

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil**



## **COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA EDIFICACIÓN UTILIZANDO ESPECTROS DE DISEÑO PROBABILÍSTICOS Y ESPECTROS DE LA NORMATIVA VIGENTE PARA LA CIUDAD DE CAJAMARCA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:  
BACH. MARIO DANIEL SALAS MENDOZA**

**ASESOR:  
DR. ING. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO**

**CAJAMARCA – PERÚ  
2021**

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios por todo lo que me ha dado en la vida.*

*Al Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno por su orientación y apoyo en el inicio, desarrollo y culminación de la presente investigación.*

*Al Dr (c). Ing. Arnold Ramsey Mendo Rodríguez por su apoyo incondicional, sus sugerencias y opiniones durante el desarrollo de la presente investigación.*

## **DEDICATORIA**

*A mi madre Olga Mendoza Vargas por todo el apoyo y cariño que siempre me ha brindado.*

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. ....	3
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN. ....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN. ....	3
1.6. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN. ....	4
1.7. OBJETIVOS.....	4
1.7.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.8. CONTENIDO.....	4
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN. ....	6
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	6
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES.....	7
2.2. BASES TEÓRICAS.....	8
2.2.1. PLACAS TECTÓNICAS. ....	8
2.2.2. SISMOS. ....	9
2.2.3. MEDIDAS DE SISMOS.....	10
2.2.3.1. Magnitud.....	10
2.2.3.2. Intensidad.....	11
2.2.4. SISMICIDAD EN EL PERÚ.....	13
2.2.5. PELIGROSIDAD SÍSMICA. ....	15
2.2.6. FUENTES SIMOGÉNICAS O SISMOGENÉTICAS. ....	15
2.2.6.1. Estudios en base a fuentes sismogénicas o sismogenéticas.....	16
2.2.7. ESTUDIO DE FUENTES SIMOGÉNICAS DE SENCICO.....	16

2.2.7.1.	Sismicidad histórica.....	17
2.2.7.2.	Catálogo sísmico.....	17
2.2.7.3.	Fuentes sismogénicas. ....	17
2.2.7.4.	Recurrencia sísmica.....	26
2.2.8.	LEY DE ATENUACIÓN. ....	27
2.2.8.1.	Definición.....	27
2.2.8.2.	Leyes de atenuación en estudio. ....	27
2.2.9.	EFFECTOS DE SITIO.....	34
2.2.10.	CLASIFICACIÓN DE SITIO.....	36
2.2.10.1.	Clasificación de sitio según el ASCE/SEI 7-10, ASCE/SEI 7-16, ATC 40, IBC y NEHRP.....	36
2.2.10.2.	Clasificación de sitio según el Eurocódigo 8.....	37
2.2.10.3.	Clasificación de sitio según código chino GB50011-2010. ....	38
2.2.11.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN. ....	39
2.2.12.	CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE A 30 M Y VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE A OTRAS PROFUNDIDADES. ....	43
2.2.13.	VELOCIDAD PROMEDIO DE ONDAS DE CORTE.....	45
2.2.14.	ESPECTROS DE RESPUESTA.....	45
2.2.14.1.	Factores que influyen en el espectro de respuesta.....	45
2.2.15.	ESPECTRO DE DISEÑO.....	47
2.2.15.1.	Influencia de la clase de sitio en el espectro de diseño. ....	48
2.2.16.	ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME. ....	49
2.2.17.	ENSAYOS MASW.....	50
2.2.18.	TEORÍA DE PROBABILIDAD.....	50
2.2.19.	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO.....	50
2.2.20.	FUNCIONES DE PROBABILIDAD.....	51
2.2.20.1.	Función de densidad probabilidad Log-normal.....	51
2.2.20.2.	Función de probabilidad acumulada Log-normal.....	52
2.2.21.	INCERTIDUMBRE.....	53
2.2.21.1.	Incertidumbre epistémica. ....	54
2.2.21.2.	Incertidumbre aleatoria.....	54
2.2.22.	CUANTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRE. ....	55
2.2.22.1.	Método del Árbol Lógico. ....	55
2.2.23.	PROGRAMA CRISIS. ....	58
2.2.24.	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES QUE AFECTAN LA RESPUESTA SÍSMICA.....	60

2.2.24.1.	Periodo Fundamental de vibración.....	60
2.2.24.2.	Amortiguamiento.....	61
2.2.25.	PERÍODO DE RETORNO.....	61
2.2.26.	ESPECTROS DE ESTUDIO.....	62
2.2.26.1.	Espectro de diseño según la norma peruana E.030. ....	62
2.2.26.2.	Espectro según el Instituto Geofísico del Perú (IGP).....	65
2.2.26.3.	Espectro según SENCICO.....	69
2.2.27.	ANÁLISIS SÍSMICO.....	70
2.2.27.1.	Métodos dinámicos.....	71
2.2.28.	RESPUESTA ESTRUCTURAL.....	72
2.2.29.	DISTORSIÓN DE ENTREPISO O DERIVA.....	73
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	73
<b>CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>		<b>76</b>
3.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	76
3.2.	ÉPOCA DE INVESTIGACIÓN.....	76
3.3.	PROCEDIMIENTO.....	76
3.3.1.	TIPO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA.....	76
3.3.2.	FUENTES SISMOGÉNICAS.....	76
3.3.3.	LEYES DE ATENUACIÓN.....	76
3.3.4.	ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME PROBABILÍSTICOS.....	77
3.3.4.1.	Método del árbol lógico.....	77
3.3.4.2.	Generación de espectros de peligro uniforme mediante el software CRISIS. .....	94
3.3.4.3.	Espectro de peligro uniforme promedio.....	95
3.3.5.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.....	96
3.3.5.1.	Ensayos MASW.....	96
3.3.5.2.	Correlación de velocidad de onda de corte a 30 m y velocidad de onda de corte a otras profundidades.....	97
3.3.5.3.	Comparación de modelos matemáticos.....	98
3.3.5.4.	Velocidad promedio de onda de corte.....	99
3.3.5.5.	Factores de amplificación.....	99
3.3.5.6.	Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal para la velocidad promedio de onda de corte y los factores de amplificación.....	99
3.3.6.	ESPECTRO DE DISEÑO.....	99
3.3.7.	EDIFICACIÓN OBJETIVO EN EL ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL.....	100

3.3.7.1.	Ubicación.....	100
3.3.7.2.	Descripción.....	101
3.3.7.3.	Propiedades de los materiales.....	102
3.3.7.4.	Parámetros sísmicos. ....	102
3.3.8.	RESPUESTA ESTRUCTURAL .....	103
3.3.8.1.	Análisis dinámico modal espectral.....	103
3.4.	TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	106
3.4.1.	TRATAMIENTO DE DATOS.....	106
3.4.1.1.	Población y muestra de estudio.....	106
3.4.2.	ANÁLISIS DE DATOS.....	106
3.4.2.1.	Tipo de investigación.....	106
3.4.2.2.	Tipo de análisis.....	107
3.4.2.3.	Recolección de datos. ....	107
3.4.2.4.	Procesamiento de datos. ....	107
3.4.3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	107
3.4.3.1.	Espectros de peligro uniforme probabilísticos. ....	107
3.4.3.2.	Espectro de peligro uniforme promedio.....	110
3.4.3.3.	Comparación de espectros de peligro uniforme.....	113
3.4.3.4.	Factores de amplificación.....	114
3.4.3.5.	Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal promedio para los factores de amplificación.....	119
3.4.3.6.	Espectros de diseño. ....	122
3.4.3.7.	Respuesta estructural.....	123
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>		<b>132</b>
4.1.	COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE A PROFUNDIDADES DE 30 m.....	132
4.2.	PERFIL DE SUELO.....	133
4.3.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.....	133
4.3.1.	FACTOR DE AMPLIFICACIÓN PARA PERIODOS CORTOS (Fa).....	133
4.3.2.	FACTOR DE AMPLIFICACIÓN PARA PERIODOS LARGOS (Fv).....	133
4.4.	ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME.....	134
4.5.	ESPECTROS DE DISEÑO.....	135
4.6.	RESPUESTA ESTRUCTURAL.....	136
4.6.1.	Desplazamientos.....	136

4.6.2.	Derivas. ....	136
4.6.3.	Cortantes en la base. ....	137
4.6.4.	Cortantes máximos en columnas. ....	137
4.6.5.	Momentos máximos en vigas.....	138
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>139</b>
5.1.	CONCLUSIONES. ....	139
5.2.	RECOMENDACIONES. ....	139
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>141</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>147</b>
	ANEXO N° 01: ENSAYOS MASW.....	147
	ANEXO N° 02: ECUACIONES POTENCIALES DE CORRELACIÓN PARA ENSAYOS MASW. ....	155
	ANEXO N° 03: VELOCIDAD PROMEDIO DE ONDAS DE CORTE A PROFUNDIDAD DE 30 m. ....	162



# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 1</b> Escala de Intensidades de Mercalli Modificada, versión 1956.....	12
<b>Tabla N° 2</b> Coordenadas geográficas de fuentes de subducción interface.....	18
<b>Tabla N° 3</b> Coordenadas geográficas de fuentes de subducción intraplaca.....	19
<b>Tabla N° 4</b> Coordenadas geográficas de fuentes continentales.....	21
<b>Tabla N° 5</b> Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas .....	26
<b>Tabla N° 6</b> Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca.....	28
<b>Tabla N° 7</b> Coeficientes de atenuación de aceleración espectral en roca para eventos de interfase.....	29
<b>Tabla N° 8</b> Coeficientes de atenuación de aceleración espectral en roca para eventos de intraplaca.....	30
<b>Tabla N° 9</b> Coeficientes de atenuación para la aceleración espectral a nivel de roca.....	31
<b>Tabla N° 10</b> Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca ( $M \leq 6.5$ ) .....	33
<b>Tabla N° 11</b> Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca ( $M > 6.5$ ) .....	33
<b>Tabla N° 12</b> Clasificación de sitio acorde a normas americanas .....	36
<b>Tabla N° 13</b> Clasificación de sitio acorde al Eurocódigo 8 .....	37
<b>Tabla N° 14</b> Clasificación de sitio acorde al código chino GB50011-2010 .....	38
<b>Tabla N° 15</b> Factor de Sitio, $F_a$ , para rango de periodo corto en el espectro de aceleración..	41
<b>Tabla N° 16</b> Factores de Sitio, $F_v$ , para rango de periodo largo en el espectro de aceleración .....	41
<b>Tabla N° 17</b> Factor de Sitio, $F_a$ , para rango de periodo corto en el espectro de aceleración..	42
<b>Tabla N° 18</b> Factores de Sitio, $F_v$ , para rango de periodo largo en el espectro de aceleración .....	42
<b>Tabla N° 19</b> Coeficientes de ecuación que relaciona $\log V_{S30}$ y $\log V_{Sz}$ en KIK-Net Data.....	43
<b>Tabla N° 20</b> Uso típico de funciones de probabilidad exponencial, log-normal y normal .....	51
<b>Tabla N° 21</b> Periodos de retorno para diferentes sismos de análisis establecidos por el COMITÉ VISION 2000.....	61
<b>Tabla N° 22</b> Factores de zona “Z” .....	62
<b>Tabla N° 23</b> Clasificación de los perfiles de suelo.....	63
<b>Tabla N° 24</b> Factor de suelo “S” .....	63
<b>Tabla N° 25</b> Periodos “ $T_P$ ” y “ $T_L$ ” .....	63
<b>Tabla N° 26</b> Valores de máximas aceleraciones esperadas (PGA) para las capitales de departamento del Perú.....	66

<b>Tabla N° 27</b> Aceleraciones máximas PGA para diferentes periodos de retorno en la ciudad de Cajamarca según el IGP.....	67
<b>Tabla N° 28</b> Límites para la distorsión de entrepiso .....	73
<b>Tabla N° 29</b> Combinaciones estimadas para la fase 1 en la generación del árbol lógico .....	79
<b>Tabla N° 30</b> Combinaciones estimadas para la fase 2 en la generación del árbol lógico .....	79
<b>Tabla N° 31</b> Combinaciones estimadas para la fase 3 en la generación del árbol lógico .....	80
<b>Tabla N° 32</b> Combinaciones estimadas para la fase 4 en la generación del árbol lógico .....	83
<b>Tabla N° 33</b> Combinaciones estimadas para la fase 5 en la generación del árbol lógico .....	85
<b>Tabla N° 34</b> Combinaciones estimadas para la fase 6 en la generación del árbol lógico .....	87
<b>Tabla N° 35</b> Combinaciones estimadas para la fase 7 en la generación del árbol lógico .....	89
<b>Tabla N° 36</b> Combinaciones estimadas para la fase 8 en la generación del árbol lógico .....	91
<b>Tabla N° 37</b> Parámetros sísmicos.....	102
<b>Tabla N° 38</b> Participación de masa efectiva.....	104
<b>Tabla N° 39</b> Verificación de la fuerza cortante mínima para el espectro de diseño .....	104
<b>Tabla N° 40</b> Tipo de investigación.....	106
<b>Tabla N° 41</b> Ordenadas espectrales del Espectro de Peligro Uniforme considerando fuentes de subducción para un periodo de retorno de 475 años .....	111
<b>Tabla N° 42</b> Ordenadas espectrales del Espectro de Peligro Uniforme considerando fuentes de subducción y continentales para un periodo de retorno de 475 años .....	112
<b>Tabla N° 43</b> Velocidad promedio de onda de corte para cada ensayo MASW .....	115
<b>Tabla N° 44</b> Factores de amplificación para el primer modelo matemático.....	116
<b>Tabla N° 45</b> Factores de amplificación para el segundo modelo matemático .....	117
<b>Tabla N° 46</b> Valores de probabilidad para los factores amplificación de periodo largo .....	121
<b>Tabla N° 47</b> Desplazamientos laterales debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y.....	136
<b>Tabla N° 48</b> Desplazamientos laterales debido a espectros de diseño en dirección X y Y ..	136
<b>Tabla N° 49</b> Derivas inelásticas debido a espectros de peligro uniforme en dirección X ....	136
<b>Tabla N° 50</b> Derivas inelásticas debido a espectros de diseño en dirección X.....	136
<b>Tabla N° 51</b> Derivas inelásticas debido a espectros de peligro uniforme en dirección Y ....	137
<b>Tabla N° 52</b> Derivas inelásticas debido a espectros de diseño en dirección Y.....	137
<b>Tabla N° 53</b> Cortantes en la base debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y .....	137
<b>Tabla N° 54</b> Cortantes en la base debido a espectros de diseño en dirección X y Y .....	137

<b>Tabla N° 55</b> Cortantes máximos en columnas debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y .....	138
<b>Tabla N° 56</b> Cortantes máximos en columnas debido a espectros de diseño en dirección X y Y .....	138
<b>Tabla N° 57</b> Momentos máximos en vigas debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y .....	138
<b>Tabla N° 58</b> Momentos máximos en vigas debido a espectros de diseño en dirección X y Y .....	138

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 1</b> Principales placas tectónicas .....	9
<b>Figura N° 2</b> Efectos sísmicos .....	10
<b>Figura N° 3</b> Secciones transversales de sismicidad en el Perú para periodos 1555 – 2016....	14
<b>Figura N° 4</b> Modelo geométrico de fuentes sismogénicas: (a) fuente en un punto; (b) fuente en una línea y (c) fuente de zona tridimensional .....	15
<b>Figura N° 5</b> Mapa de fuentes sismogénicas interface en base a la data de SENCICO (2016)	23
<b>Figura N° 6</b> Mapa de fuentes sismogénicas intraplaca en base a la data de SENCICO (2016) .....	24
<b>Figura N° 7</b> Mapa de fuentes sismogénicas continentales en base a la data de SENCICO (2016).....	25
<b>Figura N° 8</b> PGA en roca vs PGA en suelo blando (a) y (b) .....	35
<b>Figura N° 9</b> Diferencias de amplitud en registros sísmicos obtenidos en distintos tipos de suelo para un mismo sismo .....	36
<b>Figura N° 10</b> Curva de ajuste para factores de amplificación $F_a$ .....	40
<b>Figura N° 11</b> Curva de ajuste para factores de amplificación $F_v$ .....	40
<b>Figura N° 12</b> Dos ejemplos típicos de espectros de respuesta, junto con el tipo de edificios que pueden verse más afectados .....	46
<b>Figura N° 13</b> Espectros de respuesta promedio para diferentes condiciones de sitio.....	47
<b>Figura N° 14</b> Espectro de diseño según el ASCE/SEI 7-10.....	48
<b>Figura N° 15</b> Factores de amplificación $F_a$ y $F_v$ que modifican las ordenadas espectrales en los espectros de diseño.....	49
<b>Figura N° 16</b> Esquema de espectro de peligro uniforme .....	50
<b>Figura N° 17</b> Función de densidad de probabilidad log-normal.....	52
<b>Figura N° 18</b> Función de probabilidad acumulada log-normal.....	53
<b>Figura N° 19</b> Modelo de árbol lógico .....	56
<b>Figura N° 20</b> Pantalla de inicio del software CRISIS 2015 versión 4.1 y R-CRISIS versión 18.4.2.....	58
<b>Figura N° 21</b> Ejemplo de modelado del espectro de diseño de la norma peruana E.030 .....	65
<b>Figura N° 22</b> Aceleraciones máximas PGA (gals) para las ciudades del Perú en diferentes periodos de retorno .....	67
<b>Figura N° 23</b> Mapa de aceleraciones para periodos de retorno de 500 años en el departamento de Cajamarca.....	68

