. De esta manera es posible elegir el valor que responde al tipo de estructura que se quiere diseñar. Esta ventaja, unida al hecho sísmológicamente significativo de no basarse en un valor máximo sino en consideraciones estadísticas, (cuya validez quedará limitada por la extensión y homogeneidad de la muestra de terremotos, y su capacidad de incluir todos los eventos más importantes), ha motivado que los métodos probabilistas sean hoy mucho más empleados que los deterministas. Por ello es objeto de un análisis más extenso.



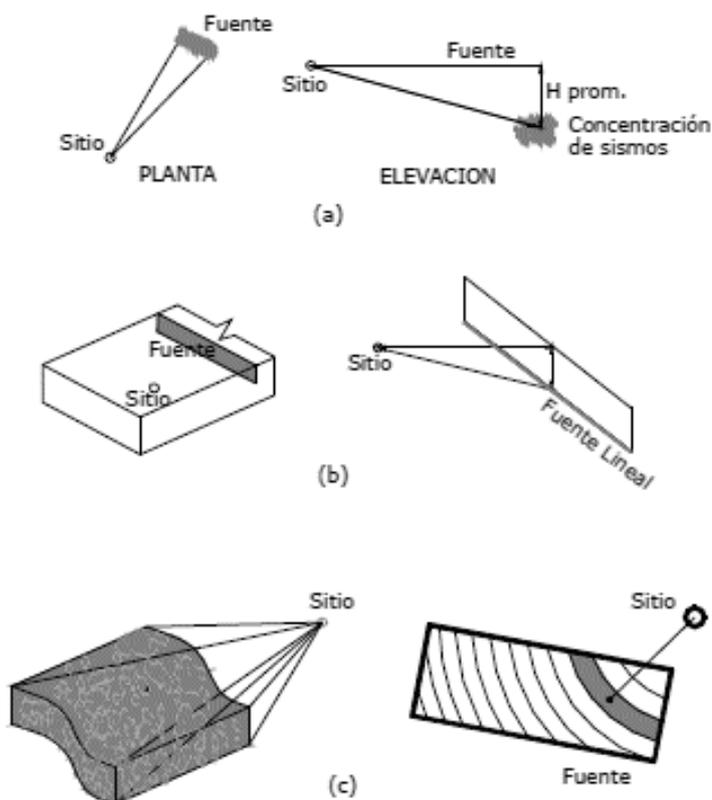
**Figura 2.15** Proceso para el análisis del peligro sísmico probabilístico. Fuente: Adaptado (Kramer, 1996).

En la Figura 2.15 se aprecia la esquematización en cuatro pasos para determinar el peligro sísmico probabilístico según la adaptación de (Kramer, 1996).

### 2.3.2. FUENTES SÍSMICAS

La sismicidad de una región se describe a partir de la distribución de los eventos sísmicos en cuanto a su ubicación en el espacio, su tamaño y su tiempo de ocurrencia. Las fuentes sísmicas se utilizan para representar esta sismicidad, agrupando eventos con características espaciales similares que ocurren en distintas zonas de la corteza. (Bolaños Luna & Monrroy Concha, 2004)

La fuente sismogénica es aquella magnitud puntual, líneal o volumen geográfico que presenta similitudes geológicas, geofísicas y sísmicas, a tal punto que puede asegurarse que su potencial sísmico es homogéneo en toda la fuente; es decir, que el proceso de generación y recurrencia de sismos es espacial y temporalmente homogéneo. Definir la geometría de la fuente sismogénica es fundamental para la evaluación del peligro sísmico, debido a que proporcionan los principales parámetros físicos que controlan la sismotectónica de la región en estudio.



**Figura 2.16** Ejemplos de distintas geometrías de fuentes sísmicas. Fuente: *Adaptado (Kramer, 1996).*

En la Figura 2.16 el apartado (a) representa una falla pequeña que puede ser modelada como una fuente puntual; (b) es una falla poco profunda que puede ser representada como una fuente lineal y (c) es un modelo de fuente tridimensional.

### **2.3.2.1. INCERTIDUMBRE ESPACIAL**

De acuerdo a las características tectónicas de la región y a la distribución espacial de los sismos la geometría de las fuentes sísmicas puede ser puntual, lineal o volumétrica.

Los sismos concentrados espacialmente con respecto a la distancia al sitio de análisis pueden representarse adecuadamente por una fuente puntual. Un ejemplo de esto sería los sismos asociados con la actividad volcánica, que generalmente se originan en zonas cercanas a los volcanes.

Fallas planas bien definidas y poco profundas, en las que los eventos sísmicos pueden ocurrir en distintas ubicaciones pueden considerarse como fuentes en dos dimensiones y representarse como fuentes lineales.

Las zonas donde los mecanismos del sismo son pobremente definidos, pueden ser tratadas como fuentes en tres dimensiones. Por ejemplo, fallas que se desarrollan en zonas de subducción que se encuentran debajo del sitio o donde las fallas son tan extensas que es necesario evitar distinciones entre fallas individuales. (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004)

### **2.3.3. RECURRENCIA SÍSMICA**

Una hipótesis básica de un análisis probabilístico de peligro sísmico es que la relación de recurrencia obtenida de la sismicidad pasada es apropiada para predecir la sismicidad futura. Cada una de las fuentes sismogénicas tiene características propias definidas por sus parámetros sismológicos: magnitud mínima de homogeneidad ( $M_{min}$ ), pendiente de la distribución Gutenberg-Richter ( $b$ ) como se aprecia en la Figura 2.17, tasa media anual de actividad sísmica ( $m$ ) y magnitud máxima ( $M_{max}$ ).

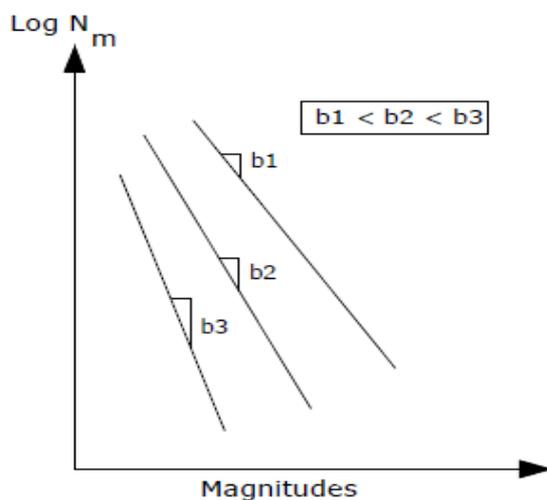
Para evaluar la variación en el tamaño de los eventos sísmicos que cada fuente sísmica pueda generar es necesario conocer la recurrencia sísmica de la fuente. La recurrencia sísmica representa el número de eventos mayores o iguales a alguna magnitud dentro de la fuente y está descrita por la pendiente de la relación de

recurrencia de Gutenberg y Richter ( $b$ ), la tasa media anual de actividad sísmica ( $v$ ), la magnitud mínima y la magnitud máxima. (Ortiz Salas, 2011)

La relación de recurrencia de Gutenberg y Richter está representada por

$$\text{Log } N = a - bM$$

Donde  $N$  es el número acumulativo de sismos de magnitudes mayores a la magnitud  $m$ , y  $a$  y  $b$  son constantes propias de cada región. Los parámetros  $a$  y  $b$  se obtienen generalmente por regresión de una base de datos de la sismicidad de la fuente de interés, donde la constante  $b$  describe la ocurrencia de sismos de magnitudes grandes y pequeñas



**Figura 2.17** Relación de recurrencia de Gutenberg y Richter. Fuente: (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004).

La Figura 2.17 representa el significado del parámetro “ $b$ ” en la relación de Gutenberg y Richter. Como se aprecia a mayores magnitudes existe una menor tasa de ocurrencia y se puede determinar mediante la pendiente de la recta a evaluar.

#### 2.3.4. LEYES DE ATENUACIÓN

Las leyes de atenuación permiten predecir los parámetros de movimientos del suelo en función de la magnitud del evento y la distancia de la fuente.

Entre estos parámetros, uno de los más importantes desde el punto de vista de la ingeniería sísmica es la aceleración pico (PGA) y especialmente la horizontal, además de:

- Un mejor conocimiento de la estructura del terreno por el que viajan las ondas sísmicas.
- Una mayor comprensión del fenómeno de propagación de las ondas sísmicas y de las características de las distintas fases.
- Estimar el movimiento del suelo en las zonas próximas al epicentro, con objeto de mejorar los códigos sismorresistentes y mitigar el efecto de los sismos mediante la prevención.

Las relaciones de atenuación son desarrolladas mediante análisis de regresiones en bases de datos de registros sísmicos, por lo tanto, las relaciones de atenuación cambian con el tiempo a medida que la base de datos de los registros se incrementa (Kramer, 1996)

Esto implica calcular, a través de una regresión, una serie de coeficientes para cada periodo considerado y de acuerdo al funcional, que se use con el fin de describir el espectro de respuesta.

## 2.4. ESPECTRO NORMATIVO DE DISEÑO SEGÚN LA NORMA TÉCNICA E.030 “DISEÑO SISMORRESISTENTE” DEL PERÚ

El reglamento nacional de edificaciones en la norma E.030 “Diseño Sismorresistente” (Ministerio de Vivienda Construcción y saneamiento, 2018), basa su espectro de diseño sísmico en el PGA de estudios de peligrosidad (Capítulo 2 de dicha norma) a partir del cual se obtienen las aceleraciones para el resto de periodos estructurales.

El Perú se divide en cuatro zonas sísmicas, desde la Z1 hasta la Z4 y PGAs desde 0.10 g hasta 0.45 g, respectivamente, las cuales se pueden observar en la Figura N° 55.



**Figura 2.18** Mapa de zonificación sísmica con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. (TR=475 años). Fuente: (Ministerio de Vivienda Construcción y saneamiento, 2018).

La clasificación de los perfiles de suelo son cinco: perfil tipo S0 Roca Dura y velocidad de onda de corte del suelo mayor a 1500 m/s, perfil tipo S1 Roca o Suelos Muy Rígidos y velocidad de onda de corte del suelo entre 500 m/s y 1500 m/s, perfil tipo S2 Suelos Intermedios y velocidad de onda de corte del suelo entre 180 m/s y 500 m/s, perfil tipo S3 Suelos Blandos y velocidad de onda de corte del suelo menores a 180 m/s, perfil tipo S4 Condiciones Excepcionales.

Otro parámetro a considerar es el Factor de Uso, “ $U$ ”, que va en categorías desde la A hasta la D, pudiendo ser un edificio esencial (categoría A con valor igual a 1.5), importante (categoría B con valor igual a 1.3), común (categoría C con valor igual a 1.0), y temporal (categoría D).

La forma del espectro, está basada en el valor del PGA de la zona de interés, y se obtiene por medio del factor de amplificación sísmica, “ $C$ ”, dado por la ecuación:

$$\begin{aligned} T < T_p & C = 2.5 \\ T_p < T < T_l & C = 2.5 \left( \frac{T_p}{T} \right) \\ T > T_l & C = 2.5 \left( \frac{T_p T_l}{T^2} \right) \end{aligned}$$

Donde,  $T$  es el periodo estructural fundamental.

Por último, se tiene el factor de reducción de fuerzas sísmicas,  $R$ , que se obtiene de la multiplicación de un coeficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas,  $R_0$ , por factores que dependen de la irregularidad en planta y en altura,  $I_p$  e  $I_a$ , respectivamente.

El espectro de diseño para un tiempo de retorno de 475 años (10%/50 años) en direcciones horizontales,  $S_a$ , se obtiene según la ecuación:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R}$$

donde:

$Z$  = Factor que depende de la localización en una determinada zona sísmica.

$U$  = Factor que depende del uso o importancia.

$C$  = Factor de amplificación sísmica.

$S$  = Factor que depende del tipo de perfil del suelo.

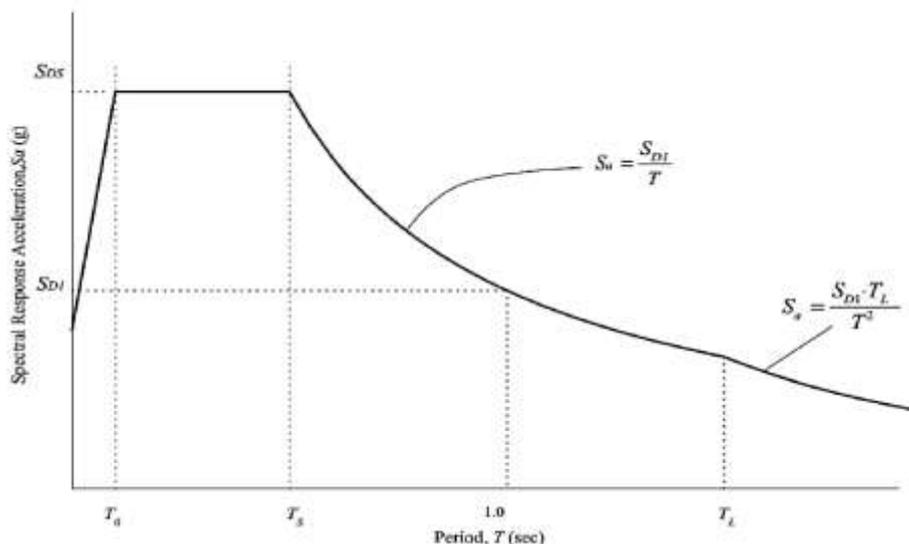
$R$  = Factor de reducción de fuerzas sísmicas

## 2.5. ESPECTRO NORMATIVO SEGÚN LA MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES, ASCE/SEI 7

El ASCE/SEI 7 no presenta zonas sísmicas como la norma del Perú, todo el territorio de los Estados Unidos se encuentra mapeado por iso aceleraciones, incluso pudiéndose interpolar valores para zonas ubicadas entre dos curvas; además, para la forma espectral no toma en cuenta directamente los valores del PGA, sino aceleraciones para periodos cortos (0.2 segundos) y para periodos largos (1.0 segundo), entonces el ASCE/SEI 7 está basado en dos puntos.

Una vez se selecciona la zona de interés, se ubican en los mapas del ASCE/SEI 7 los parámetros de aceleración  $SS$  y  $S1$  correspondientes, los cuales se modifican para tomar en cuenta el tipo de suelo multiplicándolos por los factores  $Fa$  y  $Fv$ , respectivamente, esto da valores ajustados por la clase de sitio:  $SMS=SSFa$  y  $SM1=SSFv$  que representan el Sismo Considerado Máximo (1% de excedencia en 50 años). Los parámetros de aceleración para el Sismo de Diseño se obtienen multiplicando  $SMS$  y  $SM1$  por dos tercios:  $SDS=SMS (2/3)$  y  $SD1=SM1(2/3)$  (o dividiéndolos entre un factor de seguridad igual a 1.5). Los mapas han sido elaborados para un perfil de suelo tipo  $B$ , por tanto, suelos más rígidos tendrán factores  $Fa$  y  $Fv$  de 0.80, y los suelos más flexibles tendrán factores  $Fa$  y  $Fv$  mayores a 0.90.

La clasificación por tipo de perfil de suelo se da en seis clases de sitio, desde la A hasta la F: perfil tipo  $A$  Roca Dura y velocidad de onda de corte del suelo mayor a 1524 m/s, perfil tipo  $B$  Roca y velocidad de onda de corte del suelo entre 762 m/s y 1524 m/s, perfil tipo  $C$  Suelo Muy Denso y Roca Suave y velocidad de onda de corte del suelo entre 366 m/s y 762 m/s, perfil tipo  $D$  Suelo Rígido y velocidad de onda de corte del suelo entre 183 m/s y 366 m/s, perfil tipo  $E$  Suelo de Arcillas Suaves y velocidad de onda de corte del suelo menor a 183 m/s, y perfil tipo  $F$  que son suelos que requieren análisis de respuesta de sitio.



**Figura 2.19** Forma del espectro de respuesta de diseño Fuente: (ASCE/SEI 7, 2016)

La forma del espectro de diseño se puede apreciar en la Figura N° 56. Y cumple con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 T < T_0, \quad S_a &= S_{DS} \left( 0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \\
 T_0 < T < T_S, \quad S_a &= S_{DS} \\
 T_S < T < T_L, \quad S_a &= \frac{S_{D1}}{T} \\
 T > T_L, \quad S_a &= \frac{S_{D1} T_L}{T^2}
 \end{aligned}$$

Donde:

$SDS$  = parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño en periodos cortos.

$SD1$  = parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño en periodos largos.

$T$  = periodo fundamental de la estructura.

$T_0 = 0.2(SD1/SDS)$ .

$T_S = SD1/SDS$ .

$T_L$  = periodo de transición en periodos largos.

Para obtener un espectro para el cálculo y análisis sísmico, espectro inelástico, se usa la ecuación:

$$S_{a,ine} = \frac{S_a}{(R/I_e)}$$

Donde,  $R$  es el factor de modificación de respuesta o de reducción sísmica que depende del sistema resistente a la fuerza sísmica, e  $I_e$  es el factor de importancia que a su vez depende de la categoría de riesgo. El espectro del ASCE/SEI 7 es también un espectro para el 5 por ciento de relación de amortiguamiento con respecto al crítico.

## 2.6. DEFINICION DE TERMINOS

Modelos determinísticos: son aquellos donde se supone que los datos se conocen con certeza, es decir, se supone que cuando el modelo sea analizado se tiene disponible toda la información necesaria para la toma de decisiones. (Gary D. Eppen, 2000)

Riesgo sísmico: son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue extendida por un terremoto. (Gómez Prado, W. & Loiza Yáñez, A., 2014)

Peligrosidad sísmica: Es la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, provocando efectos adversos a la actividad humana. Estos fenómenos además del movimiento del terreno pueden ser, la falla del terreno, la deformación tectónica, la licuefacción, inundaciones, tsunamis, etc. (Gómez Prado, W. & Loiza Yáñez, A., 2014)

Vulnerabilidad sísmica: Es el 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. (Gómez Prado, W. & Loiza Yáñez, A., 2014)

Espectros sísmicos: Es la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. (Francisco Crisafulli, 2002)

## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACION

##### 3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es descriptivo experimental; Consiste en la manipulación de una (o más) variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular.

El experimento provocado por el investigador, le permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas.

##### 3.1.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño del proyecto de investigación es documental debido a que la obtención de información o datos se realiza a partir de documentos denominados catálogos sísmicos.

##### 3.1.3. UNIDADES DE ESTUDIO

Peligrosidad sísmica en la región de Tacna.

- a) Unidad de Información: Catálogos sísmicos para el territorio peruano.
- b) Unidad de Observación: Ubicación, magnitud e intensidad de sismos históricos.
- c) Unidad de Análisis: Edificaciones en la región de Tacna.
- d) Unidad de muestreo: Sur del Perú y norte de Chile.
- e) Unidad de Experimentación: Ubicación, magnitud e intensidad de sismos históricos.

## **3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA**

### **3.2.1. POBLACIÓN**

La población de estudio de la presente investigación está conformada por todos los sismos registrados instrumentalmente desde el 01 de enero de 1965 hasta el 22 de mayo del 2018, comprendidos en el sur del Perú y norte de Chile. Teniendo como principal fuente de información los catálogos sísmicos emitidos por:

- a) Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).
- b) Catálogo del laboratorio sismológico de la universidad de California Berkeley "Northern California Earthquake Data Center".

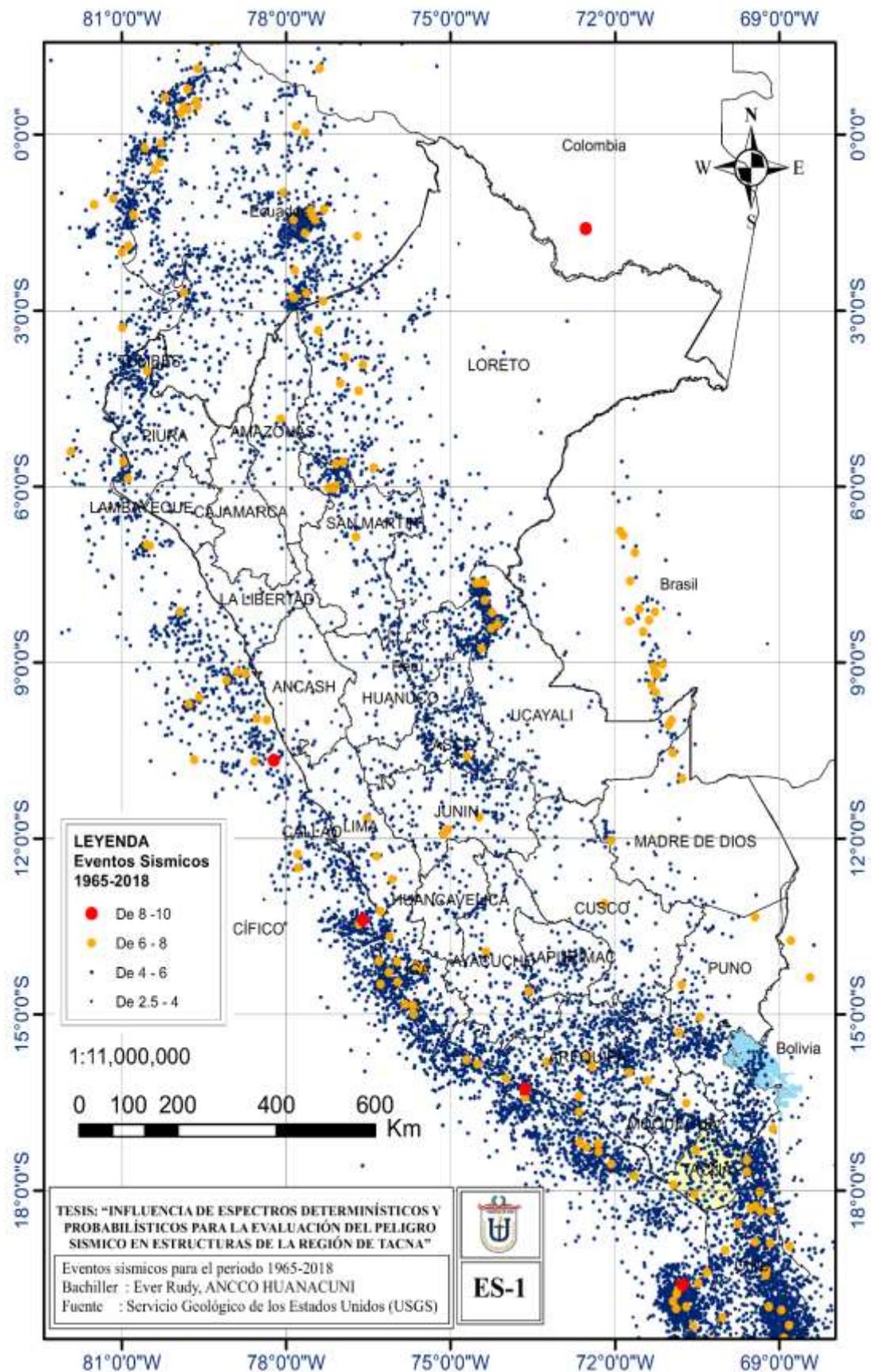
La información obtenida se digitalizó en el software ArcMap 10.5 y se aprecia en la **Figura 3.1.**

### **3.2.2. MUESTRA**

El tipo de muestra a utilizar en la presente investigación, corresponde a una muestra directa de los sismos registrados en el catálogo sísmico emitido por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que brinden información necesaria para su respectivo análisis. Estos eventos sísmicos a evaluar se aprecian en la Figura 3.1

### **3.2.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN**

Se ha tomará en cuenta para su evaluación y posterior análisis, los sismos registrados que ofrezcan información de su ubicación tiempo y magnitud. Siendo indispensables los últimos sismos registrados de forma oficial.



**Figura 3.1** Eventos sísmicos en todo el sector de América del Sur en el periodo 1965 hasta Mayo del 2018. Fuente: *(Elaboración Propia)*.

### **3.3. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

#### **3.3.1. PROCEDIMIENTO**

Los procedimientos del levantamiento de datos se realizarán de la siguiente manera:

- Se identificará la población objeto del estudio que cumpla con los requerimientos necesarios.
- Posteriormente, se seleccionará el tamaño de la muestra.
- Finalmente, mediante el análisis y metodología de diseño se procede a la interpretación de los resultados.

#### **3.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LOS DATOS**

Con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos se utilizará como técnica: la documentación, en el entendido que constituye un análisis de datos retrospectivos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el Catálogo del laboratorio sismológico de la universidad de California Berkeley “Northern California Earthquake Data Center” y del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

#### **3.5. PROCESAMIENTO, Y ANÁLISIS DE DATOS**

Para el procesamiento de datos se hará uso de técnicas y medidas de la comparación entre análisis convencionales, análisis determinísticos y probabilísticos:

- a) Representaciones gráficas de los espectros determinísticos.
- b) Representaciones gráficas de los espectros probabilísticos.
- c) Mapas de peligro sísmico.

Para la presentación de datos se ha utilizado:

- a) Excel
- b) Software Arcgis
- c) Software Crisis 2015

### 3.6. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

**Tabla 3. 1** Matriz de operacionalización de variables. Fuente: (Elaboración Propia).

| <b>Título:</b>  |   | "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA" |  |   |  |  |                                       |  |
|-----------------|---|---|--|---|--|--|---------------------------------------|--|
| <b>Autor:</b>   |   | Ever Rudy Ancco Huanacuni   |  |   |  |  |                                       |  |
| <b>Variable</b> | <b>Tipo de variable</b>   | <b>Operacionalización</b>   | <b>Categorización</b>  | <b>Definición</b>   | <b>Indicador</b>   | <b>Nivel de medición</b>   | <b>Unidad de medida</b>               |  |
| P-1             | Eventos sísmicos registrados en el área de estudio.                               | Independiente y cuantitativa  | Crear y organizar una base de datos de los sismos registrados en el área de estudio.                                 | 1- Sismos superficiales.<br>2- Sismos de interface.<br>3- Sismos de intraplaca. | Ocurrencia de un conjunto de eventos sísmicos en un área específica durante un periodo de tiempo determinado.                        | 1- Fecha (año, mes y día).<br>2-Ubicación.<br>3- Profundidad.                                    | 1- Magnitud.                          | 1- Mw (magnitud de momento)                |
|                 | Peligro sísmico en el área de estudio.  | Dependiente y cuantitativa  | Identificar todas las posibles fuentes de actividad sísmica y evaluar su potencial para predecir futuros terremotos. | 1- Determinístico.<br>2- Probabilístico.  | Estimación cuantitativa de la amenaza sísmica en un determinado lugar.   | 1- Tiempo de retorno.  | 1- PGA (aceleración pico del terreno) | 1- Gals.<br>2- m/s <sup>2</sup> (gravedad) |
| S-2             | Cálculo de espectros determinísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica. | Independiente y cuantitativa  | Identificar eventos sísmicos registrados oficialmente en la región de Tacna.   | De acuerdo a las leyes de atenuación:<br>1- Youngs, et al.                      | Es un modelo matemático donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados | 1- Fecha (año, mes y día).<br>2-Ubicación.<br>3- Profundidad.<br>4- Espectro de peligro sísmico. | 1- PGA (aceleración pico del terreno) | 1- Gals.<br>2- m/s <sup>2</sup> (gravedad) |

| <b>Título:</b>   | "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA" |  |  |  |  |                                       |  |
|--|---|--|--|--|--|---------------------------------------|--|
| <b>Autor:</b>  | Ever Rudy Ancco Huanacuni   |  |  |  |  |                                       |  |
| <b>Variable</b>  | <b>Tipo de variable</b>   | <b>Operacionalización</b>  | <b>Categorización</b>  | <b>Definición</b>  | <b>Indicador</b>   | <b>Nivel de medición</b>              | <b>Unidad de medida</b>                    |
| Análisis determinístico de eventos sísmicos en la región de Tacna.                       | Dependiente y cuantitativa  | Calcular el espectro de peligro sísmico determinístico para los distrito de la región de Tacna.                      | Ley de atenuación de Youngs:<br>1- En roca.<br>2- En suelo.  | Es un modelo matemático donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados | 1- Fecha (año, mes y día).<br>2-Ubicación.<br>3- Profundidad.<br>4- Espectro de peligro sísmico.                                 | 1- PGA (aceleración pico del terreno) | 1- Gals.<br>2- m/s <sup>2</sup> (gravedad) |
| S-3<br>Cálculo de espectros probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica. | Independiente y cuantitativa  | Identificar todas las posibles fuentes de actividad sísmica y evaluar su potencial para predecir futuros terremotos. | De acuerdo a las leyes de atenuación:<br>1- Youngs, et al.<br>2- Sadigh, et al.                                  | Es la forma que pueden tomar un conjunto de datos obtenidos de muestreos con comportamiento aleatorio.                               | 1- Fecha (año, mes y día).<br>2-Ubicación.<br>3- Profundidad.<br>4- Espectro de peligro sísmico.                                 | 1- PGA (aceleración pico del terreno) | 1- Gals.<br>2- m/s <sup>2</sup> (gravedad) |
| Análisis probabilístico de eventos sísmicos en la región de Tacna.                       | Dependiente y cuantitativa  | Calcular el espectro de peligro sísmico probabilístico para los distrito de la región de Tacna.                      | Ley de atenuación de Youngs y Sadigh en roca, para sismos:<br>1- Superficiales.<br>2- Interface<br>3- Intraplaca | Es la forma que pueden tomar un conjunto de datos obtenidos de muestreos con comportamiento aleatorio.                               | 1- Fecha (año, mes y día).<br>2-Ubicación.<br>3- Profundidad.<br>4- Espectro de peligro sísmico.<br>5- Mapa de isoaceleraciones. | 1- PGA (aceleración pico del terreno) | 1- Gals.<br>2- m/s <sup>2</sup> (gravedad) |

### 3.7. INSTRUMENTOS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

**Tabla 3.2** Formato de procesamiento de datos para el registro de eventos sísmicos por intervalo de tiempo. Fuente: *(Elaboración propia)*.

|                  |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
|------------------|---|--------|--|--|--|----------|--------|--|--|--|----------|--|-------|----|
| Rango Inferior:  | <b>a</b>                                  | .....▶ |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       | Mw |
| Rango Superior : | <b>b</b>                                  | .....▶ |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       | Mw |
| Rango            | Numero de Eventos por Intervalo de Tiempo |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  | Total |    |
| Años             |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
|                  |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
| <b>c</b>         | <b>d</b>                                  | .....▶ |  |  |  | <b>e</b> | .....▶ |  |  |  | <b>f</b> |  |       |    |
| ⋮                |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
|                  |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
|                  |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
|                  |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
|                  |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |
|                  |   |        |  |  |  |          |        |  |  |  |          |  |       |    |

La Tabla 3.2 es un formato para el procesamiento de datos y representa el resumen de los eventos sísmicos registrados en el catálogo sísmico a evaluar. Esta disgregación por intervalos de magnitud e intervalos de tiempo es realizada para poder usarlo posteriormente en el análisis de completitud (ver en 4.6), donde:

- Representa el rango inferior correspondiente a la magnitud del evento sísmico registrado en Mw (magnitud de momento) en el intervalo de tiempo de las columnas c y d
- Es el rango superior correspondiente a la magnitud del evento sísmico registrado en Mw.
- Columna correspondiente al rango inferior del intervalo de tiempo (en años).
- Columna correspondiente al rango superior del intervalo de tiempo (en años).
- Números de eventos sísmicos registrados en el intervalo de tiempo y en el intervalo de magnitud.
- Sumatoria total de la cantidad de eventos sísmicos registrados en el intervalo de tiempo.



La Tabla 3.4 es un formato para el procesamiento de datos y representa un resumen del análisis de completitud (ver en 4.6) para cada fuente sismogénica. Esta disgregación es realizada para poder usarlo posteriormente en el análisis de Gutenberg Richter (ver en 4.7), donde:

- l. Representa la magnitud de momento de la fuente #, determinada por el análisis de completitud.
- m. Columna correspondiente al número de eventos (e)
- n. Columna correspondiente al intervalo de tiempo (g).
- o. Es la tasa de ocurrencia, definida por la fórmula:  $(g / e)$
- p. Es la tasa de ocurrencia acumulada.
- q. Columna correspondiente al logaritmo en base 10 acumulado.

## CAPITULO IV

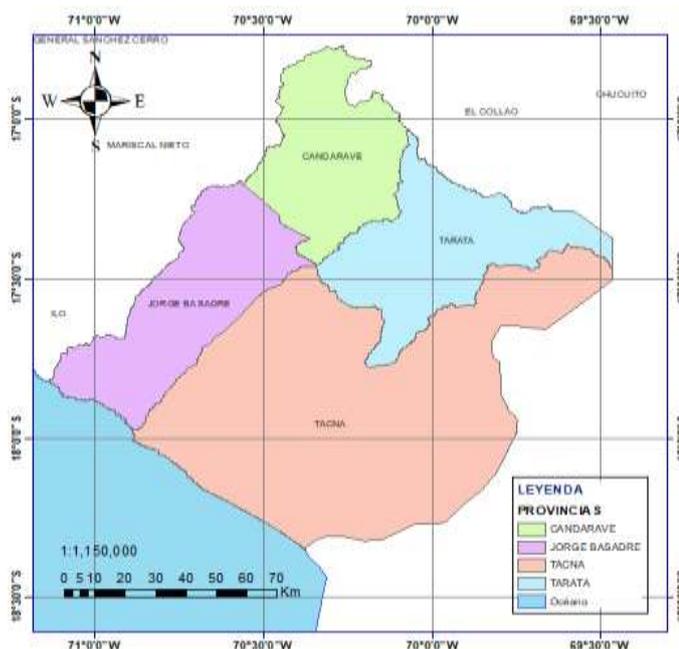
### DESARROLLO

#### 4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL LUGAR DE ANÁLISIS

La región de Tacna está situada al sur del Perú perteneciente al desierto costero peruano que limita al norte con los departamentos de Moquegua y Puno; por el este con Bolivia y Chile; por el oeste con el océano pacifico y por el sur con Chile. Se halla al pie de la meseta del Titicaca, en una zona volcánica. De relieve accidentado, con estrechas quebradas. Tiene dos terceras partes de costa, y el tercio restante es de sierra. Actualmente, la Región de Tacna está conformado por cuatro provincias y once distritos siendo su capital la ciudad de Tacna.

**Tabla 4.1** Coordenadas geográficas de la Región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Orientación           | Coordenadas                              |
|-----------------------|--|
| Latitud Sur           | 16°44' 0"                                |
| Longitud Oeste        | Entre meridianos 70° 16' 0" y 71° 8' 16" |
| Altitud de la capital | 562 msnm                                 |



**Figura 4.1** División Política de la región de Tacna, sus cuatro provincias. Fuente: *(Elaboración propia)*.

#### 4.2. SISMICIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Para la presente investigación se ha seleccionado a la región de Tacna como área de estudio, por contar información suficiente para cumplir los objetivos del mismo, teniendo zonas sismogénicas actualizadas y estudiadas además de un catálogo con 4442 registros de eventos sísmicos (instrumentados) para el sur del Perú y norte de Chile.

Esto es posible gracias a la instauración de la red sismográfica mundial a partir de 1963. Los registros en su mayoría localizan al evento en el tiempo (hora, día, mes y año), espacio (latitud, longitud y profundidad) magnitud y tipo de magnitud calculado en función de las ondas de cuerpo, por lo que los datos pueden ser considerados para la obtención de parámetros sísmicos. Obteniendo como primer evento registrado el 06 de diciembre del año 1965 con una magnitud de 5.9 mw y epicentro en las coordenadas geográficas 68.944 longitud oeste 20.38 latitud sur. El último evento del catálogo sísmico se registra el 22 de mayo del 2018 con una magnitud de 4.7 mw y epicentro en las coordenadas geográficas 68.641 longitud oeste 21.254 latitud sur. El catálogo se obtuvo a partir de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos.



**Figura 4.2** Parámetros de búsqueda para el área de estudio. Fuente: (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

En la Figura 4.2 se aprecia el área de influencia y los parámetros de búsqueda en la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Siendo estos el tiempo de inicio 01/01/1965; Tiempo final 22/05/2018; Máxima latitud -11.863; Mínima latitud -22.991; Máxima longitud -66.709; Mínima longitud -79.629; Mínima magnitud 2.5; Máxima magnitud 10.