<b>Figura N° 24</b> Espectro del peligro uniforme para el departamento de Cajamarca con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años .....	69
<b>Figura N° 25</b> Espectro de peligro uniforme para la ciudad de Cajamarca con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.....	70
<b>Figura N° 26</b> Proceso de análisis .....	70
<b>Figura N° 27</b> Formas típicas de los 3 primeros modos de vibración .....	71
<b>Figura N° 28</b> Ejemplo de cálculo del árbol lógico en CRISIS 2015 Ver 4.1.....	95
<b>Figura N° 29</b> Ubicación del coliseo multiusos Qhapac Ñan.....	96
<b>Figura N° 30</b> Ubicación de las líneas MASW .....	97
<b>Figura N° 31</b> Correlación entre $V_{S20}$ y $V_{S30}$ según aproximación potencial para ensayos MASW .....	98
<b>Figura N° 32</b> Correlación entre $V_{S20}$ y $V_{S30}$ según Boore et al. (2011) para ensayos MASW98	
<b>Figura N° 33</b> Ubicación del proyecto .....	101
<b>Figura N° 34</b> Modelado del edificio objetivo (Bloque A) .....	103
<b>Figura N° 35</b> Forma deformada del edificio en estudio.....	105
<b>Figura N° 36</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C1 a C4 para la ciudad de Cajamarca .....	108
<b>Figura N° 37</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C5 a C16 para la ciudad de Cajamarca.....	108
<b>Figura N° 38</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C17 a C38 para la ciudad de Cajamarca.....	108
<b>Figura N° 39</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C40 a C53 para la ciudad de Cajamarca.....	109
<b>Figura N° 40</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C54 a C60 para la ciudad de Cajamarca.....	109
<b>Figura N° 41</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C61 a C69 para la ciudad de Cajamarca.....	109
<b>Figura N° 42</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C70 a C78 para la ciudad de Cajamarca.....	110
<b>Figura N° 43</b> Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C79 a C88 para la ciudad de Cajamarca.....	110
<b>Figura N° 44</b> Espectro de peligro uniforme promedio con fuentes de subducción en la ciudad de Cajamarca para un periodo de retorno de 475 años .....	111

<b>Figura N° 45</b> Espectro de peligro uniforme promedio con fuentes de subducción y continentales en la ciudad de Cajamarca para un periodo de retorno de 475 años.....	112
<b>Figura N° 46</b> Espectros de peligro uniforme del IGP, SENCICO y el espectro promedio obtenido, para un periodo de retorno de 475 años a) en gals, b) en g.....	113
<b>Figura N° 47</b> Aceleraciones espectrales de espectros de peligro uniforme en periodos de 0.00, 0.20 y 1.00 segundos para un periodo de retorno de 475 años .....	114
<b>Figura N° 48</b> Obtención de $V_{S30}$ mediante el modelo matemático de Boore et al. (2011) y los modelos matemáticos de correlación para cada ensayo MASW .....	114
<b>Figura N° 49</b> Gráfica de contornos de residuos entre los valores $V_{S30}$ obtenidos mediante el modelo matemático de Boore et al. (2011) y los modelos matemáticos de correlación para cada ensayo MASW.....	115
<b>Figura N° 50</b> Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal de la velocidad promedio de onda de corte.....	118
<b>Figura N° 51</b> Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal del factor de amplificación para periodos cortos ( $F_a$ ) .....	118
<b>Figura N° 52</b> Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal del factor de amplificación para periodos largos ( $F_v$ ) .....	119
<b>Figura N° 53</b> Variación del PGA para el espectro de diseño elástico según la norma E.030 acorde a la variación de probabilidad promedio del factor de amplificación de suelo.....	119
<b>Figura N° 54</b> Variación del espectro elástico para diferentes factores de amplificación de suelo considerando $U=1$ .....	120
<b>Figura N° 55</b> Variación del espectro elástico para diferentes factores de amplificación de suelo considerando $U=1.3$ .....	120
<b>Figura N° 56</b> Variación del espectro elástico para diferentes factores de amplificación de suelo considerando $U=1.5$ .....	121
<b>Figura N° 57</b> Probabilidad promedio del factor de amplificación para periodos largos.....	121
<b>Figura N° 58</b> Espectros de diseño en comparación.....	122
<b>Figura N° 59</b> Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección X.....	123
<b>Figura N° 60</b> Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección Y.....	123
<b>Figura N° 61</b> Derivas inelásticas en la dirección X .....	124
<b>Figura N° 62</b> Derivas inelásticas en la dirección Y .....	124
<b>Figura N° 63</b> Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección X.....	124
<b>Figura N° 64</b> Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección Y.....	125
<b>Figura N° 65</b> Derivas inelásticas en la dirección X .....	125

<b>Figura N° 66</b> Derivas inelásticas en la dirección Y .....	125
<b>Figura N° 67</b> Cortante basal por nivel para la dirección X.....	126
<b>Figura N° 68</b> Cortante basal por nivel para la dirección Y.....	126
<b>Figura N° 69</b> Cortante basal por nivel para la dirección X.....	127
<b>Figura N° 70</b> Cortante basal por nivel para la dirección Y.....	127
<b>Figura N° 71</b> Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección X.....	128
<b>Figura N° 72</b> Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección Y.....	128
<b>Figura N° 73</b> Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección X.....	129
<b>Figura N° 74</b> Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección Y.....	129
<b>Figura N° 75</b> Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección X ...	130
<b>Figura N° 76</b> Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección Y ...	130
<b>Figura N° 77</b> Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección X ...	131
<b>Figura N° 78</b> Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección Y ...	131
<b>Figura N° 79</b> Residuos de la diferencia de velocidades de ondas de corte a profundidades de 30 m entre los dos modelos matemáticos .....	132
<b>Figura N° 80</b> Residuos de la diferencia de velocidades de ondas de corte promedio a profundidades de 30 m entre los dos modelos matemáticos.....	133
<b>Figura N° 81</b> Diferencias de aceleraciones espectrales de espectros de peligro uniforme en periodos de 0.00, 0.20 y 1.00 segundos para un periodo de retorno de 475 años.....	135

## RESUMEN

La presente investigación tiene como propósito comparar la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de diseño probabilísticos y espectros de la normativa peruana para la ciudad de Cajamarca. Estos espectros probabilísticos han sido obtenidos a nivel de roca en función de las 29 fuentes sismogénicas del estudio de peligro sísmico del Perú realizado por SENCICO, y debido a la gran incertidumbre sobre todo epistémica en cuanto a la selección de leyes de atenuación, se ha empleado el método del árbol lógico, generado así diversas combinaciones probabilísticas alternativas, siendo en total 88, las cuales involucran a las leyes más usadas en nuestro país como son Youngs et al. (1997), Atkinson y Boore (2003), Zhao et al. (2006) y Abrahamson et al. (2016) para sismos de subducción, y las de Sadigh et al. (1997), Campbell y Bozorgnia (2014) y Chiou y Youngs (2014) para sismos corticales o superficiales, posteriormente se cómputo el peligro sísmico mediante el software CRISIS y se obtuvo en promedio y percentiles 15 y 85 los espectros de peligro uniforme con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años para la ciudad de Cajamarca. Luego, debido a que la aceleración espectral obtenida fue a nivel de roca, se calculó los factores de amplificación del suelo para periodos cortos y largos de forma probabilística con la data de los ensayos MASW realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan. Finalmente, al comparar la respuesta estructural de una edificación, los resultados mostraron que los espectros obtenidos en este estudio generan mayores desplazamientos, derivas, fuerzas internas y cortantes basales que los de la normativa vigente.

**Palabras Clave:** *Respuesta estructural, espectro de diseño, espectro de peligro uniforme, factores de amplificación, probabilidad.*



## ABSTRACT

The purpose of this research is to compare the structural response of a building using probabilistic design spectra and spectra of the Peruvian regulations for the city of Cajamarca. These probabilistic spectra have been obtained at rock level based on the 29 seismogenic sources of the seismic hazard study of the Peru conducted by SENCICO, and due to the great uncertainty, especially epistemic in Regarding the selection of attenuation laws, the logical tree method has been used, thus generated various alternative probabilistic combinations, being a total of 88, the which involve the laws most used in our country such as Youngs et al. (1997), Atkinson and Boore (2003), Zhao et al. (2006) and Abrahamson et al. (2016) for earthquakes of subduction, and those of Sadigh et al. (1997), Campbell and Bozorgnia (2014) and Chiou and Youngs (2014) for cortical or superficial earthquakes, the seismic hazard was subsequently computed using the CRISIS software and the average and 15th and 85th percentiles were obtained uniform hazard with a probability of exceedance of 10% in 50 years for the city of Cajamarca. Then, because the spectral acceleration obtained was at rock level, calculated the soil amplification factors for short and long periods of form probabilistic with the data of the MASW tests carried out in the multipurpose arena Qhapac Ñan. Finally, when comparing the structural response of a building, the results showed that the spectra obtained in this study generate greater displacements, drifts, internal forces and basal shear than those of the current regulations.

**Keywords:** *Structural response, design spectrum, uniform hazard spectrum, amplification factors, probability.*

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

A lo largo de la historia se registran infinidad de fenómenos naturales a los cuales se enfrenta el hombre tales como inundaciones, terremotos, tornados, entre otros; los cuales ocasionan desastres y diversas pérdidas humanas y materiales, pero son los terremotos uno de los peligros naturales más devastadores que causan pérdida de vida y sustento (Elnashai y Di Sarno, 2015). La lista de terremotos que abatieron al mundo es abrumadora y debido a que Perú se encuentra dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, se identifica por ser un país sísmicamente activo como se puede contrastar en diversos catálogos sísmicos, en donde los sismos ocurridos en nuestro territorio son diferenciados principalmente por la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana, y en segunda lugar por las distorsiones continentales presentes a lo largo de toda la Cordillera Andina (Tavera y Buforn, 1998).

Pese al grave problema originado por estos movimientos sísmicos, los terremotos continúan siendo fenómenos naturales recurrentes, inadvertidos e inevitables (Tapia Hernández et al., 2017), existiendo la única posibilidad, mitigar sus consecuencias (Gioncu y Mazzolani, 2011), de manera que se proponga estructuras estables frente a una actuación sísmica. En este contexto, se parte primeramente de los problemas de sismicidad en las zonas de interés, de sus fuentes sismogénicas, de las leyes de atenuación influyentes, etc. es decir, de forma general del estudio sismológico, lo que conlleva en otras palabras a investigaciones de peligro sísmico.

En nuestro país se han realizado diversos estudios de peligro sísmico, que han dado lugar a espectros de peligro uniforme, mapas de isoaceleraciones, etc., resaltando el del Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al., 2014) y el de SENCICO (SENCICO, 2016), pero en estas investigaciones como refiere Benito y Jiménez (1999) están presentes tanto las incertidumbres aleatorias (que dependen de la disposición y cantidad de datos) como epistémicas (que dependen del modelo asumido y real) ya sea en la definición de zonas sismogénicas y relaciones de recurrencia, leyes de atenuación o efectos basados en condiciones específicas de sitio, siendo la primera supeditada por ambos estudios.

Por otro lado, las incertidumbres presentes en las leyes de atenuación es un tema complejo de resolver, ya que, si bien alrededor de todo el mundo existen una infinidad de leyes de atenuación, como enmarca Douglas (2019), en un listado de forma resumida de una enorme

variedad de estas leyes o ecuaciones de predicción del movimiento GMPEs (por sus iniciales en inglés), sin embargo, si nos enfocamos en nuestro país, la mayor cantidad de leyes de atenuación utilizadas son derivadas de otros entornos sismotectónicos (Tavera et al., 2014), por lo que las incertidumbres son grandes y así mismo estas generarán un rol transcendental en la toma de decisiones.

Es así que la incertidumbre epistémica referida a esta cuestión es abarcada por el método del árbol lógico, el cual es usado ampliamente en el análisis probabilístico de peligro sísmico (Bommer et al., 2005), finalmente estos estudios de peligro sísmico son caracterizados generalmente en suelos tipo roca, dando lugar a que la última incertidumbre concerniente a las condiciones de sitio puede llegar a ser muy relevante, no obstante esto está en función de las características particulares de cada zona y cobra significancia en investigaciones de peligrosidad específica (Benito y Jiménez, 1999), por lo que podemos afirmar el gran rol que engloban los efectos de sitio en el diseño sismorresistente, consecuentemente estos siempre deben ser considerados en lo posible independientemente para cada caso en particular (Frau, 2018).

Siguiendo este razonamiento, se ha desarrollado diversas clasificaciones sísmicas de sitio como las del NEHRP (2003), CEN (2004), GB 50011–2010 (2010), entre otras, y en base a los registros sísmicos de los terremotos de Loma Prieta y el de México se constituyó un conjunto importante de mediciones empíricas de amplificación de movimiento del suelo (Borcherdt, 1994b), generando dos factores de amplificación de este, uno para periodos cortos ( $F_a$ ) y otro para periodos medios o largos ( $F_v$ ). Si bien las normas americanas consideran estos dos factores de amplificación, como se denota en el ASCE/SEI 7-16 (2017), antes ASCE/SEI 7-10 (2010) en la elaboración del espectro de diseño; la norma peruana E.030 considera un único factor general y determinístico de la amplificación de suelo, el cual es obtenido de la relación de la zonificación y el perfil del mismo, descartando la variabilidad de la amplificación del suelo en periodos largos.

Como vemos, las incertidumbres más resaltantes en este contexto resultan ser la selección de las leyes de atenuación y los efectos de sitio, por lo que la presente investigación analizará estos términos en función de probabilidades, tanto para las leyes de atenuación considerando diversas posibilidades en cada rama del método del árbol lógico y para los factores de amplificación que presentan los efectos de sitio, los cuales estarán centrados en las condiciones locales de la ciudad de Cajamarca, determinados en base a velocidades de ondas de corte provenientes de ensayos MASW, calculados de forma probabilística debido

a que si obtenemos un único valor determinístico generaremos un patrón único y general que no tomará en cuenta la gran variabilidad existente, siendo en la mayoría de situaciones de poca utilidad para la toma de decisiones; en cambio, un análisis probabilístico nos generará un grado de incertidumbre necesaria para que una estructura sea estable frente a una actuación sísmica dentro de un cierto grado de confiabilidad, lo cual, finalmente será contrastado al comparar la respuesta estructural de una edificación.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

¿En cuánto varía la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de diseño probabilísticos y espectros de la normativa vigente para la ciudad de Cajamarca?

## **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.**

La respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de diseño probabilísticos varía en más del 4% en comparación con la respuesta generada con los espectros de la normativa vigente para la ciudad de Cajamarca.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.**

Las solicitaciones sísmicas a las cuales está sometida una estructura generalmente son expresadas en la mayoría de los códigos y normas en función de espectros, los cuales están reglamentados en función de zona, tipo de sitio, factor de uso, etc. Es así que si examinamos los espectros empelados en la norma peruana encontraremos la consideración de una macrozonificación del país la cual es muy generalizada para cada departamento del Perú. Por ejemplo, toda la ciudad de Cajamarca presenta una aceleración pico PGA de 0.35g, la cual no está muy acorde a la realidad sísmica como se ha demostrado en diversos estudios de peligro sísmico, de igual manera la gran influencia que presenta los efectos de sitio, que aumentan las frecuencias de los movimientos sísmicos donde la norma peruana E.030 solo considera un factor de amplificación independientemente de periodos cortos o largos. En este contexto, se plantea la comparación en respuesta estructural de espectros probabilísticos validados por estudios de peligro sísmico y factores de amplificación de sitio que mejoren la caracterización sísmica de la zona de Cajamarca.

## **1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.**

Los espectros obtenidos en este estudio son para estructuras de periodo de retorno de 475 años, además están en función de las leyes de atenuación más resaltantes en nuestro entorno sismotectónico, definidos en roca para la ciudad de Cajamarca en primera instancia y luego amplificando las ordenadas espectrales por efectos de sitio únicamente bajo los ensayos

MASW realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan de la ciudad. Cabe recalcar que no se considera efectos topográficos los cuales también influyen en las aceleraciones espectrales.

## **1.6. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.**

Para la presente investigación se utilizará las 29 fuentes sismogénicas establecidas por SENCICO (SENCICO, 2016), las leyes de atenuación de mayor uso en estudios de peligro sísmico para nuestro país como son las de Youngs et al. (1997), Atkinson y Boore (2003), Zhao et al. (2006) y Abrahamson et al. (2016) para sismos de subducción, y las de Sadigh et al. (1997), Campbell y Bozorgnia (2014) y Chiou y Youngs (2014) para sismos corticales. Además, se empleará la data obtenida de los ensayos MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan y la correlación empírica de velocidad de onda de corte planteada por Boore et al. (2011).

## **1.7. OBJETIVOS.**

### **1.7.1. OBJETIVO GENERAL.**

- Comparar la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de diseño probabilísticos y espectros de la normativa vigente para la ciudad de Cajamarca.

### **1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Determinar la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de diseño probabilísticos y espectros de la normativa vigente para la ciudad de Cajamarca.
- Determinar la velocidad de onda de corte a profundidades de 30 m ( $V_{S30}$ ) a partir de los ensayos MASW realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan.
- Obtener los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  (para periodos cortos y periodos largos, respectivamente) correspondientes al perfil de suelo de Cajamarca.

## **1.8. CONTENIDO.**

**Capítulo I. Introducción:** Este capítulo abarca el planteamiento del problema, la justificación, delimitaciones, alcances y objetivos de la investigación.

**Capítulo II. Marco Teórico:** Este capítulo aborda una revisión del Estado del Conocimiento referido al tema de interés, partiendo de antecedentes internacionales y nacionales afines a esta investigación, posteriormente se recaudan las bases teóricas necesarias que son el sustento del presente trabajo y finalmente, se definen a manera de

glosario una serie términos básicos necesarios para que el lector tenga una mayor comprensión del desarrollo del contenido.

**Capítulo III. Materiales y Métodos:** Este capítulo da a conocer la ubicación y época en la cual se realizó la investigación, además se describe paso a paso el procedimiento empleado, el tratamiento, análisis de datos y la presentación de resultados.

**Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados:** Este capítulo describe el análisis y discusión de los resultados obtenidos acorde a los objetivos planteados.

**Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones:** Este capítulo presenta las conclusiones más resaltantes de los resultados obtenidos; así mismo se plantean recomendaciones para las futuras líneas de investigación afines al tema.

# CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

## 2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.

### 2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.

- ❖ Pinilla Ramos (2012), en su memoria para optar el título de ingeniero civil titulada: “CORRELACIÓN ENTRE EL PERFIL DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE CORTE Y EL ESPECTRO DE RESPUESTA EN SUELOS” de la Universidad de Chile presenta un análisis de la respuesta sísmica que tuvieron nueve sitios pertenecientes al movimiento telúrico de Maule del 2010, correlacionando la respuesta y el perfil de velocidad de ondas de corte, además de la  $VS_{30}$  y su clasificación sísmica pertinente a cada sitio usando ensayos SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) hasta profundidades de 30 m. Se puede observar además en el trabajo realizado por el autor la diferencia que existe entre los gráficos de espectro de respuesta para cada una de las nueve estaciones de monitoreo y los de la norma NCh433, donde se recalcó que *“a mayor valor de  $VS_{30}$ , menor llega a ser el máximo valor de pseudo-aceleración concerniente al espectro de respuesta”*.
  
- ❖ Quinde Martínez y Reinoso Angulo (2016), en su artículo de investigación titulado: “ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DE ECUADOR Y PROPUESTA DE ESPECTROS DE DISEÑO PARA LA CIUDAD DE CUENCA” de Ecuador, utilizaron 30 fuentes sismogénicas (10 de subducción y 20 superficiales) y con leyes de atenuación de Abrahamson y Silva (2008) para sismos superficiales y Youngs et al. (1997) para el caso de sismos de subducción interplaca e intraplaca definieron los espectros de peligro uniforme, los cuales se compararon con los espectros en roca de la norma ecuatoriana de construcción NEC, encontrándose que las ordenadas espectrales de dicha norma eran menores a los obtenidos en su investigación. Posteriormente se hizo un estudio de los efectos de sitio de la ciudad de Cuenca. El estudio geotécnico fue en base al ensayo SPT, el monitoreo sísmico en base a vibración ambiental y los efectos del suelo en base a funciones de transferencia. Finalmente se comparó los espectros propuestos (tanto de peligro uniforme como los obtenidos en función los efectos de sitio) con los de la norma ecuatoriana NEC, donde se encontró que *“la diferencia de aceleraciones se incrementa con respecto a la norma NEC”*.

- ❖ Picoita (2011) es su investigación titulada: “ELABORACIÓN DE NUEVOS ESPECTROS SÍSMICOS DE DISEÑO EN ACELERACIONES PARA EL CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN 2011 ” de la Universidad San Francisco de Quito presenta primeramente una comparación entre las normas de diseño sísmico de Colombia, Estados Unidos y Ecuador (NSR-10, ASCE 7-10 y CEC-01 respectivamente), luego se plantea una propuesta denominada USFQ (en mención a su universidad) considerando dos alternativas, además se usó los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  teniendo en cuenta la clasificación de suelos en CEC-10 y se compara los espectros con las normas internacionales ya mencionadas para posteriormente analizar el comportamiento estructural de tres edificios.

### **2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES.**

- ❖ Angulo Adrianzén y Azañedo Martínez (2013), en su tesis: “PROPUESTA PARA LA MODIFICACIÓN DEL ESPECTRO ELÁSTICO DE LA ACTUAL NORMA PERUANA DE DISEÑO SISMO RESISTENTE” de la Pontificia Universidad Católica del Perú enmarcaron una propuesta para los espectros de diseño en la zona de periodos superiores a 2.5seg. La investigación se desarrolló usando regresiones establecidas en promedios espectrales de la zona de periodos largos. Se consiguieron *“espectros para los tipos de suelo S1 y S3 correspondientes a resultados medios y promedio más una desviación estándar, con un enfoque a estructuras del periodo establecido”*.
- ❖ Roncal Castro (2017), en su tesis: “DETERMINACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN EL TERRITORIO NACIONAL Y ELABORACIÓN DE APLICATIVO WEB ” de la Universidad Nacional de Ingeniería investigó el peligro sísmico probabilístico para el Perú a nivel de roca utilizando una recopilación de diversas datas sísmicas. Con respecto a la comparación de los espectros de diseño, se recalcó que *“los espectros obtenidos bajo una zona específica presentan aceleraciones espectrales inclusive hasta un 15% más conservadoras que las fijadas en la norma E.030, 2016”*.
- ❖ Malpartida Pino (2017), en su tesis: “OBTENCIÓN DEL FACTOR DE ZONA SÍSMICO "Z" MEDIANTE EL SOFTWARE CRISIS 2015 VER.4.1 EN LA CIUDAD DE HUÁNUCO 2017” de la Universidad de Huánuco donde primeramente se describió la región de Huánuco con una data sismológica; luego haciendo uso de las 29 fuentes sismogénicas presentadas por SENCICO, además de 2 leyes de atenuación para dichas



fuentes sismogénicas y con ayuda del software CRISIS 2015 Ver. 4.1 estimó el peligro sísmico, enmarcando *“un factor de zona “Z” para la región de Huánuco de 0.307g para una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años de vida útil y obteniendo también un espectro de peligro uniforme para su región, el cual se lo comparó con los espectros de diseño de las normas ASCE 2010, AASHTO 2014 y E.030 2016, concluyendo que el de la norma E.030 era la más conservadora, seguida de la AASHTO 2014, el espectro de peligro uniforme hallado y la norma ASCE 2010”*.

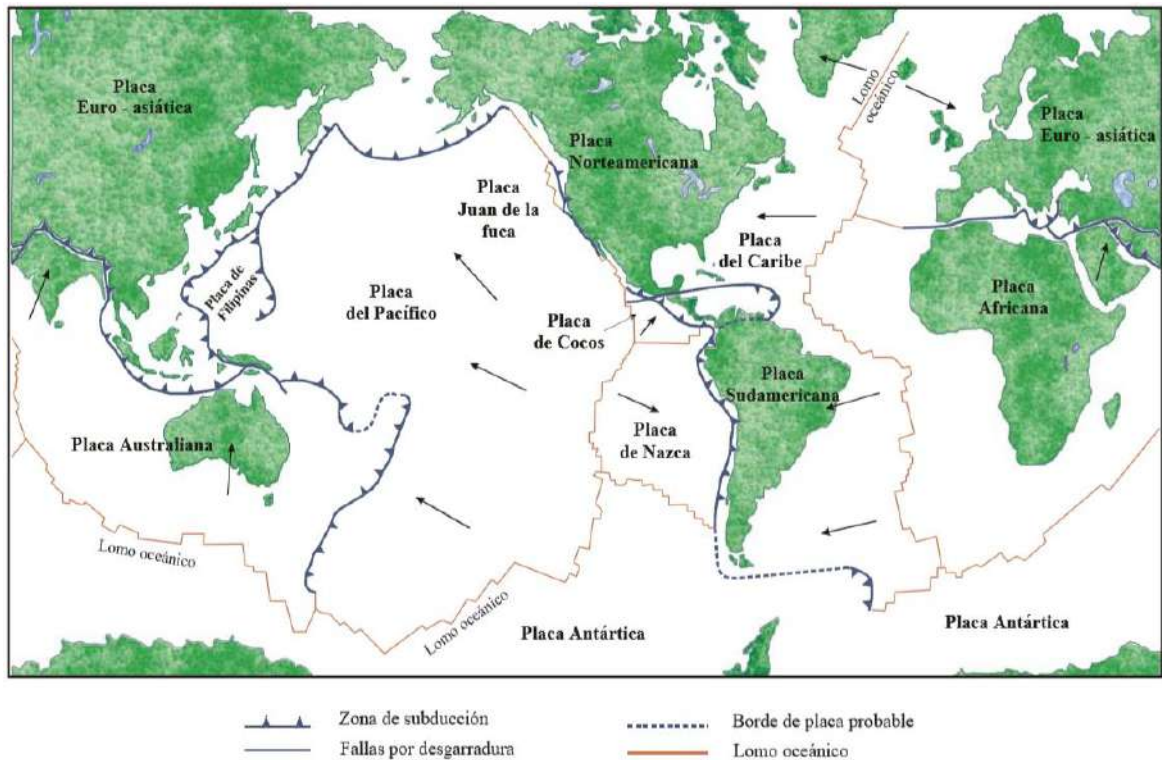
## **2.2. BASES TEÓRICAS.**

### **2.2.1. PLACAS TECTÓNICAS.**

Las placas tectónicas son bloques en los cuales está dividido la superficie terrestre, unos más grandes que otros y que se encuentran sujetos a movimientos de acercamiento y alejamiento (Rivera, 2005). Como ya es bien sabido, Gioncu y Mazzolani (2011) hacen referencia que las siete placas más importantes son:

1. Placa Africana (cubre África - placa continental).
2. Placa Antártica (cubre Antártida - placa continental).
3. Placa Australiana o Placa Indo-Australiana (cubre Australia - placa continental).
4. Placa Euroasiática (cubre Europa y Asia - placa continental).
5. Placa Norteamericana (cubre Norteamérica y noreste de Siberia - placa continental).
6. Placa Sudamericana (cubre Sudamérica - placa continental).
7. Placa del Pacífico (la más grande, cubre el Océano Pacífico - placa oceánica).

Estas y demás placas se pueden apreciar en la siguiente figura.

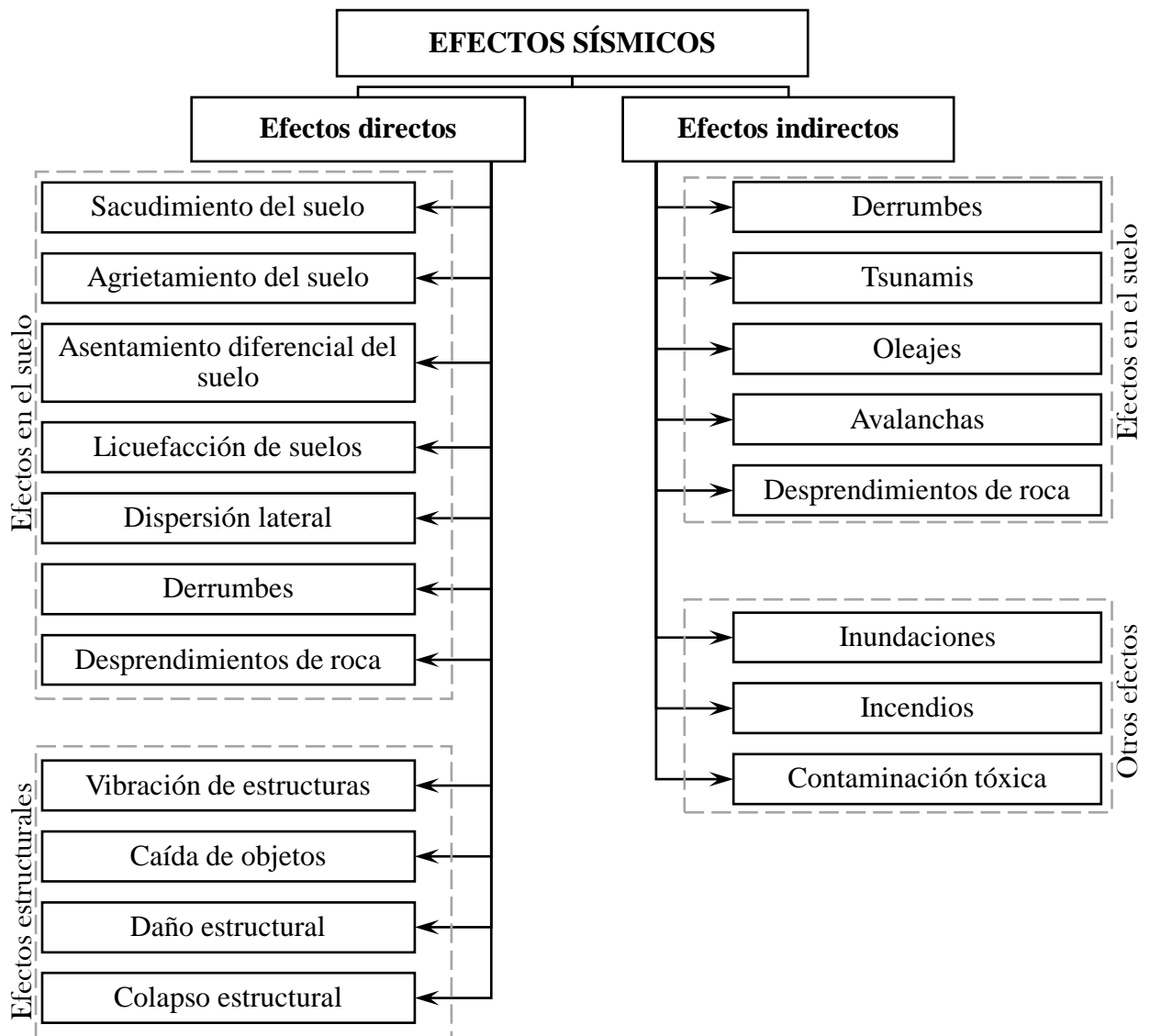


**Figura N° 1** Principales placas tectónicas  
**Fuente:** Goytia Torrez y Villanueva Inca, 2001

Vidal Sánchez (1994) menciona que el movimiento relativo de estas placas se exhibe comúnmente en los bordes, dando lugar a un área relativamente estrecha de deformación donde se centraliza la actividad sísmica estableciendo el origen de zonas divergentes, zonas convergentes, zonas de subducción, zonas de colisión, entre otras. Por ejemplo, es de particular interés en nuestro territorio, el fenómeno de subducción, dado que la sismicidad en Perú tiene su origen en la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana (Tavera et al., 2014), en donde la primera placa subduce por debajo de la segunda placa, respectivamente (Bernal et al., 2002); produciendo, como hace mención Bolaños Luna y Monroy Concha (2004) características tectónicas de subducción ya sea de interface o de intraplaca y de corteza continental de la placa sudamericana (corticales).

### 2.2.2. SISMOS.

Los sismos, terremotos o movimientos telúricos, son vibraciones de la superficie terrestre, ocasionadas por diferentes fenómenos, como las explosiones, actividad de volcanes, etc. No obstante, los sismos más dañinos y los más estudiados desde un enfoque ingenieril, son los de origen tectónico (Bazán y Meli, 2002), y pueden ocasionar efectos tanto directos e indirectos como se aprecia en la siguiente figura.



**Figura N° 2** Efectos sísmicos  
**Fuente:** Adaptado de Elnashai y Di Sarno, 2015.

### 2.2.3. MEDIDAS DE SISMOS.

#### 2.2.3.1. Magnitud.

La magnitud de un sismo viene a ser una medición instrumental cuantificado por un sismograma debido a la energía liberada por el mismo (García, 1998), llegando a determinar su capacidad destructiva (Bazán y Meli, 2002). Comúnmente se expresa como una magnitud de Richter en función de la escala establecida por Charles Richter del Instituto de Tecnología de California, en 1935 (Arnold y Reitherman, 1987).

La escala de Richter no cuenta con un valor tope establecido, pero alrededor de 9 es el más alto registrado en estos tiempos (Arnold y Reitherman, 1987).

Sismos con magnitudes inferiores a 3 son denominados sismos instrumentales que casi nunca son notados. Sismos de magnitud menores a 5 casi nunca originan daño, pero lo hacen cuando se producen superficialmente. Sismos de magnitud entre 5 y 7 perturban a lugares limitadamente pequeños. Conforme se incrementa la magnitud aumenta el rango territorial afectado (Bazán y Meli, 2002).

#### **2.2.3.2. Intensidad.**

La intensidad de un sismo es una medida completamente intrínseca sobre los efectos que el sismo causa en un determinado sitio, realizada a través de espectadores, los cuales se movilizan a los diversos lugares aludidos por el sismo y allí se designa una intensidad para cada área, conforme a los daños encontrados. Por ende, no llega a ser un valor único, debido a que el daño originado en diversos sitios por el mismo sismo es distinto y mientras la zona se ubique más distante a una cierta zona epicentral, los daños serán menores (García, 1998).

La escala empleada es la de Mercalli Modificada (MM), originaria en Europa en 1902 y cambiada en 1931 por Wood y Neuman para compensar los escenarios constructivos en aquel tiempo prevalecientes en Estados Unidos (Arnold y Reitherman, 1987). En esta escala oscila entre los valores de uno (I-MM) a doce (XII-MM) (García, 1998).

La siguiente tabla muestra una versión abreviada de la Escala de Intensidades de Mercalli Modificada, desarrollada por Richter en 1956.