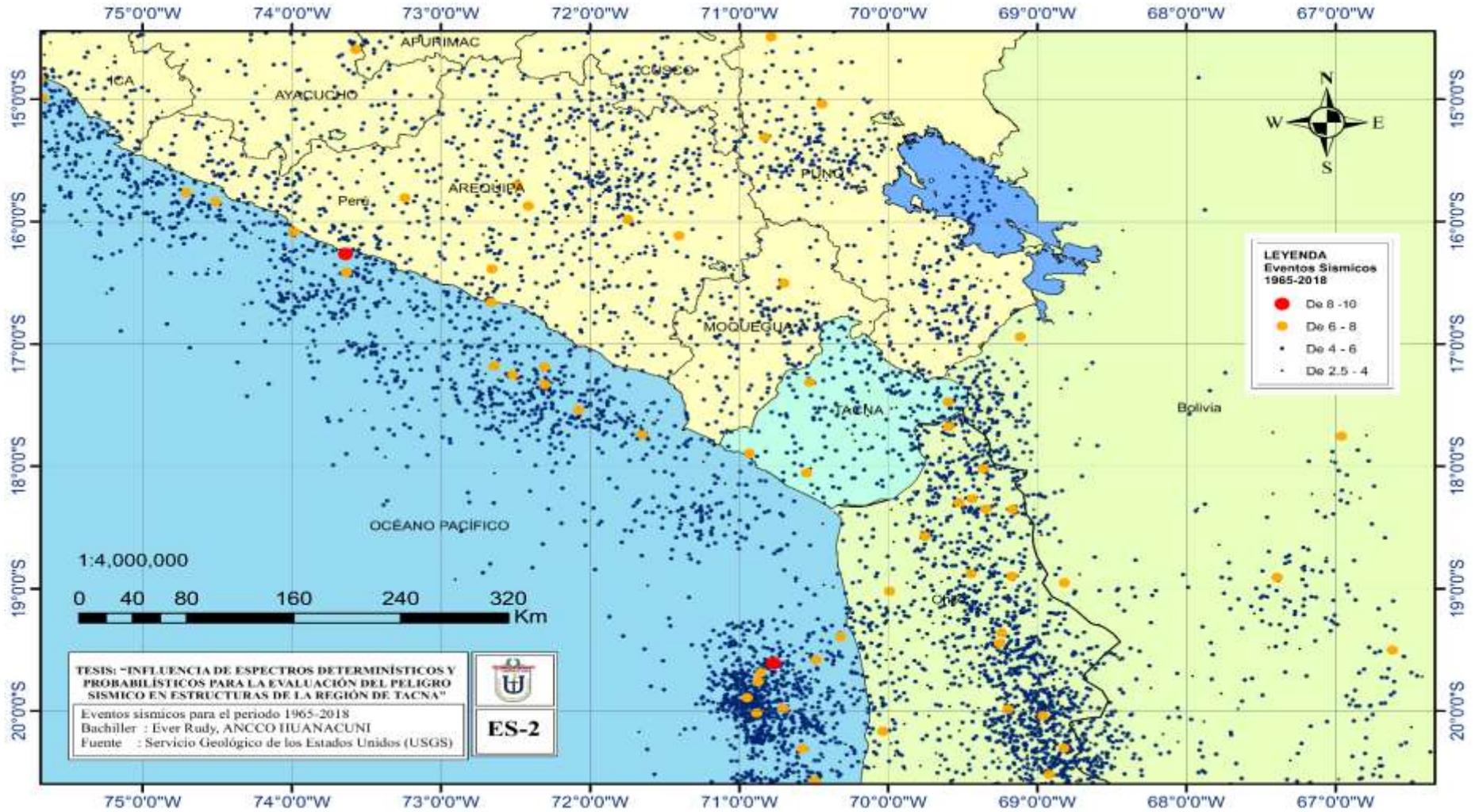


Figura 4.3 Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018. Fuente: (Elaboración propia).

### 4.3. HOMOGENIZACIÓN DE DATOS:

Para el análisis del peligro sísmico es necesario utilizar una sola medida del tamaño para el evento sísmico. Sin embargo, la información obtenida en los catálogos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) el Catálogo del laboratorio sismológico de la universidad de California Berkeley "Northern California Earthquake Data Center" y del Instituto Geofísico del Perú (IGP); utilizan diferentes medidas de tamaño para cada sismo.

El catalogo actualizado del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) posee eventos con magnitudes  $M_w$ ,  $m_b$ ,  $M_s$  y en algunos casos,  $M_l$  por lo que fue necesario homogenizar la base de datos para realizar el análisis.

Para el procesamiento de datos se eligió la magnitud momento  $M_w$  como la escala base. Debido a que es la única escala de magnitud que no se satura ya que no está basada en cantidades empíricas medidas de las características del movimiento del suelo. Asimismo, las relaciones de atenuación usadas actualmente para el movimiento del suelo y las ordenadas espectrales están basadas en  $M_w$ .

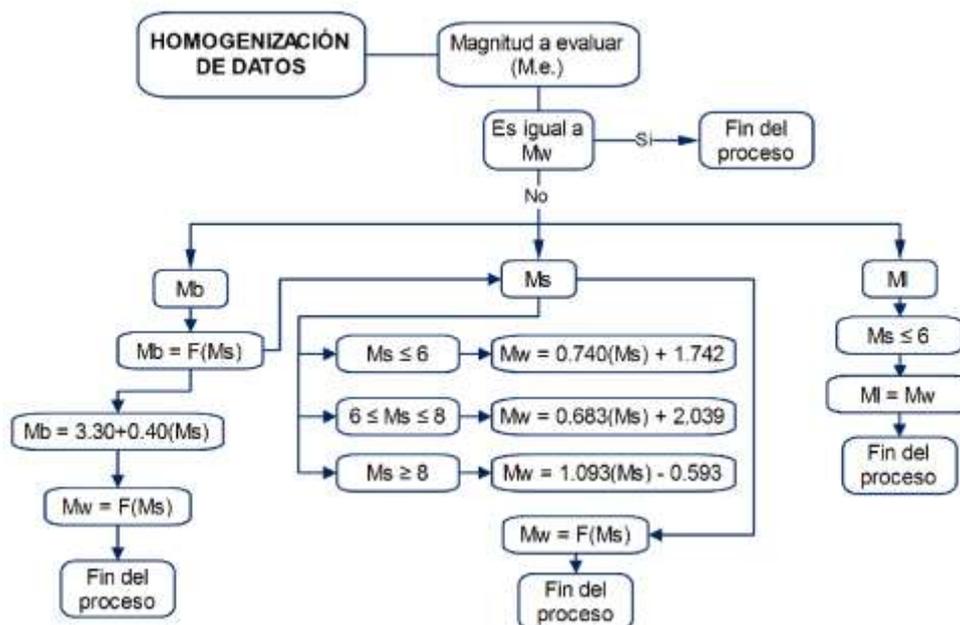
La relación entre  $m_b$  y  $M_s$  se formó utilizando la ecuación propuesta por Castillo y Alva (1993).

La magnitud de ondas de cuerpo puede ser expresada como:

$$M_b = 3.30 + 0.40 M_s$$

Según (Bolaños Luna & Monrroy Concha, 2004), la relación entre  $M_s$  y  $M_w$  se puede obtener utilizando el método de mínimos cuadrados. Estos autores utilizaron una muestra de eventos registrados en Perú y Chile que reportaron tanto  $M_s$  como  $M_w$ . La relación propuesta está dividida en los siguientes tres rangos:

|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| $M_w = 0.740(M_s) + 1.742$ | $M_s \leq 6$        |
| $M_w = 0.683(M_s) + 2.039$ | $6 \leq M_s \leq 8$ |
| $M_w = 1.093(M_s) - 0.593$ | $M_s \geq 6$        |



**Figura 4.4** Diagrama de flujo de decisión para la homogenización de datos frente a magnitudes sísmicas. Fuente: *(Elaboración propia)*.

#### 4.4. EVALUACION DE FUENTES SISMOGENICAS

Para hacer un análisis de la sismicidad es necesario conocer las características sismogénicas del territorio, para esto es necesario utilizar una clasificación que agrupa las áreas que tienen las mismas características sismogénicas. Esta división del territorio peruano se refiere a la clasificación de fuentes sismogénicas, según (SENCICO, 2016)<sup>4</sup> para obtener fuentes sismogénicas se han basado en el en el mapa de distribución de epicentros, así como en las características tectónicas del área de influencia. Debido a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana, así como del proceso de reajustes tectónicos del aparato andino que resume la actividad sísmica en el Perú. Esto permite agrupar a las fuentes en continentales y de subducción.

La determinación de estas fuentes se basa en conceptos regionales de sismotectónica, pues el aporte de fuentes sismogénicas locales es un problema que continúa abierto, ya que no existen metodologías exactas para darle solución. Un factor principal que imposibilita la evaluación de la contribución de las fuentes locales, es que, si bien es cierto que la traza y la geometría de las fuentes pueden ser

<sup>4</sup> Actualización Del Programa De Cómputo Orientado A La Determinación Del Peligro Sísmico En El País [Artículo] / Elaborado por SENCICO-2016. [Resumen] Pag. del N° 18 al 24.

conocidas, la falta de información de su actividad reciente no admite estudios de recurrencia y, en consecuencia, tal actividad no puede incluirse en un modelo probabilístico.

La mayor parte de los sismos ocurridos en el territorio nacional es producto de la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana. La placa de Nazca penetra debajo de la Sudamericana a ángulos variables y se profundiza a medida que avanza hacia el continente.

En el Perú, la distribución de los sismos en función a la profundidad de sus focos ha permitido configurar la geometría del proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se ha utilizado esta división geográfica vigente que identifican veintinueve fuentes sismogénicas de subducción identificadas con número (desde el 1 al 29) antecedido con la letra "F". en los cuales se han diferenciado los mecanismos de interface (F1, F2, F3, F4, F5 y F6), de intraplaca superficial (F7, F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15 y F16) e intermedias (F17, F18, F19 y F20). Así mismo nueve fuentes sísmicas continentales (F21, F22, F23, F24, F25, F26, F27, F28 y F29). La geometría de estas fuentes es concordante con el modelo de subducción propuesto por Cahill e Isacks (1992).

Las coordenadas geográficas y profundidad de las fuentes sismogénicas (interface, Interplaca y superficiales) se indican en la Tabla 4.2, Tabla 4.3 y Tabla 4.4. Además dicha información se digitalizó en el software ArcMap 10.5 y se aprecia en la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7.

**Tabla 4.2** Ubicación geográfica de las fuentes sismogénicas interface. Fuente: (SENCICO, 2016).

| FUENTE | LONGITUD (°S) | LATITUD (°W) | PROFUNDIDAD Km |
|--------|---------------|--------------|----------------|
| F1     | -79.928       | -1.314       | 50             |
| F1     | -79.697       | -2.447       | 50             |
| F1     | -81.742       | -2.217       | 25             |
| F1     | -81.67        | -1.163       | 25             |
| F1     | -80.38        | 2.11         | 25             |
| F1     | -78.778       | 1.666        | 50             |
| F2     | -81.851       | -3.458       | 25             |
| F2     | -82.054       | -5.322       | 25             |

| FUENTE | LONGITUD<br>(°S) | LATITUD<br>(°W) | PROFUNDIDAD<br>Km |
|--------|------------------|-----------------|-------------------|
| F2     | -80.991          | -8.528          | 25                |
| F2     | -79.267          | -7.74           | 50                |
| F2     | -80.368          | -5.595          | 50                |
| F2     | -79.699          | -2.439          | 50                |
| F2     | -81.236          | -2.274          | 25                |
| F3     | -80.991          | -8.528          | 25                |
| F3     | -80.022          | -10.322         | 25                |
| F3     | -77.184          | -14.412         | 25                |
| F3     | -75.856          | -13.563         | 60                |
| F3     | -77.824          | -10.464         | 60                |
| F3     | -79.267          | -7.74           | 60                |
| F4     | -75.8            | -15.8           | 25                |
| F4     | -74.36           | -16.88          | 25                |
| F4     | -73.43           | -16.039         | 65                |
| F4     | -75.834          | -13.548         | 65                |
| F4     | -77.155          | -14.392         | 25                |
| F5     | -73.43           | -16.039         | 70                |
| F5     | -74.36           | -16.88          | 30                |
| F5     | -72.727          | -18.1           | 30                |
| F5     | -71.602          | -19.101         | 30                |
| F5     | -70.517          | -18.082         | 75                |
| F6     | -71.602          | -19.101         | 30                |
| F6     | -71.334          | -19.475         | 30                |
| F6     | -71.377          | -22.999         | 50                |
| F6     | -69.266          | -22.999         | 85                |
| F6     | -69.623          | -20.786         | 75                |
| F6     | -69.9            | -18.564         | 70                |

**Tabla 4.3** Ubicación geográfica de las fuentes sismogénicas Interplaca. Fuente:  
(SENCICO, 2016).

| FUENTE | LONGITUD<br>(°S) | LATITUD<br>(°W) | PROFUNDIDAD<br>Km |
|--------|------------------|-----------------|-------------------|
| F7     | -79.033          | -2.129          | 125               |
| F7     | -76.989          | 0.998           | 125               |
| F7     | -79.222          | 1.809           | 50                |
| F7     | -80.031          | 0.162           | 50                |
| F7     | -80.6            | -1.4            | 50                |
| F8     | -81.334          | -3.969          | 50                |
| F8     | -80.84           | -5.926          | 50                |
| F8     | -79.881          | -8.015          | 50                |
| F8     | -77.474          | -6.92           | 120               |
| F8     | -78.667          | -4.725          | 120               |
| F8     | -77.716          | -2.798          | 200               |
| F8     | -80.017          | -1.63           | 90                |

| <b>FUENTE</b> | <b>LONGITUD<br/>(°S)</b> | <b>LATITUD<br/>(°W)</b> | <b>PROFUNDIDAD<br/>Km</b> |
|---------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| F9            | -78.423                  | -7.352                  | 100                       |
| F9            | -79.881                  | -8.015                  | 60                        |
| F9            | -78.003                  | -11.728                 | 60                        |
| F9            | -76.381                  | -13.899                 | 60                        |
| F9            | -74.775                  | -12.871                 | 120                       |
| F9            | -76.441                  | -10.831                 | 130                       |
| F10           | -73.778                  | -16.347                 | 70                        |
| F10           | -71.584                  | -14.405                 | 140                       |
| F10           | -73.127                  | -13.631                 | 125                       |
| F10           | -74.555                  | -12.725                 | 120                       |
| F10           | -76.381                  | -13.899                 | 60                        |
| F10           | -75.782                  | -14.883                 | 60                        |
| F10           | -74.709                  | -15.75                  | 60                        |
| F11           | -71.66                   | -17.328                 | 70                        |
| F11           | -70.558                  | -18.134                 | 70                        |
| F11           | -69.8                    | -17.4                   | 140                       |
| F11           | -71.584                  | -14.405                 | 140                       |
| F11           | -73.778                  | -16.347                 | 65                        |
| F12           | -70.48                   | -22.999                 | 70                        |
| F12           | -69.275                  | -22.999                 | 100                       |
| F12           | -67.872                  | -22.999                 | 150                       |
| F12           | -67.911                  | -21.766                 | 150                       |
| F12           | -68.56                   | -19.61                  | 155                       |
| F12           | -69.02                   | -18.55                  | 150                       |
| F12           | -69.8                    | -17.4                   | 140                       |
| F12           | -70.558                  | -18.143                 | 100                       |
| F13           | -77.716                  | -2.798                  | 200                       |
| F13           | -78.667                  | -4.725                  | 120                       |
| F13           | -76.472                  | -8.763                  | 130                       |
| F13           | -75.489                  | -8.12                   | 140                       |
| F13           | -74.558                  | -6.771                  | 150                       |
| F13           | -76.164                  | -4.332                  | 130                       |
| F13           | -75.255                  | -2.911                  | 150                       |
| F14           | -76.441                  | -10.831                 | 130                       |
| F14           | -74.775                  | -12.871                 | 120                       |
| F14           | -73.794                  | -12.219                 | 130                       |
| F14           | -76.472                  | -8.763                  | 130                       |
| F14           | -77.474                  | -6.92                   | 120                       |
| F14           | -78.423                  | -7.352                  | 120                       |
| F15           | -75.116                  | -10.513                 | 145                       |
| F15           | -73.794                  | -12.219                 | 130                       |
| F15           | -72.577                  | -11.41                  | 135                       |
| F15           | -73.319                  | -10.572                 | 150                       |
| F15           | -74.417                  | -9.331                  | 150                       |
| F15           | -75.489                  | -8.12                   | 140                       |

| FUENTE | LONGITUD<br>(°S) | LATITUD<br>(°W) | PROFUNDIDAD<br>Km |
|--------|------------------|-----------------|-------------------|
| F15    | -76.472          | -8.763          | 130               |
| F16    | -73.119          | -13.635         | 120               |
| F16    | -71.584          | -14.405         | 150               |
| F16    | -70.646          | -13.766         | 135               |
| F16    | -72.575          | -11.405         | 135               |
| F16    | -74.584          | -12.77          | 125               |
| F17    | -77.716          | -2.798          | 200               |
| F17    | -76.245          | -2.865          | 170               |
| F17    | -75.638          | -1.914          | 170               |
| F17    | -77.119          | -0.922          | 200               |
| F17    | -78.4            | -1.161          | 125               |
| F17    | -79.033          | -2.129          | 125               |
| F18    | -75.489          | -8.12           | 140               |
| F18    | -74.417          | -9.331          | 150               |
| F18    | -73.051          | -8.124          | 185               |
| F18    | -74.558          | -6.771          | 180               |
| F19    | -70.592          | -16.07          | 150               |
| F19    | -69.8            | -17.4           | 140               |
| F19    | -69.02           | -18.55          | 150               |
| F19    | -68.246          | -18.155         | 200               |
| F19    | -67.398          | -17.724         | 250               |
| F19    | -70.646          | -13.766         | 250               |
| F19    | -71.584          | -14.405         | 175               |
| F20    | -65.943          | -22.999         | 270               |
| F20    | -66.254          | -19.522         | 270               |
| F20    | -66.745          | -17.388         | 285               |
| F20    | -69.02           | -18.55          | 150               |
| F20    | -68.56           | -19.61          | 155               |
| F20    | -67.911          | -21.766         | 150               |
| F20    | -67.873          | -22.999         | 150               |

**Tabla 4.4** Ubicación geográfica de las fuentes sismogénicas superficiales. Fuente:  
(SENCICO, 2016).

| FUENTE | LONGITUD<br>(°S) | LATITUD<br>(°W) | PROFUNDIDAD<br>Km |
|--------|------------------|-----------------|-------------------|
| F21    | -79.173          | -7.916          | 30                |
| F21    | -77.365          | -7.009          | 30                |
| F21    | -78.581          | -4.449          | 30                |
| F21    | -80.368          | -5.595          | 30                |
| F22    | -79.173          | -7.916          | 30                |
| F22    | -77.824          | -10.464         | 30                |
| F22    | -76.318          | -12.881         | 30                |
| F22    | -75.677          | -13.764         | 30                |
| F22    | -74.411          | -12.807         | 30                |

| <b>FUENTE</b> | <b>LONGITUD<br/>(°S)</b> | <b>LATITUD<br/>(°W)</b> | <b>PROFUNDIDAD<br/>Km</b> |
|---------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| F22           | -75.315                  | -12.019                 | 30                        |
| F22           | -76.798                  | -8.551                  | 30                        |
| F22           | -77.365                  | -7.009                  | 30                        |
| F23           | -75.677                  | -13.764                 | 30                        |
| F23           | -73.09                   | -16.383                 | 30                        |
| F23           | -72.106                  | -14.949                 | 30                        |
| F23           | -73.789                  | -13.349                 | 30                        |
| F23           | -74.411                  | -12.807                 | 30                        |
| F24           | -73.09                   | -16.383                 | 30                        |
| F24           | -70.517                  | -18.096                 | 30                        |
| F24           | -69.9                    | -18.564                 | 30                        |
| F24           | -69.174                  | -17.909                 | 30                        |
| F24           | -70.484                  | -15.743                 | 30                        |
| F24           | -72.106                  | -14.949                 | 30                        |
| F25           | -79.367                  | -0.036                  | 30                        |
| F25           | -79.083                  | -2.408                  | 30                        |
| F25           | -77.139                  | -1.595                  | 30                        |
| F25           | -76.797                  | 1.211                   | 30                        |
| F25           | -77.897                  | 1.73                    | 30                        |
| F26           | -79.083                  | -2.408                  | 30                        |
| F26           | -78.581                  | -4.449                  | 30                        |
| F26           | -78.152                  | -5.348                  | 30                        |
| F26           | -76.293                  | -4.598                  | 30                        |
| F26           | -76.661                  | -3.088                  | 30                        |
| F26           | -77.139                  | -1.595                  | 30                        |
| F27           | -78.152                  | -5.348                  | 30                        |
| F27           | -77.365                  | -7.009                  | 30                        |
| F27           | -76.798                  | -8.551                  | 30                        |
| F27           | -75.145                  | -7.359                  | 30                        |
| F27           | -75.43                   | -6.292                  | 30                        |
| F27           | -76.304                  | -4.61                   | 30                        |
| F28           | -76.798                  | -8.551                  | 30                        |
| F28           | -75.315                  | -12.019                 | 30                        |
| F28           | -73.789                  | -13.349                 | 30                        |
| F28           | -72.276                  | -11.656                 | 30                        |
| F28           | -73.668                  | -10.523                 | 30                        |
| F28           | -74.957                  | -8.744                  | 30                        |
| F28           | -75.145                  | -7.359                  | 30                        |
| F29           | -73.789                  | -13.349                 | 30                        |
| F29           | -72.106                  | -14.949                 | 30                        |
| F29           | -70.484                  | -15.743                 | 30                        |
| F29           | -69.414                  | -12.956                 | 30                        |
| F29           | -72.276                  | -11.656                 | 30                        |

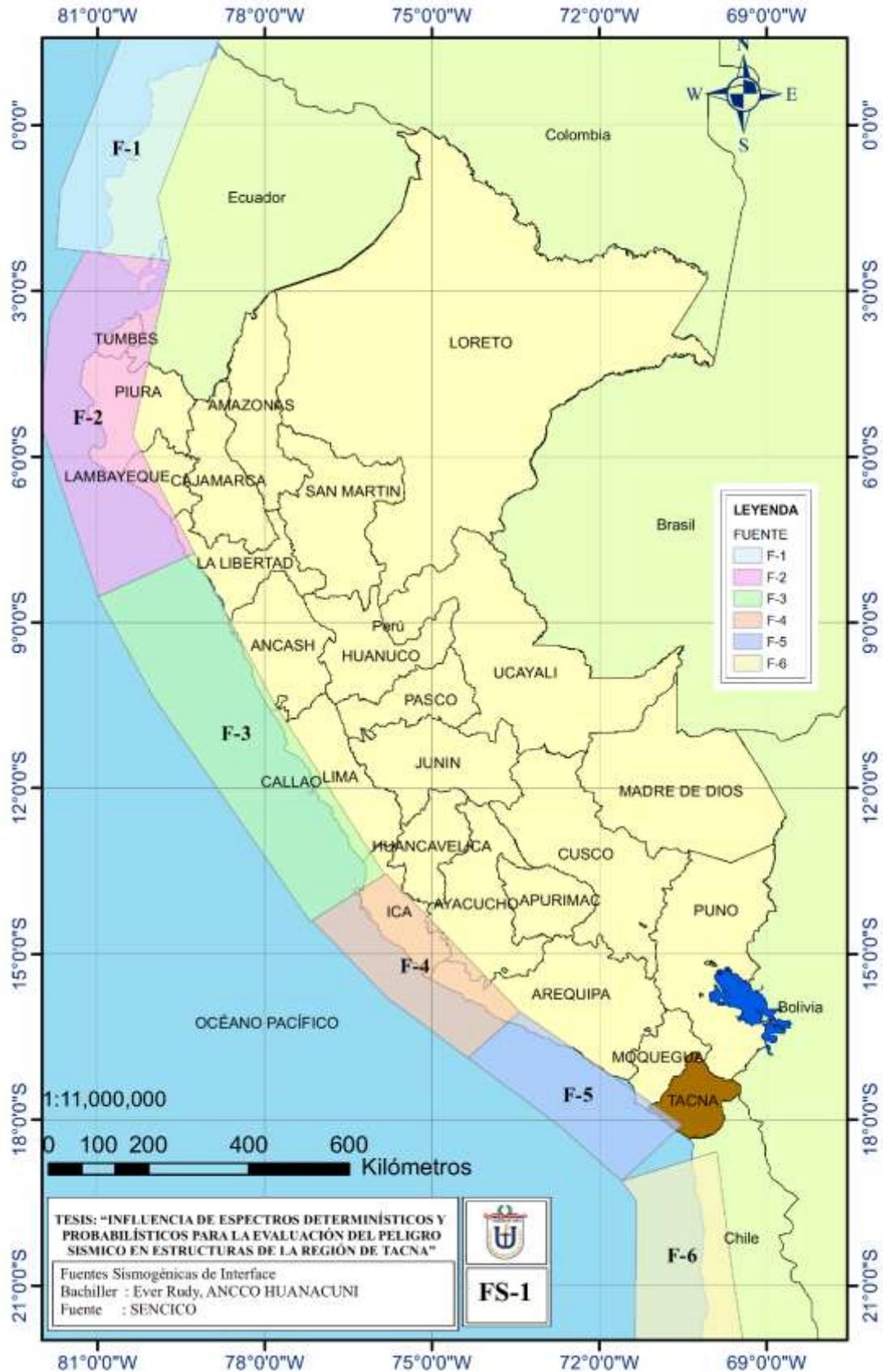


Figura 4.5 Mapa de fuentes sismogénicas de Interface. Fuente: (Elaboración propia).

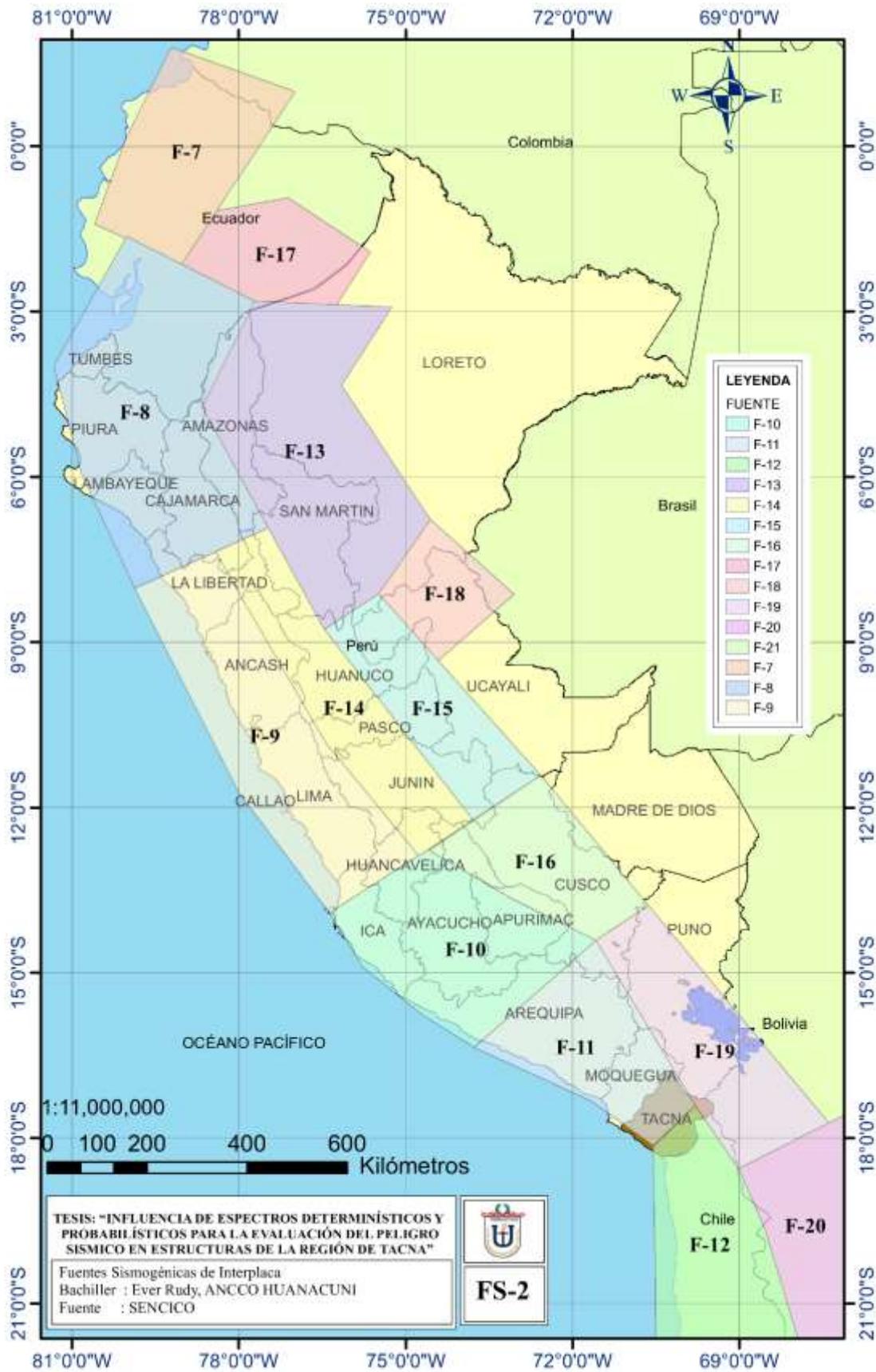


Figura 4.6 Mapa de fuentes sismogénicas de Interplaca. Fuente: (Elaboración propia).

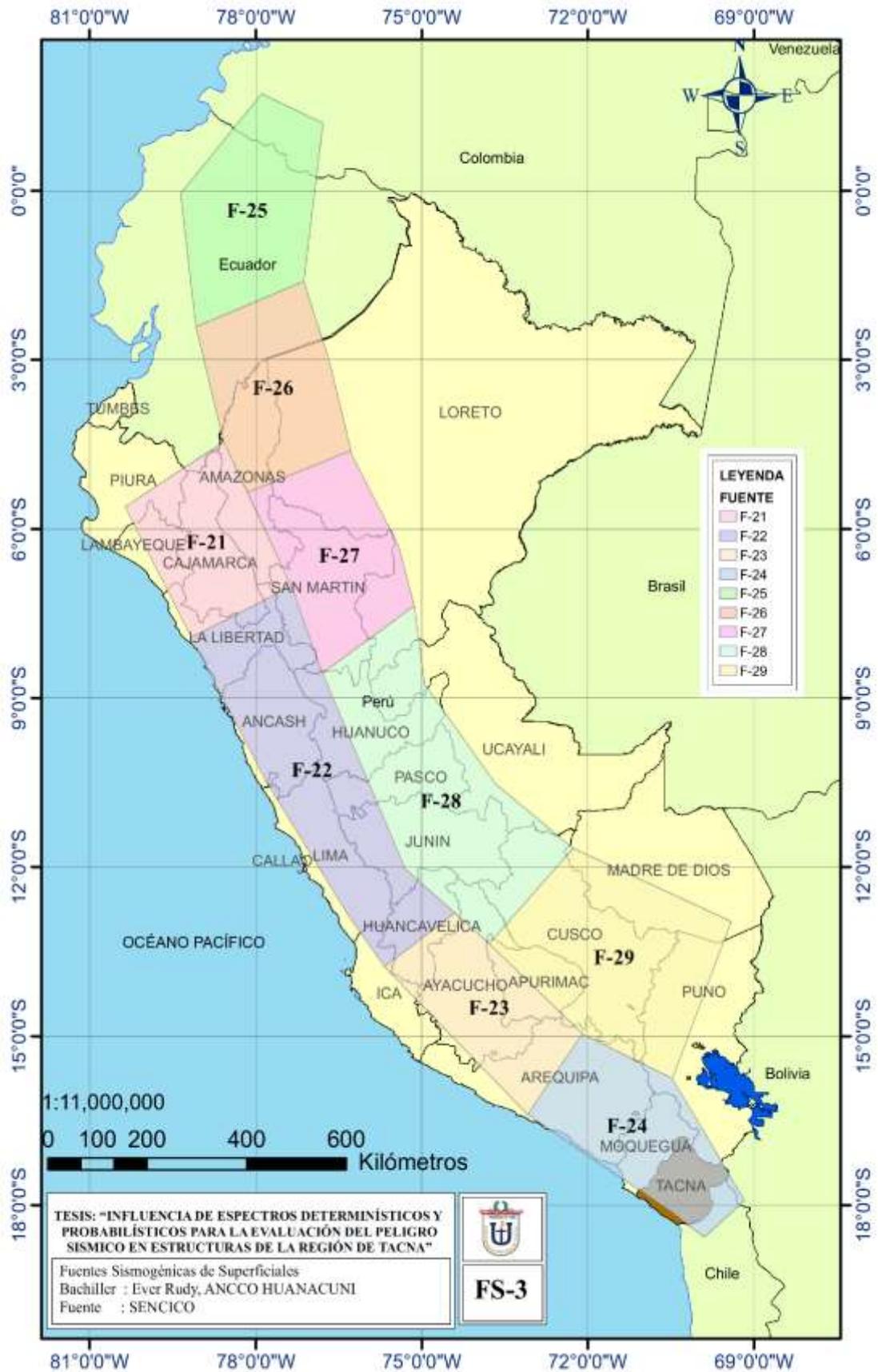
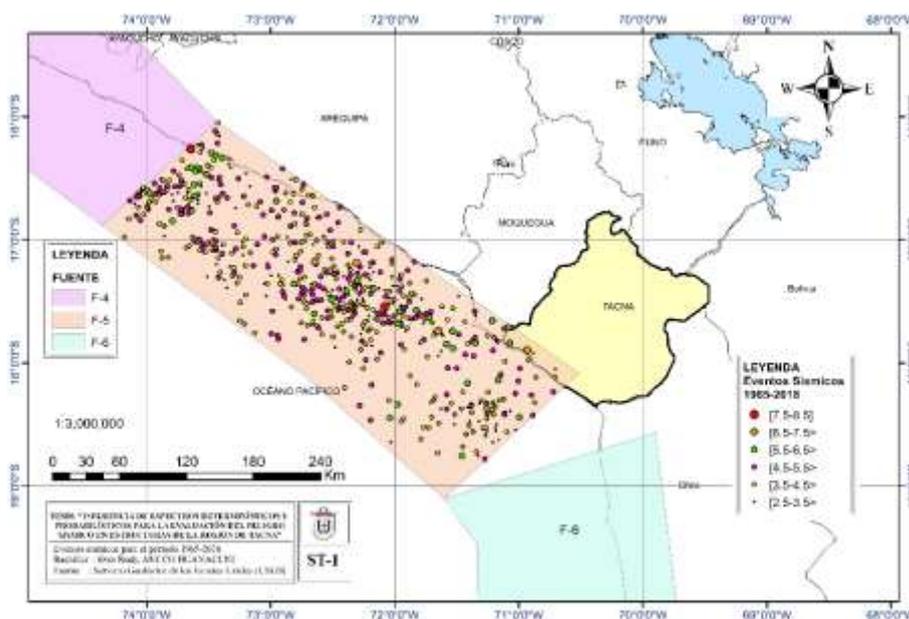


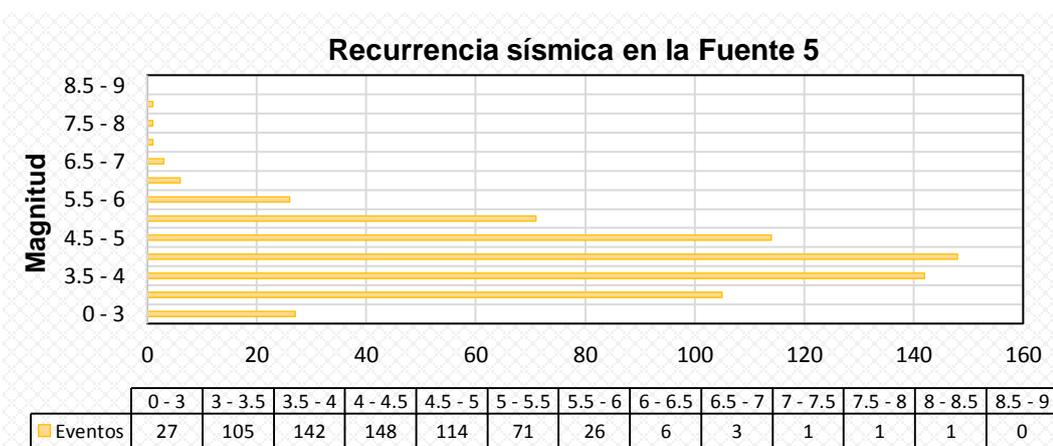
Figura 4.7 Mapa de fuentes sismogénicas Superficiales. Fuente: (Elaboración propia).