**Tabla N° 1** Escala de Intensidades de Mercalli Modificada, versión 1956

<b>Grado de Intensidad</b>	<b>Características</b>
I	No sentido. Efectos marginales y de periodo largo de sistemas grandes.
II	Sentido por personas que descansan, en pisos altos o situados favorablemente.
III	Sentido en interiores. Los objetos colgantes oscilan. La vibración es como la del paso de camiones ligeros. Duración estimada. Puede no reconocerse como sismo.
IV	Los objetos colgantes oscilan. La vibración es como la del paso de camiones pesados; o bien, sensación de una sacudida como la que produce una pelota pesada al golpear los muros. Los automóviles estacionados se mecen. Las ventanas, platos, puertas, hacen ruido. Los vidrios retintinean. La losa entrechoca. En el nivel superior IV, los muros y los marcos de madera rechinan.
V	Se siente en el exterior; dirección estimada. Despierta a quién duerme. Se afectan los líquidos, algunos se derraman. Algunos objetos inestables se desplazan o caen. Las puertas oscilan, se abren, se cierran. Las personas, los cuadros, se mueven. Los relojes de péndulo se detienen, vuelven a moverse, cambian su ritmo.
VI	Todos lo sienten. Muchos se asustan y corren hacia el exterior. Las personas caminan tambaleándose. Las ventanas, platos, cristalería, se rompen. Los objetos, los libros y otros objetos, se caen de los estantes. Los cuadros se caen de las paredes. Los muebles se desplazan o se vuelcan. El aplanado débil y la mampostería D se agrietan. Las campanas pequeñas suenan (de iglesia, de escuelas). Los árboles y arbustos se mueven notablemente o se oyen crujir.
VII	Es difícil mantenerse en pie. Los conductores de automóviles lo sienten. Los objetos colgantes se estremecen. Los muebles se rompen. Daños en mampostería D, incluyendo agrietamiento. Las chimeneas débiles se rompen a nivel del techo. Caído de aplanados, así como de ladrillos flojos, piedras, tejas y cornisas, también los parapetos y ornamentos arquitectónicos no contraventeados. Algunas grietas en mampostería C. Se forman olas en los estanques, el agua se enturbia con lodo. Pequeños deslizamientos y cavitación en bancos de arena o grava. Las campanas grandes suenan. Los canales de concreto para irrigación se dañan.
VIII	Se afecta el control de los automóviles. Daño en mampostería C; colapso parcial. Ciertos daños en mampostería B, ninguno en mampostería A. Se cae el estuco y algunos muros de mampostería. Torcimiento, caída de chimeneas, torres de chimeneas de fábricas, monumentos, torres, tanques elevados. Las casas construidas a base de marcos se mueven sobre sus cimientos si no están atornillados; se desploman los muros de paneles sueltos. Los pilotes deteriorados se rompen. Se rompen las ramas de los árboles. Cambio del curso o de la temperatura de manantiales o pozos. Grietas en suelo húmedo y en pendientes pronunciadas.

**Tabla N° 1** Escala de Intensidades de Mercalli Modificada, versión 1956 (continuación)

<b>Grado de Intensidad</b>	<b>Características</b>
IX	Pánico general. Se destruye la mampostería D; se daña gravemente la mampostería C, y a veces se colapsa totalmente; la mampostería B se daña gravemente. Daño general en cimentaciones. Las estructuras de marco, si no están atornilladas, se sueltan de la cimentación. Los marcos se deforman. Daños graves en cisternas. La tubería subterránea se rompe. Agrietamiento notable del suelo. En áreas de aluvión, la arena y el lodo son expulsados al exterior creando fuentes sísmicas y cráteres de arena.
X	La mayor parte de la mampostería y de las estructuras de marco se destruyen junto con sus cimientos. Se destruyen algunas estructuras y puentes de madera bien contruidos. Daños graves en presas, diques, represas. Grandes deslizamientos de tierra. El agua se desborda de canales, ríos y lagos. La arena y el lodo se desplazan en forma horizontal en las playas y en tierra plana. Los rieles se doblan ligeramente.
XI	Los rieles se doblan en gran medida. Los ductos subterráneos quedan completamente fuera de servicio.
XII	Daño casi total. Grandes masas rocosas se desplazan. Se distorsionan las líneas de mira y nivel. Los objetos son arrojados al aire.

**Mampostería A:** Mano de obra, mortero y diseño de buena calidad; reforzada sobre todo lateralmente, y pegado usando acero, concreto, etc.; diseñada para resistir fuerzas laterales.

**Mampostería B:** Mano de obra y mortero de buena calidad; reforzada, pero no diseñada en detalle para resistir fuerzas laterales.

**Mampostería C:** Mano de obra y mortero ordinarios, sin debilidad extrema como falta de traslape en esquinas, pero no reforzada ni diseñada contra fuerzas horizontales.

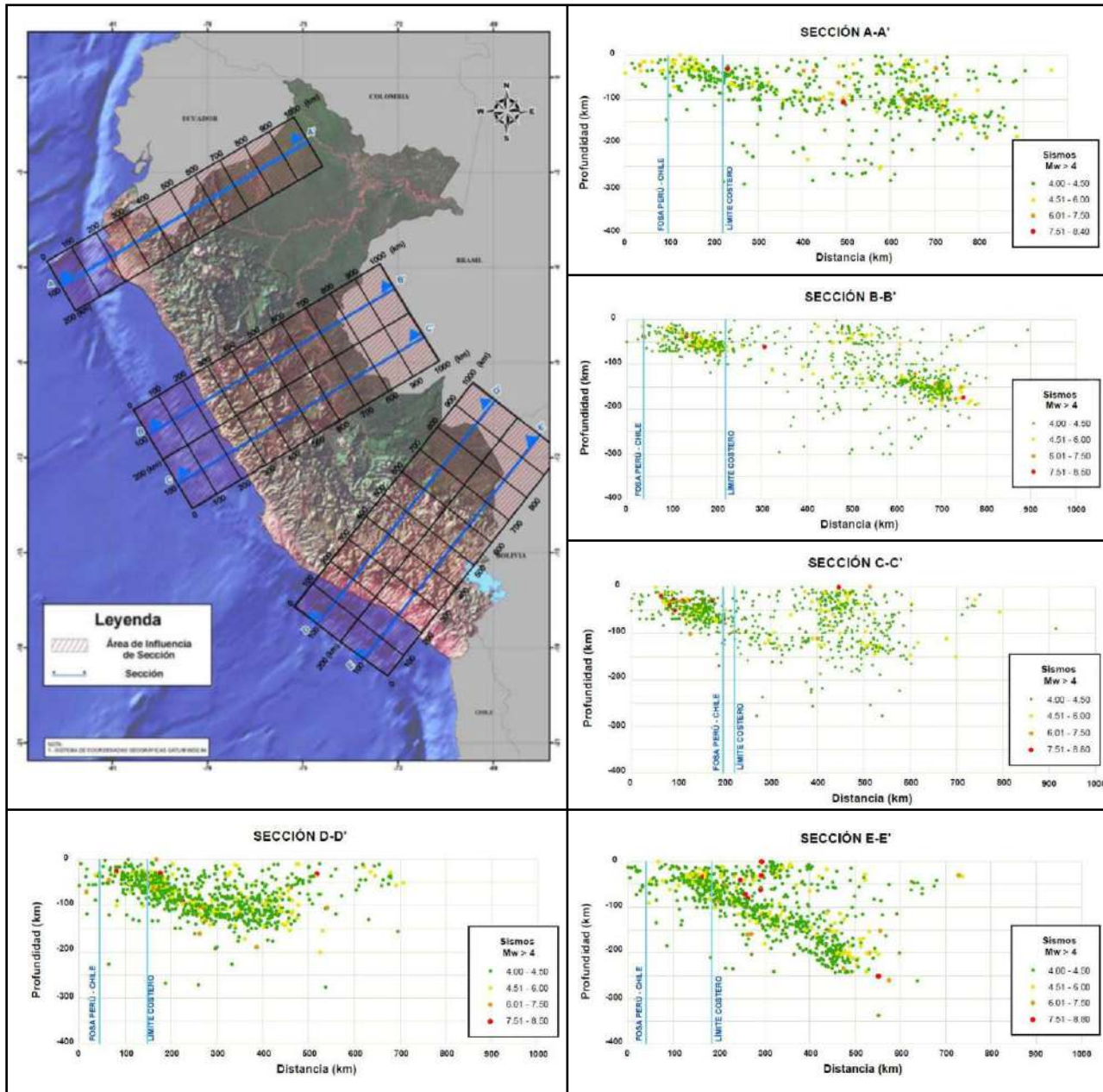
**Mampostería D:** Materiales débiles, como adobe; mortero pobre; baja calidad de mano de obra; débil horizontalmente.

**Fuente:** Adaptado de Arnold y Reitherman, 1987, p. 35

#### **2.2.4. SISMICIDAD EN EL PERÚ.**

La sismicidad en el Perú radica primordialmente en el desplazamiento de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, ocasionando entre estas dos placas un contacto de fricción, y así un sinnúmero de sismos de diferentes magnitudes a ciertos rangos de profundidad (Bernal et al., 2002). En este contexto, SENCICO (2016) definió 5 secciones (ver Figura 3) concluyendo que, para la sección (A-A') se observa generalmente sismos de baja magnitud y uno que otro de gran magnitud, en la segunda sección (B-B') la distribución se caracteriza por presentarse en la zona continental y en parte próxima a la costa, con un pequeño vacío de sismos en el área central. Además, en esta sección y en la primera, se

denota que la profundidad del foco se incrementa de oeste a este (en torno a los 50 km y 150 km), en la tercera sección (C-C') se presenta un aumento de concentración de sismos en el área central con profundidades en particulares de 100 a 150 km, en la cuarta (D-D') y quinta sección (E-E') se presenta un mayor indicio de sismicidad, con focos de hasta 300 km de profundidad.



**Figura N° 3** Secciones transversales de sismicidad en el Perú para periodos 1555 – 2016  
**Fuente:** SENCICO, 2016

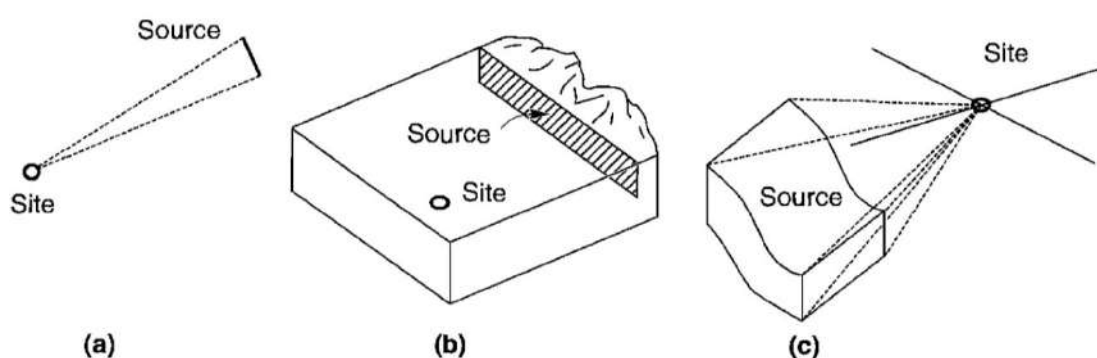
### 2.2.5. PELIGROSIDAD SÍSMICA.

Se conoce como peligrosidad sísmica a la probabilidad de exceder o sobrepasar un determinado valor de la intensidad de movimiento del suelo ocasionado por sismos, en un sitio y tiempo dado (Benito y Jiménez, 1999). Por otro lado, acorde a lo descrito en CENAPRED (2014), los pasos a seguir para una apreciación del peligro sísmico involucran el análisis de la sismicidad local, lo que conlleva a separar un determinado territorio (en este caso Perú) en diversas zonas en base a una suposición de una regulación constante de sismos específicamente, denominadas fuentes sismogénicas. Luego, se hallan los efectos que producen por cada fuente en un determinado emplazamiento, basados en intensidad sísmica instrumental. Para lo cual se generan leyes de atenuación, dichas leyes relacionan factores como, la ubicación de la fuente para una zona dada, la magnitud e intensidad originada. Considerando siempre que conforme se incrementa la distancia a partir de la fuente, disminuye la intensidad.

Para el estudio de la peligrosidad sísmica existen los métodos determinísticos (DSHA) y probabilísticos (PSHA). En la presente investigación se hará uso del peligro sísmico probabilístico; el cual se enfoca en que, distinguida la sismicidad ocurrida, se llegan a constituir leyes estadísticas que traten de prescindir los fenómenos sísmicos de una zona. Obteniendo así una probabilidad de ocurrencia bajo diferentes enfoques de intensidad de movimiento del suelo en un sitio determinado (Muñoz, 1989).

### 2.2.6. FUENTES SIMOGÉNICAS O SISMOGENÉTICAS.

La fuente sismogénica o sismogenética viene a ser aquella línea, área o volumen geográfico que contiene similitudes geofísicas, geológicas y sísmicas; afirmándose que su rango sísmico es ciertamente semejante en toda la fuente (Tavera et al., 2014).



**Figura N° 4** Modelo geométrico de fuentes sismogénicas: (a) fuente en un punto; (b) fuente en una línea y (c) fuente de zona tridimensional

**Fuente:** Kramer, 1996



Cabe recalcar que en investigaciones de sismicidad en los que se emplean una data de catálogos sísmicos, comúnmente se parte de la suposición de que la ocurrencia de sismos se ajusta a un proceso de Poisson; es decir, que los sismos no dependen entre sí en el espacio y en el tiempo (Muñoz, 1989).

#### **2.2.6.1. Estudios en base a fuentes sismogénicas o sismogenéticas.**

Las fuentes sismogénicas o sismogenéticas son clave para el estudio de peligrosidad sísmica, y como sabemos, esta se define como la probabilidad de que en un determinado lugar acontezca un sismo de cierta magnitud que englobe una aceleración igual o superior a un valor y periodo de tiempo dado (Tavera et al., 2014), y al definirse como una probabilidad, se está hablando de cierta dispersión. Esta dispersión puede ser debida a una gran cantidad de parámetros tales como la zona de ocurrencia, zona focal, efectos del emplazamiento donde se ubica la estructura, etc. (Hidalgo Leiva, 2017).

Diferentes estudios de fuentes sismogénicas se han realizado en diversos países del mundo y Latinoamérica, y dichos datos obtenidos han sido aplicados en infinidad de investigaciones. A modo de ejemplo citaremos algunos autores afines a estos estudios:

- ✓ Quinde Martínez y Reinoso Angulo (2016) han optado por 30 fuentes sismogénicas (10 del tipo subducción, y 20 superficiales) de los estudios realizados en Ecuador.
- ✓ Parra Cárdenas (2016) combinando diversos tipos de información geofísica ha considerado como fuentes sismogénicas 14 corticales, 4 de subducción y 3 de subducción interfase.

Se podría exponer muchos más estudios de fuentes sismogénicas, pero todos ellos engloban un mismo objetivo; en el cual, en base a estas diferentes fuentes (subducción, superficiales, profundas, etc.) se busca obtener resultados como: estudios de peligro sísmico, evaluaciones probabilísticas de peligros y amenazas sísmicas, espectros de peligro uniforme, curvas de peligro sísmico, espectros de diseño, mapas de aceleraciones, entre otros.

Por otro lado, Perú no es ajeno a estas investigaciones, así que puntualizaremos a continuación un estudio de fuentes sismogénicas en nuestro país.

#### **2.2.7. ESTUDIO DE FUENTES SIMOGÉNICAS DE SENCICO.**

El estudio de fuentes simogénicas que describiremos es el concerniente al propuesto por SENCICO, el cual está basado en la investigación de Roncal Castro (2017), y es materia de utilización en la presente tesis. En este estudio se reconoció 29 fuentes sismogénicas,

las cuales están acordes a los procesos de subducción, tanto en interface como en intraplaca y finalmente a las fallas sistemas pertenecientes a lo superficial.

#### **2.2.7.1. Sismicidad histórica.**

La información de sismicidad histórica en nuestro país es desde alrededor del año 1500. En Tavera et al. (2014, p. 13) se muestra una tabla (Tabla 2) que detalla la sismicidad histórica en el Perú, en la cual no entraremos en detalle.

#### **2.2.7.2. Catálogo sísmico.**

Para este análisis de peligro sísmico realizado por SENCICO se ha recurrido al catálogo sísmico del el Perú, el cual fue además acopiado con otros catálogos como el del Instituto Geofísico del Perú (IGP); el catálogo del International Seismological Centre (ISC), entre otros; actualizado hasta la fecha del primero de enero de 2016 (SENCICO, 2016).

#### **2.2.7.3. Fuentes sismogénicas.**

Como se mencionó anteriormente, en SENCICO (2016) se ha contabilizado 29 fuentes sismogénicas. La designación, coordenadas (longitud y latitud) y profundidad (km) de las fuentes de subducción (interfase), fuentes de subducción (intraplaca) y fuentes continentales se muestran en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente, de igual manera la ubicación y forma geométrica de estas se muestran en las Figuras 5, 6 y 7.

**Tabla N° 2** Coordenadas geográficas de fuentes de subducción interface

<b>Fuentes</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>		
	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Profundidad (Km)</b>
F1	-79.928	-1.314	50
	-79.697	-2.447	50
	-81.742	-2.217	25
	-81.670	-1.163	25
	-80.380	2.110	25
	-78.778	1.666	50
F2	-81.851	-3.458	25
	-82.054	-5.322	25
	-80.991	-8.528	25
	-79.267	-7.740	50
	-80.368	-5.595	50
	-79.699	-2.439	50
F3	-81.236	-2.274	25
	-80.991	-8.528	25
	-80.022	-10.322	25
	-77.184	-14.412	25
	-75.856	-13.563	60
	-77.824	-10.464	60
F4	-79.267	-7.740	60
	-75.800	-15.800	25
	-74.360	-16.880	25
	-73.430	-16.039	65
	-75.834	-13.548	65
F5	-77.155	-14.392	25
	-73.430	-16.039	70
	-74.360	-16.880	30
	-72.727	-18.100	30
	-71.602	-19.101	30
F6	-70.517	-18.082	75
	-71.602	-19.101	30
	-71.334	-19.475	30
	-71.377	-22.999	50
	-69.266	-22.999	85
	-69.623	-20.786	75
	-69.900	-18.564	70

**Fuente:** SENCICO, 2016, p. 20

**Tabla N° 3** Coordenadas geográficas de fuentes de subducción intraplaca

<b>Fuentes</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>		
	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Profundidad (Km)</b>
F7	-79.033	-2.129	125
	-76.989	0.998	125
	-79.222	1.809	50
	-80.031	0.162	50
	-80.600	-1.400	50
F8	-81.334	-3.969	50
	-80.840	-5.926	50
	-79.881	-8.015	50
	-77.474	-6.920	120
	-78.667	-4.725	120
	-77.716	-2.798	200
	-80.017	-1.630	90
F9	-78.423	-7.352	100
	-79.881	-8.015	60
	-78.003	-11.728	60
	-76.381	-13.899	60
	-74.775	-12.871	120
	-76.441	-10.831	130
F10	-73.778	-16.347	70
	-71.584	-14.405	140
	-73.127	-13.631	125
	-74.555	-12.725	120
	-76.381	-13.899	60
	-75.782	-14.883	60
	-74.709	-15.750	60
F11	-71.660	-17.328	70
	-70.558	-18.134	70
	-69.800	-17.400	140
	-71.584	-14.405	140
	-73.778	-16.347	65
F12	-70.480	-22.999	70
	-69.275	-22.999	100
	-67.872	-22.999	150
	-67.911	-21.766	150
	-68.560	-19.610	155
	-69.020	-18.550	150
	-69.800	-17.400	140
	-70.558	-18.143	100

**Tabla N° 3** Coordenadas geográficas de fuentes de subducción intraplaca (continuación)

<b>Fuentes</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>		
	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Profundidad (Km)</b>
F13	-77.716	-2.798	200
	-78.667	-4.725	120
	-76.472	-8.763	130
	-75.489	-8.120	140
	-74.558	-6.771	150
	-76.164	-4.332	130
	-75.255	-2.911	150
F14	-76.441	-10.831	130
	-74.775	-12.871	120
	-73.794	-12.219	130
	-76.472	-8.763	130
	-77.474	-6.920	120
	-78.423	-7.352	120
F15	-75.116	-10.513	145
	-73.794	-12.219	130
	-72.577	-11.410	135
	-73.319	-10.572	150
	-74.417	-9.331	150
	-75.489	-8.120	140
F16	-76.472	-8.763	130
	-73.119	-13.635	120
	-71.584	-14.405	150
	-70.646	-13.766	135
	-72.575	-11.405	135
F17	-74.584	-12.770	125
	-77.716	-2.798	200
	-76.245	-2.865	170
	-75.638	-1.914	170
	-77.119	-0.922	200
	-78.400	-1.161	125
F18	-79.033	-2.129	125
	-75.489	-8.120	140
	-74.417	-9.331	150
	-73.051	-8.124	185
	-74.558	-6.771	180

**Tabla N° 3** Coordenadas geográficas de fuentes de subducción intraplaca (continuación)

<b>Fuentes</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>		
	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Profundidad (Km)</b>
F19	-70.592	-16.070	150
	-69.800	-17.400	140
	-69.020	-18.550	150
	-68.246	-18.155	200
	-67.398	-17.724	250
	-70.646	-13.766	250
	-71.584	-14.405	175
F20	-65.943	-22.999	270
	-66.254	-19.522	270
	-66.745	-17.388	285
	-69.020	-18.550	150
	-68.560	-19.610	155
	-67.911	-21.766	150
	-67.873	-22.999	150

**Fuente:** SENCICO, 2016, p. 21

**Tabla N° 4** Coordenadas geográficas de fuentes continentales

<b>Fuentes</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>		
	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Profundidad (Km)</b>
F21	-79.173	-7.916	30
	-77.365	-7.009	30
	-78.581	-4.449	30
	-80.368	-5.595	30
F22	-79.173	-7.916	30
	-77.824	-10.464	30
	-76.318	-12.881	30
	-75.677	-13.764	30
	-74.411	-12.807	30
	-75.315	-12.019	30
	-76.798	-8.551	30
	-77.365	-7.009	30
F23	-75.677	-13.764	30
	-73.090	-16.383	30
	-72.106	-14.949	30
	-73.789	-13.349	30
	-74.411	-12.807	30

**Tabla N° 4** Coordenadas geográficas de fuentes continentales (continuación)

Fuentes	Coordenadas geográficas		Profundidad (Km)
	Longitud	Latitud	
F24	-73.090	-16.383	30
	-70.517	-18.096	30
	-69.900	-18.564	30
	-69.174	-17.909	30
	-70.484	-15.743	30
	-72.106	-14.949	30
F25	-79.367	-0.036	30
	-79.083	-2.408	30
	-77.139	-1.595	30
	-76.797	1.211	30
	-77.897	1.73	30
F26	-79.083	-2.408	30
	-78.581	-4.449	30
	-78.152	-5.348	30
	-76.293	-4.598	30
	-76.661	-3.088	30
	-77.139	-1.595	30
F27	-78.152	-5.348	30
	-77.365	-7.009	30
	-76.798	-8.551	30
	-75.145	-7.359	30
	-75.430	-6.292	30
	-76.304	-4.610	30
F28	-76.798	-8.551	30
	-75.315	-12.019	30
	-73.789	-13.349	30
	-72.276	-11.656	30
	-73.668	-10.523	30
	-74.957	-8.744	30
	-75.145	-7.359	30
F29	-73.789	-13.349	30
	-72.106	-14.949	30
	-70.484	-15.743	30
	-69.414	-12.956	30
	-72.276	-11.656	30

**Fuente:** SENCICO, 2016, p. 23

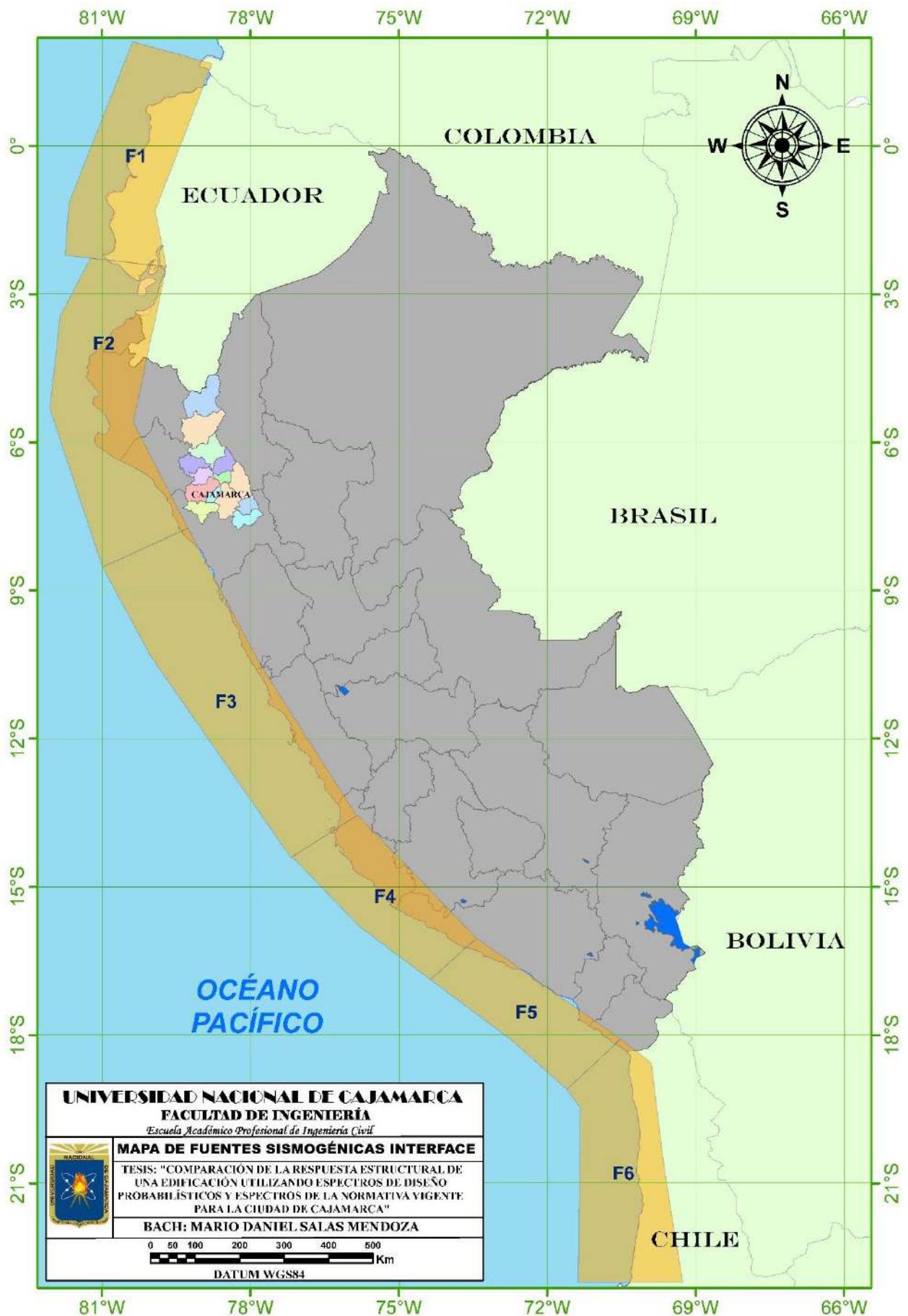


Figura N° 5 Mapa de fuentes sismogénicas interface en base a la data de SENCICO (2016)



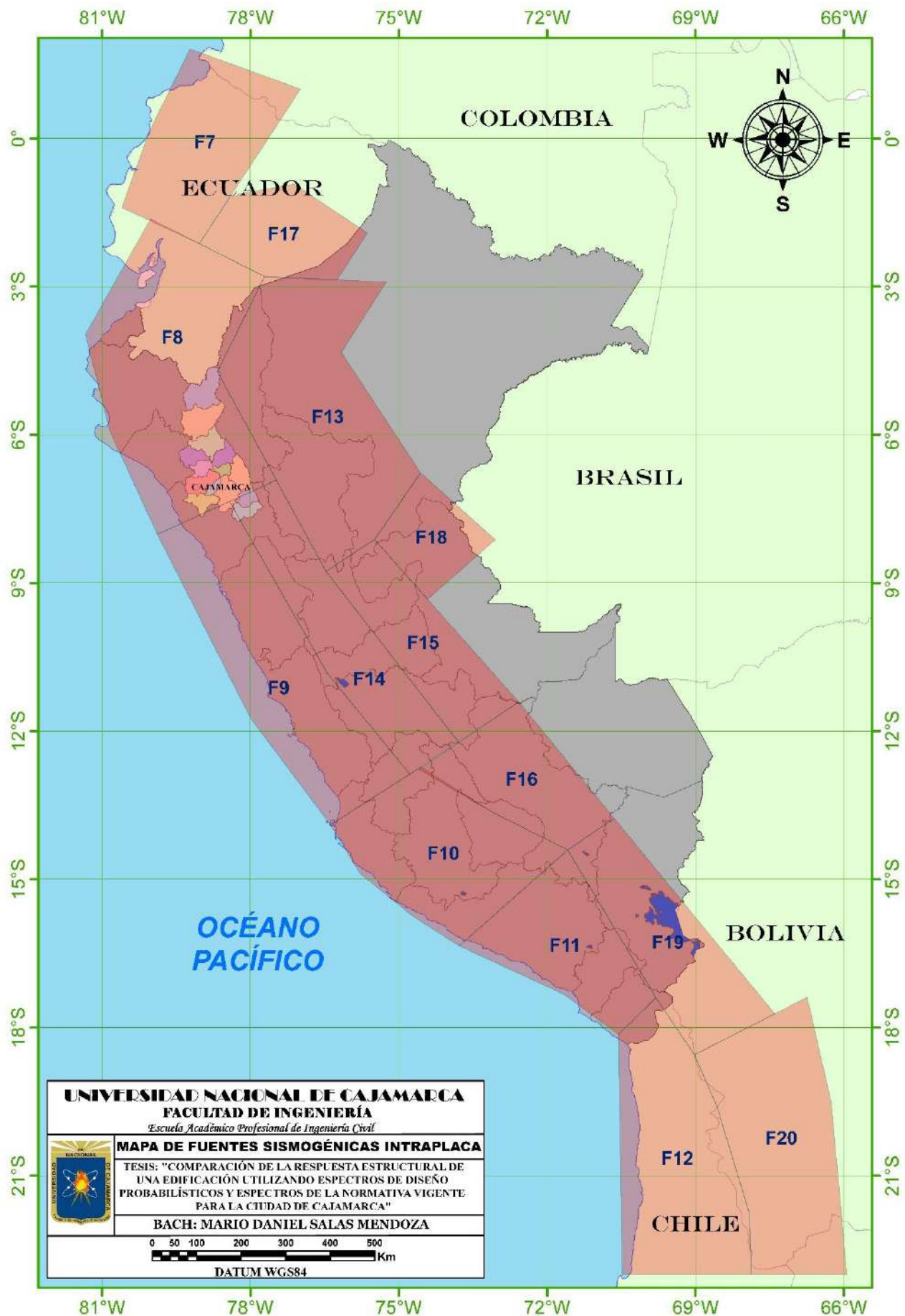


Figura N° 6 Mapa de fuentes sismogénicas intraplaca en base a la data de SENCICO (2016)

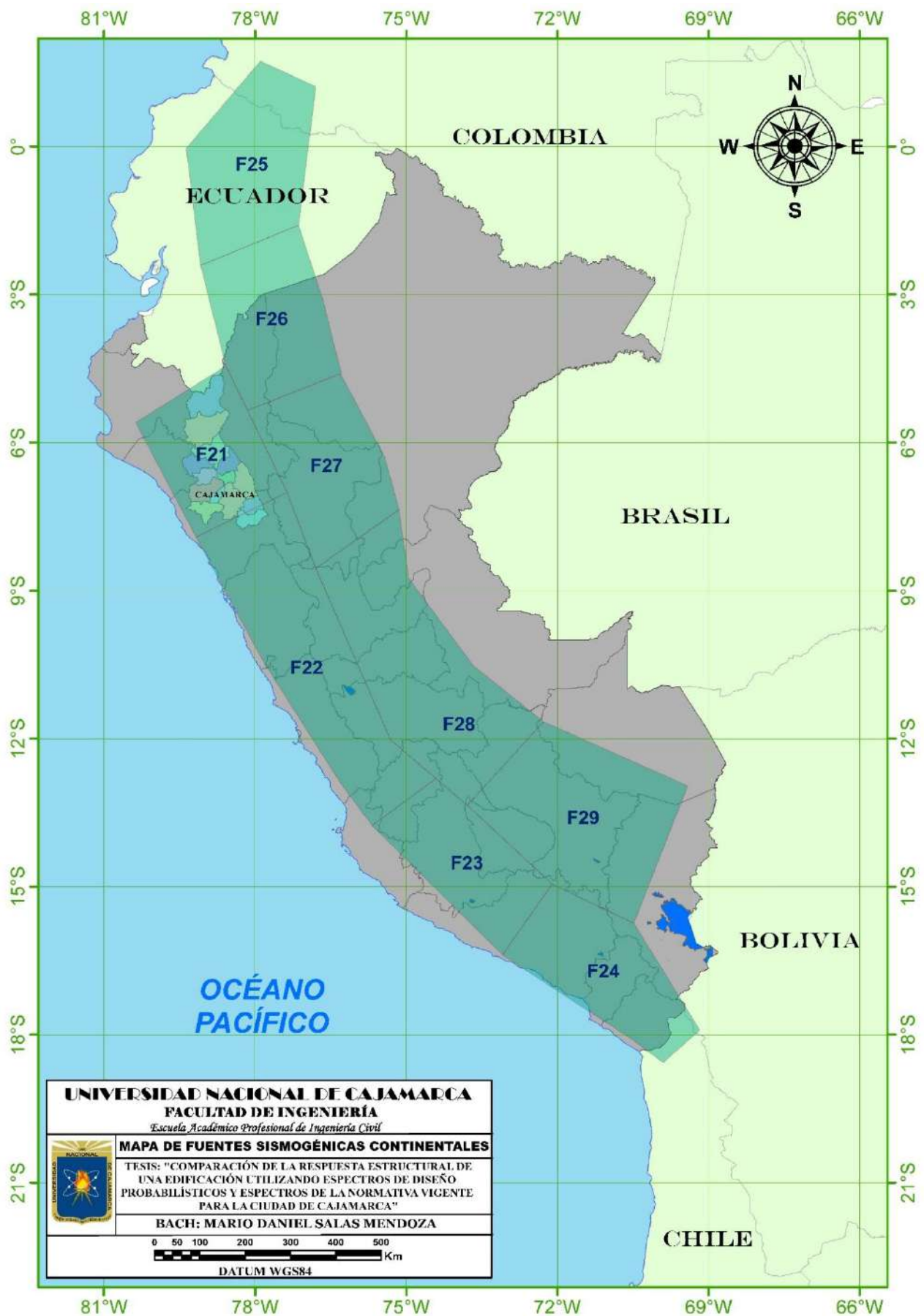


Figura N° 7 Mapa de fuentes sismogénicas continentales en base a la data de SENCICO (2016)

#### 2.2.7.4. Recurrencia sísmica.

En este estudio de SENCICO se procedió a la utilización de la Ley de Gutenberg y Richter, como se muestra en Roncal Castro (2017). Esta ley fue postulada en 1944, para enmarcar una relación en la frecuencia media anual de las actividades sísmicas para una cierta magnitud  $M$  determinada, y caracterizando así la región acorde a las diferentes fuentes sismogénicas. Esta ley se define de la siguiente forma:

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

Donde:

$N$ : Número de eventos mayores o iguales a una determinada magnitud  $M$ .

$a$ : Parámetro de capacidad de una determinada zona para generar terremotos.