### 4.4.1. EVALUACIÓN DE FUENTES SISMOGÉNICAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Para realizar el análisis del peligro sísmico en la región de Tacna es necesario conocer las fuentes sismogénicas participantes en dicha región. Estas divisiones sismológicas se muestran en la Figura 4.8, Figura 4.10 y Figura 4.14. Pertenecientes a la clasificación de fuentes de interface, interplaca y superficiales (F5, F11, F12, F19, F24) mostradas anteriormente. Además de la recurrencia sísmica se presenta en la Figura 4.9, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13 y Figura 4.15 respectivamente.



**Figura 4.8** Eventos sísmicos en la fuente sismogénica de Interface (F5) para la Región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 4.9** Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interface (F5) para la Región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.

En la Figura 4.8 y Figura 4.9 se aprecia la evaluación de la fuente sismogénica de interface (F5) con un registro de 645 eventos sísmicos según el Servicio Geológico de los Estados Unidos en 54 años, teniendo como magnitud máxima 8.40 Mw y magnitud mínima de 2.9 Mw además de una tasa promedio anual (varianza) de 11.94 y una desviación estándar de 3.5.

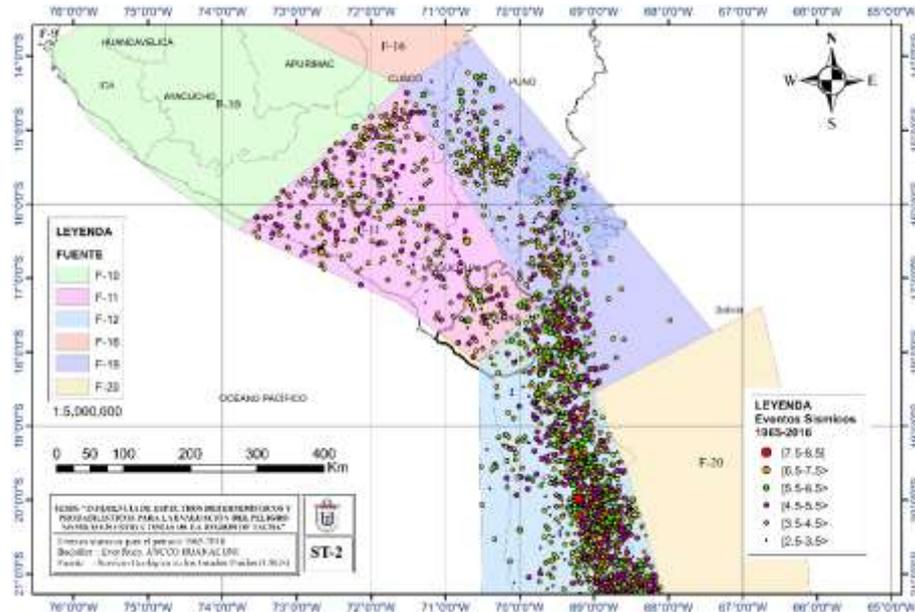


Figura 4.10 Eventos sísmicos en las fuentes sismogénicas de Interplaca (F11, F12, F19) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).

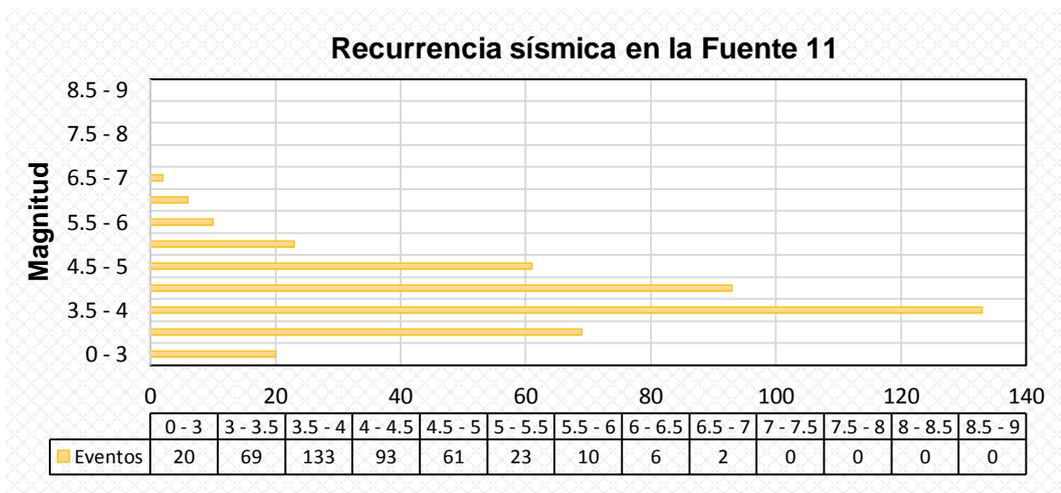
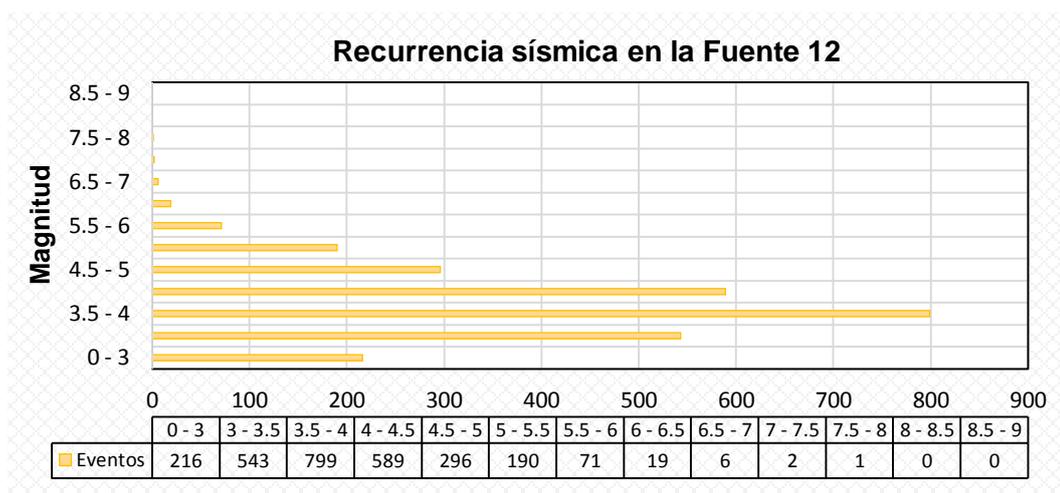
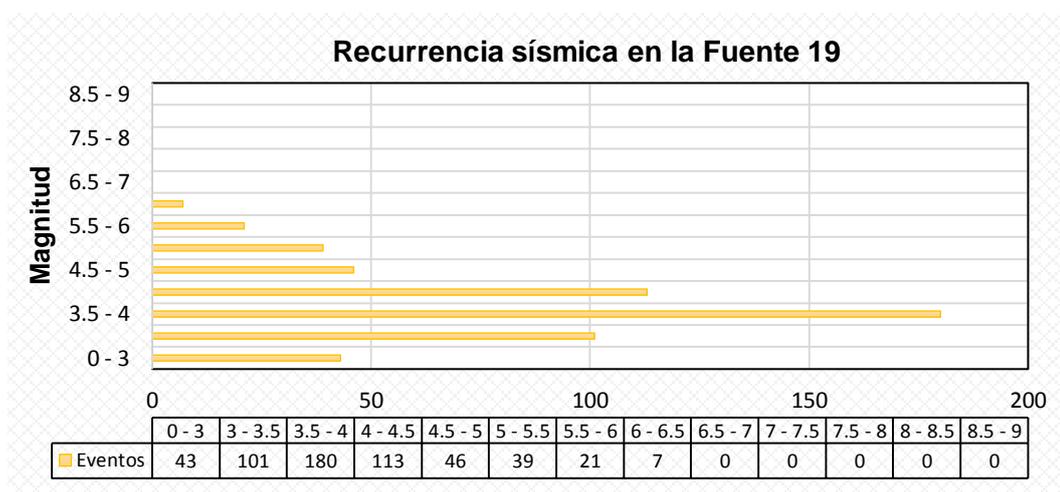


Figura 4.11 Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interplaca (F11) para la Región de Tacna. Fuente: (Elaboración propia).



**Figura 4.12** Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interplaca (F12) para la Región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 4.13** Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica de Interplaca (F19) para la Región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.

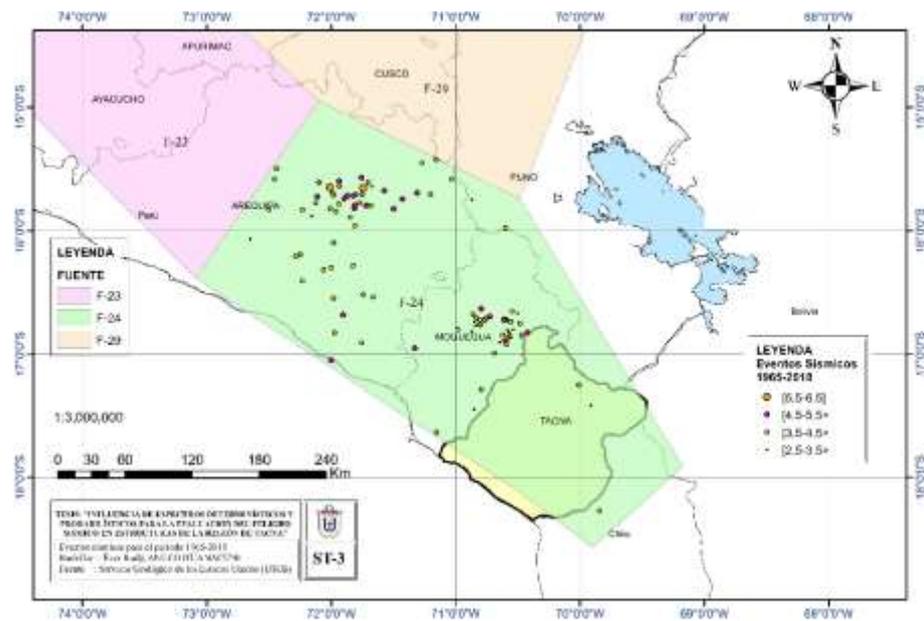
En la Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13 se aprecia la evaluación de la fuente sismogénica de interplaca (F11, F12 y F19).

Para la Fuente 11 se tiene un registro de 417 eventos sísmicos según el Servicio Geológico de los Estados Unidos en 54 años, teniendo como magnitud máxima 6.8 Mw y magnitud mínima de 2.97 Mw además de una tasa promedio anual (varianza) de 7.72 y una desviación estándar de 2.78.

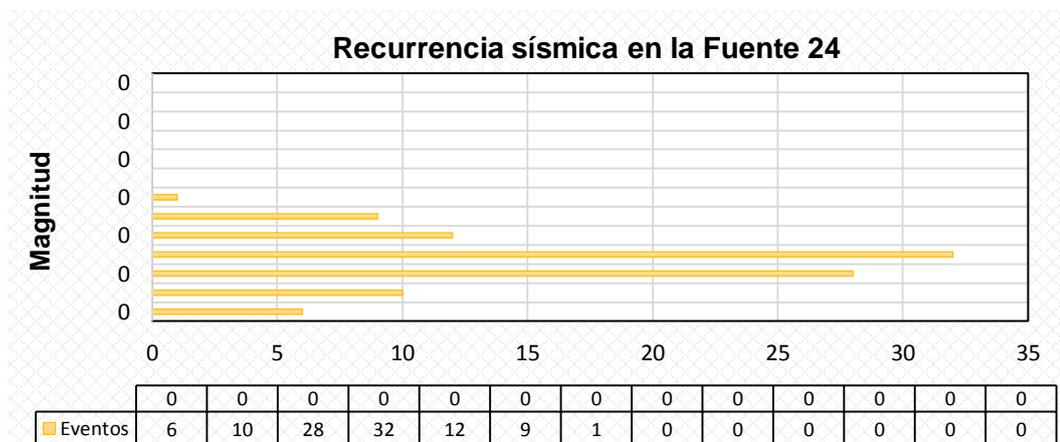
Para la Fuente 12 se tiene un registro de 2732 eventos sísmicos según el Servicio Geológico de los Estados Unidos en 54 años, teniendo como magnitud

máxima 7.8 Mw y magnitud mínima de 2.97 Mw además de una tasa promedio anual (varianza) de 50.59 y una desviación estándar de 7.11.

Para la Fuente 19 se tiene un registro de 550 eventos sísmicos según el Servicio Geológico de los Estados Unidos en 54 años, teniendo como magnitud máxima 6.49 Mw y magnitud mínima de 2.97 Mw además de una tasa promedio anual (varianza) de 10.19 y una desviación estándar de 3.19.



**Figura 4.14** Eventos sísmicos en la fuente sismogénica superficial (F24) para la Región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 4.15** Recurrencia sísmica en la fuente sismogénica superficial (F24) para la Región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.

En la Figura 4.14 y Figura 4.15 se aprecia la evaluación de la fuente sismogénica superficial (F24) con un registro de 98 eventos sísmicos según el Servicio Geológico de los Estados Unidos en 54 años, teniendo como magnitud máxima 6.00 Mw y magnitud mínima de 2.9 Mw además de una tasa promedio anual (varianza) de 1.81 y una desviación estándar de 1.35.

#### **4.5. LEYES DE ATENUACIÓN UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO**

Para el cálculo de la peligrosidad sísmica es necesario el uso de relaciones de atenuación que permitan predecir los parámetros del movimiento del suelo en función de la magnitud del evento y la distancia de la fuente. Uno de los parámetros más importantes desde el punto de vista de la ingeniería sísmica es la aceleración pico (PGA) y especialmente la horizontal. Por lo tanto, la elección de la ley de atenuación es un factor muy importante para determinar la peligrosidad sísmica de la zona de estudio.

Según (Bolaños Luna & Monrroy Concha, 2004) es posible desarrollar modelos de atenuación del movimiento del suelo para sismos con características regionales y tectónicas diferentes. Por ejemplo, sismos que se desarrollan en la corteza en regiones tectónicamente activas, sismos en la zona de subducción de interface y sismos que ocurren en la placa de subducción descendente. Debido a la limitada cantidad de información existente en registros de aceleraciones, velocidades o desplazamientos ante movimientos sísmicos en el Perú hacen difícil el desarrollo de nuevas leyes de atenuación que permitan estimar parámetros como la aceleración del suelo y ordenadas espectrales para los diferentes tipos de sismos en el Perú (sismos de interface e intraplaca y sismos de corteza). Sin embargo, en la literatura hay leyes de atenuación para las relaciones empíricas de la PGA horizontales definidas en una escala regional. Entre ellas, se decidió utilizar las publicadas por:

- (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997) que diferencia los mecanismos focales para sismos de subducción de interface e intraplaca en la estimación de la máxima aceleración del suelo usando datos de sismos registrados en Cascadia, Alaska, Mexico, Chile, Japón, Perú (14 registros) y las Islas Salomón para distancias entre 10 y 500 km, teniendo en cuenta además las características del sitio.

- (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997) que diferencia los mecanismos focales para sismos continentales en la estimación de la máxima aceleración del suelo.

A continuación, se describirá de forma individual las dos leyes citadas.

#### **4.5.1. MODELO DE ATENUACIÓN SÍSMICA (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997)**

En esta ley de atenuación se define las características de sitio en una clasificación de tres grupos: roca, suelo duro poco profundo y suelo profundo, utilizando la magnitud de momento  $M_w$  para la medida del evento. Según (Bolaños Luna & Monroy Concha, 2004) Youngs mostró que las aceleraciones máximas obtenidas de sismos de subducción atenúan más lentamente que aquellas producidas por sismos de corteza, y que los sismos de intraplaca producen aceleraciones mayores que los de interface para la misma magnitud y distancia.

##### **4.5.1.1. SISMOS POR SUBDUCCIÓN EN ROCA**

La relación de atenuación para la aceleración espectral de respuesta horizontal (5% amortiguado) en roca está dada por la siguiente función:

$$\begin{aligned} \ln(y) = & 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) \\ & + 0.00607H + 0.3846Z_T \end{aligned}$$

$$\text{Desviación Estándar} = C_4 + C_5M$$

Donde:

$Y$  = aceleración espectral en (g).

$M$  = magnitud momento ( $M_w$ ).

$r_{rup}$  = distancia más cercana a la rotura (Km).

$H$  = profundidad (Km).

$Z_T$  = tipo de fuente, 0 para Interface, 1 para intraplaca Desviación estándar para magnitudes  $M \geq 8$ .

**Tabla 4.5** Coeficientes para la ley de atenuación Youngs et al en 1997. Fuente: (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997).

| Periodos (s) | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.075        | 1.275          | 0.000          | -2.707         | 1.450          | -0.100         |
| 0.2          | 0.722          | -0.003         | -2.528         | 1.450          | -0.100         |
| 0.3          | 0.246          | -0.004         | -2.454         | 1.450          | -0.100         |
| 0.4          | -0.115         | -0.004         | -2.401         | 1.450          | -0.100         |
| 0.5          | -0.400         | -0.005         | -2.360         | 1.450          | -0.100         |
| 0.75         | -1.149         | -0.006         | -2.286         | 1.450          | -0.100         |
| 1            | -1.736         | -0.006         | -2.234         | 1.450          | -0.100         |
| 1.5          | -2.634         | -0.007         | -2.160         | 1.500          | -0.100         |
| 2            | -3.328         | -0.008         | -2.107         | 1.550          | -0.100         |
| 3            | -4.511         | -0.009         | -2.033         | 1.650          | -0.100         |

En la Tabla 4.5 se presentan los valores de los coeficientes calculados según la ley de atenuación de (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997) con 5% de amortiguamiento para los terremotos de subducción en roca.

### 3.7.1.1. SISMOS POR SUBDUCCIÓN EN SUELO

La relación de atenuación para la aceleración espectral de respuesta horizontal (5% amortiguado) en suelo está dada por la siguiente función:

$$\begin{aligned} \ln(y) = & -0.6687 + 1.438M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(R + 1.097e^{0.617M}) \\ & + 0.00648H + 0.3643Z_T \end{aligned}$$

**Tabla 4.6** Coeficientes para la ley de atenuación Youngs et al en 1997. Fuente: (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997).

| Periodos (s) | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.075        | 2.400          | -0.002         | -2.697         | 1.450          | -0.100         |
| 0.1          | 2.516          | -0.002         | -2.697         | 1.450          | -0.100         |
| 0.2          | 1.549          | -0.002         | -2.464         | 1.450          | -0.100         |
| 0.4          | 0.144          | -0.002         | -2.230         | 1.450          | -0.100         |
| 0.5          | -0.438         | -0.004         | -2.140         | 1.450          | -0.100         |
| 0.75         | -1.704         | -0.005         | -1.952         | 1.450          | -0.100         |
| 1            | -2.870         | -0.007         | -1.785         | 1.450          | -0.100         |
| 1.5          | -5.101         | -0.011         | -1.470         | 1.500          | -0.100         |

| Periodos (s) | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2            | -6.433         | -0.016         | -1.290         | 1.550          | -0.100         |
| 3            | -6.672         | -0.022         | -1.347         | 1.650          | -0.100         |
| 4            | -7.618         | -0.024         | -1.272         | 1.650          | -0.100         |

En la Tabla 4.6 se presentan los valores de los coeficientes calculados según la ley de atenuación de (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997) con 5% de amortiguamiento para los terremotos de subducción en suelo.

#### 4.5.2. MODELO DE ATENUACIÓN SÍSMICA (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997)

Para los sismos continentales se ha utilizado la ley de atenuación propuesta por Sadigh, Chang, Egan, Makdisi y Youngs (1997). Esta relación está basada principalmente en sismos de la Costa Oeste de los Estados Unidos y en datos obtenidos de los sismos de Gazli (Rusia, 1976) y Tabas (Irán, 1978), por medio de un análisis de regresión utilizando una base de datos de 121 acelerogramas de terremotos, La medida del tamaño del evento fue caracterizada por la magnitud momento ( $M_w > 3.8$ ), registrados en sitios dentro de los 200 kilómetros de la superficie de ruptura; la distancia empleada en el modelo, es definida como la menor distancia a la ruptura.

Este modelo de atenuación de aceleraciones espectrales se aplica a sismos continentales.

$$\ln(S_a) = C_1 + C_2M + C_3(8.5M)^{2.5} + C_4(\ln(R + \exp(C_5 + C_6M))) + C_7\ln(R + 2)$$

Donde:

S<sub>a</sub> = aceleración espectral en (g)

M = magnitud momento (M<sub>w</sub>)

R = distancia más cercana a la rotura (Km)

**Tabla 4.7** Coeficientes para la ley de atenuación de ordenadas espectrales en roca según Sadigh et al. (1997). Fuente: (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997).

| Periodos (s) | C1    | C2    | C3    | C4     | C5    | C6    | C7     |
|--------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 0.07         | 0.132 | 1.200 | 0.007 | -2.554 | 1.556 | 0.300 | -0.099 |

| Periodos (s) | C1     | C2    | C3     | C4     | C5    | C6    | C7     |
|--------------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
| <b>0.1</b>   | 0.330  | 1.200 | 0.007  | -2.578 | 1.556 | 0.300 | -0.049 |
| <b>0.2</b>   | 0.184  | 1.200 | -0.005 | -2.496 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>0.3</b>   | -0.068 | 1.200 | -0.020 | -2.434 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>0.4</b>   | -0.358 | 1.200 | -0.034 | -2.388 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>0.5</b>   | -0.706 | 1.200 | -0.048 | -2.334 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>0.75</b>  | -1.450 | 1.200 | -0.060 | -2.238 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>1</b>     | -2.046 | 1.200 | -0.066 | -2.160 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>1.5</b>   | -2.888 | 1.200 | -0.078 | -2.070 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>2</b>     | -3.534 | 1.200 | -0.084 | -2.004 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |
| <b>3</b>     | -4.440 | 1.200 | -0.096 | -1.932 | 1.556 | 0.300 | 0.000  |

En la Tabla 4.7 se presentan los valores de los coeficientes calculados según la ley de atenuación de (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997) con 5% de amortiguamiento en roca para eventos con  $M \leq 6.5$ .

**Tabla 4.8** Coeficientes para la ley de atenuación de ordenadas espectrales en roca según Sadigh et al. (1997). Fuente: (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997).

| Periodos (s) | C1     | C2    | C3     | C4     | C5     | C6    | C7     |
|--------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| <b>0.07</b>  | -0.648 | 1.320 | 0.007  | -2.554 | -0.581 | 0.629 | -0.098 |
| <b>0.1</b>   | -0.450 | 1.320 | 0.007  | -2.578 | -0.581 | 0.629 | -0.049 |
| <b>0.2</b>   | -0.596 | 1.320 | -0.005 | -2.496 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>0.3</b>   | -0.848 | 1.320 | -0.020 | -2.433 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>0.4</b>   | -1.138 | 1.320 | -0.034 | -2.388 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>0.5</b>   | -1.486 | 1.320 | -0.048 | -2.334 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>0.75</b>  | -2.230 | 1.320 | -0.060 | -2.238 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>1</b>     | -2.826 | 1.320 | -0.066 | -2.160 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>1.5</b>   | -3.668 | 1.320 | -0.078 | -2.070 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>2</b>     | -4.314 | 1.320 | -0.084 | -2.004 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |
| <b>3</b>     | -5.220 | 1.320 | -0.096 | -1.932 | -0.581 | 0.629 | 0.000  |

En la Tabla 4.8 se presentan los valores de los coeficientes calculados según la ley de atenuación de (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997) con 5% de amortiguamiento en roca para eventos con  $M > 6.5$ .

#### 4.6. ANÁLISIS DE LA COMPLETITUD DE LA MUESTRA SÍSMICA<sup>5</sup>

La incompletitud de las muestras de eventos acontecidos hace que no encajen en la ecuación planteada para la relación de recurrencia de Gutenberg y Richter. El análisis se realizará usando la metodología planteada por Steep. “Determinar la tasa media de ocurrencia,  $\lambda=N/años$  de la muestra de eventos conduce a subestimar seriamente  $\lambda$  para los niveles de intensidades o magnitudes medias y bajas. Por otro lado, si la muestra es acortada al intervalo de tiempo en el cual la clase de intensidad más baja incluida en el cálculo es completamente reportada, las tasas medias de ocurrencia pueden no establecerse para los eventos observados más grandes debido a la falta de datos.

Para sobrellevar este problema se busca determinar el subintervalo de la muestra en el cual  $\lambda$  es estable para cada clase de intensidad, y asumir que este representa el intervalo completo del reporte.

El procedimiento consiste en agrupar los eventos en clases de intensidades o magnitudes y cada clase se modela como un proceso de punto en el tiempo. La secuencia de los eventos puede ser modelada por una distribución de Poisson, se considera que la muestra es estacionaria si la media, la variancia y otros parámetros se mantienen en cada intervalo de tiempo (o en el periodo de ventana evaluado). De acuerdo a Steep, si  $k_1, k_2, k_3 \dots, k_n$ , son el número de sismos por intervalo de tiempo unitario, entonces un estimado imparcial de la tasa media por intervalo de tiempo unitario es:

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i$$

Teniendo como varianza:

$$\sigma^2 = \frac{\lambda}{n}$$

Donde  $n$  es el número de intervalos de tiempo unitarios. Tomando el intervalo de tiempo unitario para un año da

$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}}$$

---

<sup>5</sup> Peligrosidad Sísmica – Evaluación Determinística y Probabilística [Artículo] / Elaborado por Vlasev Toledo Espinoza. [Resumen] Pag. del N° 22 al 32.

Como la desviación estándar de la media, donde  $T$  es la longitud de la muestra. Así, asumiendo estacionalidad, se espera que  $\sigma\lambda$  se comporte como  $1/\sqrt{T}$  en el subintervalo de la muestra en el cual la tasa media de ocurrencia es una clase de intensidad es constante.

#### 4.7. RELACIÓN GUTENBERG-RICHTER

Es una relación propuesta por Gutenberg y Richter en 1949, quienes determinaron que en un rango de magnitudes la relación del logaritmo de la frecuencia (acumulada de eventos,  $N$ ) con la magnitud es lineal. El inicio de dicho rango será la magnitud mínima, y el final es la magnitud máxima.

$$\text{Log } N = a - bM$$

Donde,  $N$  es la frecuencia acumulada de eventos que se tienen registrados mayores o iguales a una magnitud,  $M$  es la magnitud, y  $a$  y  $b$  son los parámetros de la ecuación lineal que se obtiene mediante mínimos cuadrados o regresión por máxima verosimilitud. Además, debido a la naturaleza de la ecuación lineal,  $a$  indicará la cantidad de eventos con magnitud mayor a cero, y  $b$  es la pendiente. Si  $b$  es menor indicará que la relación de eventos de mayor magnitud será mayor que los eventos de menor magnitud. A medida que se tienen más eventos y mayor cantidad de años en el registro el valor de  $b$  llega a estabilizarse. Esta ecuación también se puede representar con base a la frecuencia o tasa de ocurrencia  $N/T$ , el valor de  $b$  seguirá siendo el mismo, sólo varía el valor de " $a$ ".

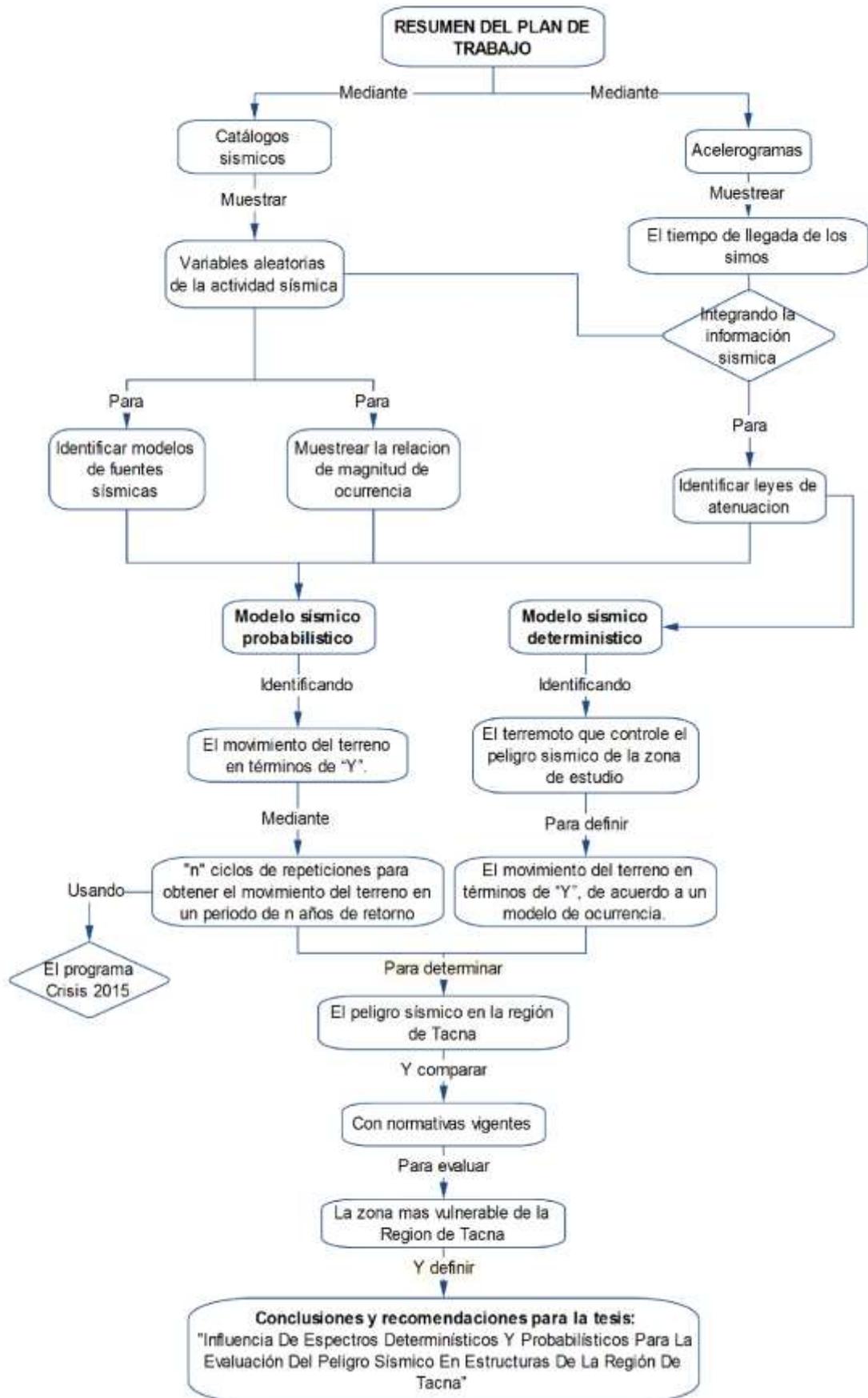


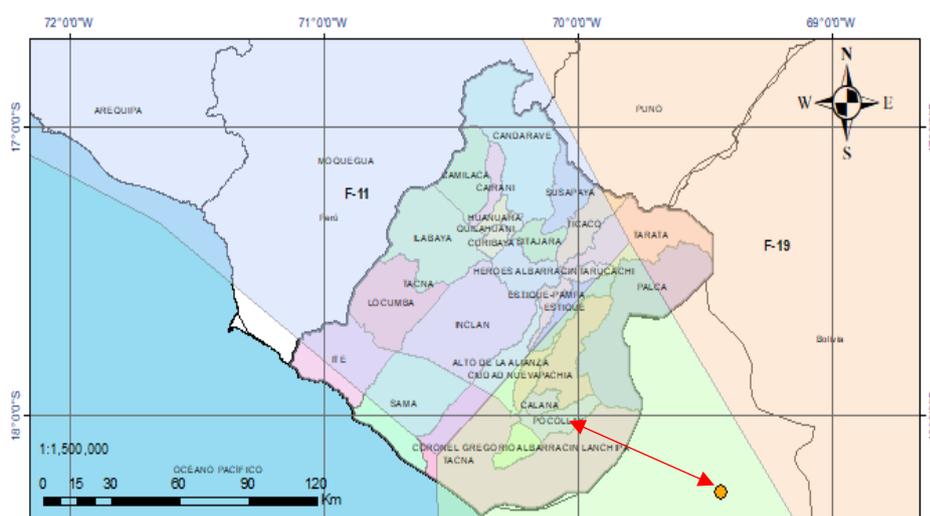
Figura 4.16 Resumen del plan de trabajo. Fuente: (Elaboración Propia).

## CAPITULO V

### RESULTADOS

#### 5.1. PELIGROSIDAD SÍSMICA DETERMINISTA

En esta sección se dan detalles sobre el cálculo del espectro de peligro sísmico determinístico para un distrito en específico de la región de Tacna. El distrito seleccionado para la obtención del espectro fue el distrito de Pocollay ubicado a  $17^{\circ} 50' 39.84''$  latitud sur y  $70^{\circ} 13' 6.6''$  longitud oeste (ver Figura 5.1), y perteneciente a la fuente sísmogénica 12 (F12) en la que prevalecen eventos sísmicos de intraplaca.



**Figura 5.1** Sismo del 25 de febrero de 1983 con una magnitud de 6.9 Mw en la división política distrital de la región de Tacna. Fuente: *(Elaboración propia)*.

Para esta sección se evaluó la ley de atenuación propuesta por (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997). Luego se compararon estos resultados usando el espectro de peligro probabilístico para Perú según la Norma Técnica peruana (E-030) que tiene un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años y un 5% de amortiguamiento con respecto al crítico.

En la Tabla 5.1 y Tabla 5.2 se aprecia los resultados de la evaluación para la ley de atenuación según (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997) en roca y suelo, respectivamente. Para ello la magnitud a evaluar es el sismo del 25 de febrero de 1983 con una magnitud de 6.9 Mw e hipocentro ubicado a  $18.27^{\circ}$  latitud sur y  $69.44^{\circ}$

longitud oeste, a 146 km de profundidad (ver Figura 5.1) y una distancia a la ruptura de 105.946 km.

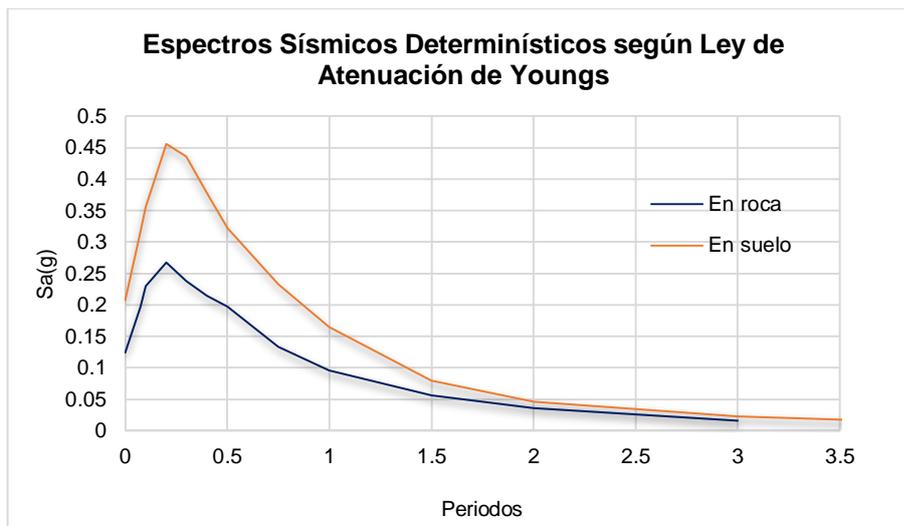
### 5.1.1. LEY DE ATENUACIÓN DE (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997)

**Tabla 5.1** Valores del espectro determinístico para la ley de atenuación de Youngs, para el sismo con magnitud 6.9 Mw en roca. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Periodos (s) | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | Ln(y)  | y(g)   | Desv. Estand. |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|---------------|
| 0            | 0.000          | 0.000          | -2.552         | 1.450          | -0.100         | -2.086 | 0.1242 | 0.76          |
| 0.075        | 1.275          | 0.000          | -2.707         | 1.450          | -0.100         | -1.622 | 0.1974 | 0.76          |
| 0.1          | 1.188          | -0.001         | -2.655         | 1.450          | -0.100         | -1.470 | 0.2299 | 0.76          |
| 0.2          | 0.722          | -0.003         | -2.528         | 1.450          | -0.100         | -1.319 | 0.2674 | 0.76          |
| 0.3          | 0.246          | -0.004         | -2.454         | 1.450          | -0.100         | -1.435 | 0.2382 | 0.76          |
| 0.4          | -0.115         | -0.004         | -2.401         | 1.450          | -0.100         | -1.539 | 0.2146 | 0.76          |
| 0.5          | -0.400         | -0.005         | -2.360         | 1.450          | -0.100         | -1.624 | 0.1970 | 0.76          |
| 0.75         | -1.149         | -0.006         | -2.286         | 1.450          | -0.100         | -2.013 | 0.1336 | 0.76          |
| 1            | -1.736         | -0.006         | -2.234         | 1.450          | -0.100         | -2.349 | 0.0955 | 0.76          |
| 1.5          | -2.634         | -0.007         | -2.160         | 1.500          | -0.100         | -2.886 | 0.0558 | 0.81          |
| 2            | -3.328         | -0.008         | -2.107         | 1.550          | -0.100         | -3.324 | 0.0360 | 0.86          |
| 3            | -4.511         | -0.009         | -2.033         | 1.650          | -0.100         | -4.146 | 0.0158 | 0.96          |

**Tabla 5.2** Valores del espectro determinístico para la ley de atenuación de Youngs, para el sismo con magnitud 6.9 Mw en suelo. Fuente: *(Elaboración propia)*.