$b$ : Coeficiente que indica la proporción de sismo pequeños con respecto a la cantidad de eventos mayores.

Se detalla de forma concisa la anterior ecuación (Ley de Gutenberg y Richter) ya que está será utilizada como modelo de ocurrencia en el software CRISIS 2015 versión 4.1 y R-CRISIS versión 18.4.2.

Definidas ya las fuentes sismogénicas y la ley de recurrencia sísmica utilizada, se muestra a continuación los parámetros sismológicos para cada fuente sismogénica obtenidos en el estudio de SENCICO.

**Tabla N° 5** Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas

Fuentes	Mw			
	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	$\beta$	Tasa
F1	4.3	8.1	1.286	3.100
F2	4.5	8.0	1.302	4.200
F3	4.8	8.4	1.732	3.980
F4	4.4	8.4	1.730	6.620
F5	4.8	8.4	1.473	2.580
F6	4.5	8.4	1.344	3.530
F7	4.1	7.9	0.991	1.300
F8	4.4	6.6	1.990	3.380
F9	4.5	7.9	1.939	6.510
F10	4.5	7.0	1.805	6.570
F11	4.8	7.8	2.251	4.850
F12	4.8	7.7	2.580	19.000
F13	4.3	7.4	1.491	3.710
F14	4.2	6.6	1.280	2.070
F15	4.6	6.0	2.334	2.520
F16	4.1	6.9	1.307	1.250

**Tabla N° 5** Parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas (continuación)

Fuentes	Mw			
	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	$\beta$	Tasa
F17	4.4	7.3	1.697	3.870
F18	4.8	7.1	2.413	3.130
F19	4.8	7.0	2.307	2.920
F20	4.5	7.7	2.352	11.700
F21	4.0	7.1	0.580	0.461
F22	4.1	7.2	1.068	1.320
F23	4.5	7.0	1.384	0.675
F24	4.4	7.4	1.314	1.280
F25	4.2	7.0	1.133	2.040
F26	4.6	6.7	1.384	0.889
F27	4.8	6.8	2.162	1.270
F28	4.5	7.0	1.667	2.850
F29	4.3	7.1	1.259	1.420

**Fuente:** SENCICO, 2016, p. 29

Esta data sismológica proporcionada por la investigación de SENCICO ya ha sido tomada para diversos trabajos de estudio (ver por ejemplo Malpartida Pino 2017, Campos Irigoín 2019) y será utilizada en la presente tesis.

## 2.2.8. LEY DE ATENUACIÓN.

### 2.2.8.1. Definición.

*“La ley de atenuación es una expresión semiempírica, que relaciona magnitud, distancia e intensidad del registro de un sismo y describe la forma de disipación de energía que se libera en el epicentro”* (Moncayo et al., 2017).

### 2.2.8.2. Leyes de atenuación en estudio.

Cada una de estas leyes de atenuación varía de acuerdo a la fuente sismogénica (subducción interfase, subducción intraplaca y continental).

#### a) Ley de atenuación de Youngs et al. (1997).

Youngs et al. (1997) presentaron una ley de atenuación para sismos en zonas de subducción interface e intraplaca para distancias que van de 10 a 500 km utilizando registros sísmicos de diferentes regiones entre ellos Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú (11 registros) y las Islas Salomón. Estos registros tuvieron un momento magnitud por encima de 5, en donde para Perú los valores fluctuaban entre 5.3 y 8.1. La ley de atenuación que es aplicada en sismos de subducción para la aceleración espectral de respuesta horizontal (5% de amortiguamiento) en roca es como sigue.

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T \quad (2)$$

$$Desviación\ estándar = C_4 + C_5M \quad (3)$$

Donde:

$y$  : Aceleración espectral en g.

$M$  : Magnitud momento (Mw).

$r_{rup}$  : Distancia más cercana al área de ruptura (km).

$H$  : Profundidad (km).

$Z_T$  : Tipo de fuente, 0 para interface, 1 para intraplaca.

Los coeficientes  $C_1$  a  $C_5$  se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla N° 6** Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca.

Periodo (s)	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> *	C <sub>5</sub> *
PGA	0.000	0.00	-2.552	1.45	-0.10
0.075	1.275	0.00	-2.707	1.45	-0.10
0.100	1.188	0.0	-2.655	1.45	-0.10
0.200	0.722	-0.0027	-2.528	1.45	-0.10
0.300	0.246	-0.0036	-2.454	1.45	-0.10
0.400	-0.115	-0.0043	-2.401	1.45	-0.10
0.500	-0.400	-0.0048	-2.360	1.45	-0.10
0.750	-1.149	-0.0057	-2.286	1.45	-0.10
1.000	-1.736	-0.0064	-2.234	1.45	-0.10
1.500	-2.634	-0.0073	-2.160	1.50	-0.10
2.000	-3.328	-0.0080	-2.107	1.55	-0.10
3.000	-4.511	-0.0089	-2.033	1.65	-0.10

\* Desviación estándar para magnitudes  $M > 8$  considerar  $M = 8$ .

**Fuente:** Youngs et al., 1997, p. 67

#### b) Ley de atenuación de Boore y Atkinson (2003).

Atkinson y Boore (2003) para la generación de su ley de atenuación han compilado una base de datos de espectros de respuesta de miles de registros de movimiento del suelo (Cascadia, Japón, México y Centroamérica) para eventos de magnitud que varían entre 5 y 8.3 en zonas de subducción ocurridos alrededor del mundo. La ley de atenuación que se llegó a concluir es como sigue:

$$\log Y = fn(M) + c_3h + c_4R - g \log R + c_5slS_C + c_6slS_D + c_7slS_E \quad (4)$$

Donde:

$Y$ : Aceleración pico o pseudoaceleración con 5% de amortiguamiento (PSA) en cm/s componente horizontal aleatoria.

$M$ : Magnitud momento (usar 8.5 para eventos de interfase de  $M > 8.5$ , para eventos de intraplaca de  $M \geq 8$ ).

$fn(M)$ :  $c_1 + c_2M$ .

$h$ : Profundidad focal en kilómetros.

$R$ :  $\sqrt{(D_{fault}^2 - \Delta^2)}$  con  $D_{fault}$  siendo la distancia más cercana a la superficie de la falla, en kilómetros (usar  $h = 100$  km para eventos con profundidad  $> 100$  km) y  $\Delta$ , una fuente cercana de saturación, dada por  $\Delta = 0.00724 \times 10^{0.507M}$ .

$S_C$ : 1 para NERHP suelo C, 0 para los demás.

$S_D$ : 1 para NERHP suelo D, 0 para los demás.

$S_E$ : 1 para NERHP suelo E, 0 para los demás.

$g$ :  $10^{(1.2-0.18M)}$  para eventos interfase y  $10^{(0.301-0.01M)}$  para eventos intraplaca.

$sl$ : 1 para  $PGA_{rx} \leq 100$  cm/s<sup>2</sup> o frecuencias  $\leq 1$  Hz.

$sl$ :  $1-(f-1)(PGA_{rx}-100)/400$  para  $100 < PGA_{rx} < 500$  cm/s<sup>2</sup> ( $1\text{ Hz} < f < 2\text{ Hz}$ ).

$sl$ :  $1-(f-1)$  para  $PGA_{rx} \geq 500$  cm/s<sup>2</sup> ( $1\text{ Hz} < f < 2\text{ Hz}$ ).

$sl$ :  $1-(PGA_{rx}-100)/400$  para  $100 < PGA_{rx} < 500$  cm/s<sup>2</sup> ( $f \geq 2\text{ Hz}$  y PGA).

$sl$ : 0 para  $PGA_{rx} \geq 500$  cm/s<sup>2</sup> ( $f \geq 2\text{ Hz}$  y PGA).

Cabe recalcar que  $PGA_{rx}$  predice el PGA en roca (NERHP B). Los coeficientes utilizados por Atkinson y Boore (2003) se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla N° 7** Coeficientes de atenuación de aceleración espectral en roca para eventos de interfase

Frecuencia	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
0.33	2.301	0.02237	0.00012	0.000	0.10	0.25	0.36
0.5	2.1907	0.07148	0.00224	0.000	0.10	0.25	0.40
1	2.1442	0.1345	0.00521	-0.00110	0.10	0.30	0.55
2.5	2.5249	0.1477	0.00728	-0.00235	0.13	0.37	0.38
5	2.6638	0.12386	0.00884	-0.00280	0.15	0.27	0.25
10	2.7789	0.09841	0.00974	-0.00287	0.15	0.23	0.20
25	2.8753	0.07052	0.01004	-0.00278	0.15	0.20	0.20
PGA	2.991	0.03525	0.00759	-0.00206	0.19	0.24	0.29

**Fuente:** Atkinson y Boore, 2003, p. 1715

**Tabla N° 8** Coeficientes de atenuación de aceleración espectral en roca para eventos de intraplaca

Frecuencia	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
0.33	-3.70012	1.1169	0.00615	-0.00045	0.10	0.25	0.36
0.5	-2.39234	0.9964	0.00364	-0.00118	0.10	0.25	0.40
1	-1.02133	0.8789	0.00130	-0.00173	0.10	0.30	0.55
2.5	0.005445	0.7727	0.00173	-0.00178	0.13	0.37	0.39
5	0.51589	0.69186	0.00572	-0.00192	0.15	0.27	0.25
10	0.43928	0.66675	0.01080	-0.00219	0.15	0.23	0.20
25	0.50697	0.63273	0.01275	-0.00234	0.15	0.20	0.20
PGA	-0.04713	0.6909	0.01130	-0.00202	0.19	0.24	0.29

**Fuente:** Atkinson y Boore, 2003, p. 1715

**c) Ley de atenuación de Zhao et al. (2006).**

Zhao et al. (2006) desarrollaron una ley de atenuación para sismos de subducción de interface e intraplaca con registros sísmicos de Japón (en su gran mayoría actualizados hasta el 2003), Irán y el oeste de Estados Unidos para mecanismos de subducción cortical, interfase e intraplaca.

La ley de atenuación que se llegó a concluir para un 5% de amortiguamiento en roca es como sigue:

$$\log_e(y_{i,j}) = aM_{Wi} + bx_{i,j} - \log_e(r_{i,j}) + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \log_e(x_{i,j}) + C_k + \xi_{i,j} + \eta_i \quad (5)$$

$$r_{i,j} = x_{i,j} + c \exp(dM_{Wi}) \quad (6)$$

Donde:

$y$  : Valor de PGA (cm/s<sup>2</sup> o gals) con 5% de amortiguamiento de aceleración en el espectro de respuesta para un periodo espectral T.

$M_{Wi}$  : Magnitud momento.

$x$  : Distancia a la fuente (km).

$h$  : Profundidad focal (km). Para  $h > 125$  km,  $h = 125$  km.

$F_R$  : Parámetro de falla reversa aplicado solo para eventos corticales y es cero para cualquier otro evento.

$S_I$  : Parámetro tectónico por el tipo de fuente para eventos de interface y es cero para cualquier otro evento.

$S_S$  : Parámetro tectónico por el tipo de fuente para eventos de intraplaca y es cero para cualquier otro evento.

$S_{SL}$  : Parámetro independiente de la magnitud que conduce una modificación referente a los eventos intraplaca.

$C_k$  : Término obtenido de la clasificación de sitio. Se consideró un suelo tipo roca ( $C_k = C_1$ ).

$i, j$  : Subíndices que indican el número del evento y el número de registro del evento, respectivamente.

$h_c$  : Constante de profundidad.

$\eta_i$  : Variable aleatoria del error intra-evento.

El término  $e(h - h_c)$  tiene un efecto que depende de  $\delta_h$  que toma el valor de 0 para  $h < h_c$  y 1 para  $h \geq h_c$ .

Los coeficientes utilizados por Zhao et al. (2006) se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla N° 9** Coeficientes de atenuación para la aceleración espectral a nivel de roca

Periodo (s)	a	b	c	d	e	F <sub>R</sub>	S <sub>I</sub>	S <sub>S</sub>	S <sub>SL</sub>	C <sub>1</sub>
PGA	1.101	-0.00564	0.0055	1.080	0.01412	0.251	0.000	2.607	-0.528	1.111
0.05	1.076	-0.00671	0.0075	1.060	0.01463	0.251	0.000	2.764	-0.551	1.684
0.10	1.118	-0.00787	0.0090	1.083	0.01423	0.240	0.000	2.156	-0.420	2.061
0.15	1.134	-0.00722	0.0100	1.053	0.01509	0.251	0.000	2.161	-0.431	1.916
0.20	1.147	-0.00659	0.0120	1.014	0.01462	0.260	0.000	1.901	-0.372	1.669
0.25	1.149	-0.00590	0.0140	0.966	0.01459	0.269	0.000	1.814	-0.360	1.468
0.30	1.163	-0.00520	0.0150	0.934	0.01458	0.259	0.000	2.181	-0.450	1.172
0.40	1.200	-0.00422	0.0100	0.959	0.01257	0.248	-0.041	2.432	-0.506	0.655
0.50	1.250	-0.00338	0.0060	1.008	0.01114	0.247	-0.053	2.629	-0.554	0.071
0.60	1.293	-0.00282	0.0030	1.088	0.01019	0.233	-0.103	2.702	-0.575	-0.429
0.70	1.336	-0.00258	0.0025	1.084	0.00979	0.220	-0.146	2.654	-0.572	-0.866
0.80	1.386	-0.00242	0.0022	1.088	0.00944	0.232	-0.164	2.480	-0.540	-1.325
0.90	1.433	-0.00232	0.0020	1.109	0.00972	0.220	-0.206	2.332	-0.522	-1.732
1.00	1.479	-0.00220	0.0020	1.115	0.01005	0.211	-0.239	2.233	-0.509	-2.152
1.25	1.551	-0.00207	0.0020	1.083	0.01003	0.251	-0.256	2.029	-0.469	-2.923
1.50	1.621	-0.00224	0.0020	1.091	0.00928	0.248	-0.306	1.589	-0.379	-3.548
2.00	1.694	-0.00201	0.0025	1.055	0.00833	0.263	-0.321	0.966	-0.248	-4.410
2.50	1.748	-0.00187	0.0028	1.052	0.00776	0.262	-0.337	0.789	-0.221	-5.049
3.00	1.759	-0.00147	0.0032	1.025	0.00644	0.307	-0.331	1.037	-0.263	-5.431
4.00	1.826	-0.00195	0.0040	1.044	0.00590	0.353	-0.390	0.561	-0.169	-6.181
5.00	1.825	-0.00237	0.0050	1.065	0.00510	0.248	-0.498	0.225	-0.120	-6.347

Fuente: Zhao et al., 2006, p. 903

**d) Ley de atenuación de Abrahamson et al. (2016).**

Abrahamson et al. (2016) realizó unas leyes de atenuación en base a la data de Atkinson y Boore del año 2003 combinada con la de Japón, Taiwán, Sudamérica, América Central, incluido México. Se coleccionó 3557 pares de registros de componentes horizontales de 163 eventos de interface y 6389 pares de registros de componentes horizontales de 129 eventos de intraplaca. Los modelos de leyes de atenuación son como sigue:



Para interface:

$$\ln Sa = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + [\theta_2 + \theta_3(M - 7.8)] \ln\{R_{rup} + C_4 \exp[\theta_9(M - 6)]\} + \theta_6 R_{rup} + f_{mag} + f_{FABA} + f_{site} \quad (7)$$

Para intraplaca:

$$\ln Sa = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + [\theta_2 + \theta_{14} F_{event} + \theta_3(M - 7.8)] \ln\{R_{hypo} + C_4 \exp[\theta_9(M - 6)]\} + \theta_6 R_{hypo} + \theta_{10} F_{event} + f_{mag} + f_{depth} + f_{FABA} + f_{site} \quad (8)$$

Donde:

$Sa$  : Aceleración espectral en g.

$M$  : Magnitud momento.

$F_{event}$ : 0 para sismos de interface y 1 para eventos de intraplaca.

Debido a la gran cantidad de factores y coeficientes que intervienen en estas leyes de atenuación no nos centraremos en profundizar a detalle estos valores, pero se encuentran de manera más clara en Abrahamson et al. (2016).

#### e) Ley de atenuación de Sadigh et al. (1997).

Sadigh et al. (1997) han propuesto leyes de atenuación en base a registros sísmicos de California y en datos obtenidos de los sismos de Gazli, Rusia (1976) y Tabas, Irán (1978). Dichos eventos sísmicos tienen una magnitud momento por encima de los 3.8 registrados en sitios dentro de los 200 km de superficie de ruptura. La ley de atenuación que es aplicada en sismos continentales para la aceleración espectral de respuesta horizontal (5% de amortiguamiento) en roca es como sigue.

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + e^{C_5 + C_6 M}) + C_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (9)$$

Donde:

$y$  : Aceleración espectral en g.

$M$  : Magnitud momento (Mw).

$r_{rup}$  : Distancia más cercana al área de ruptura (km).

Los coeficientes  $C_1$  a  $C_7$  se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla N° 10** Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca ( $M \leq 6.5$ )

Periodo (s)	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
PGA	-0.624	1.0	0.000	-2.100	1.29649	0.250	0.0
0.07	0.110	1.0	0.006	-2.128	1.29649	0.250	-0.082
0.10	0.275	1.0	0.006	-2.148	1.29649	0.250	-0.041
0.20	0.153	1.0	-0.004	-2.080	1.29649	0.250	0.0
0.30	-0.057	1.0	-0.017	-2.028	1.29649	0.250	0.0
0.40	-0.298	1.0	-0.028	-1.990	1.29649	0.250	0.0
0.50	-0.588	1.0	-0.040	-1.945	1.29649	0.250	0.0
0.75	-1.208	1.0	-0.050	-1.865	1.29649	0.250	0.0
1.00	-1.705	1.0	-0.055	-1.800	1.29649	0.250	0.0
1.50	-2.407	1.0	-0.065	-1.725	1.29649	0.250	0.0
2.00	-2.945	1.0	-0.070	-1.670	1.29649	0.250	0.0
3.00	-3.700	1.0	-0.080	-1.610	1.29649	0.250	0.0
4.00	-4.230	1.0	-0.100	-1.570	1.29649	0.250	0.0

**Fuente:** Sadigh et al., 1997, p. 185

**Tabla N° 11** Coeficientes de atenuación de aceleraciones espectrales en roca ( $M > 6.5$ )

Periodo (s)	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
PGA	-1.274	1.1	0.000	-2.100	-0.48451	0.524	0.0
0.07	-0.540	1.1	0.006	-2.128	-0.48451	0.524	-0.082
0.10	-0.375	1.1	0.006	-2.148	-0.48451	0.524	-0.041
0.20	-0.497	1.1	-0.004	-2.080	-0.48451	0.524	0.0
0.30	-0.707	1.1	-0.017	-2.028	-0.48451	0.524	0.0
0.40	-0.948	1.1	-0.028	-1.990	-0.48451	0.524	0.0
0.50	-1.238	1.1	-0.040	-1.945	-0.48451	0.524	0.0
0.75	-1.858	1.1	-0.050	-1.865	-0.48451	0.524	0.0
1.00	-2.355	1.1	-0.055	-1.800	-0.48451	0.524	0.0
1.50	-3.057	1.1	-0.065	-1.725	-0.48451	0.524	0.0
2.00	-3.595	1.1	-0.070	-1.670	-0.48451	0.524	0.0
3.00	-4.350	1.1	-0.080	-1.610	-0.48451	0.524	0.0
4.00	-4.880	1.1	-0.100	-1.570	-0.48451	0.524	0.0

**Fuente:** Sadigh et al., 1997, p. 185

**f) Ley de atenuación de Campbell y Bozorgnia (2014).**

Campbell y Bozorgnia (2014) investigaron una ley de atenuación con una base de datos del NGA-West2. En donde, se sabe que, según Power et al. (2008), el proyecto NGA (Next generation of ground-motion attenuation models) es un programa de investigación multidisciplinario coordinado por el PEER en sociedad con el U.S. Geological Survey y el Southern California Earthquake Center cuyo objetivo es desarrollar nuevas relaciones de predicción del movimiento del suelo; es decir, leyes de atenuación para terremotos corticales poco profundos al oeste de Estados Unidos y regiones tectónicas de actividad similar. Por otro lado, esta ley de atenuación fue desarrollada para el promedio de las

componentes horizontales de la aceleración pico (PGA), velocidad pico (PGV) y el amortiguamiento elástico de 5% de respuesta de aceleración espectral (PSA). Finalmente, el NGA-West2 incluye más de 21000 registros de estas tres componentes en los sismos de California y del mundo con rangos de magnitud momento de 3.0 a 7.9, y generalmente en un rango de ruptura entre 80 km y 500 km.

De forma general la ley de atenuación es como sigue:

$$\ln Y = \begin{cases} \ln PGA & PSA < PGA \text{ y } T < 0.25 \text{ s.} \\ f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atm} & \end{cases} \quad (10)$$

Donde  $Y$  es la medida de intensidad de interés en términos de  $f$ , y para cada sumando de forma ordenada representa la magnitud del sismo, la atenuación geométrica, el tipo de fallamiento, la geometría del “hanging wall”, la respuesta de sitio, la respuesta de área, la profundidad hipocentral, la inclinación de falla y la atenuación inelástica, respectivamente. Los valores de los términos de  $f$  conjuntamente con sus coeficientes son detallados en Campbell y Bozorgnia (2014).

#### **g) Ley de atenuación de Chiou y Youngs (2014).**

Chiou y Youngs (2014) modificaron su modelo del 2008, específicamente en las distancias de 70 km o menos. En esta actualización se utilizó la distancia máxima empleable ( $R_{m\acute{a}x}$ ) en cada sismo de manera de tener un rango mayor a 70 km en la data. Por otro lado, en la evaluación preliminar de la data de NGA-West2 (descrito anteriormente) indica la necesidad de incluir la regionalización para el reporte de diferencias regionales en la atenuación por distancia y respuesta del suelo de la fuente distante, por lo que la base de datos para la actualización del modelo fue restringida principalmente para movimientos de campos libres de sismos corticales en California.

Debido a la complejidad de la ley de atenuación, no se la detallará en este apartado, pero ya se encuentra definida en el software CRISIS 2015 versión 4.1 y R-CRISIS Ver. 18.4.2.

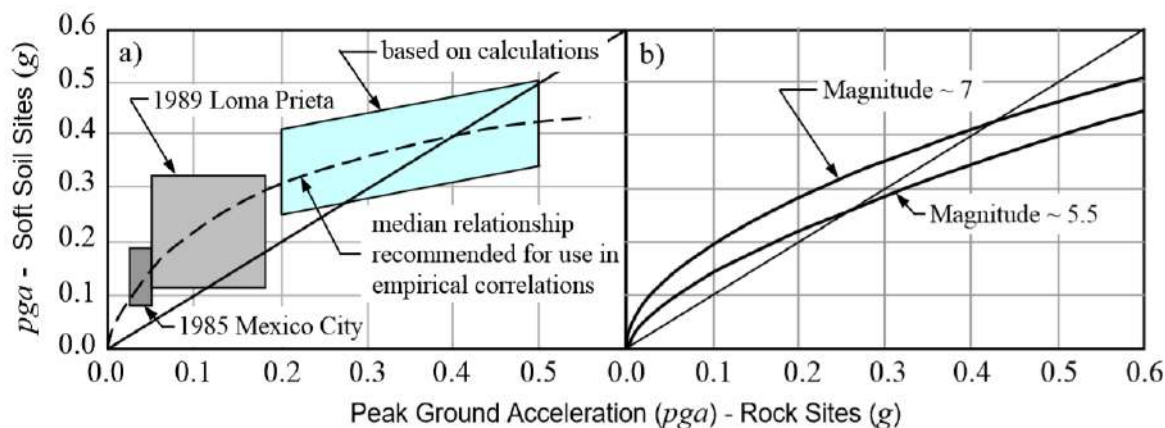
#### **2.2.9. EFECTOS DE SITIO.**

Según CENAPRED (1999) se sabe que el efecto de sitio ocasionado en un determinado emplazamiento relativamente reducido, viene a ser la respuesta sísmica que presenta esta zona diferenciada específicamente en propiedades significativas como duración, amplitud y contenido de frecuencias de un sismo. Es decir, un área con características de efecto de sitio se llega a verificar con las intensidades sísmicas del movimiento del suelo muy

diferenciadas sin haber una correlación con la atenuación normal de la energía sísmica liberada con el recorrido.

El efecto de sitio se da fundamentalmente en función de las particularidades geométricas de las zonas geológicas (topografía, potencia y distribución de los estratos, etc.) y de los parámetros mecánicos de los materiales (densidad, velocidades de ondas P y S, amortiguamientos, etc.). Por tanto, las condiciones locales del sitio también influyen en la frecuencia de movimientos de la superficie y por ende de los espectros de respuesta que se ocasionan (Kramer, 1996).

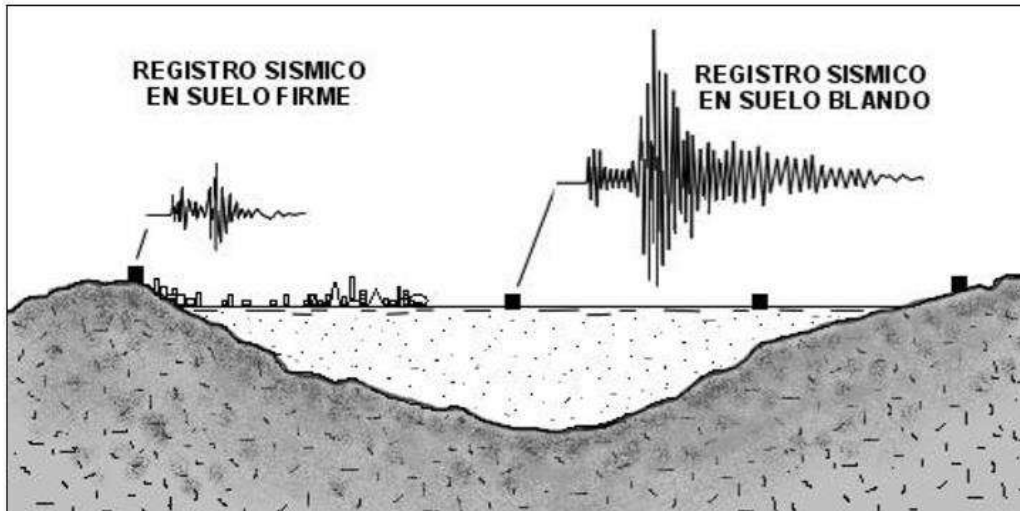
Si se compara las máximas aceleraciones entre sitios con distintos tipos de perfiles estratigráficos de suelo, se aprecia diferentes predisposiciones en el comportamiento de la amplificación, se ha encontrado que en suelos blandos es superior que en roca cuando los niveles de aceleración son bajos (sismos de pequeña magnitud). Esta disposición tiende a revertirse cuando existe aceleraciones altas; para mayores aceleraciones se muestra que las amplificaciones en suelo duro son mayores que en las de suelo blando (Frau, 2018), como se aprecia en la siguiente figura.



**Figura N° 8** PGA en roca vs PGA en suelo blando (a) y (b)

**Fuente:** Cameron y Green, 2004

Daños significantes y pérdidas de vida han sido relacionados directamente a los efectos de sitios de las condiciones locales en los recientes terremotos, tales como el de 1964 de Niigata, 1977 de Bucharest, 1985 de Ciudad de México, 1988 de Armenia, 1989 de Loma Prieta, 1990 de Irán, 1994 de Northridge, 1995 de Kobe, 1999 de Kocaeli y 2009 de Aquila; como se describe en Gioncu y Mazzolani (2011), pero la diferencia de amplitud debida al efecto del suelo se notó exhaustivamente en el sismo de México de 1985 (para profundizar en el tema ver por ejemplo CENAPRED, 1999, p. 143), en donde el perfil del suelo modificó enormemente el registro sísmico, análogo al mostrado en la siguiente figura.



**Figura N° 9** Diferencias de amplitud en registros sísmicos obtenidos en distintos tipos de suelo para un mismo sismo

**Fuente:** CENAPRED, 2014

## 2.2.10. CLASIFICACIÓN DE SITIO.

### 2.2.10.1. Clasificación de sitio según el ASCE/SEI 7-10, ASCE/SEI 7-16, ATC 40, IBC y NEHRP.

El ASCE/SEI 7-10 (2010), ASCE/SEI 7-16 (2017), ATC 40 (1996), IBC (2006) y NEHRP (2003) guardan la siguiente clasificación de sitio.

**Tabla N° 12** Clasificación de sitio acorde a normas americanas

Perfil de suelo	Clase de sitio	Propiedades promedio del suelo para 100 pies superiores del perfil de suelo		
		$V_s$	$\bar{N}$	$\bar{s}_u$
A	Roca dura	> 5000 fts/s > 1500 m/s	NA	NA
B	Roca	2500 fts/s a 5000 fts/s 760 m/s a 1500 m/s	NA	NA
C	Suelo muy denso y roca blanda	1200 fts/s a 2500 fts/s 360 m/s a 760 m/s	> 50	> 2000 psf > 0.98 kgf/cm <sup>2</sup>
D	Suelo rígido	600 fts/s a 1200 fts/s 180 m/s a 360 m/s	15 a 50	1000 psf a 2000 psf 0.49 kgf/cm <sup>2</sup> a 0.98 kgf/cm <sup>2</sup>

**Tabla N° 12** Clasificación de sitio acorde a normas americanas (continuación)

Perfil de suelo	Clase de sitio	Propiedades promedio del suelo para 100 pies superiores del perfil de suelo		
		$V_s$	$\bar{N}$	$\bar{s}_u$
		< 600 fts/s < 180 m/s	< 15	< 1000 psf < 0.49 kgf/cm <sup>2</sup>
E	Suelo arcilloso blando	Cualquier perfil con más de 10 ft de suelo que tenga las siguientes características:		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Índice de plasticidad <math>PI &gt; 20</math></li> <li>❖ Contenido de humedad <math>w \geq 40\%</math></li> <li>❖ Resistencia al corte no drenado <math>\bar{s}_u &lt; 500</math> psf (0.24 kgf/cm<sup>2</sup>)</li> </ul>		
		Cualquier perfil de suelo que tenga una o más de las siguientes características:		
F	Suelos que requieren un análisis de respuesta	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Suelos vulnerables a fallas potenciales o colapso bajo cargas sísmicas, tales como suelos licuables, arcillas rápidas y altamente sensibles, suelos colapsables débilmente cementados.</li> <li>❖ Turbas y/o arcillas altamente orgánicas [<math>H &gt; 10</math> ft (3 m)] de turba o arcilla altamente orgánica donde <math>H</math> = espesor de suelo.</li> <li>❖ Arcillas de muy alta plasticidad [<math>H &gt; 25</math> ft (7.6 m) con <math>PI &gt; 75</math>].</li> <li>❖ Arcillas muy suaves/medias rígidas. [<math>H &gt; 120</math> ft (37 m) con <math>s_u &lt; 1000</math> psf (0.49 kgf/cm<sup>2</sup>).</li> </ul>		

**Fuente:** Adaptado de ASCE/SEI 7-10 (2010), ASCE/SEI 7-16 (2017), ATC 40(1996), IBC (2006) y NEHRP (2003)

### 2.2.10.2. Clasificación de sitio según el Eurocódigo 8.

**Tabla N° 13** Clasificación de sitio acorde al Eurocódigo 8

Tipo de suelo	Descripción estratigráfica del perfil	Parámetros		
		$V_{s30}$ (m/s)	$N_{SPT}$	$c_u$ (kPa)
A	Roca u otra formación geológica similar a una roca, incluyendo como máximo 5 m de material más débil en la superficie.	> 800	-	-
B	Depósitos de arena muy densa, grava o arcilla muy rígida, al menos varias decenas de metros de espesor, caracterizadas por un aumento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad.	360 – 800	> 50	> 250

**Tabla N° 13** Clasificación de sitio acorde al Eurocódigo 8 (continuación)

Tipo de suelo	Descripción estratigráfica del perfil	Parámetros		
		V <sub>s30</sub> (m/s)	N <sub>SPT</sub>	c <sub>u</sub> (kPa)
C	Depósitos profundos de arena densa o medianamente densa, grava o arcilla rígida con espesor de varias decenas a muchos cientos de metros.	180 – 360	15 – 50	70 – 250
D	Depósito de suelo cohesivo suelto a medio (con o sin algunas capas cohesivas suaves), o de suelo cohesivo predominantemente blando a firme	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de suelo que consiste en una capa de aluvión superficial con valores V <sub>s</sub> de tipo C o D y espesor entre 5 m y 20 m, subyacentes por material más rígido con V <sub>s</sub> >800 m/s			

**Fuente:** Adaptado de CEN, 2004, p. 34

### 2.2.10.3. Clasificación de sitio según código chino GB50011-2010.

**Tabla N° 14** Clasificación de sitio acorde al código chino GB50011-2010

Tipo de suelo	Nombre y carácter del suelo o roca	Alcance de la velocidad de onda de corte de la capa del suelo (m/s)
Roca	Rocas rígidas, duras y completas	$V_s > 800$
Suelo rígido o roca suave	Roca quebrada y relativamente rota; roca blanda y relativamente suave; suelo de grava compacta.	$500 < V_s \leq 800$
Suelo medio rígido	Detrito medio denso o ligeramente denso; grava densa o medianamente densa; arenas gruesas o medianas; suelo cohesivo y limo con $f_{ak} > 150\text{kPa}$ ; loess duro.	$250 < V_s \leq 500$
Suelo medio blando	Grava ligeramente densa; arenas gruesas y medianas; arenas finas y harinosas (excluyendo la arena suelta), suelo cohesivo y limo con $f_{ak} \leq 150\text{kPa}$ ; suelo lleno con $f_{ak} > 130\text{kPa}$	$150 < V_s \leq 250$

**Tabla N° 14** Clasificación de sitio acorde al código chino GB50011-2010 (continuación)

Tipo de suelo	Nombre y carácter del suelo o roca	Alcance de la velocidad de onda de corte de la capa del suelo (m/s)
Suelo blando	Barro y tierra fangosa; arena suelta; nuevo suelo cohesivo sedimentado y limo; suelo lleno con $f_{ak} \leq 130$ kPa; flujo plástico de loess	$V_s \leq 150$

Nota:  $f_{ak}$  es el valor característico de la capacidad portante obtenida mediante prueba de carga u otros métodos,  $V_s$  es la velocidad de onda de corte de roca o suelo.