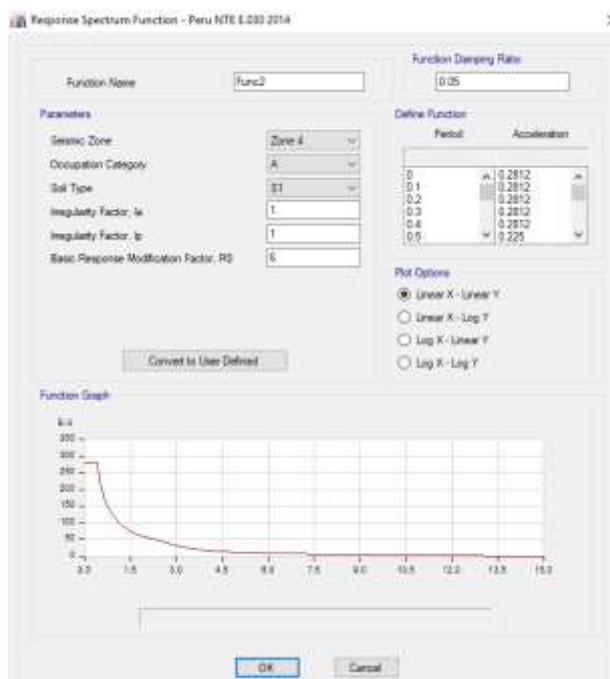
| Periodos (s) | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | Ln(y)  | y(g)   | Desv. Estand. |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|---------------|
| 0            | 0.000          | 0.000          | -2.329         | 1.450          | -0.100         | -1.574 | 0.2072 | 0.76          |
| 0.075        | 2.400          | -0.002         | -2.697         | 1.450          | -0.100         | -1.149 | 0.3170 | 0.76          |
| 0.1          | 2.516          | -0.002         | -2.697         | 1.450          | -0.100         | -1.033 | 0.3560 | 0.76          |
| 0.2          | 1.549          | -0.002         | -2.464         | 1.450          | -0.100         | -0.785 | 0.4559 | 0.76          |
| 0.3          | 0.793          | -0.002         | -2.327         | 1.450          | -0.100         | -0.830 | 0.4359 | 0.76          |
| 0.4          | 0.144          | -0.002         | -2.230         | 1.450          | -0.100         | -0.974 | 0.3776 | 0.76          |
| 0.5          | -0.438         | -0.004         | -2.140         | 1.450          | -0.100         | -1.132 | 0.3225 | 0.76          |
| 0.75         | -1.704         | -0.005         | -1.952         | 1.450          | -0.100         | -1.456 | 0.2331 | 0.76          |
| 1            | -2.870         | -0.007         | -1.785         | 1.450          | -0.100         | -1.806 | 0.1644 | 0.76          |
| 1.5          | -5.101         | -0.011         | -1.470         | 1.500          | -0.100         | -2.538 | 0.0790 | 0.81          |
| 2            | -6.433         | -0.016         | -1.290         | 1.550          | -0.100         | -3.081 | 0.0459 | 0.86          |
| 3            | -6.672         | -0.022         | -1.347         | 1.650          | -0.100         | -3.787 | 0.0227 | 0.960         |
| 4            | -7.618         | -0.024         | -1.272         | 1.650          | -0.100         | -4.384 | 0.0125 | 0.96          |



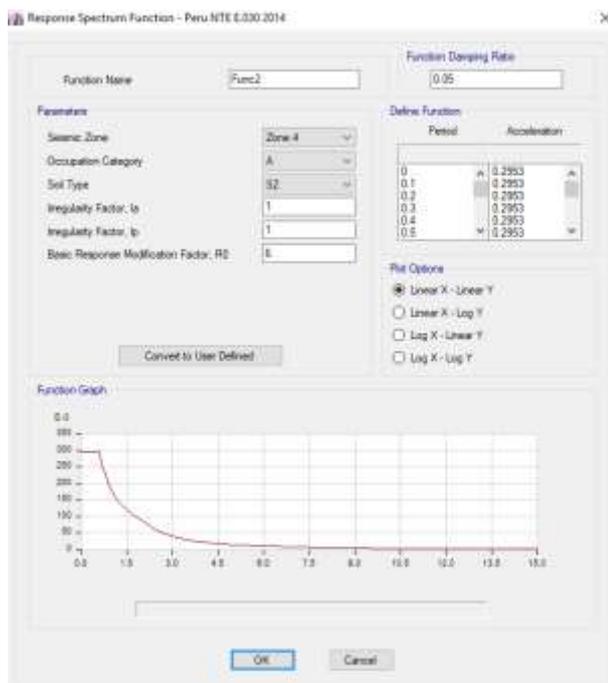
**Figura 5.2** Espectros sísmicos determinísticos para la ley de atenuación de Youngs en roca y suelo. Fuente: *(Elaboración propia)*.

### 5.1.2. ESPECTRO NORMATIVO SEGÚN LA NORMA DE DISEÑO SISMORRESISTENTE E-030

Los espectros normativos que se obtuvieron usando el software Etabs 2016, ya que en su biblioteca está incluido funciones de espectros de diseño sísmicos para varios países y entre ellos se encuentra el del Perú.



**Figura 5.3** Espectro sísmico según la norma técnica Sismoresistente E-030 en el software ETABS 2016. Fuente: *(Elaboración propia)*.

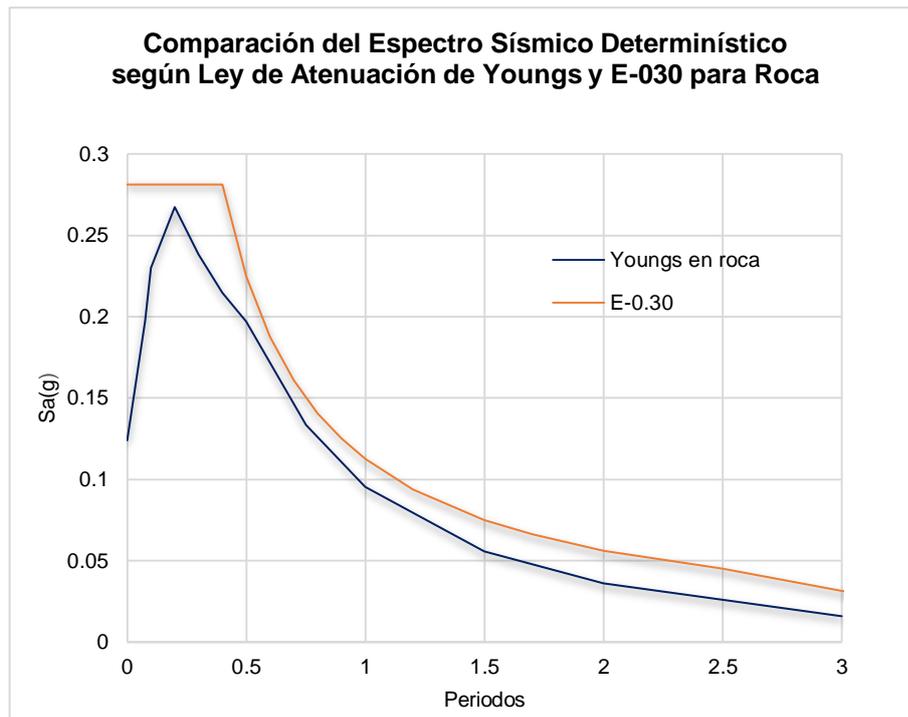


**Figura 5.4** Espectro sísmico según la norma técnica Sismorresistente E-030 en el software ETABS 2016. Fuente: *(Elaboración propia)*.

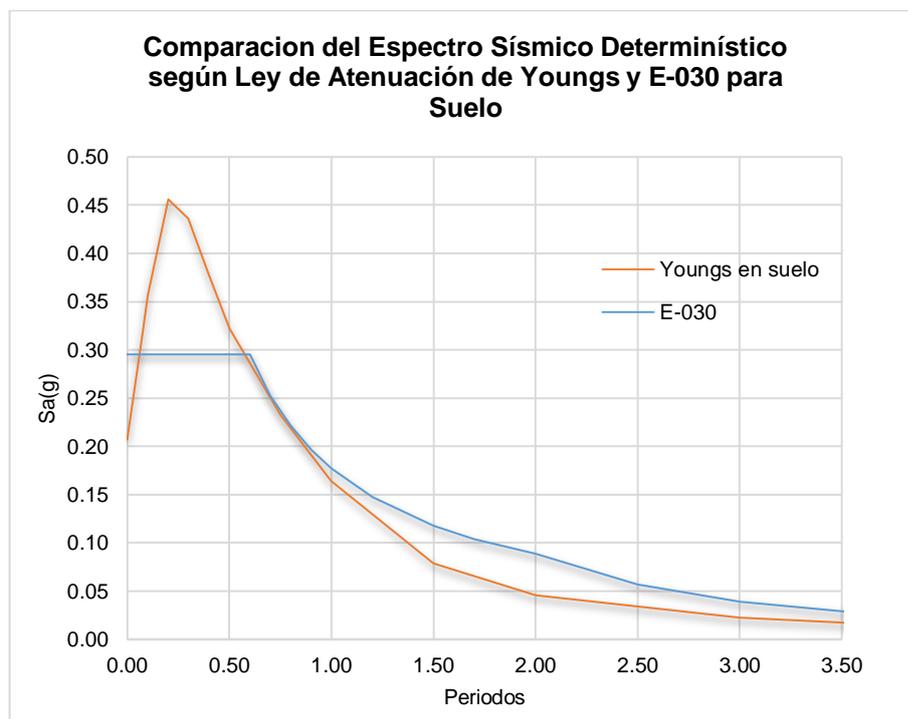
La Figura 5.3 y Figura 5.4 muestra la elaboración de dos espectros de diseño según la norma técnica sismorresistente E-030 en el software ETABS 2016. Estos se usarán para ser comparados con los datos obtenidos según la ley de atenuación propuesta por (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997).

El primer espectro normativo (Figura 5.3) se obtiene para el distrito de Pocollay con una clase de suelo S1 (roca o suelo muy rígido) y el segundo (Figura 5.4) corresponde a la clase de suelo S2 que es un suelo intermedio. La clase de suelo S1 se usará para la comparativa con el espectro obtenido en roca (según Youngs en roca) y la clase de suelo S2 con el obtenido en suelos (según Youngs en suelos).

Debido a que el espectro de aceleraciones de la norma técnica sismorresistente E-030 es probabilístico, con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años y un 5% de amortiguamiento. No es recomendable comparar cuantitativamente los valores de un espectro probabilístico con otro determinístico. Es la razón por la cual se realiza una comparación cualitativa (forma del espectro) y no cuantitativa en los espectros mostrados anteriormente (Figura 5.3 y Figura 5.4).



**Figura 5.5** Comparación del espectro sísmico determinístico según ley de atenuación de Youngs para roca y E-030. Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 5.6** Comparación del Espectro Sísmico Determinístico según Ley de Atenuación de Youngs para Suelo y E-030. Fuente: *(Elaboración propia)*.

### **5.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL PELIGRO SÍSMICO DETERMINÍSTICO**

En la Figura 5.5 y Figura 5.6 se ostentan los resultados de la presente investigación. Con respecto al espectro determinístico en roca según (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997), para el sismo del 25 de febrero de 1983 (6.9 Mw), todos los valores caen por debajo del espectro normativo, pero los espectros obtenidos son bastante parecidos (ver Figura 5.5), con la diferencia de la pendiente ascendente en los periodos menores a 0.1 segundos.

Con respecto al espectro determinístico en suelo según (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997), para el sismo del 25 de febrero de 1983 (6.9 Mw), los valores obtenidos para periodos menores a 0.7 segundos están por muy por encima del espectro normativo a diferencia de los valores mayores a 0.7 segundos que están por debajo, pero estos son bastante parecidos. (ver Figura 5.6).

## **5.2. PELIGROSIDAD SÍSMICA PROBABILÍSTICA**

En este apartado se dan detalles sobre la evaluación del peligro sísmico probabilístico para la región de Tacna. perteneciente a las fuentes sismogénicas F5, F11, F12, F19 y F25 (ver Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7) en la que prevalecen eventos sísmicos de intraplaca.

### **5.2.1. ANÁLISIS DE LA COMPLETITUD DE LA MUESTRA SÍSMICA EN LAS ZONAS SELECCIONADAS**

En las Tablas 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 expresan los eventos registrados agrupados en intervalos de magnitudes y por intervalos de tiempo, para poder realizar el análisis de la completitud. El objetivo será el encontrar el intervalo(s) de tiempo para el cual se puede considerar que la desviación estándar es estacionaria.

En las Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 se observan los trazos de la desviación estándar versus el tiempo (años), para cada intervalo de tiempo.

Para cada trazado se ha sobrepuesto también las líneas que representan el estado estacionario, por lo tanto, la tasa de ocurrencia representativa, para cada

intervalo, se puede seleccionar entre puntos que coincidan con el estado estacionario. La elección del intervalo representativo es un tanto subjetiva, pero como criterio se usó que en cada intensidad superior el intervalo representativo será mayor a la intensidad inferior inmediata.

El intervalo representativo puede ser cualquiera que esté o se aproxime al estado estacionario, por lo tanto, las tasas de ocurrencia entre estos intervalos darán buenas aproximaciones para la Ley de Gutenberg y Richter.

**Tabla 5.3** Registro de eventos sísmicos por intervalo de tiempo. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Rango Inferior:  |             | 2.5                                       | 3.0 | 3.5  | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | Mw          |
|------------------|-------------|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| Rango Superior : |             | 3.0                                       | 3.5 | 4.0  | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | Mw          |
| Rango            |             | Numero de Eventos por Intervalo de Tiempo |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Total       |
| Años             |             |   |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |             |
| <b>2017</b>      | <b>2018</b> | 2   | 17  | 30   | 6   | 5   | 5   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | <b>66</b>   |
| <b>2016</b>      | <b>2018</b> | 26  | 79  | 96   | 42  | 28  | 20  | 4   | 3   | 0   | 0   | 0   | 0   | <b>298</b>  |
| <b>2013</b>      | <b>2018</b> | 92  | 251 | 267  | 165 | 88  | 43  | 16  | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | <b>927</b>  |
| <b>2010</b>      | <b>2018</b> | 109                                       | 313 | 413  | 269 | 128 | 71  | 21  | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | <b>1334</b> |
| <b>2007</b>      | <b>2018</b> | 122                                       | 380 | 528  | 347 | 144 | 104 | 30  | 16  | 0   | 0   | 0   | 0   | <b>1671</b> |
| <b>2004</b>      | <b>2018</b> | 185                                       | 494 | 682  | 418 | 167 | 131 | 49  | 16  | 1   | 0   | 1   | 0   | <b>2144</b> |
| <b>2001</b>      | <b>2018</b> | 217                                       | 547 | 762  | 473 | 187 | 163 | 57  | 17  | 2   | 0   | 1   | 0   | <b>2426</b> |
| <b>1998</b>      | <b>2018</b> | 256                                       | 653 | 909  | 581 | 256 | 203 | 77  | 20  | 6   | 0   | 2   | 1   | <b>2964</b> |
| <b>1995</b>      | <b>2018</b> | 278                                       | 705 | 987  | 637 | 265 | 216 | 80  | 23  | 6   | 0   | 2   | 1   | <b>3200</b> |
| <b>1992</b>      | <b>2018</b> | 286                                       | 728 | 1044 | 675 | 283 | 227 | 86  | 25  | 6   | 0   | 2   | 1   | <b>3363</b> |
| <b>1989</b>      | <b>2018</b> | 297                                       | 754 | 1107 | 725 | 321 | 242 | 100 | 25  | 7   | 0   | 2   | 1   | <b>3581</b> |
| <b>1986</b>      | <b>2018</b> | 297                                       | 762 | 1133 | 767 | 361 | 267 | 113 | 28  | 8   | 1   | 2   | 1   | <b>3740</b> |
| <b>1983</b>      | <b>2018</b> | 302                                       | 778 | 1161 | 808 | 402 | 271 | 117 | 31  | 9   | 1   | 2   | 1   | <b>3883</b> |
| <b>1980</b>      | <b>2018</b> | 302                                       | 789 | 1195 | 863 | 442 | 283 | 121 | 35  | 10  | 1   | 2   | 1   | <b>4044</b> |
| <b>1977</b>      | <b>2018</b> | 303                                       | 793 | 1215 | 915 | 469 | 298 | 127 | 37  | 12  | 1   | 2   | 1   | <b>4173</b> |
| <b>1974</b>      | <b>2018</b> | 305                                       | 802 | 1234 | 952 | 502 | 317 | 136 | 39  | 12  | 2   | 2   | 1   | <b>4304</b> |
| <b>1971</b>      | <b>2018</b> | 312                                       | 828 | 1264 | 977 | 516 | 328 | 143 | 41  | 12  | 3   | 2   | 1   | <b>4427</b> |
| <b>1968</b>      | <b>2018</b> | 312                                       | 828 | 1264 | 977 | 516 | 328 | 149 | 43  | 12  | 3   | 2   | 1   | <b>4435</b> |
| <b>1965</b>      | <b>2018</b> | 312                                       | 828 | 1264 | 977 | 516 | 328 | 154 | 44  | 13  | 3   | 2   | 1   | <b>4442</b> |

La Tabla 5.3 presenta el resumen de los intervalos representativos por cada magnitud y eventos sísmicos en dicho intervalo, esto es realizado para poder usarlos posteriormente en el análisis de la completitud, para las cinco fuentes sismogénicas, elegidas en la presente investigación. Los valores que son iguales a cero significan que no se tienen eventos para dicha magnitud.

**Tabla 5.4** Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 5. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Tiempo    | [ 2.5 - 3 > |          |          | [ 3 - 3.5 > |          |          | [ 3.5 - 4 > |          |          | [ 4 - 4.5 > |          |          | [ 4.5 - 5 > |          |          | [ 5 - 5.5 > |          |          |
|-----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| Años      | N/T         | $\sigma$ | k/sqr(T) |
| <b>1</b>  | 0.00        | 0.00     | 0.60     | 0.00        | 0.00     | 1.35     | 0.00        | 0.00     | 1.36     | 0.00        | 0.00     | 1.45     | 0.00        | 0.00     | 1.70     | 0.00        | 0.00     | 1.36     |
| <b>2</b>  | 0.00        | 0.00     | 0.42     | 0.00        | 0.00     | 0.95     | 0.00        | 0.00     | 0.96     | 0.50        | 0.50     | 1.03     | 0.00        | 0.00     | 1.20     | 0.00        | 0.00     | 0.96     |
| <b>3</b>  | 0.33        | 0.33     | 0.35     | 1.67        | 0.75     | 0.78     | 0.67        | 0.47     | 0.79     | 0.33        | 0.33     | 0.84     | 0.33        | 0.33     | 0.98     | 1.00        | 0.58     | 0.78     |
| <b>6</b>  | 0.83        | 0.37     | 0.24     | 2.67        | 0.67     | 0.55     | 1.33        | 0.47     | 0.56     | 2.33        | 0.62     | 0.59     | 1.00        | 0.41     | 0.69     | 0.83        | 0.37     | 0.55     |
| <b>9</b>  | 0.56        | 0.25     | 0.20     | 2.00        | 0.47     | 0.45     | 1.78        | 0.44     | 0.45     | 1.89        | 0.46     | 0.48     | 0.78        | 0.29     | 0.57     | 0.56        | 0.25     | 0.45     |
| <b>12</b> | 0.42        | 0.19     | 0.17     | 1.83        | 0.39     | 0.39     | 1.75        | 0.38     | 0.39     | 2.00        | 0.41     | 0.42     | 0.67        | 0.24     | 0.49     | 0.58        | 0.22     | 0.39     |
| <b>15</b> | 0.33        | 0.15     | 0.15     | 1.93        | 0.36     | 0.35     | 2.00        | 0.37     | 0.35     | 2.00        | 0.37     | 0.37     | 0.80        | 0.23     | 0.44     | 0.73        | 0.22     | 0.35     |
| <b>18</b> | 0.33        | 0.14     | 0.14     | 1.83        | 0.32     | 0.32     | 2.11        | 0.34     | 0.32     | 1.89        | 0.32     | 0.34     | 0.83        | 0.22     | 0.40     | 1.06        | 0.24     | 0.32     |
| <b>21</b> | 1.14        | 0.23     | 0.13     | 4.10        | 0.44     | 0.29     | 5.33        | 0.50     | 0.30     | 5.43        | 0.51     | 0.32     | 3.62        | 0.42     | 0.37     | 2.33        | 0.33     | 0.30     |
| <b>24</b> | 1.04        | 0.21     | 0.12     | 3.83        | 0.40     | 0.28     | 4.92        | 0.45     | 0.28     | 4.92        | 0.45     | 0.30     | 3.21        | 0.37     | 0.35     | 2.13        | 0.30     | 0.28     |
| <b>27</b> | 0.93        | 0.19     | 0.12     | 3.52        | 0.36     | 0.26     | 4.52        | 0.41     | 0.26     | 4.56        | 0.41     | 0.28     | 2.89        | 0.33     | 0.33     | 1.93        | 0.27     | 0.26     |
| <b>30</b> | 0.83        | 0.17     | 0.11     | 3.23        | 0.33     | 0.25     | 4.27        | 0.38     | 0.25     | 4.27        | 0.38     | 0.26     | 2.73        | 0.30     | 0.31     | 1.77        | 0.24     | 0.25     |
| <b>33</b> | 0.76        | 0.15     | 0.10     | 2.94        | 0.30     | 0.24     | 3.88        | 0.34     | 0.24     | 3.94        | 0.35     | 0.25     | 2.70        | 0.29     | 0.30     | 1.82        | 0.23     | 0.24     |
| <b>36</b> | 0.69        | 0.14     | 0.10     | 2.75        | 0.28     | 0.23     | 3.64        | 0.32     | 0.23     | 3.69        | 0.32     | 0.24     | 2.75        | 0.28     | 0.28     | 1.67        | 0.22     | 0.23     |
| <b>39</b> | 0.64        | 0.13     | 0.10     | 2.56        | 0.26     | 0.22     | 3.44        | 0.30     | 0.22     | 3.54        | 0.30     | 0.23     | 2.67        | 0.26     | 0.27     | 1.59        | 0.20     | 0.22     |
| <b>42</b> | 0.60        | 0.12     | 0.09     | 2.38        | 0.24     | 0.21     | 3.21        | 0.28     | 0.21     | 3.43        | 0.29     | 0.22     | 2.67        | 0.25     | 0.26     | 1.50        | 0.19     | 0.21     |
| <b>45</b> | 0.60        | 0.12     | 0.09     | 2.27        | 0.22     | 0.20     | 3.00        | 0.26     | 0.20     | 3.27        | 0.27     | 0.22     | 2.53        | 0.24     | 0.25     | 1.51        | 0.18     | 0.20     |
| <b>48</b> | 0.56        | 0.11     | 0.09     | 2.19        | 0.21     | 0.19     | 2.92        | 0.25     | 0.20     | 3.08        | 0.25     | 0.21     | 2.40        | 0.22     | 0.25     | 1.42        | 0.17     | 0.20     |
| <b>51</b> | 0.53        | 0.10     | 0.08     | 2.06        | 0.20     | 0.19     | 2.75        | 0.23     | 0.19     | 2.90        | 0.24     | 0.20     | 2.25        | 0.21     | 0.24     | 1.33        | 0.16     | 0.19     |
| <b>54</b> | 0.50        | 0.10     | 0.08     | 1.94        | 0.19     | 0.18     | 2.59        | 0.22     | 0.19     | 2.74        | 0.23     | 0.20     | 2.13        | 0.20     | 0.23     | 1.26        | 0.15     | 0.18     |



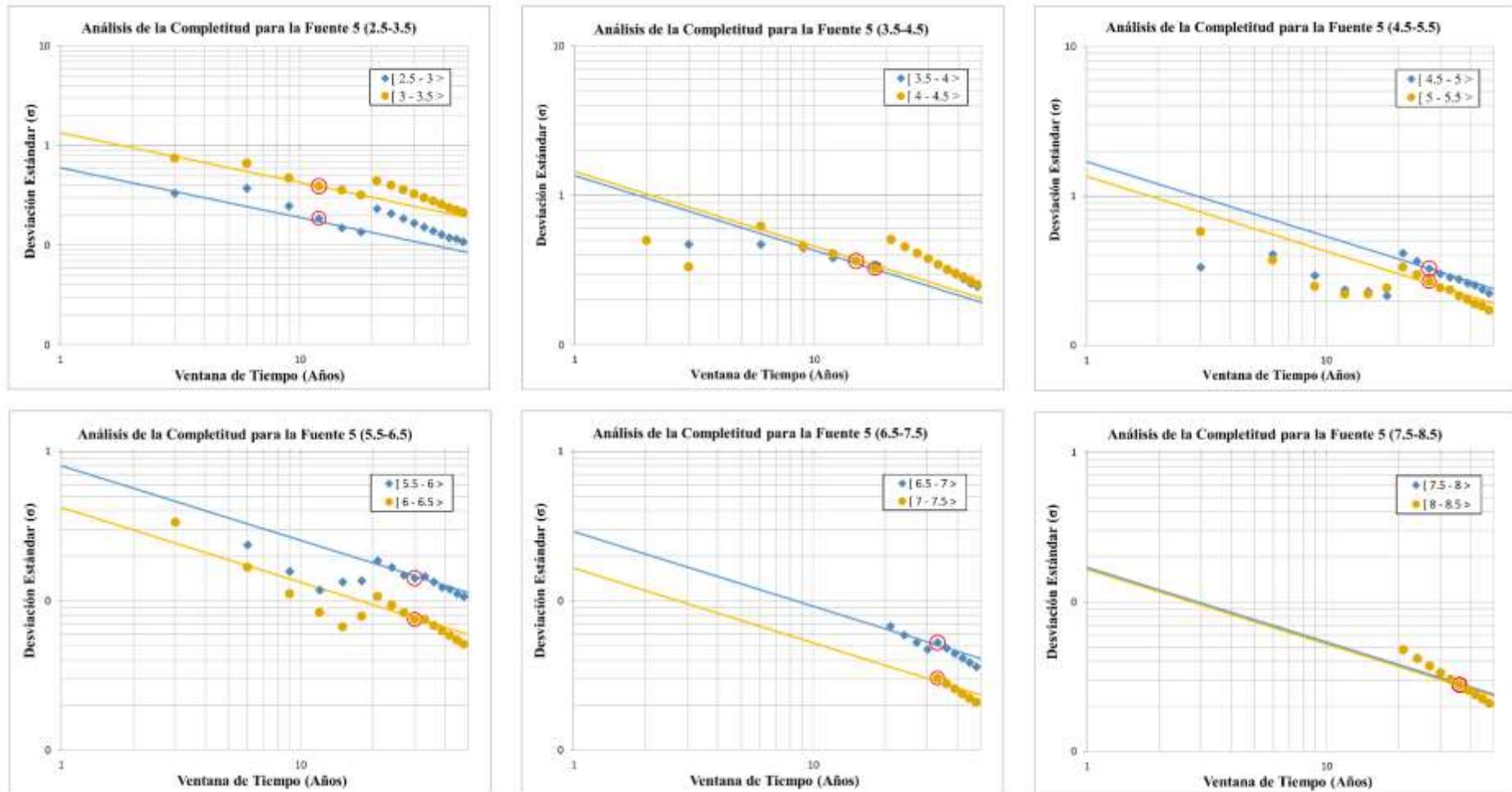


Figura 5.7 Analisis de la completitud para la Fuente 5. Fuente: (Elaboración propia).

**Tabla 5.6** Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 11. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Tiempo | [ 2.5 - 3 > |          |          | [ 3 - 3.5 > |          |          | [ 3.5 - 4 > |          |          | [ 4 - 4.5 > |          |          | [ 4.5 - 5 > |          |          | [ 5 - 5.5 > |          |          |
|--------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| Años   | N/T         | $\sigma$ | k/sqr(T) |
| 1      | 0.00        | 0.00     | 0.96     | 0.00        | 0.00     | 1.80     | 0.00        | 0.00     | 2.20     | 0.00        | 0.00     | 1.75     | 0.00        | 0.00     | 1.15     | 0.00        | 0.00     | 0.94     |
| 2      | 0.50        | 0.50     | 0.68     | 2.00        | 1.00     | 1.27     | 1.50        | 0.87     | 1.56     | 0.50        | 0.50     | 1.24     | 0.50        | 0.50     | 0.81     | 0.00        | 0.00     | 0.66     |
| 3      | 0.67        | 0.47     | 0.55     | 3.33        | 1.05     | 1.04     | 3.00        | 1.00     | 1.27     | 0.67        | 0.47     | 1.01     | 0.33        | 0.33     | 0.66     | 0.33        | 0.33     | 0.54     |
| 6      | 1.33        | 0.47     | 0.39     | 5.00        | 0.91     | 0.73     | 4.33        | 0.85     | 0.90     | 2.00        | 0.58     | 0.71     | 1.33        | 0.47     | 0.47     | 0.67        | 0.33     | 0.38     |
| 9      | 1.22        | 0.37     | 0.32     | 4.11        | 0.68     | 0.60     | 4.78        | 0.73     | 0.73     | 2.67        | 0.54     | 0.58     | 1.78        | 0.44     | 0.38     | 0.78        | 0.29     | 0.31     |
| 12     | 0.92        | 0.28     | 0.28     | 3.25        | 0.52     | 0.52     | 4.75        | 0.63     | 0.64     | 3.08        | 0.51     | 0.51     | 1.33        | 0.33     | 0.33     | 0.92        | 0.28     | 0.27     |
| 15     | 0.80        | 0.23     | 0.25     | 3.00        | 0.45     | 0.46     | 4.80        | 0.57     | 0.57     | 3.07        | 0.45     | 0.45     | 1.27        | 0.29     | 0.30     | 0.93        | 0.25     | 0.24     |
| 18     | 0.83        | 0.22     | 0.23     | 2.56        | 0.38     | 0.42     | 4.50        | 0.50     | 0.52     | 3.06        | 0.41     | 0.41     | 1.28        | 0.27     | 0.27     | 0.83        | 0.22     | 0.22     |
| 21     | 0.86        | 0.20     | 0.21     | 2.62        | 0.35     | 0.39     | 4.24        | 0.45     | 0.48     | 2.67        | 0.36     | 0.38     | 1.10        | 0.23     | 0.25     | 0.86        | 0.20     | 0.21     |
| 24     | 0.83        | 0.19     | 0.19     | 2.46        | 0.32     | 0.37     | 4.17        | 0.42     | 0.45     | 2.75        | 0.34     | 0.36     | 1.00        | 0.20     | 0.23     | 0.83        | 0.19     | 0.19     |
| 27     | 0.74        | 0.17     | 0.18     | 2.33        | 0.29     | 0.35     | 4.07        | 0.39     | 0.42     | 2.59        | 0.31     | 0.34     | 0.96        | 0.19     | 0.22     | 0.78        | 0.17     | 0.18     |
| 30     | 0.67        | 0.15     | 0.17     | 2.17        | 0.27     | 0.33     | 3.87        | 0.36     | 0.40     | 2.47        | 0.29     | 0.32     | 0.87        | 0.17     | 0.21     | 0.77        | 0.16     | 0.17     |
| 33     | 0.61        | 0.14     | 0.17     | 1.97        | 0.24     | 0.31     | 3.55        | 0.33     | 0.38     | 2.36        | 0.27     | 0.30     | 0.91        | 0.17     | 0.20     | 0.76        | 0.15     | 0.16     |
| 36     | 0.56        | 0.12     | 0.16     | 1.83        | 0.23     | 0.30     | 3.33        | 0.30     | 0.37     | 2.28        | 0.25     | 0.29     | 1.00        | 0.17     | 0.19     | 0.69        | 0.14     | 0.16     |
| 39     | 0.51        | 0.11     | 0.15     | 1.69        | 0.21     | 0.29     | 3.15        | 0.28     | 0.35     | 2.23        | 0.24     | 0.28     | 1.05        | 0.16     | 0.18     | 0.64        | 0.13     | 0.15     |
| 42     | 0.48        | 0.11     | 0.15     | 1.57        | 0.19     | 0.28     | 3.02        | 0.27     | 0.34     | 2.12        | 0.22     | 0.27     | 1.10        | 0.16     | 0.18     | 0.60        | 0.12     | 0.15     |
| 45     | 0.44        | 0.10     | 0.14     | 1.49        | 0.18     | 0.27     | 2.89        | 0.25     | 0.33     | 2.07        | 0.21     | 0.26     | 1.20        | 0.16     | 0.17     | 0.56        | 0.11     | 0.14     |
| 48     | 0.42        | 0.09     | 0.14     | 1.44        | 0.17     | 0.26     | 2.75        | 0.24     | 0.32     | 1.94        | 0.20     | 0.25     | 1.17        | 0.16     | 0.17     | 0.52        | 0.10     | 0.14     |
| 51     | 0.39        | 0.09     | 0.13     | 1.35        | 0.16     | 0.25     | 2.59        | 0.23     | 0.31     | 1.82        | 0.19     | 0.25     | 1.10        | 0.15     | 0.16     | 0.49        | 0.10     | 0.13     |
| 54     | 0.37        | 0.08     | 0.13     | 1.28        | 0.15     | 0.24     | 2.44        | 0.21     | 0.30     | 1.72        | 0.18     | 0.24     | 1.04        | 0.14     | 0.16     | 0.46        | 0.09     | 0.13     |



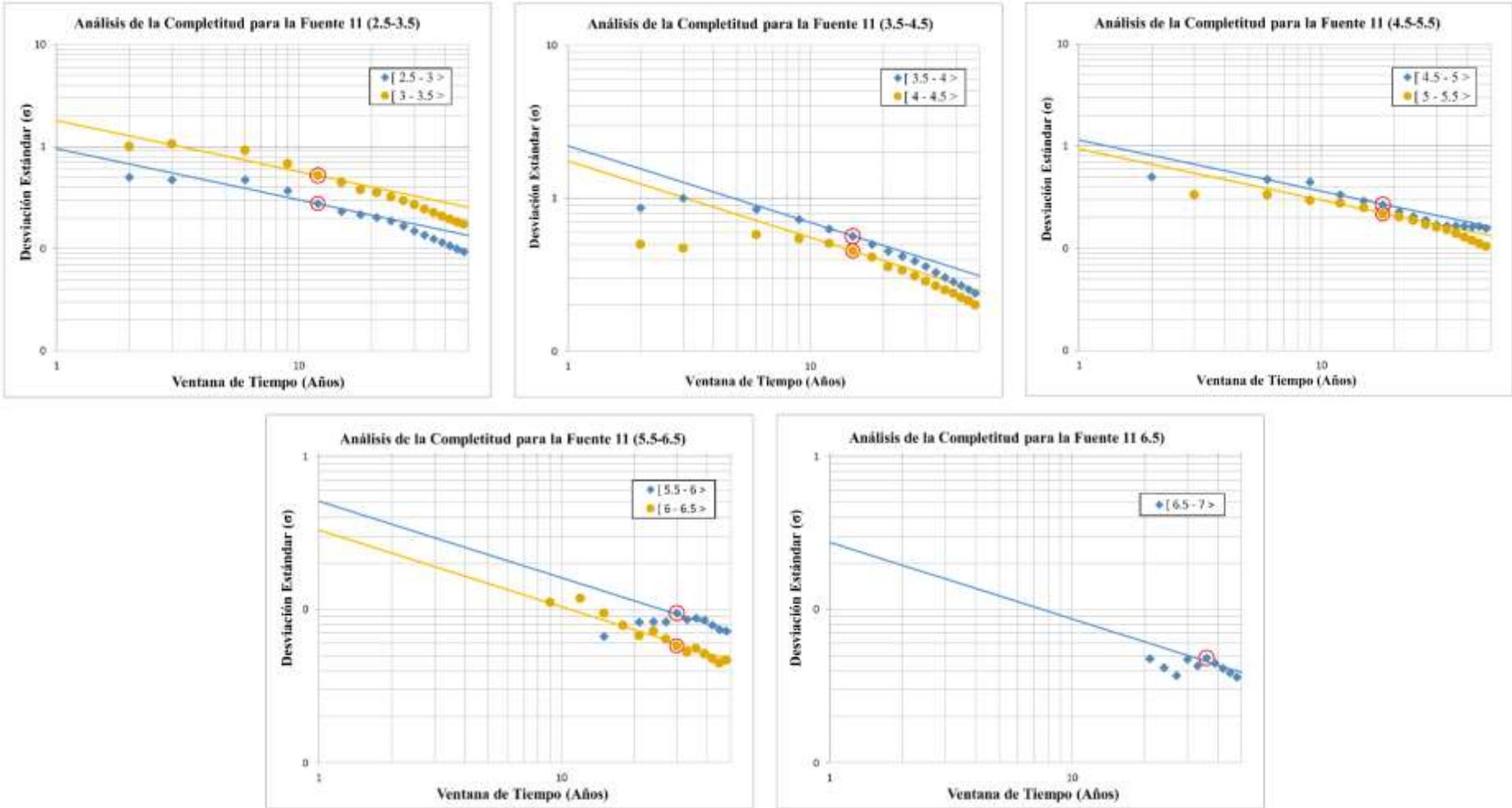


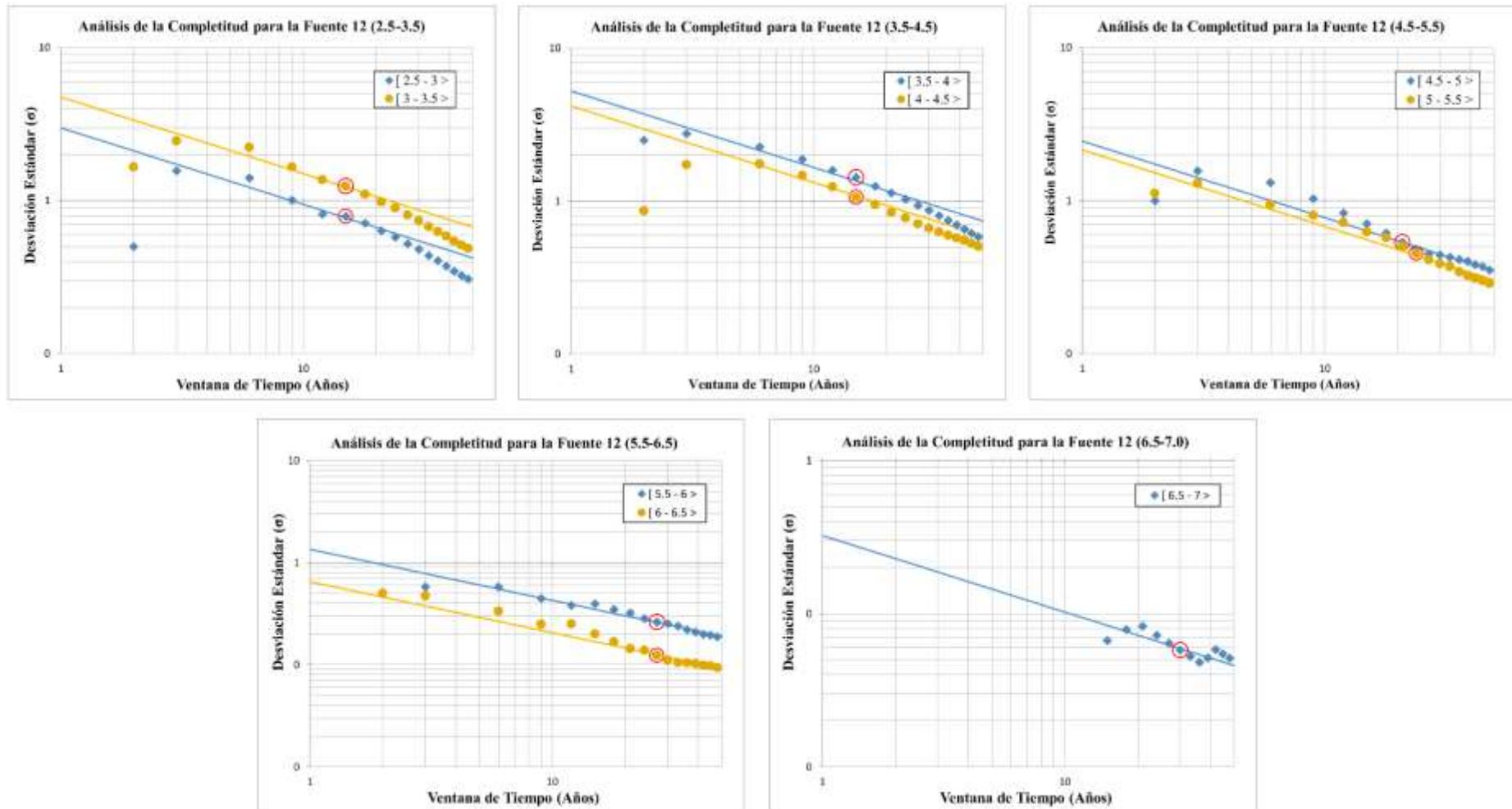
Figura 5.8 Analisis de la completitud para la Fuente 11. Fuente: (Elaboración propia).

**Tabla 5.8** Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 12. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Tiempo | [ 2.5 - 3 > |          |          | [ 3 - 3.5 > |          |          | [ 3.5 - 4 > |          |          | [ 4 - 4.5 > |          |          | [ 4.5 - 5 > |          |          | [ 5 - 5.5 > |          |          |
|--------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| Años   | N/T         | $\sigma$ | k/sqr(T) |
| 1      | 0.00        | 0.00     | 2.99     | 0.00        | 0.00     | 4.75     | 0.00        | 0.00     | 5.25     | 0.00        | 0.00     | 4.19     | 0.00        | 0.00     | 2.45     | 0.00        | 0.00     | 2.15     |
| 2      | 0.50        | 0.50     | 2.11     | 5.50        | 1.66     | 3.36     | 12.50       | 2.50     | 3.71     | 1.50        | 0.87     | 2.96     | 2.00        | 1.00     | 1.73     | 2.50        | 1.12     | 1.52     |
| 3      | 7.33        | 1.56     | 1.72     | 18.00       | 2.45     | 2.74     | 23.00       | 2.77     | 3.03     | 9.00        | 1.73     | 2.42     | 7.33        | 1.56     | 1.41     | 5.00        | 1.29     | 1.24     |
| 6      | 11.83       | 1.40     | 1.22     | 29.83       | 2.23     | 1.94     | 30.83       | 2.27     | 2.14     | 18.33       | 1.75     | 1.71     | 10.33       | 1.31     | 1.00     | 5.33        | 0.94     | 0.88     |
| 9      | 9.11        | 1.01     | 1.00     | 24.78       | 1.66     | 1.58     | 31.89       | 1.88     | 1.75     | 19.44       | 1.47     | 1.40     | 9.56        | 1.03     | 0.82     | 5.78        | 0.80     | 0.72     |
| 12     | 7.92        | 0.81     | 0.86     | 22.42       | 1.37     | 1.37     | 30.50       | 1.59     | 1.52     | 18.50       | 1.24     | 1.21     | 8.25        | 0.83     | 0.71     | 6.25        | 0.72     | 0.62     |
| 15     | 9.33        | 0.79     | 0.77     | 23.20       | 1.24     | 1.23     | 30.67       | 1.43     | 1.36     | 16.93       | 1.06     | 1.08     | 7.47        | 0.71     | 0.63     | 5.87        | 0.63     | 0.56     |
| 18     | 9.11        | 0.71     | 0.70     | 21.67       | 1.10     | 1.12     | 28.28       | 1.25     | 1.24     | 16.17       | 0.95     | 0.99     | 6.83        | 0.62     | 0.58     | 5.89        | 0.57     | 0.51     |
| 21     | 8.43        | 0.63     | 0.65     | 20.14       | 0.98     | 1.04     | 26.95       | 1.13     | 1.15     | 14.86       | 0.84     | 0.91     | 6.05        | 0.54     | 0.53     | 5.33        | 0.50     | 0.47     |
| 24     | 7.96        | 0.58     | 0.61     | 19.08       | 0.89     | 0.97     | 25.42       | 1.03     | 1.07     | 14.46       | 0.78     | 0.86     | 5.58        | 0.48     | 0.50     | 4.92        | 0.45     | 0.44     |
| 27     | 7.33        | 0.52     | 0.57     | 17.44       | 0.80     | 0.91     | 23.81       | 0.94     | 1.01     | 13.63       | 0.71     | 0.81     | 5.41        | 0.45     | 0.47     | 4.56        | 0.41     | 0.41     |
| 30     | 6.90        | 0.48     | 0.54     | 16.27       | 0.74     | 0.87     | 22.80       | 0.87     | 0.96     | 13.37       | 0.67     | 0.76     | 5.87        | 0.44     | 0.45     | 4.47        | 0.39     | 0.39     |
| 33     | 6.27        | 0.44     | 0.52     | 15.03       | 0.67     | 0.83     | 21.30       | 0.80     | 0.91     | 13.06       | 0.63     | 0.73     | 6.03        | 0.43     | 0.43     | 4.52        | 0.37     | 0.37     |
| 36     | 5.86        | 0.40     | 0.50     | 14.11       | 0.63     | 0.79     | 20.11       | 0.75     | 0.88     | 12.86       | 0.60     | 0.70     | 6.14        | 0.41     | 0.41     | 4.22        | 0.34     | 0.36     |
| 39     | 5.41        | 0.37     | 0.48     | 13.28       | 0.58     | 0.76     | 19.15       | 0.70     | 0.84     | 12.95       | 0.58     | 0.67     | 6.28        | 0.40     | 0.39     | 4.10        | 0.32     | 0.34     |
| 42     | 5.02        | 0.35     | 0.46     | 12.43       | 0.54     | 0.73     | 18.05       | 0.66     | 0.81     | 12.86       | 0.55     | 0.65     | 6.12        | 0.38     | 0.38     | 4.05        | 0.31     | 0.33     |
| 45     | 4.69        | 0.32     | 0.44     | 11.71       | 0.51     | 0.71     | 17.13       | 0.62     | 0.78     | 12.60       | 0.53     | 0.62     | 6.18        | 0.37     | 0.37     | 4.04        | 0.30     | 0.32     |
| 48     | 4.50        | 0.31     | 0.43     | 11.31       | 0.49     | 0.69     | 16.42       | 0.58     | 0.76     | 12.27       | 0.51     | 0.60     | 5.98        | 0.35     | 0.35     | 3.98        | 0.29     | 0.31     |
| 51     | 4.24        | 0.29     | 0.42     | 10.65       | 0.46     | 0.67     | 15.45       | 0.55     | 0.74     | 11.55       | 0.48     | 0.59     | 5.63        | 0.33     | 0.34     | 3.75        | 0.27     | 0.30     |
| 54     | 4.00        | 0.27     | 0.41     | 10.06       | 0.43     | 0.65     | 14.59       | 0.52     | 0.71     | 10.91       | 0.45     | 0.57     | 5.31        | 0.31     | 0.33     | 3.54        | 0.26     | 0.29     |

**Tabla 5.9** Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 12. Fuente: *(Elaboración propia)*

| Tiempo | [ 5.5 - 6 > |      |          | [ 6 - 6.5 > |      |          | [ 6.5 - 7 > |      |          | [ 7 - 7.5 > |      |          | [ 7.5 - 8 > |      |          | [ 8 - 8.5 > |      |          |          |
|--------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|----------|
|        | Años        | N/T  | $\sigma$ | k/sqr(T)    | N/T  | $\sigma$ | k/sqr(T) |
| 1      | 0.00        | 0.00 | 1.35     | 0.00        | 0.00 | 0.65     | 0.00        | 0.00 | 0.32     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 2      | 0.00        | 0.00 | 0.95     | 0.50        | 0.50 | 0.46     | 0.00        | 0.00 | 0.23     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 3      | 1.00        | 0.58 | 0.78     | 0.67        | 0.47 | 0.38     | 0.00        | 0.00 | 0.19     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 6      | 2.00        | 0.58 | 0.55     | 0.67        | 0.33 | 0.27     | 0.00        | 0.00 | 0.13     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 9      | 1.78        | 0.44 | 0.45     | 0.56        | 0.25 | 0.22     | 0.00        | 0.00 | 0.11     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 12     | 1.75        | 0.38 | 0.39     | 0.75        | 0.25 | 0.19     | 0.00        | 0.00 | 0.09     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 15     | 2.33        | 0.39 | 0.35     | 0.60        | 0.20 | 0.17     | 0.07        | 0.07 | 0.08     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.07        | 0.07 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 18     | 2.17        | 0.35 | 0.32     | 0.50        | 0.17 | 0.15     | 0.11        | 0.08 | 0.08     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.06        | 0.06 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 21     | 2.14        | 0.32 | 0.29     | 0.43        | 0.14 | 0.14     | 0.14        | 0.08 | 0.07     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.05        | 0.05 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 24     | 1.92        | 0.28 | 0.28     | 0.46        | 0.14 | 0.13     | 0.13        | 0.07 | 0.07     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.04        | 0.04 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 27     | 1.85        | 0.26 | 0.26     | 0.41        | 0.12 | 0.13     | 0.11        | 0.06 | 0.06     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.04        | 0.04 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 30     | 1.90        | 0.25 | 0.25     | 0.37        | 0.11 | 0.12     | 0.10        | 0.06 | 0.06     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.03        | 0.03 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 33     | 1.88        | 0.24 | 0.24     | 0.36        | 0.10 | 0.11     | 0.09        | 0.05 | 0.06     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.03        | 0.03 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 36     | 1.75        | 0.22 | 0.23     | 0.39        | 0.10 | 0.11     | 0.08        | 0.05 | 0.05     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.03        | 0.03 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 39     | 1.69        | 0.21 | 0.22     | 0.41        | 0.10 | 0.10     | 0.10        | 0.05 | 0.05     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.03        | 0.03 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 42     | 1.64        | 0.20 | 0.21     | 0.40        | 0.10 | 0.10     | 0.14        | 0.06 | 0.05     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.02        | 0.02 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 45     | 1.69        | 0.19 | 0.20     | 0.42        | 0.10 | 0.10     | 0.13        | 0.05 | 0.05     | 0.02        | 0.02 | 0.00     | 0.02        | 0.02 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 48     | 1.69        | 0.19 | 0.19     | 0.42        | 0.09 | 0.09     | 0.13        | 0.05 | 0.05     | 0.04        | 0.03 | 0.00     | 0.02        | 0.02 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 51     | 1.65        | 0.18 | 0.19     | 0.39        | 0.09 | 0.09     | 0.12        | 0.05 | 0.05     | 0.04        | 0.03 | 0.00     | 0.02        | 0.02 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |
| 54     | 1.61        | 0.17 | 0.18     | 0.39        | 0.08 | 0.09     | 0.13        | 0.05 | 0.04     | 0.04        | 0.03 | 0.00     | 0.02        | 0.02 | 0.00     | 0.00        | 0.00 | 0.00     | 0.00     |

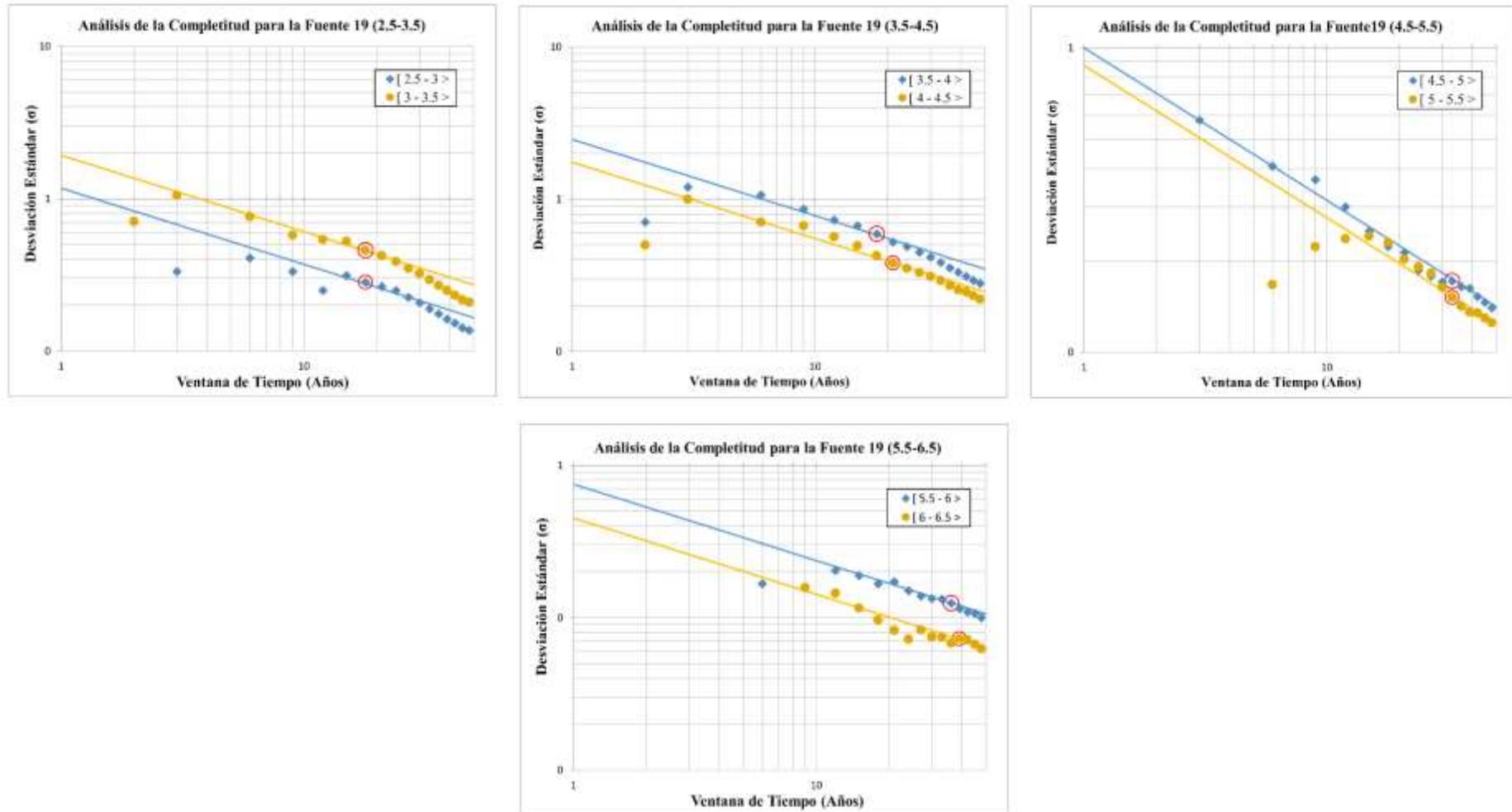


**Figura 5.9** Analisis de la completitud para la Fuente 12. Fuente: *(Elaboración propia)*.

**Tabla 5.10** Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 19. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Tiempo | [ 2.5 - 3 > |      |          | [ 3 - 3.5 > |      |          | [ 3.5 - 4 > |      |          | [ 4 - 4.5 > |      |          | [ 4.5 - 5 > |      |          | [ 5 - 5.5 > |      |          |
|--------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|
|        | Años        | N/T  | $\sigma$ | k/sqr(T)    | N/T  | $\sigma$ |
| 1      | 0.00        | 0.00 | 1.17     | 0.00        | 0.00 | 1.93     | 0.00        | 0.00 | 2.47     | 0.00        | 0.00 | 1.75     | 0.00        | 0.00 | 1.00     | 0.00        | 0.00 | 0.88     |
| 2      | 0.00        | 0.00 | 0.83     | 1.00        | 0.71 | 1.36     | 1.00        | 0.71 | 1.75     | 0.50        | 0.50 | 1.24     | 0.00        | 0.00 | 0.71     | 0.00        | 0.00 | 0.62     |
| 3      | 0.33        | 0.33 | 0.68     | 3.33        | 1.05 | 1.11     | 4.33        | 1.20 | 1.43     | 3.00        | 1.00 | 1.01     | 1.00        | 0.58 | 0.58     | 0.00        | 0.00 | 0.51     |
| 6      | 1.00        | 0.41 | 0.48     | 3.50        | 0.76 | 0.79     | 6.83        | 1.07 | 1.01     | 3.00        | 0.71 | 0.71     | 1.00        | 0.41 | 0.41     | 0.17        | 0.17 | 0.36     |
| 9      | 1.00        | 0.33 | 0.39     | 3.00        | 0.58 | 0.64     | 6.67        | 0.86 | 0.82     | 4.00        | 0.67 | 0.58     | 1.22        | 0.37 | 0.33     | 0.44        | 0.22 | 0.29     |
| 12     | 0.75        | 0.25 | 0.34     | 3.50        | 0.54 | 0.56     | 6.42        | 0.73 | 0.71     | 3.83        | 0.57 | 0.51     | 1.08        | 0.30 | 0.29     | 0.67        | 0.24 | 0.25     |
| 15     | 1.47        | 0.31 | 0.30     | 4.13        | 0.52 | 0.50     | 6.73        | 0.67 | 0.64     | 3.67        | 0.49 | 0.45     | 0.93        | 0.25 | 0.26     | 0.87        | 0.24 | 0.23     |
| 18     | 1.44        | 0.28 | 0.28     | 3.78        | 0.46 | 0.45     | 6.33        | 0.59 | 0.58     | 3.28        | 0.43 | 0.41     | 0.89        | 0.22 | 0.24     | 0.94        | 0.23 | 0.21     |
| 21     | 1.48        | 0.27 | 0.26     | 3.76        | 0.42 | 0.42     | 5.76        | 0.52 | 0.54     | 3.05        | 0.38 | 0.38     | 0.95        | 0.21 | 0.22     | 0.86        | 0.20 | 0.19     |
| 24     | 1.50        | 0.25 | 0.24     | 3.58        | 0.39 | 0.39     | 5.71        | 0.49 | 0.50     | 2.96        | 0.35 | 0.36     | 0.83        | 0.19 | 0.20     | 0.88        | 0.19 | 0.18     |
| 27     | 1.37        | 0.23 | 0.23     | 3.30        | 0.35 | 0.37     | 5.44        | 0.45 | 0.48     | 2.93        | 0.33 | 0.34     | 0.85        | 0.18 | 0.19     | 0.89        | 0.18 | 0.17     |
| 30     | 1.30        | 0.21 | 0.21     | 3.13        | 0.32 | 0.35     | 5.20        | 0.42 | 0.45     | 2.90        | 0.31 | 0.32     | 0.87        | 0.17 | 0.18     | 0.80        | 0.16 | 0.16     |
| 33     | 1.18        | 0.19 | 0.20     | 2.85        | 0.29 | 0.34     | 4.88        | 0.38 | 0.43     | 2.82        | 0.29 | 0.30     | 0.97        | 0.17 | 0.17     | 0.76        | 0.15 | 0.15     |
| 36     | 1.11        | 0.18 | 0.20     | 2.64        | 0.27 | 0.32     | 4.50        | 0.35 | 0.41     | 2.64        | 0.27 | 0.29     | 0.97        | 0.16 | 0.17     | 0.72        | 0.14 | 0.15     |
| 39     | 1.03        | 0.16 | 0.19     | 2.44        | 0.25 | 0.31     | 4.28        | 0.33 | 0.40     | 2.51        | 0.25 | 0.28     | 1.03        | 0.16 | 0.16     | 0.72        | 0.14 | 0.14     |
| 42     | 0.98        | 0.15 | 0.18     | 2.26        | 0.23 | 0.30     | 4.07        | 0.31 | 0.38     | 2.55        | 0.25 | 0.27     | 0.98        | 0.15 | 0.15     | 0.76        | 0.13 | 0.14     |
| 45     | 0.91        | 0.14 | 0.17     | 2.13        | 0.22 | 0.29     | 3.87        | 0.29 | 0.37     | 2.44        | 0.23 | 0.26     | 0.96        | 0.15 | 0.15     | 0.76        | 0.13 | 0.13     |
| 48     | 0.90        | 0.14 | 0.17     | 2.10        | 0.21 | 0.28     | 3.75        | 0.28 | 0.36     | 2.33        | 0.22 | 0.25     | 0.94        | 0.14 | 0.14     | 0.75        | 0.13 | 0.13     |
| 51     | 0.84        | 0.13 | 0.16     | 1.98        | 0.20 | 0.27     | 3.53        | 0.26 | 0.35     | 2.20        | 0.21 | 0.25     | 0.88        | 0.13 | 0.14     | 0.71        | 0.12 | 0.12     |
| 54     | 0.80        | 0.12 | 0.16     | 1.87        | 0.19 | 0.26     | 3.33        | 0.25 | 0.34     | 2.07        | 0.20 | 0.24     | 0.83        | 0.12 | 0.14     | 0.67        | 0.11 | 0.12     |





**Figura 5.10** Analisis de la completitud para la Fuente 19. Fuente: *(Elaboración propia)*.

**Tabla 5.12** Tasas de ocurrencia sísmica agrupadas en magnitudes y en intervalos de tiempo para la Fuente 24. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Tiempo | [ 2.5 - 3 > |      |          | [ 3 - 3.5 > |      |          | [ 3.5 - 4 > |      |          | [ 4 - 4.5 > |      |          | [ 4.5 - 5 > |      |          | [ 5 - 5.5 > |      |          |
|--------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|-------------|------|----------|
|        | Años        | N/T  | $\sigma$ | k/sqr(T)    | N/T  | $\sigma$ |
| 1      | 0.00        | 0.00 | 0.50     | 0.00        | 0.00 | 0.65     | 0.00        | 0.00 | 0.85     | 0.00        | 0.00 | 1.15     | 0.00        | 0.00 | 0.60     | 0.00        | 0.00 | 0.50     |
| 2      | 0.00        | 0.00 | 0.35     | 0.00        | 0.00 | 0.46     | 0.00        | 0.00 | 0.60     | 0.00        | 0.00 | 0.81     | 0.00        | 0.00 | 0.42     | 0.00        | 0.00 | 0.35     |
| 3      | 0.00        | 0.00 | 0.29     | 0.00        | 0.00 | 0.38     | 1.00        | 0.58 | 0.49     | 1.00        | 0.58 | 0.66     | 0.33        | 0.33 | 0.35     | 0.33        | 0.33 | 0.29     |
| 6      | 0.33        | 0.24 | 0.20     | 0.83        | 0.37 | 0.27     | 1.17        | 0.44 | 0.35     | 1.83        | 0.55 | 0.47     | 1.00        | 0.41 | 0.24     | 0.17        | 0.17 | 0.20     |
| 9      | 0.22        | 0.16 | 0.17     | 0.89        | 0.31 | 0.22     | 0.78        | 0.29 | 0.28     | 1.89        | 0.46 | 0.38     | 0.89        | 0.31 | 0.20     | 0.33        | 0.19 | 0.17     |
| 12     | 0.17        | 0.12 | 0.14     | 0.67        | 0.24 | 0.19     | 0.58        | 0.22 | 0.25     | 1.50        | 0.35 | 0.33     | 0.67        | 0.24 | 0.17     | 0.25        | 0.14 | 0.14     |
| 15     | 0.40        | 0.16 | 0.13     | 0.67        | 0.21 | 0.17     | 1.27        | 0.29 | 0.22     | 2.20        | 0.38 | 0.30     | 0.67        | 0.21 | 0.15     | 0.33        | 0.15 | 0.13     |
| 18     | 0.33        | 0.14 | 0.12     | 0.56        | 0.18 | 0.15     | 1.11        | 0.25 | 0.20     | 1.89        | 0.32 | 0.27     | 0.56        | 0.18 | 0.14     | 0.33        | 0.14 | 0.12     |
| 21     | 0.29        | 0.12 | 0.11     | 0.48        | 0.15 | 0.14     | 1.00        | 0.22 | 0.19     | 1.67        | 0.28 | 0.25     | 0.48        | 0.15 | 0.13     | 0.29        | 0.12 | 0.11     |
| 24     | 0.25        | 0.10 | 0.10     | 0.42        | 0.13 | 0.13     | 0.92        | 0.20 | 0.17     | 1.46        | 0.25 | 0.23     | 0.42        | 0.13 | 0.12     | 0.25        | 0.10 | 0.10     |
| 27     | 0.22        | 0.09 | 0.10     | 0.37        | 0.12 | 0.13     | 0.81        | 0.17 | 0.16     | 1.30        | 0.22 | 0.22     | 0.37        | 0.12 | 0.12     | 0.26        | 0.10 | 0.10     |
| 30     | 0.20        | 0.08 | 0.09     | 0.33        | 0.11 | 0.12     | 0.77        | 0.16 | 0.16     | 1.17        | 0.20 | 0.21     | 0.37        | 0.11 | 0.11     | 0.27        | 0.09 | 0.09     |
| 33     | 0.18        | 0.07 | 0.09     | 0.30        | 0.10 | 0.11     | 0.73        | 0.15 | 0.15     | 1.06        | 0.18 | 0.20     | 0.33        | 0.10 | 0.10     | 0.24        | 0.09 | 0.09     |
| 36     | 0.17        | 0.07 | 0.08     | 0.28        | 0.09 | 0.11     | 0.67        | 0.14 | 0.14     | 0.97        | 0.16 | 0.19     | 0.31        | 0.09 | 0.10     | 0.22        | 0.08 | 0.08     |
| 39     | 0.15        | 0.06 | 0.08     | 0.26        | 0.08 | 0.10     | 0.62        | 0.13 | 0.14     | 0.90        | 0.15 | 0.18     | 0.31        | 0.09 | 0.10     | 0.21        | 0.07 | 0.08     |
| 42     | 0.14        | 0.06 | 0.08     | 0.24        | 0.08 | 0.10     | 0.57        | 0.12 | 0.13     | 0.83        | 0.14 | 0.18     | 0.31        | 0.09 | 0.09     | 0.19        | 0.07 | 0.08     |
| 45     | 0.13        | 0.05 | 0.07     | 0.22        | 0.07 | 0.10     | 0.53        | 0.11 | 0.13     | 0.78        | 0.13 | 0.17     | 0.29        | 0.08 | 0.09     | 0.18        | 0.06 | 0.07     |
| 48     | 0.13        | 0.05 | 0.07     | 0.21        | 0.07 | 0.09     | 0.50        | 0.10 | 0.12     | 0.73        | 0.12 | 0.17     | 0.27        | 0.08 | 0.09     | 0.17        | 0.06 | 0.07     |
| 51     | 0.12        | 0.05 | 0.07     | 0.20        | 0.06 | 0.09     | 0.47        | 0.10 | 0.12     | 0.69        | 0.12 | 0.16     | 0.25        | 0.07 | 0.08     | 0.16        | 0.06 | 0.07     |
| 54     | 0.11        | 0.05 | 0.07     | 0.19        | 0.06 | 0.09     | 0.44        | 0.09 | 0.12     | 0.65        | 0.11 | 0.16     | 0.24        | 0.07 | 0.08     | 0.15        | 0.05 | 0.07     |



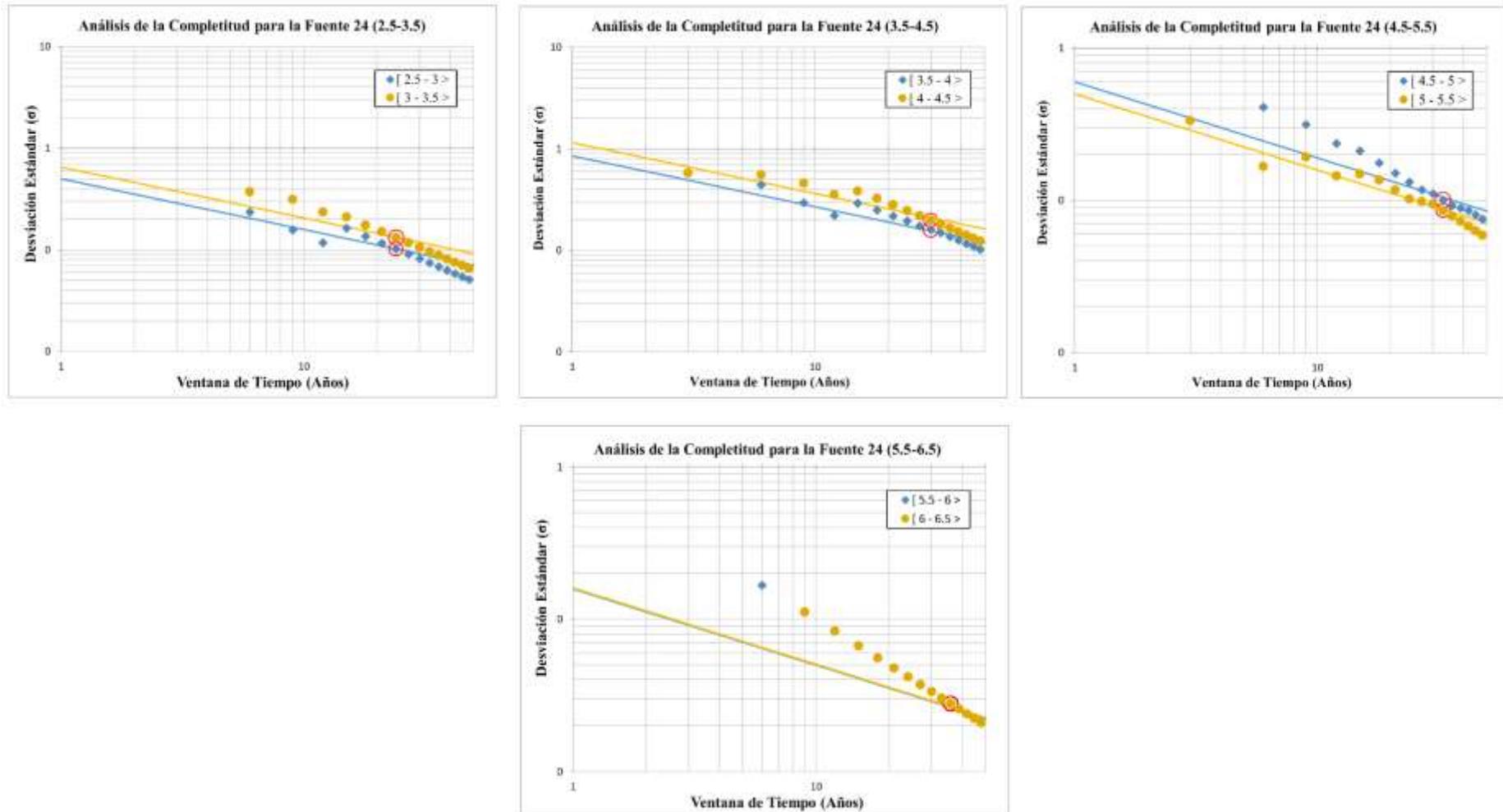


Figura 5.11 Analisis de la completitud para la Fuente 24. Fuente: (Elaboración propia).

### 5.2.2. RELACIÓN GUTENBERG-RICHTER

Con la finalidad de encontrar las relaciones de recurrencia para cada zona sismogénica y poder usarlas en el cálculo probabilístico, se usarán los valores de la Tabla 5.14 para calcular la tasa anual de excedencia o frecuencia, para cada magnitud dividiendo el número de eventos por el intervalo representativo en cada magnitud (frecuencia simple) y luego se procede a acumular los valores para encontrar las tasas acumuladas, que representa el número de eventos total mayor a una cierta magnitud.

**Tabla 5.14** Resumen del análisis de completitud para las fuentes sismogénicas de interés.

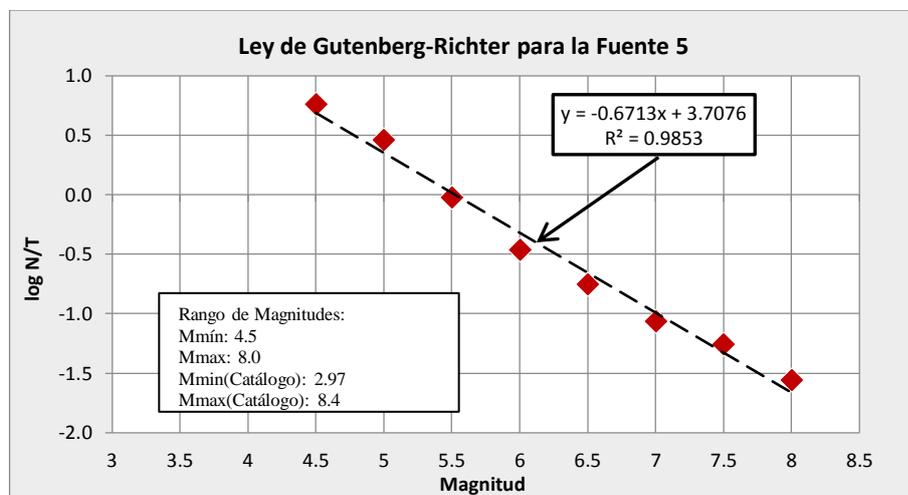
Fuente: *(Elaboración propia)*.

|           | Mw  | N   | T  | N/T   | (N/T)acum | log (N/T)acum |
|-----------|-----|-----|----|-------|-----------|---------------|
| Fuente 5  | 4.5 | 78  | 27 | 2.889 | 5.758     | 0.760         |
|           | 5.0 | 52  | 27 | 1.926 | 2.869     | 0.458         |
|           | 5.5 | 18  | 30 | 0.600 | 0.943     | -0.025        |
|           | 6.0 | 5   | 30 | 0.167 | 0.343     | -0.464        |
|           | 6.5 | 3   | 33 | 0.091 | 0.177     | -0.753        |
|           | 7.0 | 1   | 33 | 0.030 | 0.086     | -1.066        |
|           | 7.5 | 1   | 36 | 0.028 | 0.056     | -1.255        |
|           | 8.0 | 1   | 36 | 0.028 | 0.028     | -1.556        |
| Fuente 11 | 4.5 | 23  | 18 | 1.278 | 2.561     | 0.408         |
|           | 5.0 | 15  | 18 | 0.833 | 1.283     | 0.108         |
|           | 6.0 | 3   | 30 | 0.100 | 0.183     | -0.737        |
|           | 6.5 | 3   | 36 | 0.083 | 0.083     | -1.079        |
| Fuente 12 | 4.5 | 127 | 21 | 6.048 | 13.324    | 1.125         |
|           | 5.0 | 118 | 24 | 4.917 | 7.276     | 0.862         |
|           | 5.5 | 50  | 27 | 1.852 | 2.359     | 0.373         |
|           | 6.0 | 11  | 27 | 0.407 | 0.507     | -0.295        |
|           | 6.5 | 3   | 30 | 0.100 | 0.100     | -1.000        |
| Fuente 19 | 4.5 | 32  | 33 | 0.970 | 2.488     | 0.396         |
|           | 5.0 | 25  | 33 | 0.758 | 1.518     | 0.181         |
|           | 5.5 | 20  | 36 | 0.556 | 0.761     | -0.119        |
|           | 6.0 | 8   | 39 | 0.205 | 0.205     | -0.688        |
| Fuente 24 | 4.5 | 11  | 33 | 0.333 | 0.631     | -0.200        |
|           | 5.0 | 8   | 33 | 0.242 | 0.298     | -0.526        |
|           | 5.5 | 1   | 36 | 0.028 | 0.056     | -1.255        |
|           | 6.0 | 1   | 36 | 0.028 | 0.028     | -1.556        |

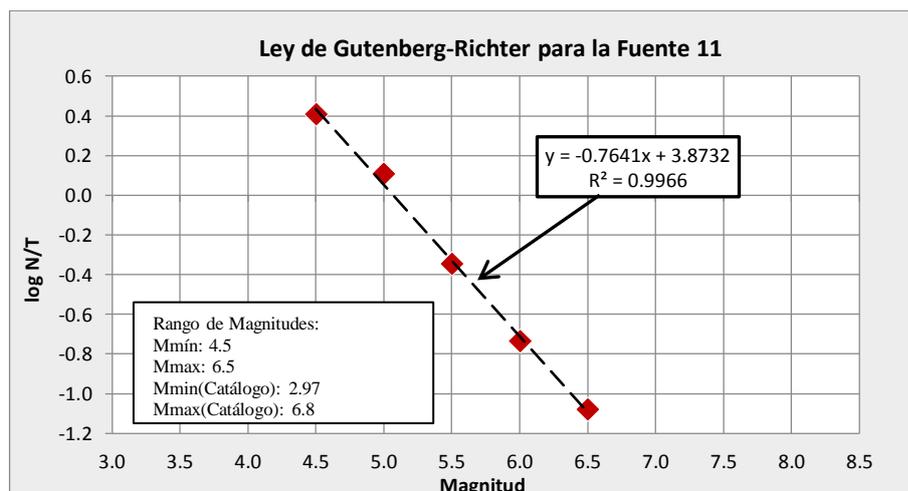
La Tabla 5.14 presenta la secuencia de cálculo indicada en la metodología.

Una vez que se encuentra la frecuencia acumulada para cada magnitud, se grafica versus la magnitud. Se usó el método de los mínimos cuadrados para la obtención del resto de parámetros necesarios. Para encontrar la relación Gutenberg y Richter y para obtener una mejor correlación, en todas las zonas se limitó a una magnitud mínima y máxima.

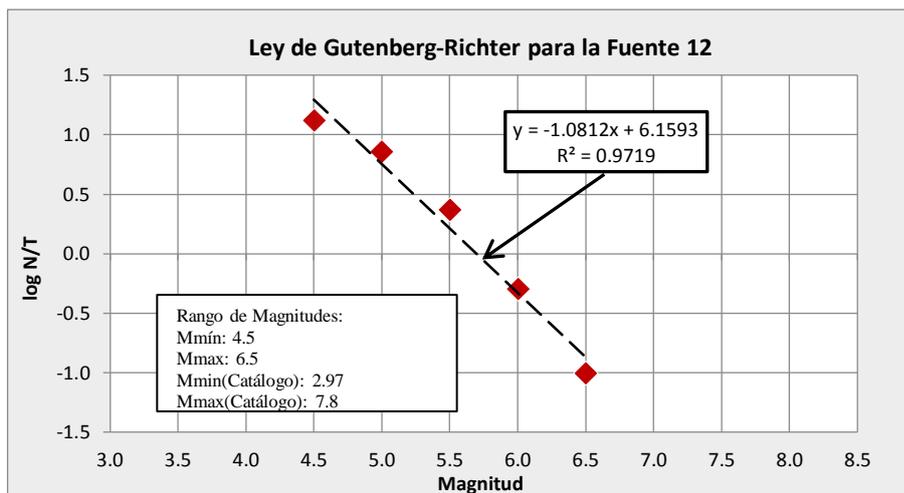
Las Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 presentan el trazado de los puntos del logaritmo en base diez de la frecuencia acumulada versus las magnitudes correspondientes, además de la ecuación de la recta.



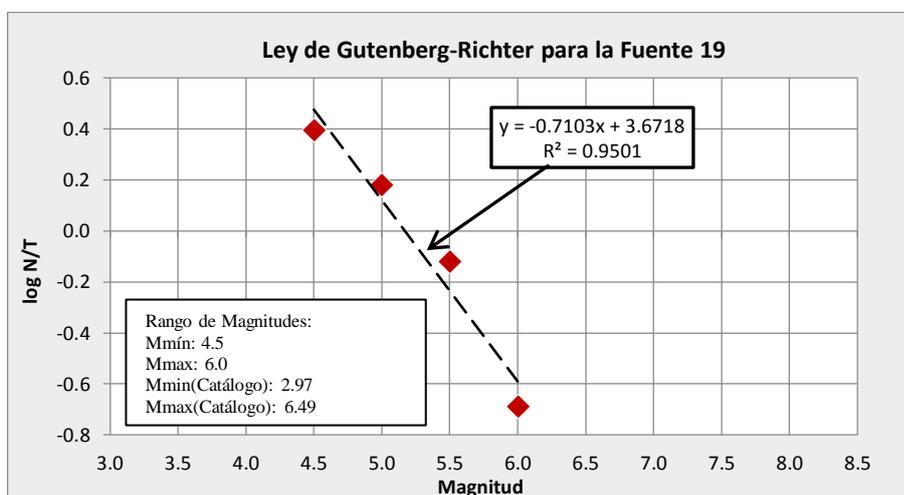
**Figura 5.12** Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 5 (mínimos cuadrados). Fuente: *(Elaboración propia)*.



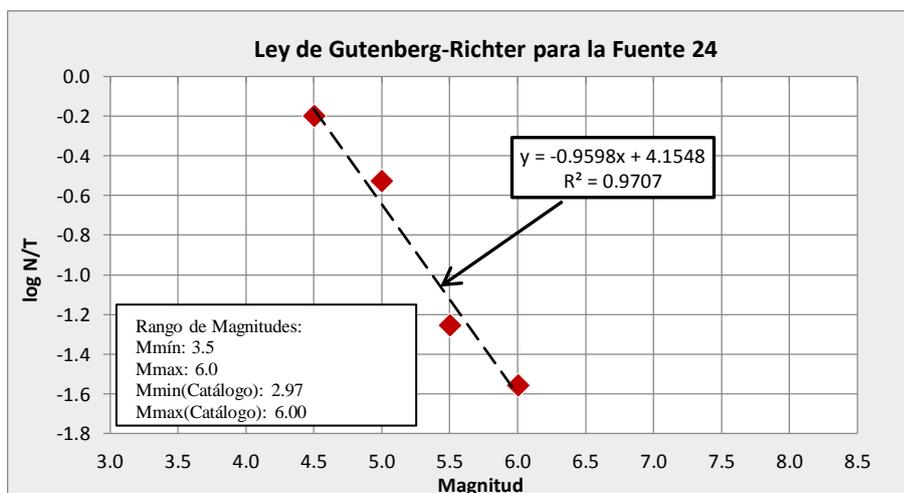
**Figura 5.13** Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 11 (mínimos cuadrados). Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 5.14** Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 12 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).



**Figura 5.15** Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 19 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).



**Figura 5.16** Relación Gutenberg-Richter para la Fuente 24 (mínimos cuadrados). Fuente: (Elaboración propia).

**Tabla 5.15** Resumen de los valores de la relación Gutenberg Richter. Fuente: (Elaboración propia).

|   | Interfac<br>e | Intraplaca   |              |              | Superfici<br>al |
|---|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
|   | Fuente<br>5   | Fuente<br>11 | Fuente<br>12 | Fuente<br>19 | Fuente<br>24    |
| a (Gutenberg-Richter)                         | 3.708         | 3.873        | 6.159        | 3.672        | 4.155           |
| b (Gutenberg-Richter)                         | 0.671         | 0.764        | 1.081        | 0.710        | 0.960           |
| Mo (Magnitud Mínima)                          | 4.500         | 4.500        | 4.500        | 4.500        | 4.500           |
| $\lambda$ (Mo) tasa anual de excedencia de Mo | 5.758         | 2.561        | 13.324       | 2.488        | 0.631           |
| $\sigma(b)$                                   | 0.033         | 0.026        | 0.106        | 0.115        | 0.118           |
| $\beta = \ln(10) b$                           | 1.546         | 1.759        | 2.489        | 1.636        | 2.210           |
| $\sigma(\beta) = \ln(10) \sigma(b)$           | 0.077         | 0.059        | 0.244        | 0.265        | 0.271           |
| E(Mu)   | 8.000         | 6.000        | 6.500        | 6.000        | 6.000           |
| $\sigma(\text{Mu})$                           | 0.000         | 0.000        | 0.000        | 0.000        | 0.000           |
| M1 = E(Mu) - $\sigma(\text{Mu})$              | 8.000         | 6.000        | 6.500        | 6.000        | 6.000           |
| M1 = E(Mu) + $\sigma(\text{Mu})$              | 8.000         | 6.000        | 6.500        | 6.000        | 6.000           |

En la **Tabla 5.15** se presenta un resumen de los datos a ingresar en el software Crisis 2015 Ver.4.1, para poder evaluar la peligrosidad sísmica probabilística.

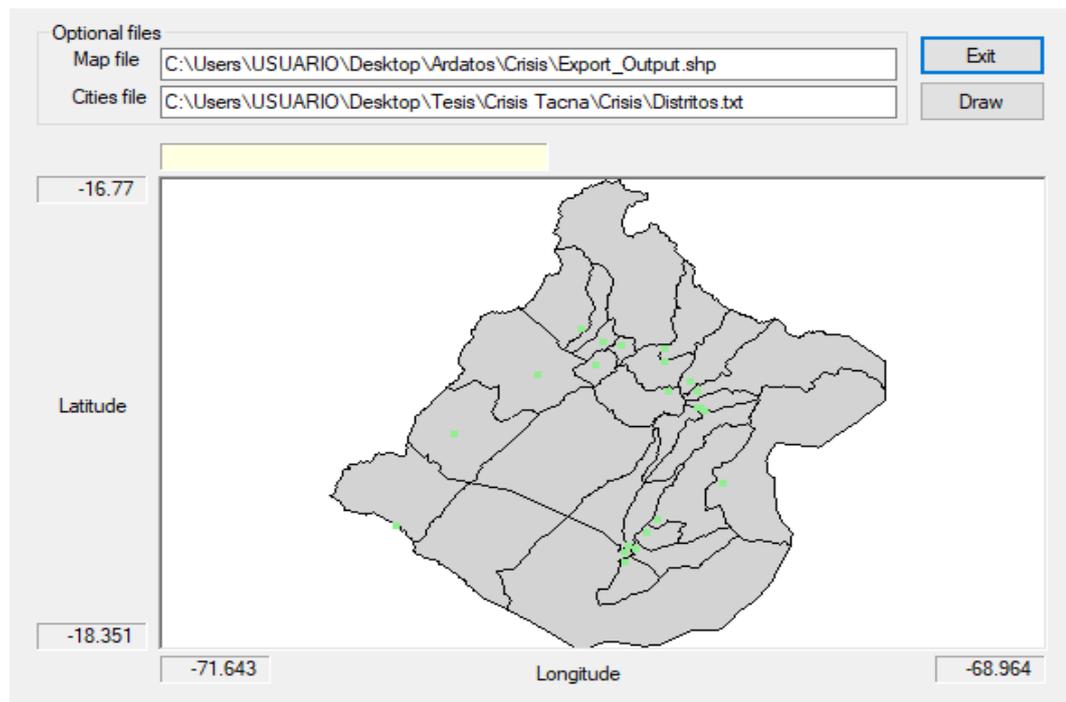
### 5.2.3. PELIGROSIDAD SÍSMICA PROBABILÍSTICA EN EL CRISIS 2015 VER.4.1

Para el cálculo del peligro sísmico probabilístico se utilizó el software Crisis2015. Se usaron en total 5 fuentes sismogénicas (F5, F11, F12, F19, F24), de las 29 que se tienen para el Perú. En la Tabla N° 23 se pueden apreciar todos los valores a usar para el ingreso de los datos al programa.



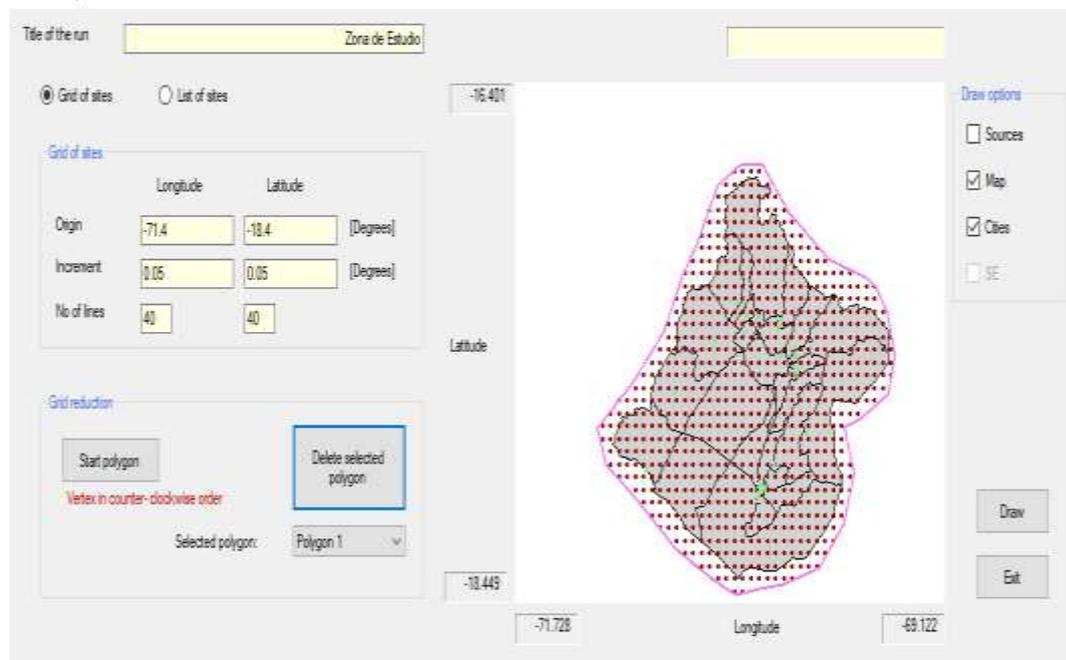
**Figura 5.17** Crisis 2015 Ver 4.1 Software para el cálculo del peligro sísmico. Fuente: (Crisis 2015 Ver 4.1).

MAPS - CRISIS 2015 Ver 4.1

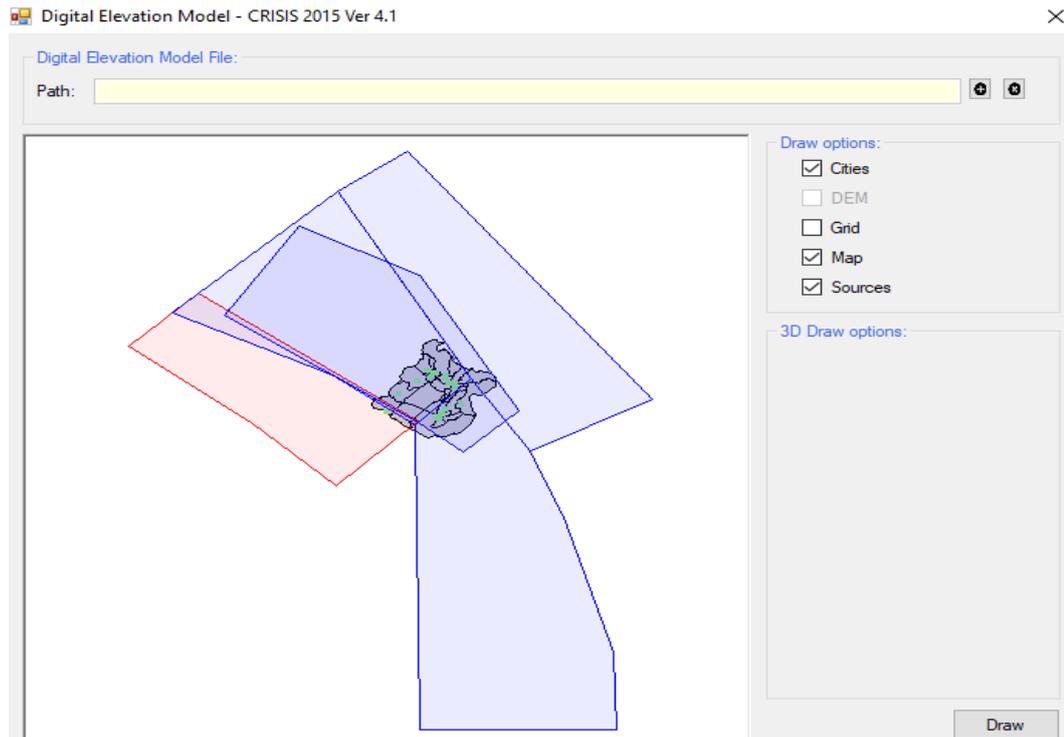


**Figura 5.18** Mapa del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: *(Elaboración propia)*.

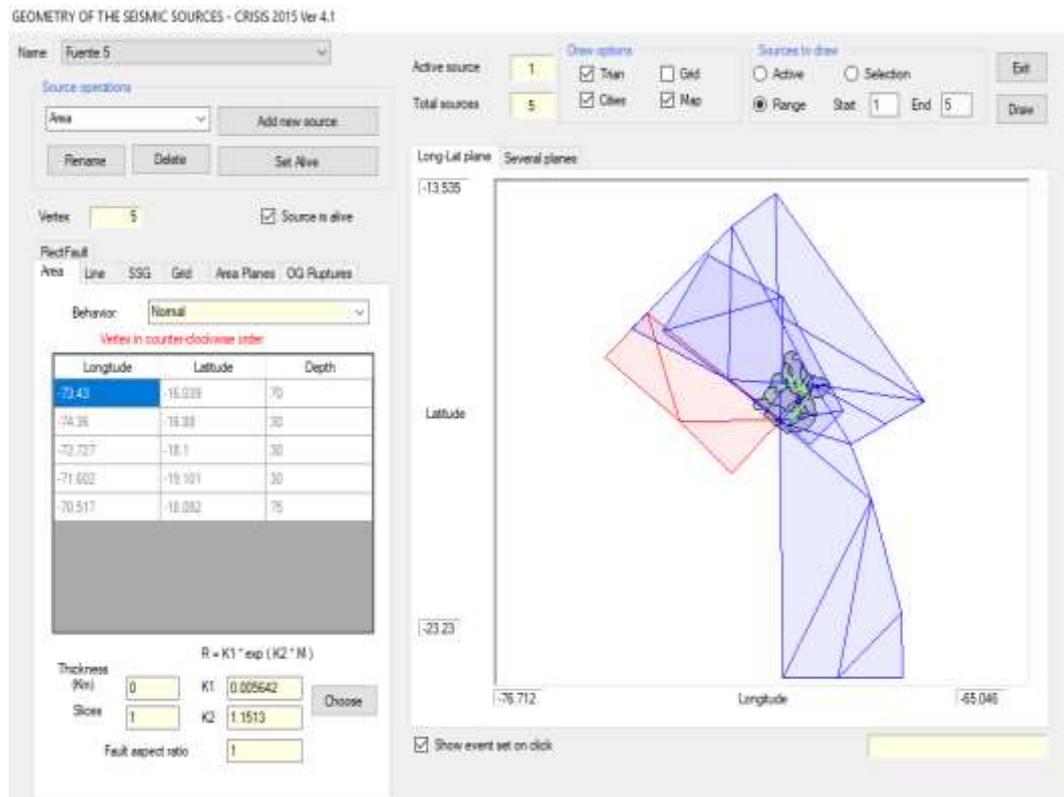
Sites of computation of hazard - CRISIS 2015 Ver 4.1



**Figura 5.19** Malla de puntos del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 5.20** Fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1  
Fuente: (Elaboración propia).



**Figura 5.21** Triangulación de las fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).

## INTENSITIES FOR EACH SPECTRAL ORDINATE - CRISIS 2015 Ver 4.1

**Spectral ordinates**

Total number of spectral ordinates: 15

Actual spectral ordinate: 1

Structural period of actual spectral ordinate: 0

Lower limit of intensity level: 1

Upper limit of intensity level: 2000

**Spacing**

Log  Linear  PEER  Large PEER

**General values**

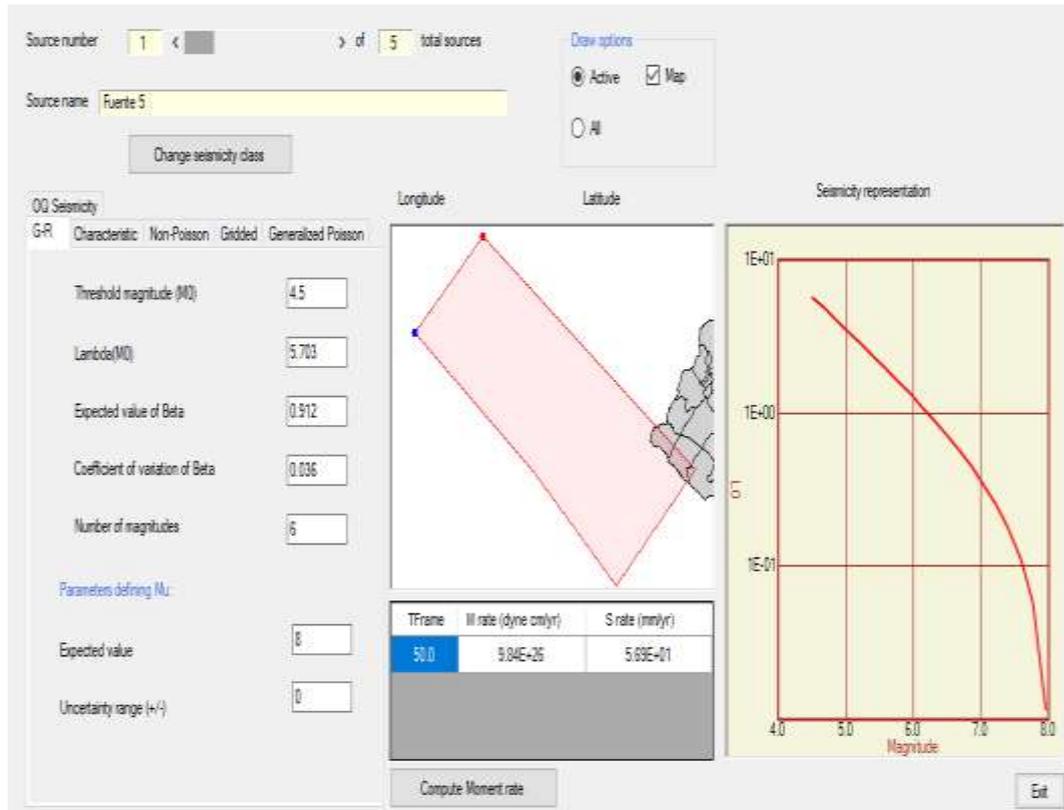
Units: gals

Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed: 20

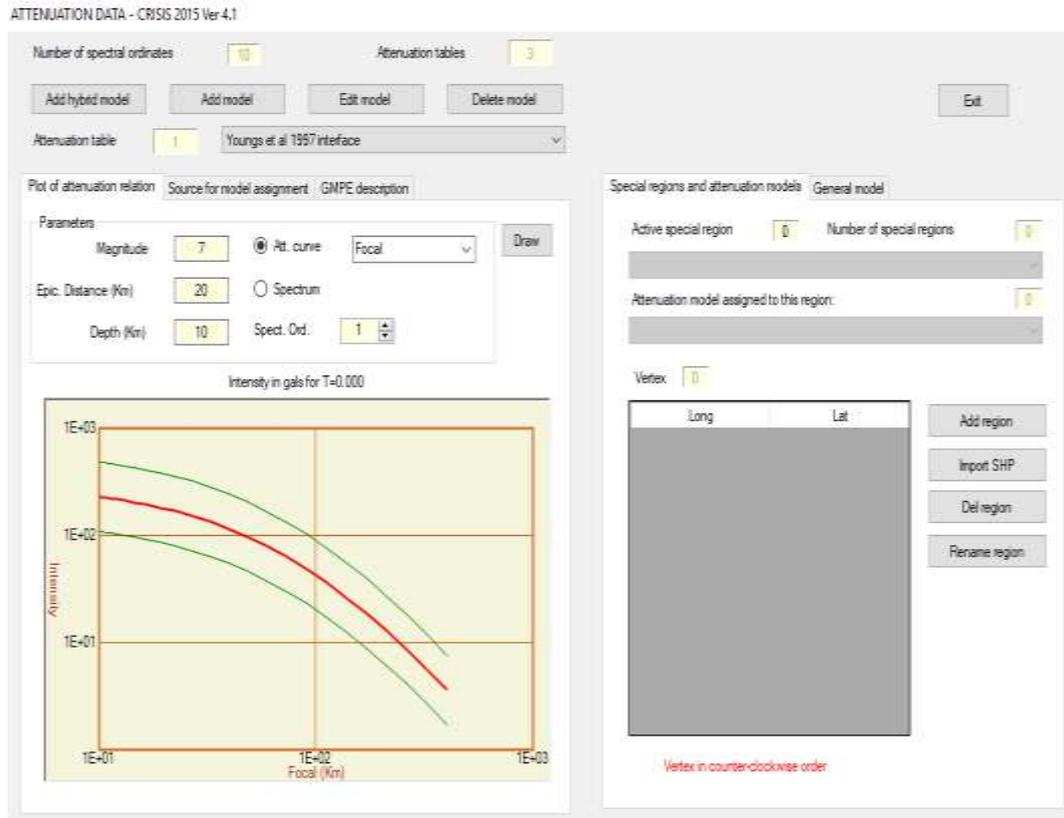
Exit

**Figura 5.22** Intensidades por cada ordenada espectral. del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).

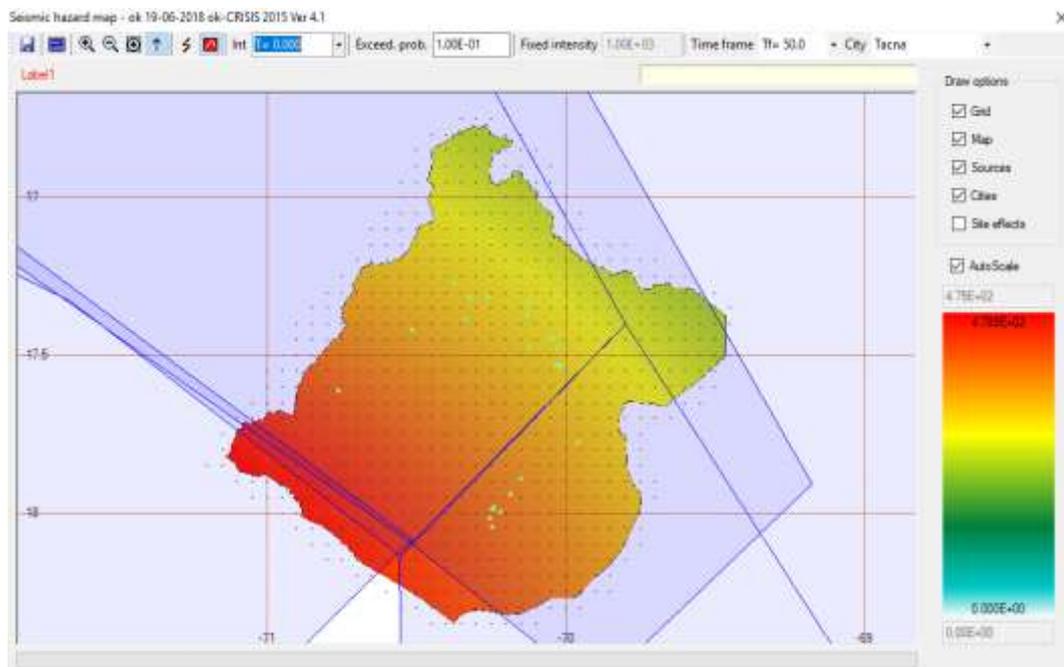
## SEISMICITY - CRISIS 2015 Ver 4.1



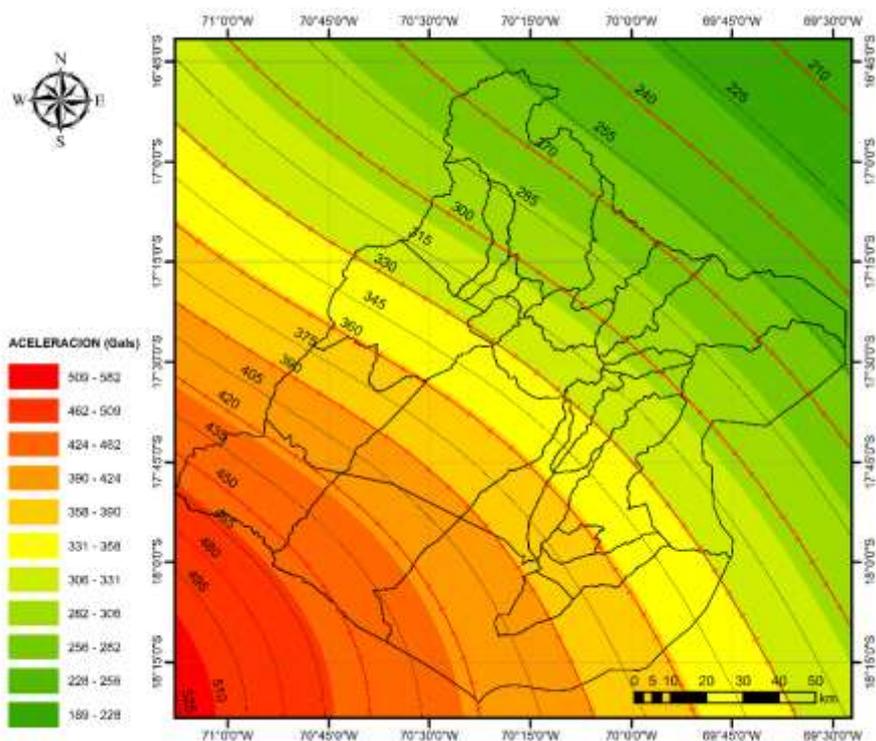
**Figura 5.23** Sismicidad de las fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).



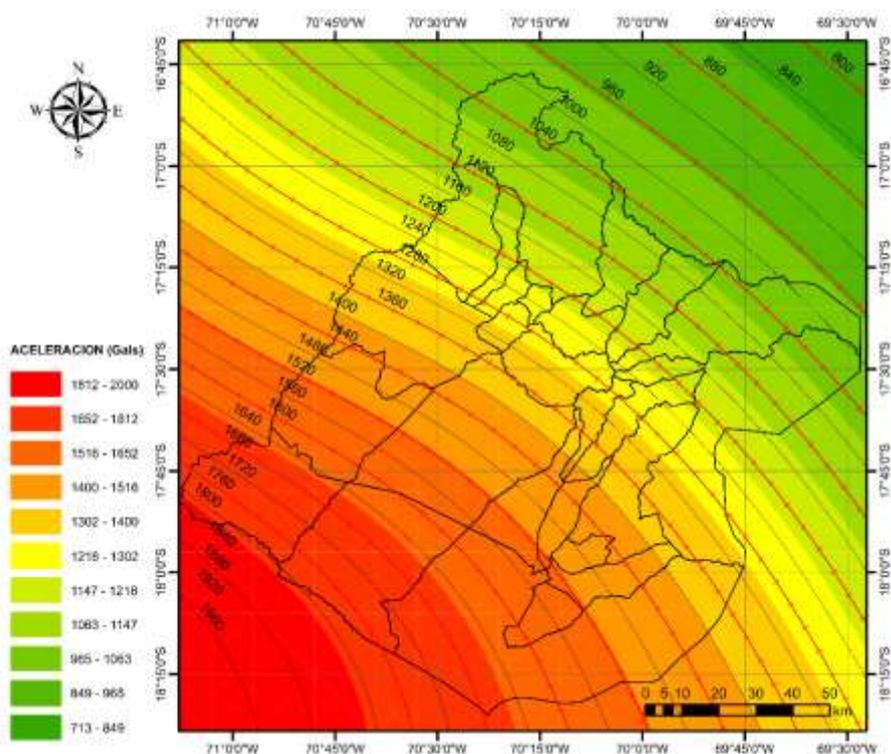
**Figura 5.24** Leyes de atenuación en las fuentes sismogénicas del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).



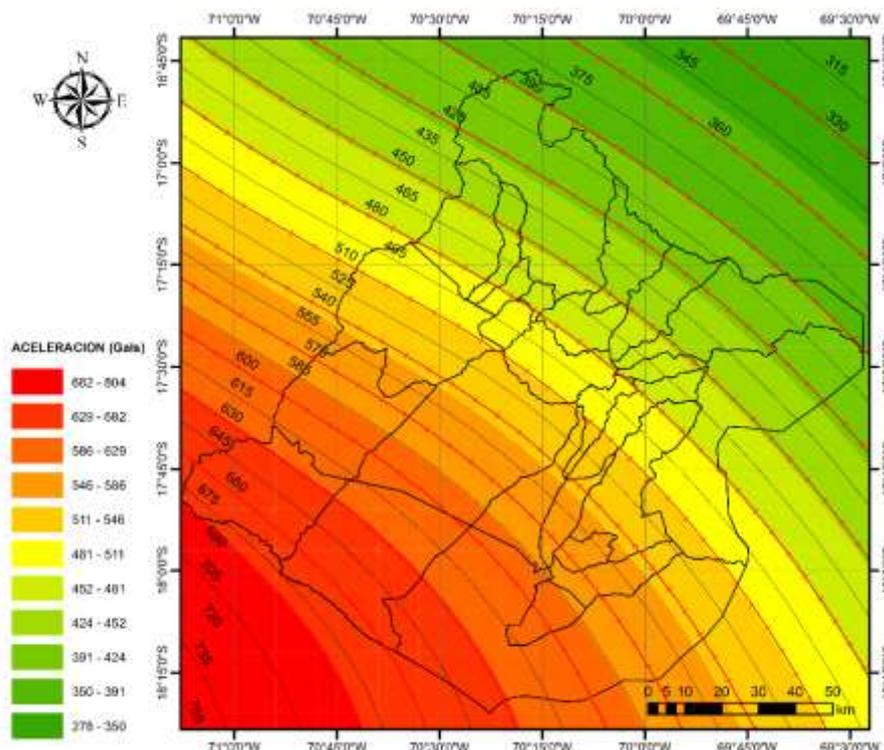
**Figura 5.25** Resultados del peligro sísmico del área de estudio en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 Fuente: (Elaboración propia).



**Figura 5.26** Mapa de aceleraciones máximas del suelo en la región de Tacna para un periodo estructural de 0.0 segundos en 495 años. Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 5.27** Mapa de aceleraciones máximas del suelo en la región de Tacna para un periodo estructural de 0.2 segundos en 4975 años. Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Figura 5.28** Mapa de aceleraciones máximas del suelo en la región de Tacna para un periodo estructural de 1.0 segundos en 4975 años. Fuente: *(Elaboración propia)*.

En la Figura 5.26, Figura 5.27 y Figura 5.28 se aprecia el peligro sísmico para la región de Tacna, en función de las máximas aceleraciones espectrales obtenidas en el Software Crisis 2015 Ver 4.1. Esto es realizado para distintos periodos estructurales. (ver Anexo N° 1, Anexo N° 2 y Anexo N° 3).

La Figura 5.26 muestra un mapa de isoaceleraciones espectrales de la región de Tacna, con un periodo estructural  $t=0.0$  segundos, con 5% de amortiguamiento y un tiempo de retorno de 475 años, equivalente a un 10% de excedencia en 50 años (ver Anexo N° 1).

La Figura 5.27 ostenta un mapa de isoaceleraciones espectrales de la región de Tacna, con un periodo estructural  $t=0.2$  segundos, con 5% de amortiguamiento y un tiempo de retorno de 4975 años, equivalente a un 1% de excedencia en 50 años (ver Anexo N° 2).

La Figura 5.28 muestra un mapa de isoaceleraciones espectrales de la región de Tacna, con un periodo estructural  $t=1.0$  segundo, con 5% de amortiguamiento y un tiempo de retorno de 4975 años, equivalente a un 1% de excedencia en 50 años (ver Anexo N° 3).

**Tabla 5.16** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Tacna, Gregorio Albarracín y Alto de la Alianza. Fuente: (Elaboración propia).

| Distrito   | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|--|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|  |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| TACNA<br>Latitud Sur :<br>18°0'49.68"<br>Longitud Oeste :<br>70°15'11.16"                  | 0.00             | 0.17                            | 0.21 | 0.39 | 0.48 | 0.74 |
|  | 0.05             | 0.23                            | 0.29 | 0.54 | 0.67 | 1.02 |
|  | 0.10             | 0.30                            | 0.37 | 0.71 | 0.88 | 1.36 |
|  | 0.15             | 0.32                            | 0.40 | 0.77 | 0.95 | 1.46 |
|  | 0.20             | 0.33                            | 0.43 | 0.82 | 1.02 | 1.57 |
|  | 0.25             | 0.32                            | 0.40 | 0.78 | 0.97 | 1.50 |
|  | 0.30             | 0.30                            | 0.37 | 0.73 | 0.92 | 1.42 |
|  | 0.35             | 0.29                            | 0.35 | 0.70 | 0.88 | 1.36 |
|  | 0.40             | 0.28                            | 0.33 | 0.67 | 0.83 | 1.29 |
|  | 0.45             | 0.26                            | 0.32 | 0.64 | 0.80 | 1.24 |
|  | 0.50             | 0.24                            | 0.31 | 0.62 | 0.77 | 1.19 |
|  | 0.60             | 0.21                            | 0.27 | 0.54 | 0.67 | 1.04 |
|  | 1.00             | 0.12                            | 0.15 | 0.31 | 0.38 | 0.60 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.07 | 0.15 | 0.19 | 0.30 |
| 3.00   | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.11 | 0.18 |      |
| GREGORIO<br>ALBARRACIN<br>Latitud Sur :<br>18°2'29.76"<br>Longitud Oeste :<br>70°14'56.76" | 0.00             | 0.17                            | 0.21 | 0.40 | 0.49 | 0.74 |
|  | 0.05             | 0.23                            | 0.29 | 0.55 | 0.67 | 1.03 |
|  | 0.10             | 0.30                            | 0.37 | 0.71 | 0.89 | 1.37 |
|  | 0.15             | 0.32                            | 0.40 | 0.77 | 0.96 | 1.47 |
|  | 0.20             | 0.34                            | 0.43 | 0.83 | 1.03 | 1.58 |
|  | 0.25             | 0.32                            | 0.40 | 0.78 | 0.98 | 1.50 |
|  | 0.30             | 0.30                            | 0.38 | 0.74 | 0.93 | 1.43 |
|  | 0.35             | 0.29                            | 0.35 | 0.70 | 0.88 | 1.37 |
|  | 0.40             | 0.28                            | 0.33 | 0.67 | 0.84 | 1.29 |
|  | 0.45             | 0.26                            | 0.32 | 0.65 | 0.80 | 1.24 |
|  | 0.50             | 0.25                            | 0.31 | 0.62 | 0.77 | 1.19 |
|  | 0.60             | 0.21                            | 0.28 | 0.54 | 0.68 | 1.05 |
|  | 1.00             | 0.12                            | 0.15 | 0.31 | 0.39 | 0.60 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.07 | 0.15 | 0.19 | 0.31 |
| 3.00   | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.11 | 0.18 |      |
| ALTO DE ALIANZA<br>Latitud Sur :<br>17°59'24.72"<br>Longitud Oeste :<br>70°14'42"          | 0.00             | 0.17                            | 0.20 | 0.39 | 0.48 | 0.73 |
|  | 0.05             | 0.23                            | 0.29 | 0.54 | 0.67 | 1.02 |
|  | 0.10             | 0.30                            | 0.37 | 0.71 | 0.88 | 1.35 |
|  | 0.15             | 0.31                            | 0.40 | 0.76 | 0.95 | 1.46 |
|  | 0.20             | 0.33                            | 0.42 | 0.82 | 1.02 | 1.56 |
|  | 0.25             | 0.31                            | 0.40 | 0.77 | 0.97 | 1.49 |
|  | 0.30             | 0.30                            | 0.37 | 0.73 | 0.92 | 1.42 |
|  | 0.35             | 0.29                            | 0.35 | 0.70 | 0.87 | 1.35 |
|  | 0.40             | 0.27                            | 0.33 | 0.66 | 0.83 | 1.28 |
|  | 0.45             | 0.26                            | 0.32 | 0.64 | 0.79 | 1.23 |
|  | 0.50             | 0.24                            | 0.31 | 0.62 | 0.76 | 1.18 |
|  | 0.60             | 0.21                            | 0.27 | 0.53 | 0.67 | 1.04 |
|  | 1.00             | 0.12                            | 0.15 | 0.30 | 0.38 | 0.60 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.07 | 0.14 | 0.19 | 0.30 |
| 3.00   | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.10 | 0.18 |      |

**Tabla 5.17** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Ciudad Nueva, Pocollay y Calana. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Distrito   | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|--|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|  |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| CIUDAD NUEVA<br>Latitud Sur :<br>17°59'8.16"<br>Longitud Oeste :<br>70°14'32.28" | 0.00             | 0.17                            | 0.20 | 0.39 | 0.48 | 0.73 |
|  | 0.05             | 0.23                            | 0.29 | 0.54 | 0.67 | 1.01 |
|  | 0.10             | 0.30                            | 0.37 | 0.70 | 0.87 | 1.35 |
|  | 0.15             | 0.31                            | 0.40 | 0.76 | 0.95 | 1.45 |
|  | 0.20             | 0.33                            | 0.42 | 0.82 | 1.01 | 1.56 |
|  | 0.25             | 0.31                            | 0.40 | 0.77 | 0.96 | 1.48 |
|  | 0.30             | 0.30                            | 0.37 | 0.73 | 0.91 | 1.41 |
|  | 0.35             | 0.29                            | 0.35 | 0.70 | 0.87 | 1.35 |
|  | 0.40             | 0.27                            | 0.33 | 0.66 | 0.82 | 1.27 |
|  | 0.45             | 0.25                            | 0.32 | 0.64 | 0.79 | 1.23 |
|  | 0.50             | 0.24                            | 0.30 | 0.62 | 0.76 | 1.18 |
|  | 0.60             | 0.21                            | 0.27 | 0.53 | 0.67 | 1.03 |
|  | 1.00             | 0.12                            | 0.15 | 0.30 | 0.38 | 0.59 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.07 | 0.14 | 0.19 | 0.30 |
| 3.00   | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.10 | 0.18 |      |
| POCOLLAY<br>Latitud Sur :<br>17°59'39.84"<br>Longitud Oeste :<br>70°13'6.6"      | 0.00             | 0.16                            | 0.20 | 0.39 | 0.48 | 0.73 |
|  | 0.05             | 0.23                            | 0.29 | 0.54 | 0.66 | 1.01 |
|  | 0.10             | 0.30                            | 0.36 | 0.70 | 0.87 | 1.34 |
|  | 0.15             | 0.31                            | 0.39 | 0.75 | 0.94 | 1.45 |
|  | 0.20             | 0.33                            | 0.42 | 0.81 | 1.01 | 1.55 |
|  | 0.25             | 0.31                            | 0.40 | 0.77 | 0.96 | 1.48 |
|  | 0.30             | 0.30                            | 0.37 | 0.73 | 0.91 | 1.41 |
|  | 0.35             | 0.28                            | 0.35 | 0.69 | 0.86 | 1.35 |
|  | 0.40             | 0.27                            | 0.33 | 0.66 | 0.82 | 1.27 |
|  | 0.45             | 0.25                            | 0.32 | 0.64 | 0.79 | 1.22 |
|  | 0.50             | 0.24                            | 0.30 | 0.61 | 0.76 | 1.17 |
|  | 0.60             | 0.21                            | 0.27 | 0.53 | 0.66 | 1.03 |
|  | 1.00             | 0.12                            | 0.15 | 0.30 | 0.38 | 0.59 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.07 | 0.14 | 0.19 | 0.30 |
| 3.00   | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.10 | 0.18 |      |
| CALANA<br>Latitud Sur :<br>17°56'29.4"<br>Longitud Oeste :<br>70°11'15"          | 0.00             | 0.16                            | 0.20 | 0.38 | 0.47 | 0.71 |
|  | 0.05             | 0.22                            | 0.28 | 0.52 | 0.65 | 0.99 |
|  | 0.10             | 0.29                            | 0.35 | 0.69 | 0.85 | 1.30 |
|  | 0.15             | 0.31                            | 0.38 | 0.74 | 0.92 | 1.42 |
|  | 0.20             | 0.32                            | 0.41 | 0.79 | 0.99 | 1.52 |
|  | 0.25             | 0.31                            | 0.38 | 0.75 | 0.94 | 1.45 |
|  | 0.30             | 0.29                            | 0.36 | 0.71 | 0.89 | 1.38 |
|  | 0.35             | 0.28                            | 0.34 | 0.68 | 0.84 | 1.30 |
|  | 0.40             | 0.26                            | 0.32 | 0.65 | 0.80 | 1.24 |
|  | 0.45             | 0.25                            | 0.31 | 0.62 | 0.77 | 1.19 |
|  | 0.50             | 0.23                            | 0.30 | 0.60 | 0.74 | 1.15 |
|  | 0.60             | 0.21                            | 0.26 | 0.52 | 0.65 | 1.01 |
|  | 1.00             | 0.12                            | 0.14 | 0.30 | 0.37 | 0.58 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.07 | 0.14 | 0.18 | 0.30 |
| 3.00   | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.10 | 0.17 |      |

**Tabla 5.18** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Ilabaya, Pachia y Palca. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Distrito   | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|--|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|  |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| ILABAYA<br>Latitud Sur :<br>17°25'14.88"<br>Longitud Oeste :<br>70°30'47.88" | 0.00             | 0.15                            | 0.19 | 0.35 | 0.43 | 0.65 |
|  | 0.05             | 0.21                            | 0.26 | 0.48 | 0.60 | 0.91 |
|  | 0.10             | 0.28                            | 0.33 | 0.63 | 0.78 | 1.18 |
|  | 0.15             | 0.29                            | 0.35 | 0.68 | 0.84 | 1.28 |
|  | 0.20             | 0.30                            | 0.38 | 0.73 | 0.91 | 1.40 |
|  | 0.25             | 0.29                            | 0.35 | 0.69 | 0.86 | 1.33 |
|  | 0.30             | 0.28                            | 0.33 | 0.66 | 0.81 | 1.25 |
|  | 0.35             | 0.26                            | 0.32 | 0.63 | 0.77 | 1.19 |
|  | 0.40             | 0.24                            | 0.30 | 0.60 | 0.74 | 1.14 |
|  | 0.45             | 0.23                            | 0.29 | 0.57 | 0.71 | 1.09 |
|  | 0.50             | 0.22                            | 0.28 | 0.55 | 0.68 | 1.06 |
|  | 0.60             | 0.20                            | 0.24 | 0.48 | 0.60 | 0.93 |
|  | 1.00             | 0.11                            | 0.14 | 0.28 | 0.34 | 0.53 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.06 | 0.13 | 0.17 | 0.28 |
| 3.00   | 0.03             | 0.03                            | 0.07 | 0.10 | 0.16 |      |
| PACHIA<br>Latitud Sur :<br>17°53'47.4"<br>Longitud Oeste :<br>70°9'16.92"    | 0.00             | 0.16                            | 0.20 | 0.37 | 0.46 | 0.70 |
|  | 0.05             | 0.22                            | 0.27 | 0.51 | 0.64 | 0.97 |
|  | 0.10             | 0.29                            | 0.35 | 0.67 | 0.83 | 1.27 |
|  | 0.15             | 0.30                            | 0.37 | 0.72 | 0.90 | 1.39 |
|  | 0.20             | 0.32                            | 0.40 | 0.77 | 0.97 | 1.49 |
|  | 0.25             | 0.30                            | 0.37 | 0.73 | 0.92 | 1.42 |
|  | 0.30             | 0.29                            | 0.35 | 0.69 | 0.87 | 1.35 |
|  | 0.35             | 0.27                            | 0.33 | 0.66 | 0.82 | 1.28 |
|  | 0.40             | 0.25                            | 0.31 | 0.63 | 0.78 | 1.21 |
|  | 0.45             | 0.24                            | 0.30 | 0.61 | 0.75 | 1.17 |
|  | 0.50             | 0.23                            | 0.29 | 0.58 | 0.72 | 1.12 |
|  | 0.60             | 0.20                            | 0.25 | 0.51 | 0.64 | 0.99 |
|  | 1.00             | 0.11                            | 0.14 | 0.29 | 0.36 | 0.57 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.06 | 0.14 | 0.18 | 0.29 |
| 3.00   | 0.03             | 0.03                            | 0.08 | 0.10 | 0.17 |      |
| PALCA<br>Latitud Sur :<br>17°46'30.72"<br>Longitud Oeste :<br>69°57'35.64"   | 0.00             | 0.14                            | 0.18 | 0.33 | 0.42 | 0.64 |
|  | 0.05             | 0.20                            | 0.24 | 0.46 | 0.57 | 0.88 |
|  | 0.10             | 0.25                            | 0.31 | 0.61 | 0.75 | 1.15 |
|  | 0.15             | 0.28                            | 0.33 | 0.65 | 0.81 | 1.24 |
|  | 0.20             | 0.29                            | 0.36 | 0.70 | 0.87 | 1.36 |
|  | 0.25             | 0.28                            | 0.34 | 0.66 | 0.83 | 1.28 |
|  | 0.30             | 0.26                            | 0.32 | 0.63 | 0.78 | 1.21 |
|  | 0.35             | 0.24                            | 0.30 | 0.60 | 0.74 | 1.16 |
|  | 0.40             | 0.23                            | 0.29 | 0.57 | 0.71 | 1.10 |
|  | 0.45             | 0.22                            | 0.28 | 0.55 | 0.68 | 1.07 |
|  | 0.50             | 0.21                            | 0.27 | 0.52 | 0.66 | 1.03 |
|  | 0.60             | 0.19                            | 0.23 | 0.46 | 0.58 | 0.90 |
|  | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.26 | 0.33 | 0.51 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.06 | 0.13 | 0.16 | 0.27 |
| 3.00   | 0.03             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.16 |      |

**Tabla 5.19** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Tarata, Susapaya y Sitajara. Fuente: (Elaboración propia).

| Distrito  | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|---|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|   |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| TARATA<br>Latitud Sur :<br>17°28'24"<br>Longitud Oeste :<br>70°01'51"   | 0.00             | 0.13                            | 0.16 | 0.31 | 0.38 | 0.59 |
|   | 0.05             | 0.19                            | 0.22 | 0.43 | 0.53 | 0.81 |
|   | 0.10             | 0.23                            | 0.29 | 0.56 | 0.69 | 1.06 |
|   | 0.15             | 0.25                            | 0.31 | 0.61 | 0.74 | 1.15 |
|   | 0.20             | 0.28                            | 0.33 | 0.65 | 0.80 | 1.24 |
|   | 0.25             | 0.25                            | 0.31 | 0.62 | 0.76 | 1.18 |
|   | 0.30             | 0.24                            | 0.30 | 0.58 | 0.72 | 1.12 |
|   | 0.35             | 0.22                            | 0.29 | 0.55 | 0.69 | 1.07 |
|   | 0.40             | 0.21                            | 0.27 | 0.53 | 0.66 | 1.02 |
|   | 0.45             | 0.21                            | 0.26 | 0.51 | 0.64 | 0.99 |
|   | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.49 | 0.61 | 0.95 |
|   | 0.60             | 0.17                            | 0.21 | 0.43 | 0.53 | 0.83 |
|   | 1.00             | 0.10                            | 0.12 | 0.24 | 0.31 | 0.48 |
|   | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00  | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |
| SUSAPAYA<br>Latitud Sur :<br>17°19'48"<br>Longitud Oeste :<br>70°07'37" | 0.00             | 0.13                            | 0.16 | 0.30 | 0.37 | 0.57 |
|   | 0.05             | 0.18                            | 0.22 | 0.42 | 0.51 | 0.78 |
|   | 0.10             | 0.23                            | 0.29 | 0.54 | 0.67 | 1.03 |
|   | 0.15             | 0.25                            | 0.30 | 0.59 | 0.72 | 1.12 |
|   | 0.20             | 0.27                            | 0.32 | 0.63 | 0.78 | 1.21 |
|   | 0.25             | 0.25                            | 0.31 | 0.60 | 0.74 | 1.15 |
|   | 0.30             | 0.23                            | 0.29 | 0.57 | 0.70 | 1.09 |
|   | 0.35             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.67 | 1.04 |
|   | 0.40             | 0.21                            | 0.27 | 0.51 | 0.64 | 1.00 |
|   | 0.45             | 0.20                            | 0.25 | 0.49 | 0.62 | 0.96 |
|   | 0.50             | 0.20                            | 0.24 | 0.48 | 0.60 | 0.93 |
|   | 0.60             | 0.17                            | 0.21 | 0.42 | 0.52 | 0.81 |
|   | 1.00             | 0.09                            | 0.12 | 0.24 | 0.30 | 0.47 |
|   | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.24 |
| 3.00  | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.14 |      |
| SITAJARA<br>Latitud Sur :<br>17°22'18"<br>Longitud Oeste :<br>70°07'55" | 0.00             | 0.13                            | 0.16 | 0.31 | 0.38 | 0.58 |
|   | 0.05             | 0.19                            | 0.22 | 0.43 | 0.52 | 0.80 |
|   | 0.10             | 0.23                            | 0.29 | 0.55 | 0.68 | 1.05 |
|   | 0.15             | 0.25                            | 0.31 | 0.60 | 0.74 | 1.14 |
|   | 0.20             | 0.28                            | 0.33 | 0.65 | 0.80 | 1.23 |
|   | 0.25             | 0.25                            | 0.31 | 0.61 | 0.76 | 1.17 |
|   | 0.30             | 0.24                            | 0.30 | 0.58 | 0.72 | 1.11 |
|   | 0.35             | 0.22                            | 0.28 | 0.55 | 0.69 | 1.06 |
|   | 0.40             | 0.21                            | 0.27 | 0.52 | 0.65 | 1.01 |
|   | 0.45             | 0.20                            | 0.26 | 0.50 | 0.63 | 0.98 |
|   | 0.50             | 0.20                            | 0.24 | 0.48 | 0.61 | 0.94 |
|   | 0.60             | 0.17                            | 0.21 | 0.43 | 0.53 | 0.82 |
|   | 1.00             | 0.10                            | 0.12 | 0.24 | 0.30 | 0.47 |
|   | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.24 |
| 3.00  | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |

**Tabla 5.20** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Ticaco, Chucatamani y Tarucachi. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Distrito   | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|--|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|  |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| TICACO<br>Latitud Sur :<br>17°26'42"<br>Longitud Oeste :<br>70°03'06"      | 0.00             | 0.13                            | 0.16 | 0.31 | 0.38 | 0.59 |
|  | 0.05             | 0.19                            | 0.22 | 0.43 | 0.52 | 0.80 |
|  | 0.10             | 0.23                            | 0.29 | 0.55 | 0.69 | 1.05 |
|  | 0.15             | 0.25                            | 0.31 | 0.60 | 0.74 | 1.14 |
|  | 0.20             | 0.28                            | 0.33 | 0.65 | 0.80 | 1.24 |
|  | 0.25             | 0.25                            | 0.31 | 0.62 | 0.76 | 1.17 |
|  | 0.30             | 0.24                            | 0.30 | 0.58 | 0.72 | 1.11 |
|  | 0.35             | 0.22                            | 0.28 | 0.55 | 0.69 | 1.07 |
|  | 0.40             | 0.21                            | 0.27 | 0.52 | 0.66 | 1.02 |
|  | 0.45             | 0.20                            | 0.26 | 0.50 | 0.63 | 0.98 |
|  | 0.50             | 0.20                            | 0.24 | 0.49 | 0.61 | 0.95 |
|  | 0.60             | 0.17                            | 0.21 | 0.43 | 0.53 | 0.83 |
|  | 1.00             | 0.10                            | 0.12 | 0.24 | 0.30 | 0.48 |
|  | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00   | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |
| CHUCATAMANI<br>Latitud Sur :<br>17°28'37"<br>Longitud Oeste :<br>70°07'25" | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.32 | 0.40 | 0.61 |
|  | 0.05             | 0.19                            | 0.23 | 0.44 | 0.54 | 0.83 |
|  | 0.10             | 0.24                            | 0.30 | 0.58 | 0.71 | 1.09 |
|  | 0.15             | 0.26                            | 0.32 | 0.62 | 0.77 | 1.18 |
|  | 0.20             | 0.28                            | 0.34 | 0.67 | 0.83 | 1.28 |
|  | 0.25             | 0.27                            | 0.32 | 0.64 | 0.79 | 1.22 |
|  | 0.30             | 0.24                            | 0.31 | 0.60 | 0.74 | 1.15 |
|  | 0.35             | 0.23                            | 0.29 | 0.57 | 0.71 | 1.10 |
|  | 0.40             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.68 | 1.05 |
|  | 0.45             | 0.21                            | 0.27 | 0.52 | 0.65 | 1.02 |
|  | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.50 | 0.63 | 0.98 |
|  | 0.60             | 0.18                            | 0.22 | 0.44 | 0.55 | 0.86 |
|  | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.25 | 0.31 | 0.49 |
|  | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00   | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |
| TARUCACHI<br>Latitud Sur :<br>17°31'39"<br>Longitud Oeste :<br>70°01'21"   | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.32 | 0.39 | 0.60 |
|  | 0.05             | 0.19                            | 0.23 | 0.44 | 0.54 | 0.82 |
|  | 0.10             | 0.24                            | 0.30 | 0.57 | 0.70 | 1.08 |
|  | 0.15             | 0.26                            | 0.32 | 0.62 | 0.76 | 1.17 |
|  | 0.20             | 0.28                            | 0.34 | 0.66 | 0.82 | 1.27 |
|  | 0.25             | 0.26                            | 0.32 | 0.63 | 0.78 | 1.20 |
|  | 0.30             | 0.24                            | 0.30 | 0.59 | 0.73 | 1.14 |
|  | 0.35             | 0.23                            | 0.29 | 0.56 | 0.70 | 1.09 |
|  | 0.40             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.67 | 1.04 |
|  | 0.45             | 0.21                            | 0.26 | 0.51 | 0.65 | 1.01 |
|  | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.50 | 0.62 | 0.97 |
|  | 0.60             | 0.18                            | 0.22 | 0.44 | 0.54 | 0.85 |
|  | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.25 | 0.31 | 0.49 |
|  | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00   | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |

**Tabla 5.21** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Estique Pamapa, Estique Pueblo y Camilaca. Fuente: (Elaboración propia).

| Distrito   | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|--|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|  |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| ESTIQUE<br>PAMPA<br>Latitud Sur :<br>17°31'51"<br>Longitud Oeste :<br>70°02'07"  | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.32 | 0.39 | 0.60 |
|  | 0.05             | 0.19                            | 0.23 | 0.44 | 0.54 | 0.83 |
|  | 0.10             | 0.24                            | 0.30 | 0.57 | 0.71 | 1.08 |
|  | 0.15             | 0.26                            | 0.32 | 0.62 | 0.76 | 1.18 |
|  | 0.20             | 0.28                            | 0.34 | 0.66 | 0.82 | 1.27 |
|  | 0.25             | 0.26                            | 0.32 | 0.63 | 0.78 | 1.21 |
|  | 0.30             | 0.24                            | 0.30 | 0.60 | 0.74 | 1.15 |
|  | 0.35             | 0.23                            | 0.29 | 0.57 | 0.71 | 1.10 |
|  | 0.40             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.67 | 1.05 |
|  | 0.45             | 0.21                            | 0.27 | 0.52 | 0.65 | 1.01 |
|  | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.50 | 0.63 | 0.97 |
|  | 0.60             | 0.18                            | 0.22 | 0.44 | 0.55 | 0.85 |
|  | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.25 | 0.31 | 0.49 |
|  | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00   | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |
| ESTIQUE<br>PUEBLO<br>Latitud Sur :<br>17°32'15"<br>Longitud Oeste :<br>70°00'57" | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.32 | 0.39 | 0.60 |
|  | 0.05             | 0.19                            | 0.23 | 0.44 | 0.54 | 0.82 |
|  | 0.10             | 0.24                            | 0.30 | 0.57 | 0.70 | 1.08 |
|  | 0.15             | 0.26                            | 0.32 | 0.62 | 0.76 | 1.17 |
|  | 0.20             | 0.28                            | 0.34 | 0.66 | 0.82 | 1.27 |
|  | 0.25             | 0.26                            | 0.32 | 0.63 | 0.78 | 1.20 |
|  | 0.30             | 0.24                            | 0.30 | 0.60 | 0.74 | 1.14 |
|  | 0.35             | 0.23                            | 0.29 | 0.56 | 0.70 | 1.09 |
|  | 0.40             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.67 | 1.04 |
|  | 0.45             | 0.21                            | 0.26 | 0.52 | 0.65 | 1.01 |
|  | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.50 | 0.62 | 0.97 |
|  | 0.60             | 0.18                            | 0.22 | 0.44 | 0.54 | 0.85 |
|  | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.25 | 0.31 | 0.49 |
|  | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00   | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |
| CAMILACA<br>Latitud Sur :<br>17°16'3"<br>Longitud Oeste :<br>70°22'48"           | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.32 | 0.39 | 0.60 |
|  | 0.05             | 0.19                            | 0.23 | 0.44 | 0.54 | 0.82 |
|  | 0.10             | 0.24                            | 0.30 | 0.57 | 0.70 | 1.07 |
|  | 0.15             | 0.26                            | 0.32 | 0.62 | 0.76 | 1.16 |
|  | 0.20             | 0.28                            | 0.34 | 0.66 | 0.82 | 1.26 |
|  | 0.25             | 0.27                            | 0.32 | 0.63 | 0.78 | 1.20 |
|  | 0.30             | 0.25                            | 0.31 | 0.60 | 0.74 | 1.13 |
|  | 0.35             | 0.23                            | 0.29 | 0.57 | 0.70 | 1.08 |
|  | 0.40             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.67 | 1.04 |
|  | 0.45             | 0.21                            | 0.27 | 0.52 | 0.65 | 1.00 |
|  | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.50 | 0.62 | 0.96 |
|  | 0.60             | 0.18                            | 0.22 | 0.44 | 0.54 | 0.84 |
|  | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.25 | 0.31 | 0.48 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00   | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |

**Tabla 5.22** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Quilahuani, Curibaya y Huanuara. Fuente: *(Elaboración propia)*.

| Distrito  | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|---|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|   |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| <b>QUILAHUANI</b><br>Latitud Sur :<br>17°19'4.08"<br>Longitud Oeste :<br>70°15'29.16" | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.31 | 0.39 | 0.59 |
|   | 0.05             | 0.19                            | 0.23 | 0.43 | 0.53 | 0.81 |
|   | 0.10             | 0.24                            | 0.30 | 0.56 | 0.70 | 1.07 |
|   | 0.15             | 0.26                            | 0.31 | 0.61 | 0.75 | 1.15 |
|   | 0.20             | 0.28                            | 0.34 | 0.66 | 0.81 | 1.25 |
|   | 0.25             | 0.26                            | 0.32 | 0.62 | 0.77 | 1.19 |
|   | 0.30             | 0.24                            | 0.30 | 0.59 | 0.73 | 1.13 |
|   | 0.35             | 0.23                            | 0.29 | 0.56 | 0.70 | 1.08 |
|   | 0.40             | 0.22                            | 0.28 | 0.53 | 0.66 | 1.03 |
|   | 0.45             | 0.21                            | 0.26 | 0.51 | 0.64 | 0.99 |
|   | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.49 | 0.62 | 0.96 |
|   | 0.60             | 0.18                            | 0.22 | 0.43 | 0.54 | 0.84 |
|   | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.25 | 0.31 | 0.48 |
|   | 2.00             | 0.04                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00  | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |
| <b>CURIBAYA</b><br>Latitud Sur :<br>17°22'57"<br>Longitud Oeste :<br>70°20'4.92"      | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.33 | 0.41 | 0.62 |
|   | 0.05             | 0.20                            | 0.24 | 0.45 | 0.56 | 0.85 |
|   | 0.10             | 0.25                            | 0.31 | 0.59 | 0.73 | 1.12 |
|   | 0.15             | 0.28                            | 0.33 | 0.64 | 0.79 | 1.21 |
|   | 0.20             | 0.29                            | 0.35 | 0.69 | 0.85 | 1.31 |
|   | 0.25             | 0.28                            | 0.33 | 0.65 | 0.81 | 1.24 |
|   | 0.30             | 0.25                            | 0.31 | 0.62 | 0.76 | 1.18 |
|   | 0.35             | 0.24                            | 0.30 | 0.59 | 0.73 | 1.12 |
|   | 0.40             | 0.23                            | 0.29 | 0.56 | 0.69 | 1.07 |
|   | 0.45             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.67 | 1.04 |
|   | 0.50             | 0.21                            | 0.26 | 0.52 | 0.65 | 1.00 |
|   | 0.60             | 0.19                            | 0.23 | 0.45 | 0.56 | 0.88 |
|   | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.26 | 0.32 | 0.50 |
|   | 2.00             | 0.05                            | 0.06 | 0.13 | 0.16 | 0.26 |
| 3.00  | 0.03             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |
| <b>HUANUARA</b><br>Latitud Sur :<br>17°18'50.04"<br>Longitud Oeste :<br>70°19'18.84"  | 0.00             | 0.14                            | 0.17 | 0.32 | 0.39 | 0.60 |
|   | 0.05             | 0.19                            | 0.23 | 0.44 | 0.54 | 0.82 |
|   | 0.10             | 0.24                            | 0.30 | 0.57 | 0.70 | 1.08 |
|   | 0.15             | 0.26                            | 0.32 | 0.62 | 0.76 | 1.17 |
|   | 0.20             | 0.28                            | 0.34 | 0.67 | 0.82 | 1.27 |
|   | 0.25             | 0.27                            | 0.32 | 0.63 | 0.78 | 1.20 |
|   | 0.30             | 0.25                            | 0.31 | 0.60 | 0.74 | 1.14 |
|   | 0.35             | 0.23                            | 0.29 | 0.57 | 0.71 | 1.09 |
|   | 0.40             | 0.22                            | 0.28 | 0.54 | 0.67 | 1.04 |
|   | 0.45             | 0.21                            | 0.27 | 0.52 | 0.65 | 1.01 |
|   | 0.50             | 0.20                            | 0.25 | 0.50 | 0.63 | 0.97 |
|   | 0.60             | 0.18                            | 0.22 | 0.44 | 0.55 | 0.85 |
|   | 1.00             | 0.10                            | 0.13 | 0.25 | 0.31 | 0.49 |
|   | 2.00             | 0.05                            | 0.06 | 0.12 | 0.15 | 0.25 |
| 3.00  | 0.02             | 0.03                            | 0.07 | 0.09 | 0.15 |      |

**Tabla 5.23** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 4975 años en los distritos de Locumba e Ite. Fuente: (Elaboración propia).

| Distrito  | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|---|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|   |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| LOCUMBA<br>Latitud Sur :<br>17°36'50.4"<br>Longitud Oeste :<br>70°45'50.04" | 0.00             | 0.18                            | 0.21 | 0.40 | 0.49 | 0.74 |
|   | 0.05             | 0.24                            | 0.30 | 0.56 | 0.69 | 1.04 |
|   | 0.10             | 0.31                            | 0.39 | 0.73 | 0.91 | 1.37 |
|   | 0.15             | 0.33                            | 0.42 | 0.79 | 0.97 | 1.48 |
|   | 0.20             | 0.35                            | 0.44 | 0.85 | 1.04 | 1.59 |
|   | 0.25             | 0.33                            | 0.42 | 0.80 | 0.99 | 1.51 |
|   | 0.30             | 0.31                            | 0.39 | 0.75 | 0.94 | 1.43 |
|   | 0.35             | 0.30                            | 0.37 | 0.72 | 0.90 | 1.37 |
|   | 0.40             | 0.29                            | 0.35 | 0.69 | 0.85 | 1.30 |
|   | 0.45             | 0.28                            | 0.33 | 0.66 | 0.82 | 1.25 |
|   | 0.50             | 0.26                            | 0.32 | 0.64 | 0.78 | 1.20 |
|   | 0.60             | 0.22                            | 0.28 | 0.55 | 0.69 | 1.05 |
|   | 1.00             | 0.13                            | 0.16 | 0.31 | 0.39 | 0.61 |
|   | 2.00             | 0.06                            | 0.07 | 0.15 | 0.19 | 0.31 |
| 3.00  | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.11 | 0.18 |      |
| ITE<br>Latitud Sur :<br>17°55'32.88"<br>Longitud Oeste :<br>70°56'13.92"    | 0.00             | 0.20                            | 0.25 | 0.47 | 0.57 | 0.86 |
|   | 0.05             | 0.29                            | 0.35 | 0.66 | 0.80 | 1.20 |
|   | 0.10             | 0.37                            | 0.46 | 0.86 | 1.05 | 1.58 |
|   | 0.15             | 0.40                            | 0.48 | 0.93 | 1.13 | 1.70 |
|   | 0.20             | 0.42                            | 0.51 | 0.99 | 1.21 | 1.82 |
|   | 0.25             | 0.40                            | 0.48 | 0.94 | 1.14 | 1.73 |
|   | 0.30             | 0.36                            | 0.45 | 0.88 | 1.08 | 1.63 |
|   | 0.35             | 0.34                            | 0.43 | 0.84 | 1.03 | 1.56 |
|   | 0.40             | 0.32                            | 0.41 | 0.79 | 0.98 | 1.49 |
|   | 0.45             | 0.31                            | 0.39 | 0.76 | 0.95 | 1.44 |
|   | 0.50             | 0.30                            | 0.37 | 0.73 | 0.91 | 1.38 |
|   | 0.60             | 0.26                            | 0.32 | 0.64 | 0.79 | 1.20 |
|   | 1.00             | 0.14                            | 0.19 | 0.36 | 0.45 | 0.68 |
|   | 2.00             | 0.06                            | 0.08 | 0.17 | 0.22 | 0.35 |
| 3.00  | 0.03             | 0.04                            | 0.10 | 0.12 | 0.21 |      |

Las tablas 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 y 5.23 expresan los valores de las aceleraciones espectrales obtenidas en el Software Crisis 2015 Ver 4.1 para distintos periodos estructurales. (ver Anexo N° 1, Anexo N° 2 y Anexo N° 3). Calculados para cinco periodos de retorno (43, 72, 475, 975 y 4975 años) con 5% de amortiguamiento en los distritos de la región de Tacna.

La Figura 5.26, Figura 5.27 y Figura 5.28 muestran los resultados de la presente investigación. (ver Anexo N° 1, Anexo N° 2 y Anexo N° 3).

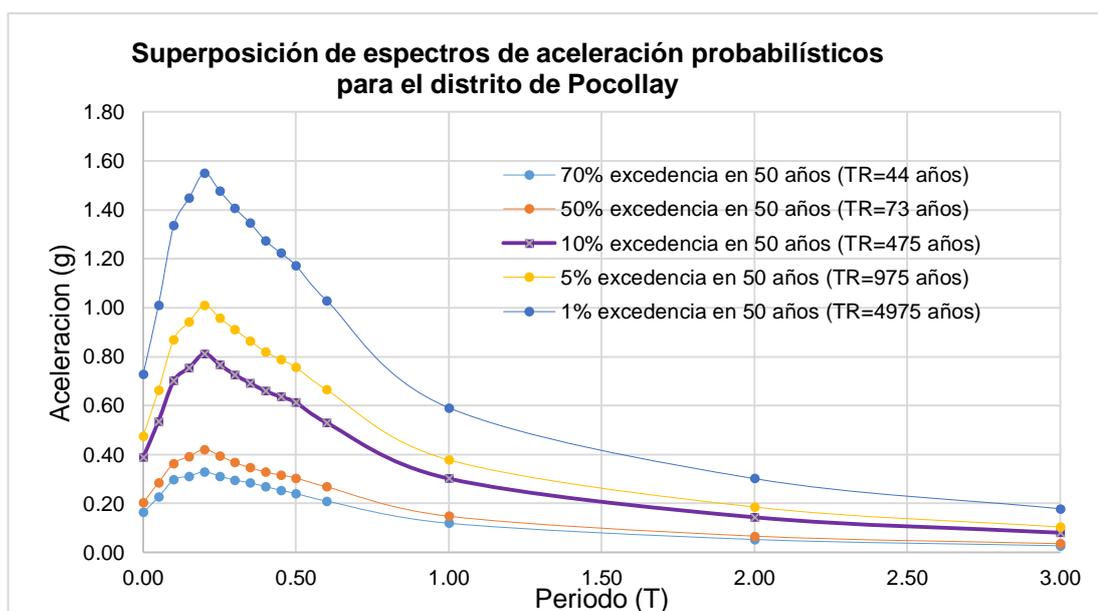
## CAPÍTULO VI

### DISCUSIÓN

#### 6.1. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se dan detalles sobre la comparación del espectro de peligro sísmico probabilístico para un distrito en específico de la región de Tacna. El distrito seleccionado para la obtención del espectro fue el distrito de Pocollay ubicado a  $17^{\circ} 50' 39.84''$  latitud sur y  $70^{\circ} 13' 6.6''$  longitud oeste (ver Figura 5.1), y perteneciente a la fuente sísmogénica 12 (F12) en donde prevalecen eventos sísmicos de intraplaca.

Los resultados del estudio de peligrosidad sísmica probabilística obtenido mediante el uso del software Crisis 2015 ver 4.1. (ver Figura 6.1) han servido para la comparación con las normativas E-0.30 y ASCE/SEI 7-10.



**Figura 6.1** Superposición de espectros probabilísticos para el distrito de Pocollay de acuerdo al peligro sísmico. Fuente: *(Elaboración propia)*.

En la Figura 6.1 se muestra la forma espectral de cinco aceleraciones de peligro sísmico para el distrito de Pocollay, donde cada ordenada espectral es obtenida de acuerdo a un periodo de excedencia (de 44, 73, 475, 975 y 4975 años) para un 5% de amortiguamiento con respecto al crítico, teniendo en cuenta la eventualidad de sismos moderados cercanos al sitio y sismos grandes alejados del sitio.

**Tabla 6.1** Determinación del peligro sísmico con un tiempo de retorno de 43, 72, 475, 975 y 9475 años en el distrito de Pocollay. Fuente: *(Elaboración propia)*.

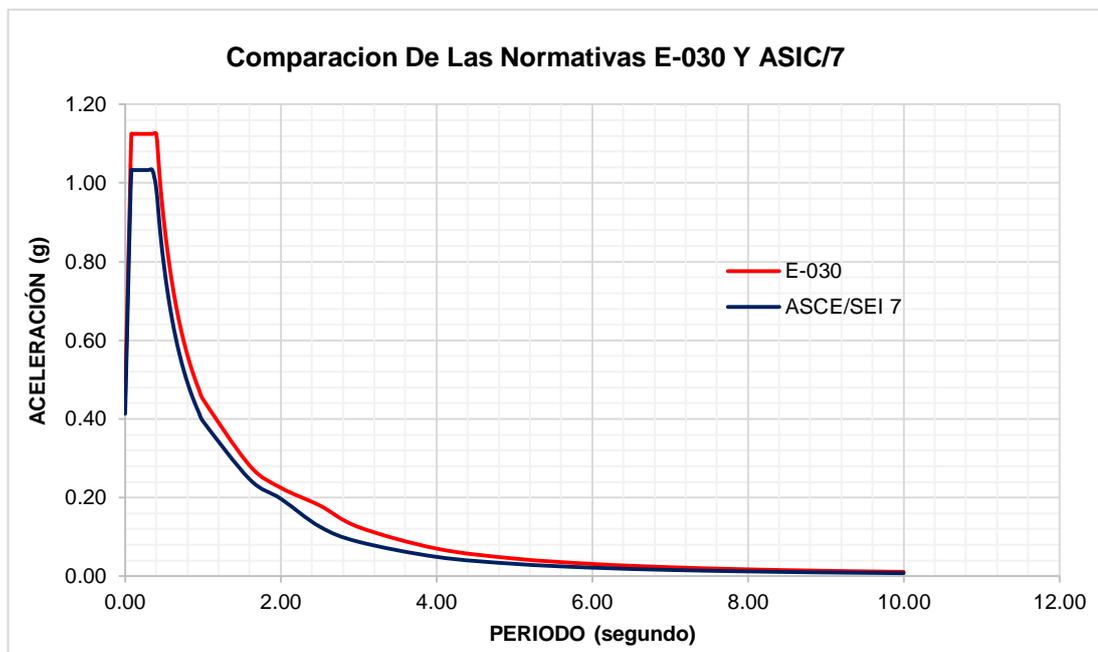
| Distrito   | Periodo<br>T (S) | 43                              | 72   | 475  | 975  | 4975 |
|--|------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
|  |                  | Aceleración Máxima Esperada (g) |      |      |      |      |
| POCOLLAY<br>Latitud Sur :<br>17°59'39.84"<br>Longitud<br>Oeste :<br>70°13'6.6" | 0.00             | 0.16                            | 0.20 | 0.39 | 0.48 | 0.73 |
|  | 0.05             | 0.23                            | 0.29 | 0.54 | 0.66 | 1.01 |
|  | 0.10             | 0.30                            | 0.36 | 0.70 | 0.87 | 1.34 |
|  | 0.15             | 0.31                            | 0.39 | 0.75 | 0.94 | 1.45 |
|  | 0.20             | 0.33                            | 0.42 | 0.81 | 1.01 | 1.55 |
|  | 0.25             | 0.31                            | 0.40 | 0.77 | 0.96 | 1.48 |
|  | 0.30             | 0.30                            | 0.37 | 0.73 | 0.91 | 1.41 |
|  | 0.35             | 0.28                            | 0.35 | 0.69 | 0.86 | 1.35 |
|  | 0.40             | 0.27                            | 0.33 | 0.66 | 0.82 | 1.27 |
|  | 0.45             | 0.25                            | 0.32 | 0.64 | 0.79 | 1.22 |
|  | 0.50             | 0.24                            | 0.30 | 0.61 | 0.76 | 1.17 |
|  | 0.60             | 0.21                            | 0.27 | 0.53 | 0.66 | 1.03 |
|  | 1.00             | 0.12                            | 0.15 | 0.30 | 0.38 | 0.59 |
|  | 2.00             | 0.05                            | 0.07 | 0.14 | 0.19 | 0.30 |
| 3.00   | 0.03             | 0.04                            | 0.08 | 0.10 | 0.18 |      |

En la Tabla 6.1 se aprecia los valores de las aceleraciones máximas esperadas de acuerdo a un periodo de excedencia (de 44, 73, 475, 975 y 4975 años) para el distrito de Pocollay. A partir de estos datos es que se realizará la comparación del peligro sísmico en ordenadas espectrales con el código sísmico peruano E-030 y la ASCE/SEI 7.

Para la evaluación espectral de la normativa peruana E-030 (Ministerio de Vivienda Construcción y saneamiento, 2018). Se usarán los siguientes parámetros sísmicos (ver Anexo N° 7):

- Z = 0.45 (Factor de zona).
- U = 1.00 (Factor del uso).
- S = 1.00 (Factor del suelo).
- R = 1.00 (Coeficiente de reducción)

Tal como se realizó en la en la sección anterior, para la norma peruana, los parámetros  $R$  e  $I_e$  del (ASCE/SEI 7, 2016) también se tomaron iguales a 1.0 con la finalidad de realizar comparaciones. (ver Anexo N° 8).

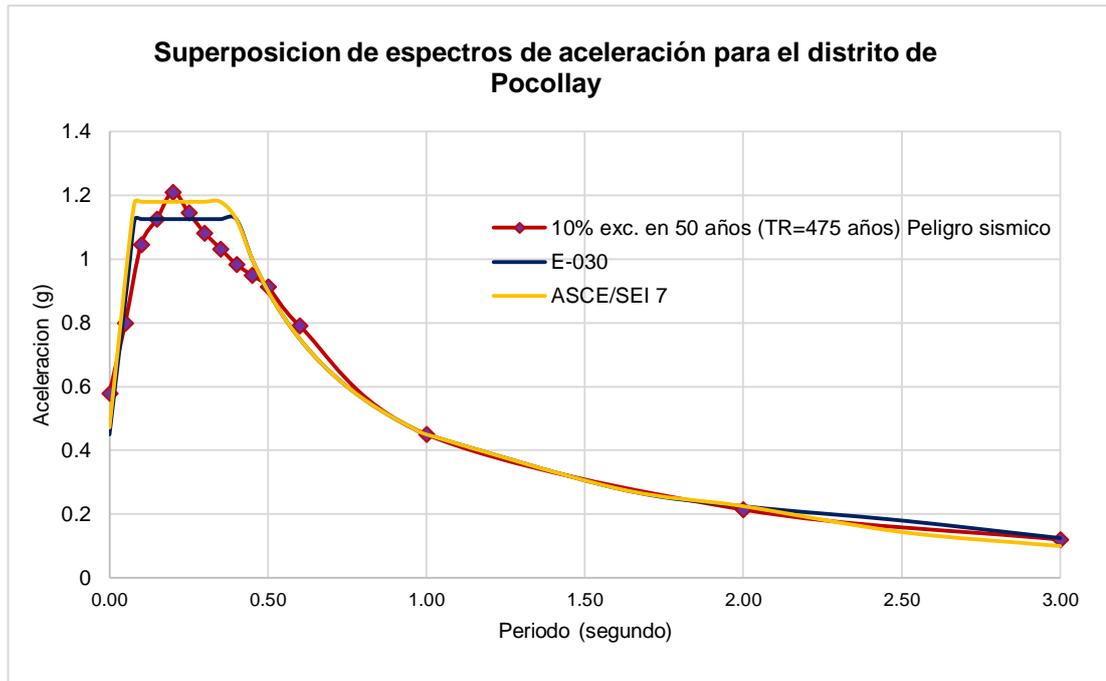


**Figura 6.2** Comparación de las normativas E-030 (2018) y ASCE/SEI 7 asumiendo la peligrosidad sísmica en los parámetros de aceleración del movimiento (para la ASCE/SEI 7). Fuente: (Elaboración propia).

La Figura 6.2 ostenta la comparación de dos espectros de diseño comprendidas entre las normativas E-030 y ASCE/SEI 7, en la que esta última utiliza factores de peligro sísmico para periodos de 0.2 y 1.0 segundos, con un tiempo de retorno de 475 años y un 5% de amortiguamiento con respecto al crítico obtenidos en la presente investigación.

Se puede apreciar que todos los valores del espectro del ASCE/SEI 7 caen por debajo del espectro que proporciona el código sísmico peruano E-030, (debido a que la aceleración pico del terreno obtenido en esta investigación, para el distrito de Pocollay es menor al normativo peruano). Siendo esta variación de los factores de amplificación dinámica (aceleración máxima del suelo) la principal causa para la utilización de espectros propios para cada región.

En la Figura 6.3 se puede apreciar la comparación del espectro calculado probabilísticamente de acuerdo al grado de peligro sísmico en la región de Tacna versus los espectros normativos E-030 y ASCE/SEI 7 (ver Anexo N° 9 y Anexo N° 10). Cada uno de ellos escalados adecuadamente para un periodo estructural de 1.0 segundo, que demuestra el gran parecido de la forma espectral (validando de esta forma la investigación realizada), a diferencia de la pendiente ascendente para periodos menores a 0.1 segundos.



**Figura 6.3** Superposición de espectros de aceleración sísmica para el distrito de Pocollay (escalado). Fuente: *(Elaboración propia)*.

## CONCLUSIONES

- a) Del trabajo de investigación se concluye que; se cumplió con el objetivo principal de evaluar espectros determinísticos y probabilísticos según el peligro sísmico en estructuras de la región de Tacna. Esto se pudo realizar mediante el uso de leyes de atenuación y evaluando cinco de las veintinueve fuentes sismogénicas de interface, interplaca y superficiales propuestas por (SENCICO, 2016).
- b) La peligrosidad sísmica en la región de Tacna se pudo establecer mediante a la información sísmica instrumental brindado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), evaluando 4442 sismos, desde el 01 de enero de 1965 hasta el 22 de mayo del 2018.
- c) La determinación de espectros determinísticos permitió evaluar la ley de atenuación propuesta por (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997), estableciendo que, cuando se varía la distancia entre el epicentro y la zona de estudio, esta genera una mayor variación en los valores de las aceleraciones espectrales. Por otra parte, la determinación de espectros probabilísticos se pudo establecer mediante uso del software Crisis 2015 Ver 4.1. El cual ha permitido evaluar las leyes de atenuación propuestas por (Youngs, Chiou, Silva, & Humphrey, 1997) y (Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, & Youngs , 1997) para el cálculo de las aceleraciones espectrales. Esto se puede apreciar en el Anexo N° 1, Anexo N° 2 y Anexo N° 3.
- d) No es factible justificar la demanda sísmica mediante franjas de colores, como lo establece el código sísmico peruano E-0.30, debido a que en esta metodología no incluyen formas específicas para cada lugar (como el que se propone en esta investigación para la región de Tacna), esto se debe a que todos los espectros de diseño se basan en escalar una forma espectral estándar inicial (mediante el uso factor de zona "Z"), por lo que es necesario cambiar esta metodología y considerar formas espectrales basados en múltiples periodos.

## RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda estudiar la incorporación en el código sísmico peruano E-030 mapas de ordenadas espectrales como los obtenidos en este trabajo e instaurar mapas de isoaceleraciones espectrales multiperiodos para cada departamento. Esto hará posible tener formas espectrales propias de cada región asociadas a la misma probabilidad de excedencia, considerando factores de peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico. Como lo hace la (ASCE/SEI 7, 2016).
  
- b) Es recomendable aumentar la cantidad de estaciones sísmicas en todo el país, para que de este modo las investigaciones futuras puedan actualizar las leyes de atenuación existentes que tienen más de 21 años de antigüedad, así también como otros parámetros sísmicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASCE/SEI 7. (2016). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Bolaños Luna, A. M., & Monrroy Concha, O. M. (2004). *Espectros de peligro sísmico*. Lima.
- Bolt, B. A. (2005). *Earthquakes*. New York: Journal of Seismology.
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1956). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Herraíz Sarachaga, M. (1997). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros*. Lima: CISMID.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey.
- Ministerio de Vivienda Construcción y saneamiento. (2018). *Norma Técnica E.030 "Diseño Sísmoresistente"*. Lima.
- Muñoz, D. (1989). *Física de la tierra*. Madrid: Univ.
- Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, U. (1980). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Geneva.
- Ortiz Salas, C. E. (2011). *Determinación del Peligro Sísmico de la Región de Tacna*. Tacna.
- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la lengua española*. Madrid.
- Sadigh, K., Chang, Y., Egan, J. A., Makdisi, F., & Youngs, R. (1997). *Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data*. California.
- SENCICO. (2016). *Actualización del programa de cómputo orientado a la determinación del peligro sísmico del país*. Lima.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Educación S. A.
- Tavera Huarache, H. J., & Buforn Peiró, V. M. (1998). *Sismicidad y sismotectónica de Perú*. Madrid.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). *Re-Evaluación Del Peligro Sísmico Probabilístico*. Lima.
- Toledo Espinoza, V. (2016). *Peligrosidad Sísmica – Evaluación Determinística y Probabilística*. Lima: Comunidad para la Ingeniería Civil.
- Uniform Building Code*. (1997).

Youngs, R. R., Chiou, S. J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. (1997). *Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes*. Seismological Research Letters.

**ANEXOS**

**Anexo N° 1** Mapa de Isoaceleraciones en la región de Tacna con un periodo estructural  $T=0$  segundos y un tiempo de retorno de 475 años. Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Anexo N° 2** Mapa de Isoaceleraciones en la región de Tacna con un periodo estructural  $T=0.2$  segundos y un tiempo de retorno de 4975 años. Fuente:  
*(Elaboración propia).*



**Anexo N° 3** Mapa de Isoaceleraciones en la región de Tacna con un periodo estructural  $T=1.0$  segundo y un tiempo de retorno de 4975 años. Fuente:  
*(Elaboración propia).*



**Anexo N° 4** Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018  
(Fuentes de interface). Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Anexo N° 5** Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018  
(Fuentes de Interplaca). Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Anexo N° 6** Mapa de eventos sísmicos para el área de estudio desde 1965 al 2018  
(Fuentes superficiales). Fuente: *(Elaboración propia)*.



**Anexo N° 7** Espectro normativo según la E-030 (sin el sistema estructural). Fuente:  
*(Elaboración propia).*

**ESPECTRO NORMATIVO SEGÚN E.030-2018**

**TESIS:** "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA"

**FECHA:** 21/10/2018

Región : Tacna

Provincia : Tacna

Distrito : Pocollay

Zona : Zona 4

Categoría: "C" Edificaciones Comunes

Suelo: S1

Sis. Estructural: -

$T_p$ : 0.40

$T_l$ : 2.50

$R_o$ : 1

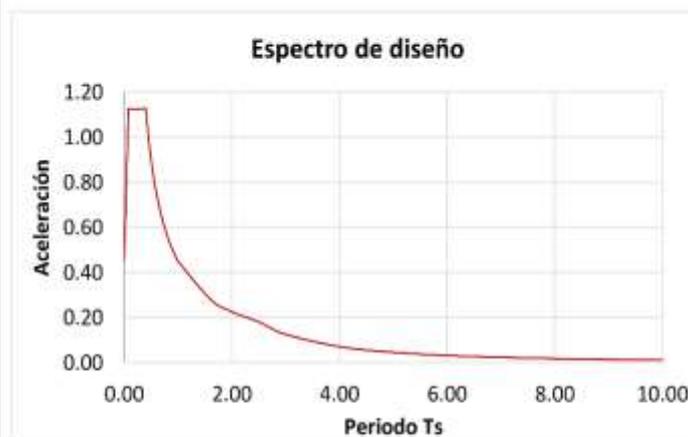
Verificación de  $\rightarrow$   $l_p = 1.0$

Irregularidad:  $\rightarrow$   $l_a = 1.0$



$$\begin{aligned}
 Z: & 0.450 \\
 U: & 1.000 \quad T < T_p \quad C = 2.5 \\
 S: & 1.000 \quad T_p < T < T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p}{T}\right) \\
 R: & 1.000 \\
 T_p: & 0.400 \quad T > T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2}\right) \\
 T_l: & 2.500 \\
 R: & 1.000 \quad \frac{S_a}{g} = \frac{ZUCS}{R}
 \end{aligned}$$

| T     | C    | Sa/g    |
|-------|------|---------|
| 0.00  | 1.00 | 0.45000 |
| 0.02  | 1.38 | 0.61875 |
| 0.04  | 1.75 | 0.78750 |
| 0.06  | 2.13 | 0.95625 |
| 0.08  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.10  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.12  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.14  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.16  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.18  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.20  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.25  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.30  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.35  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.40  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.45  | 2.22 | 1.00000 |
| 0.50  | 2.00 | 0.90000 |
| 0.55  | 1.82 | 0.81818 |
| 0.60  | 1.67 | 0.75000 |
| 0.65  | 1.54 | 0.69231 |
| 0.70  | 1.43 | 0.64286 |
| 0.75  | 1.33 | 0.60000 |
| 0.80  | 1.25 | 0.56250 |
| 0.85  | 1.18 | 0.52941 |
| 0.90  | 1.11 | 0.50000 |
| 0.95  | 1.05 | 0.47368 |
| 1.00  | 1.00 | 0.45000 |
| 1.60  | 0.63 | 0.28125 |
| 2.00  | 0.50 | 0.22500 |
| 2.50  | 0.40 | 0.18000 |
| 3.00  | 0.28 | 0.12500 |
| 4.00  | 0.16 | 0.07031 |
| 5.00  | 0.10 | 0.04500 |
| 6.00  | 0.07 | 0.03125 |
| 7.00  | 0.05 | 0.02296 |
| 8.00  | 0.04 | 0.01758 |
| 9.00  | 0.03 | 0.01389 |
| 10.00 | 0.03 | 0.01125 |



**Anexo N° 8** Espectro normativo según la ASCE/SEI 7. Fuente: *(Elaboración propia)*.

**ESPECTRO NORMATIVO SEGUN LA MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER  
STRUCTURES, ASCE/SEI 7 - 2016**

TESIS: "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA"

FECHA: 02/07/2018

Región : Tacna  
Provincia : Tacna  
Distrito : Pocolay

**Parámetros de Aceleración para el Movimiento MCE**

Periodos cortos  $S_3 = 1.55$   
Periodos largos  $S_1 = 0.59$

**Ajuste por la Clase de Sitio C**

$F_a = 1.000$   
 $F_v = 1.000$

Periodos cortos  $S_{M3} = S_3 \times F_a = 1.55 \text{ g}$   
Periodos largos  $S_{M1} = S_1 \times F_v = 0.59 \text{ g}$

**Reduciendo al nivel de diseño**

Periodos cortos  $S_{D3} = S_{M3} \times 2/3 = 1.03 \text{ g}$   
Periodos largos  $S_{D1} = S_{M1} \times 2/3 = 0.39 \text{ g}$

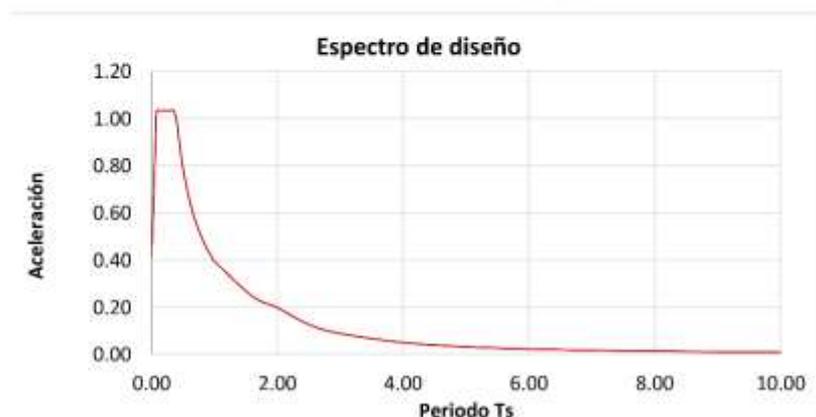
**Periodo de Transición TS**

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{D3}} = 0.38$$

**Datos para Espectro Inelástico**

$T_0 = T_S \times 0.2 = 0.08$   
 $T_L = 2.00$   
 $R = 1.00$   
 $I_e = 1.00$

| T     | Sa elás. |
|-------|----------|
| 0.00  | 0.4132   |
| 0.02  | 0.5756   |
| 0.04  | 0.7380   |
| 0.06  | 0.9005   |
| 0.08  | 1.0330   |
| 0.10  | 1.0330   |
| 0.12  | 1.0330   |
| 0.14  | 1.0330   |
| 0.16  | 1.0330   |
| 0.18  | 1.0330   |
| 0.20  | 1.0330   |
| 0.25  | 1.0330   |
| 0.30  | 1.0330   |
| 0.35  | 1.0330   |
| 0.40  | 0.9854   |
| 0.45  | 0.8759   |
| 0.50  | 0.7883   |
| 0.55  | 0.7166   |
| 0.60  | 0.6569   |
| 0.65  | 0.6064   |
| 0.70  | 0.5631   |
| 0.75  | 0.5255   |
| 0.80  | 0.4927   |
| 0.85  | 0.4637   |
| 0.90  | 0.4380   |
| 0.95  | 0.4149   |
| 1.00  | 0.3942   |
| 1.60  | 0.2463   |
| 2.00  | 0.1971   |
| 2.50  | 0.1261   |
| 3.00  | 0.0876   |
| 4.00  | 0.0493   |
| 5.00  | 0.0315   |
| 6.00  | 0.0219   |
| 7.00  | 0.0161   |
| 8.00  | 0.0123   |
| 9.00  | 0.0097   |
| 10.00 | 0.0079   |



**Anexo N° 9** Espectro normativo según la E-030 (escalado). Fuente: *(Elaboración propia)*.

**ESPECTRO NORMATIVO SEGÚN E.030-2018**

**TESIS:** "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA"

**FECHA:** 21/10/2018

Región : Tacna

Provincia : Tacna

Distrito : Pocollay

Zona : Zona 4

Categoría: "C" Edificaciones Comunes

Suelo: S1

Sis. Estructural: -

$T_p$ : 0.40

$T_l$ : 2.50

$R_o$ : 1

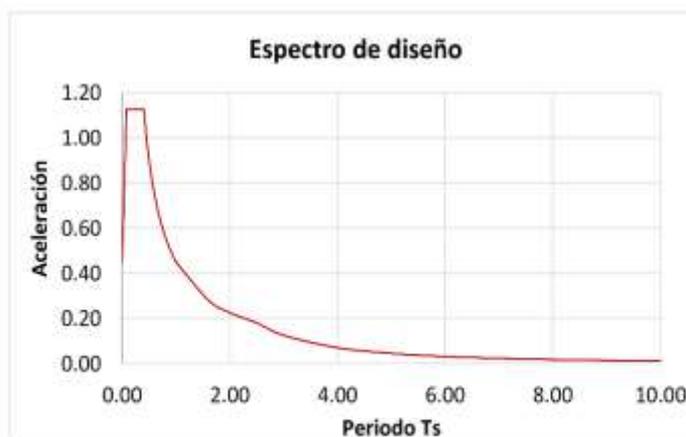
Verificación de  $\rightarrow I_p = 1.0$

Irregularidad:  $\rightarrow I_a = 1.0$



$$\begin{aligned}
 Z: & 0.450 \\
 U: & 1.000 \quad T < T_p \quad C = 2.5 \\
 S: & 1.000 \quad T_p < T < T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p}{T}\right) \\
 R: & 1.000 \\
 T_p: & 0.400 \quad T > T_L \quad C = 2.5 \cdot \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2}\right) \\
 T_l: & 2.500 \\
 R: & 1.000 \quad \frac{S_a}{g} = \frac{ZUCS}{R}
 \end{aligned}$$

| T     | C    | Sa/g    |
|-------|------|---------|
| 0.00  | 1.00 | 0.45000 |
| 0.02  | 1.38 | 0.61875 |
| 0.04  | 1.75 | 0.78750 |
| 0.06  | 2.13 | 0.95625 |
| 0.08  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.10  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.12  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.14  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.16  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.18  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.20  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.25  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.30  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.35  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.40  | 2.50 | 1.12500 |
| 0.45  | 2.22 | 1.00000 |
| 0.50  | 2.00 | 0.90000 |
| 0.55  | 1.82 | 0.81818 |
| 0.60  | 1.67 | 0.75000 |
| 0.65  | 1.54 | 0.69231 |
| 0.70  | 1.43 | 0.64286 |
| 0.75  | 1.33 | 0.60000 |
| 0.80  | 1.25 | 0.56250 |
| 0.85  | 1.18 | 0.52941 |
| 0.90  | 1.11 | 0.50000 |
| 0.95  | 1.05 | 0.47368 |
| 1.00  | 1.00 | 0.45000 |
| 1.60  | 0.63 | 0.28125 |
| 2.00  | 0.50 | 0.22500 |
| 2.50  | 0.40 | 0.18000 |
| 3.00  | 0.28 | 0.12500 |
| 4.00  | 0.16 | 0.07031 |
| 5.00  | 0.10 | 0.04500 |
| 6.00  | 0.07 | 0.03125 |
| 7.00  | 0.05 | 0.02296 |
| 8.00  | 0.04 | 0.01758 |
| 9.00  | 0.03 | 0.01389 |
| 10.00 | 0.03 | 0.01125 |



**Anexo N° 10** Espectro normativo según la ASCE/SEI 7 (escalado). Fuente:  
*(Elaboración propia).*

**ESPECTRO NORMATIVO SEGÚN LA MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER  
STRUCTURES, ASCE/SEI 7 - 2016**

TESIS: "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO  
SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA"

FECHA: 21/10/2018

Región : Tacna  
Provincia : Tacna  
Distrito : Pacollay

**Parámetros de Aceleración para el Movimiento MCE**

Periodos cortos  $S_s = 1.55$   
Periodos largos  $S_1 = 0.59$

**Ajuste por la Clase de Sitio C**

$F_a = 0.800$   
 $F_v = 0.800$

Periodos cortos  $S_{MS} = S_s \times F_a = 1.24 \text{ g}$   
Periodos largos  $S_{M1} = S_1 \times F_v = 0.47 \text{ g}$

**Reduciendo al nivel de diseño**

Periodos cortos  $S_{DS} = S_{MS} \times 2/3 = 0.83 \text{ g}$   
Periodos largos  $S_{D1} = S_{M1} \times 2/3 = 0.32 \text{ g}$

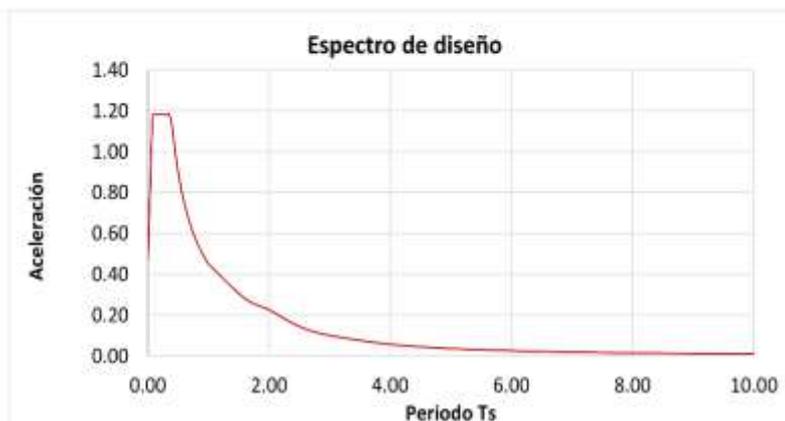
**Periodo de Transición  $T_S$**

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0.38$$

**Datos para Espectro Inelástico**

$T_0 = T_S \times 0.2 = 0.08$   
 $T_L = 2.00$   
 $R = 1.00$   
 $I_e = 1.00$

| T     | Sa elás. |
|-------|----------|
| 0.00  | 0.4717   |
| 0.02  | 0.6572   |
| 0.04  | 0.8426   |
| 0.06  | 1.0280   |
| 0.08  | 1.1793   |
| 0.10  | 1.1793   |
| 0.12  | 1.1793   |
| 0.14  | 1.1793   |
| 0.16  | 1.1793   |
| 0.18  | 1.1793   |
| 0.20  | 1.1793   |
| 0.25  | 1.1793   |
| 0.30  | 1.1793   |
| 0.35  | 1.1793   |
| 0.40  | 1.1250   |
| 0.45  | 1.0000   |
| 0.50  | 0.9000   |
| 0.55  | 0.8182   |
| 0.60  | 0.7500   |
| 0.65  | 0.6923   |
| 0.70  | 0.6429   |
| 0.75  | 0.6000   |
| 0.80  | 0.5625   |
| 0.85  | 0.5294   |
| 0.90  | 0.5000   |
| 0.95  | 0.4737   |
| 1.00  | 0.4500   |
| 1.60  | 0.2813   |
| 2.00  | 0.2250   |
| 2.50  | 0.1440   |
| 3.00  | 0.1000   |
| 4.00  | 0.0563   |
| 5.00  | 0.0360   |
| 6.00  | 0.0250   |
| 7.00  | 0.0184   |
| 8.00  | 0.0141   |
| 9.00  | 0.0111   |
| 10.00 | 0.0090   |



**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

| MATRIZ DE CONSISTENCIA   |  |   |  |           |   |
|--|--|---|--|-----------|---|
| <b>Título:</b>   |  | "INFLUENCIA DE ESPECTROS DETERMINÍSTICOS Y PROBABILÍSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO EN ESTRUCTURAS DE LA REGIÓN DE TACNA" |  |           |   |
| <b>Autor:</b>  |  | Ever Rudy Ancco Huanacuni   |  |           |   |
| Problemas  |  | Objetivos   | Hipótesis  | Variables |   |
| Problema Principal   |  | Objetivo General  | Hipótesis Principal  | V.I.      | V.D.  |
| ¿Cómo determinar los espectros determinísticos y probabilísticos para la evaluación de la peligrosidad sísmica en estructuras de la región de Tacna? |  | Determinar espectros determinísticos y probabilísticos para la evaluación del peligro sísmico en estructuras de la región de Tacna.     | Es necesario determinar espectros determinísticos y probabilísticos para la evaluación del peligro sísmico en estructuras de la región de Tacna debido a que los ingenieros civiles podrán realizar un análisis sísmico en estructuras, con información propia de la zona. | VD-P:     | Eventos sísmicos registrados en el área de estudio.<br><br>Peligro sísmico en el área de estudio.   |
| Problemas Secundarios  |  | Objetivos Específicos   | Hipótesis Secundarias  | V.I.      | V.D.  |
| 1 ¿Cómo se establece la peligrosidad sísmica en la región de Tacna?  |  | 1 Establecer la peligrosidad sísmica en la región de Tacna.   | 1 Establecer la peligrosidad sísmica, permitirá identificar focos de peligro sísmico, que necesiten una asistencia en particular para el análisis y diseño de estructuras en la región de Tacna.   | VD-1:     | Eventos sísmicos registrados en la región de Tacna.<br><br>Peligro sísmico en la región de Tacna.   |
| 2 ¿Por qué es necesario determinar espectros determinísticos y probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica para la región de Tacna?  |  | 2 Determinar espectros determinísticos y probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica para la región de Tacna.           | 2 Determinar espectros determinísticos y probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica para la región de Tacna generará solicitudes propias de la zona para el análisis de estructuras.  | VD-2:     | Cálculo de espectros determinísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica.<br><br>Análisis determinístico de eventos sísmicos en la región de Tacna. |
| 3 ¿Cuándo se justifica la peligrosidad sísmica para el análisis de estructuras en la región de Tacna?  |  | 3 Justificar la peligrosidad sísmica para el análisis de estructuras en la región de Tacna.   | 3 Para justificar la peligrosidad sísmica en el análisis de estructuras en la región de Tacna será necesario evaluar las normativas que  | VD-3:     | Cálculo de espectros probabilísticos de acuerdo al grado de peligrosidad sísmica.<br><br>Análisis probabilístico de eventos sísmicos en la región de Tacna. |

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
|  | validen este tipo de investigación y esto<br>constituirá un análisis sísmico no convencional. |  |  |
|--|---|--|--|