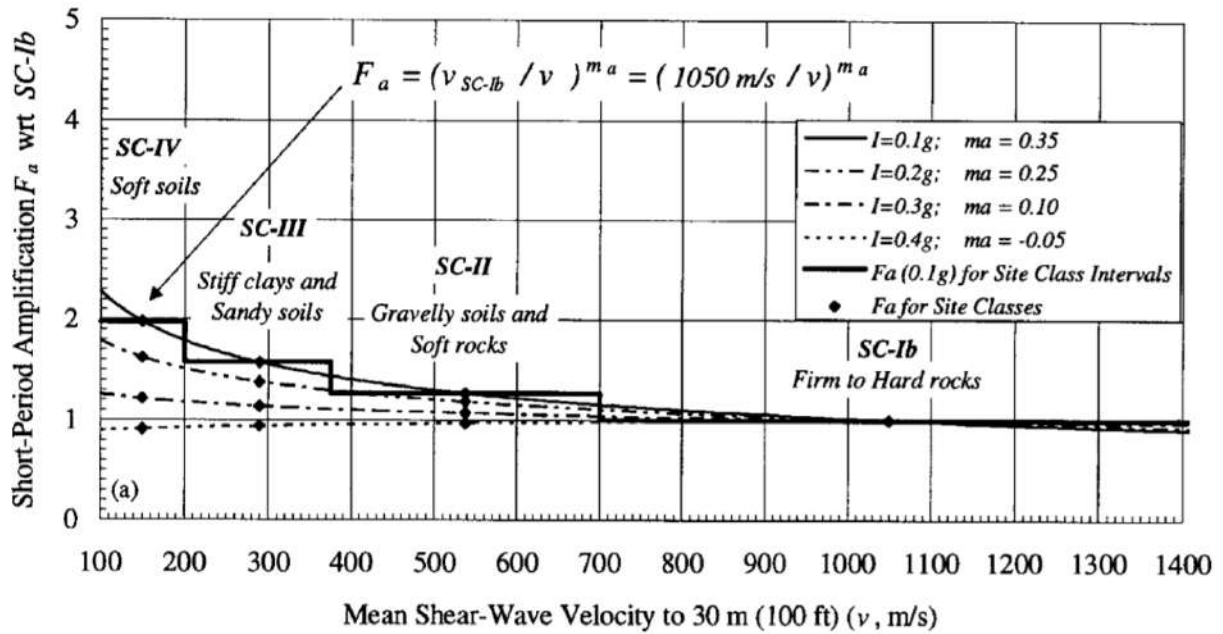
**Fuente:** Adaptado de GB 50011–2010, 2010, p. 17

### 2.2.11. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.

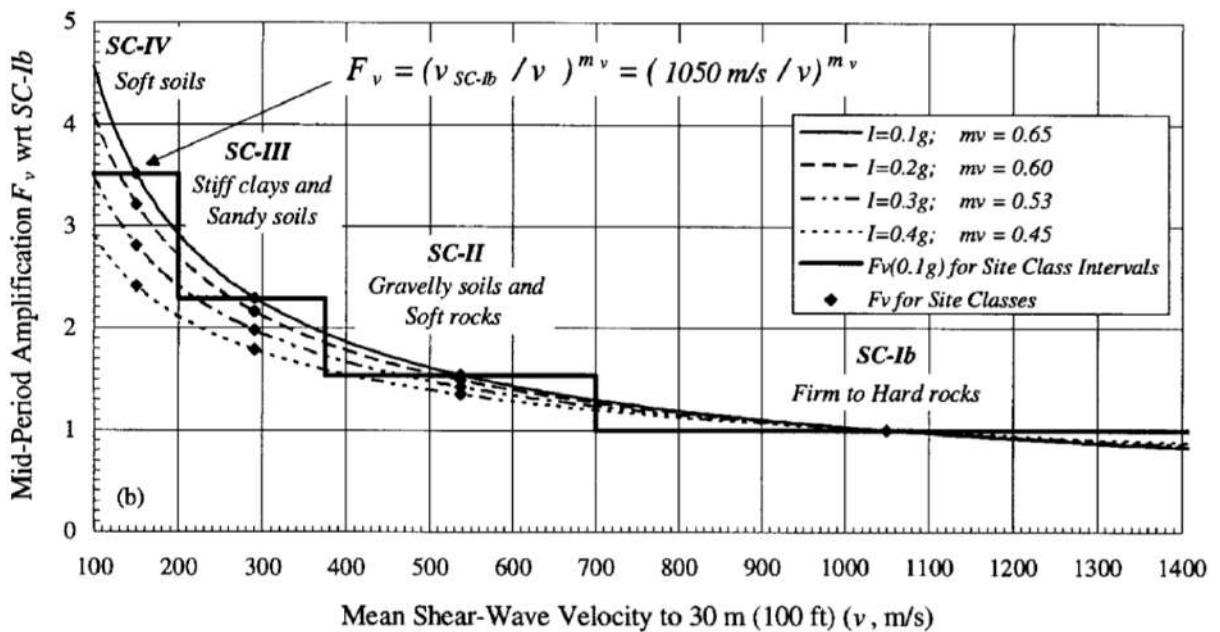
Los factores de amplificación fueron estimados en base a enfoques teóricos y prácticos de los registros sísmicos de los terremotos de Loma Prieta y de México y las relaciones de las velocidades de onda de corte. De estos resultados, se constituyó un conjunto muy importante de mediciones empíricas de amplificación de movimiento del suelo (Borcherdt, 1994b). Además, en el estudio de investigación, según Borcherdt (1994a) se notó que los datos mostraron que, la amplificación de periodo corto aumenta a una velocidad más lenta con una velocidad de onda de corte decreciente que la amplificación de periodo medio o largo, en otras palabras, dependían de los efectos de sitio. En consecuencia, los datos implicaban dos factores de amplificación espectral, uno para movimiento corto ( $F_a$ ) y uno para movimiento de periodo medio o largo ( $F_v$ ). Estos están a la orden de 0.2 s para periodos cortos ( $F_a$ ) y 1.0 s para periodos medios o largos ( $F_v$ ).

Dobry et al. (2000) denota que posteriormente estos factores de amplificación fueron adoptados por el NEHRP en su clasificación de suelos (ver Tabla 12). Las curvas de ajuste de los factores de amplificación se muestran en las siguientes figuras.





**Figura N° 10** Curva de ajuste para factores de amplificación  $F_a$   
**Fuente:** Borcherdt, 1994b



**Figura N° 11** Curva de ajuste para factores de amplificación  $F_v$   
**Fuente:** Borcherdt, 1994b

De las fórmulas mostradas pertenecientes a las figuras anteriormente expuestas, cada término representa lo siguiente.

$F_a$  : Factor de amplificación para periodos cortos (0.2 s).

$F_v$  : Factor de amplificación para periodos largos (1.0 s).

$v$  : Velocidad media de onda de corte del sitio a una profundidad de 30m o 100 pies

$m_a, m_v$ : Factores implícitos en el factor de amplificación del suelo para periodos cortos y largos respectivamente y que dependen del input sísmico.

Nótese que las ordenadas espectrales concernientes a los espectros de diferentes sitios estarán en función de los valores numéricos de estos factores de amplificación, que serán mayores mientras menos estable sea el sitio o emplazamiento.

El ASCE/SEI 7-10 (2010) considera los siguientes valores como factores de amplificación para periodos cortos y largos, los mismos que son adoptados, por ejemplo, en el Manual de Puentes (2018) para Perú.

**Tabla N° 15** Factor de Sitio,  $F_a$ , para rango de periodo corto en el espectro de aceleración

Clase de Sitio	Parámetros de aceleración de respuesta para periodo corto				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s > 1.00$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	*	*	*	*	*

Notas: Usar línea recta de interpolación para valores intermedios de  $S_s$ .

\* Ver sección 11.4.7 del ASCE/SEI 7-10, 2010.

**Fuente:** Adaptado de ASCE/SEI 7-10, 2010, p. 66

**Tabla N° 16** Factores de Sitio,  $F_v$ , para rango de periodo largo en el espectro de aceleración

Clase de Sitio	Parámetros de aceleración de respuesta para periodo largo				
	$S_l \leq 0.1$	$S_l = 0.2$	$S_l = 0.3$	$S_l = 0.4$	$S_l \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	*	*	*	*	*

Notas: Usar línea recta de interpolación para valores intermedios de  $S_l$ .

\* Ver sección 11.4.7 del ASCE/SEI 7-10, 2010.

**Fuente:** Adaptado ASCE/SEI 7-10, 2010, p. 66

Además, de un estudio más reciente, el ASCE/SEI 7-16 (2017), modifica estos valores incrementándolos o disminuyéndolos según sea el caso, como se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla N° 17** Factor de Sitio,  $F_a$ , para rango de periodo corto en el espectro de aceleración

Clase de Sitio	Parámetros de aceleración de respuesta para periodo corto					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s > 1.25$	$S_s \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	*	*	*
F	*	*	*	*	*	*

Notas: Usar línea recta de interpolación para valores intermedios de  $S_s$ .

\* Ver sección 11.4.8 del ASCE/SEI 7-16, 2017.

**Fuente:** Adaptado de ASCE/SEI 7-16, 2017, p. 84

**Tabla N° 18** Factores de Sitio,  $F_v$ , para rango de periodo largo en el espectro de aceleración

Clase de Sitio	Parámetros de aceleración de respuesta para periodo largo					
	$S_l \leq 0.1$	$S_l = 0.2$	$S_l = 0.3$	$S_l = 0.4$	$S_l > 0.5$	$S_l \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2 <sup>a</sup>	2.0 <sup>a</sup>	1.9 <sup>a</sup>	1.8 <sup>a</sup>	1.7 <sup>a</sup>
E	4.2	*	*	*	*	*
F	*	*	*	*	*	*

Notas: Usar línea recta de interpolación para valores intermedios de  $S_l$ .

\* Ver sección 11.4.8 del ASCE/SEI 7-16, 2017.

<sup>a</sup> Ver también sección 11.4.8 del ASCE/SEI 7-16, 2017.

**Fuente:** Adaptado ASCE/SEI 7-16, 2017, p. 84

Por otro lado, en nuestro caso, las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) obtenidos de los ensayos MASW realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan no se encuentran hasta profundidades de 30 m como lo solicitado, sino únicamente hasta profundidades de 20 m. Asumir los valores  $V_s$  a esta profundidad nos llevaría a incurrir a serios errores, por lo que se plantea según la literatura consultada hacer una correlación entre la velocidad  $V_s$  a otras profundidades para obtener la velocidad  $V_s$  a la profundidad de 30 m. Por ejemplo, Boore et al. (2011) han realizado correlaciones entre  $V_s$  a otras profundidades (5 m, 10 m, 15 m y 20 m) y  $V_s$  a la profundidad de 30 m en perfiles de suelo de Japón, California, Turquía y algunas regiones de Europa. En nuestro caso habrá dos modelos matemáticos de correlaciones, los cuales son detallados en la siguiente sección.

## 2.2.12. CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE A 30 M Y VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE A OTRAS PROFUNDIDADES.

La velocidad de onda de corte a profundidades de 30 m es indispensable para la obtención de los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  (descritos anteriormente), aunque en algunos casos no es posible obtener este valor directamente, pese a que se cuenta con estas velocidades a profundidades mucho menores. Es por ello que estudios como los de Boore et al. (2011) han dado a conocer una correlación empírica entre la velocidad de onda de corte a profundidades de 30 m ( $V_{S30}$ ) y velocidades de onda de corte a otras profundidades ( $V_{Sz}$ ). Dicha correlación es como sigue:

$$\log V_{S30} = c_0 + c_1 \log V_{Sz} + c_2 (\log V_{Sz})^2 \quad (11)$$

Donde los coeficientes  $c_0$ ,  $c_1$  y  $c_2$  de esta ecuación fueron obtenidos de los perfiles de registros del KIK-Net (Kiban-Kyoshin Network) de Japón y se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla N° 19** Coeficientes de ecuación que relaciona  $\log V_{S30}$  y  $\log V_{Sz}$  en KIK-Net Data

Profundidad z (m)	Coeficientes de ecuación			Desviación estándar de residuos $\sigma_{RES}$
	$c_0$	$c_1$	$c_2$	
5	$2.046 \times 10^{-1}$	$1.318 \times 10^0$	$-1.174 \times 10^{-1}$	0.119
6	$-6.072 \times 10^{-2}$	$1.482 \times 10^0$	$-1.423 \times 10^{-1}$	0.111
7	$-2.744 \times 10^{-1}$	$1.607 \times 10^0$	$-1.600 \times 10^{-1}$	0.103
8	$-3.723 \times 10^{-1}$	$1.649 \times 10^0$	$-1.634 \times 10^{-1}$	0.097
9	$-4.941 \times 10^{-1}$	$1.707 \times 10^0$	$-1.692 \times 10^{-1}$	0.090
10	$-5.438 \times 10^{-1}$	$1.715 \times 10^0$	$-1.667 \times 10^{-1}$	0.084
11	$-6.006 \times 10^{-1}$	$1.727 \times 10^0$	$-1.649 \times 10^{-1}$	0.078
12	$-6.082 \times 10^{-1}$	$1.707 \times 10^0$	$-1.576 \times 10^{-1}$	0.072
13	$-6.322 \times 10^{-1}$	$1.698 \times 10^0$	$-1.524 \times 10^{-1}$	0.067
14	$-6.118 \times 10^{-1}$	$1.659 \times 10^0$	$-1.421 \times 10^{-1}$	0.062
15	$-5.780 \times 10^{-1}$	$1.611 \times 10^0$	$-1.303 \times 10^{-1}$	0.056
16	$-5.430 \times 10^{-1}$	$1.565 \times 10^0$	$-1.193 \times 10^{-1}$	0.052
17	$-5.282 \times 10^{-1}$	$1.535 \times 10^0$	$-1.115 \times 10^{-1}$	0.047
18	$-4.960 \times 10^{-1}$	$1.494 \times 10^0$	$-1.020 \times 10^{-1}$	0.043
19	$-4.552 \times 10^{-1}$	$1.447 \times 10^0$	$-9.156 \times 10^{-2}$	0.038
20	$-4.059 \times 10^{-1}$	$1.396 \times 10^0$	$-8.064 \times 10^{-2}$	0.035
21	$-3.827 \times 10^{-1}$	$1.365 \times 10^0$	$-7.338 \times 10^{-2}$	0.030
22	$-3.531 \times 10^{-1}$	$1.331 \times 10^0$	$-6.585 \times 10^{-2}$	0.027

**Tabla N° 19** Coeficientes de ecuación que relaciona  $\log V_{S30}$  y  $\log V_{Sz}$  en KIK-Net Data (continuación)

Profundidad z (m)	Coeficientes de ecuación			Desviación estándar de residuos $\sigma_{RES}$
	$c_0$	$c_1$	$c_2$	
23	$-3.158 \times 10^{-1}$	$1.291 \times 10^0$	$-5.751 \times 10^{-2}$	0.023
24	$-2.736 \times 10^{-1}$	$1.250 \times 10^0$	$-4.896 \times 10^{-2}$	0.019
25	$-2.227 \times 10^{-1}$	$1.202 \times 10^0$	$-3.943 \times 10^{-2}$	0.016
26	$-1.768 \times 10^{-1}$	$1.159 \times 10^0$	$-3.087 \times 10^{-2}$	0.013
27	$-1.349 \times 10^{-1}$	$1.120 \times 10^0$	$-2.310 \times 10^{-2}$	0.009
28	$-9.038 \times 10^{-2}$	$1.080 \times 10^0$	$-1.527 \times 10^{-2}$	0.006
29	$-4.612 \times 10^{-2}$	$1.040 \times 10^0$	$-7.618 \times 10^{-3}$	0.003

**Fuente:** Boore et al., 2011, p. 3051

Por otro lado, debido a la complejidad del elemento cuadrático de la anterior ecuación, Borchardt (2012) en un estudio posterior describe que una forma simple de esta relación es:

$$\log V_{S30} = c_{0z} + c_{1z} \log V_{Sz} \quad (12)$$

Donde:

$c_{0z}, c_{1z}$ : Coeficientes de regresión correspondientes a una profundidad z para los cuales  $V_{Sz}$  ha sido medida.

Para eliminar el logaritmo, se hace uso de una conversión:  $c_{0z} = \log a_{0z}$  y reemplazando en la ecuación anterior, se tiene:

$$\log V_{S30} = \log a_{0z} + c_{1z} \log V_{Sz} \quad (13)$$

Reduciendo:

$$V_{S30} = a_{0z} (V_{Sz})^{c_{1z}} \quad (14)$$

Para esta última ecuación, los coeficientes  $a_{0z}$  y  $c_{1z}$  se obtienen de la relación entre  $V_{S30}$  y  $V_{Sz}$ , pero para relacionarlas se necesita una data de registros conocidos de  $V_{S30}$  y  $V_{Sz}$ , que sirvan de modelo, como los que se utilizó en Boore et al. (2011); no teniendo estos registros, pero si contando con registros que relacionan la velocidad  $V_{Sz}$  y la profundidad, emplearemos la ecuación anterior utilizando como variable independiente la profundidad, generando la siguiente ecuación:

$$V_{S30} = a_{0z}(Z)^{c_{1z}} \quad (15)$$

Esta ecuación será la utilizada para correlacionar la profundidad y la velocidad de onda de corte registrados en los ensayos MASW del coliseo multiusos Qhapac Ñan y obtener así la velocidad de onda de corte a profundidades de 30 m.

Debido a que contamos con dos modelos a conseguir la  $V_{S30}$  (ecuaciones 14 y 15), utilizaremos ambas y como hace mención Boore et al. (2011), las ecuaciones encontradas están en términos de logaritmos de velocidades y se ha encontrado que las velocidades son consistentes a una distribución log-normal, por lo que generaremos la función de distribución de probabilidad acumulada log-normal para cada una de ellas.

### 2.2.13. VELOCIDAD PROMEDIO DE ONDAS DE CORTE.

Acorde a la norma E.030 (2019), la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte se determinará con la siguiente fórmula.

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{si}}\right)} \quad (16)$$

Donde:

$\bar{V}_s$  : Velocidad promedio de onda de corte (m/s).

$d_i$  : Espesor del estrato  $i$  (m)

$V_{si}$  : Velocidad de onda de corte correspondiente al estrato  $i$  (m/s).

### 2.2.14. ESPECTROS DE RESPUESTA.

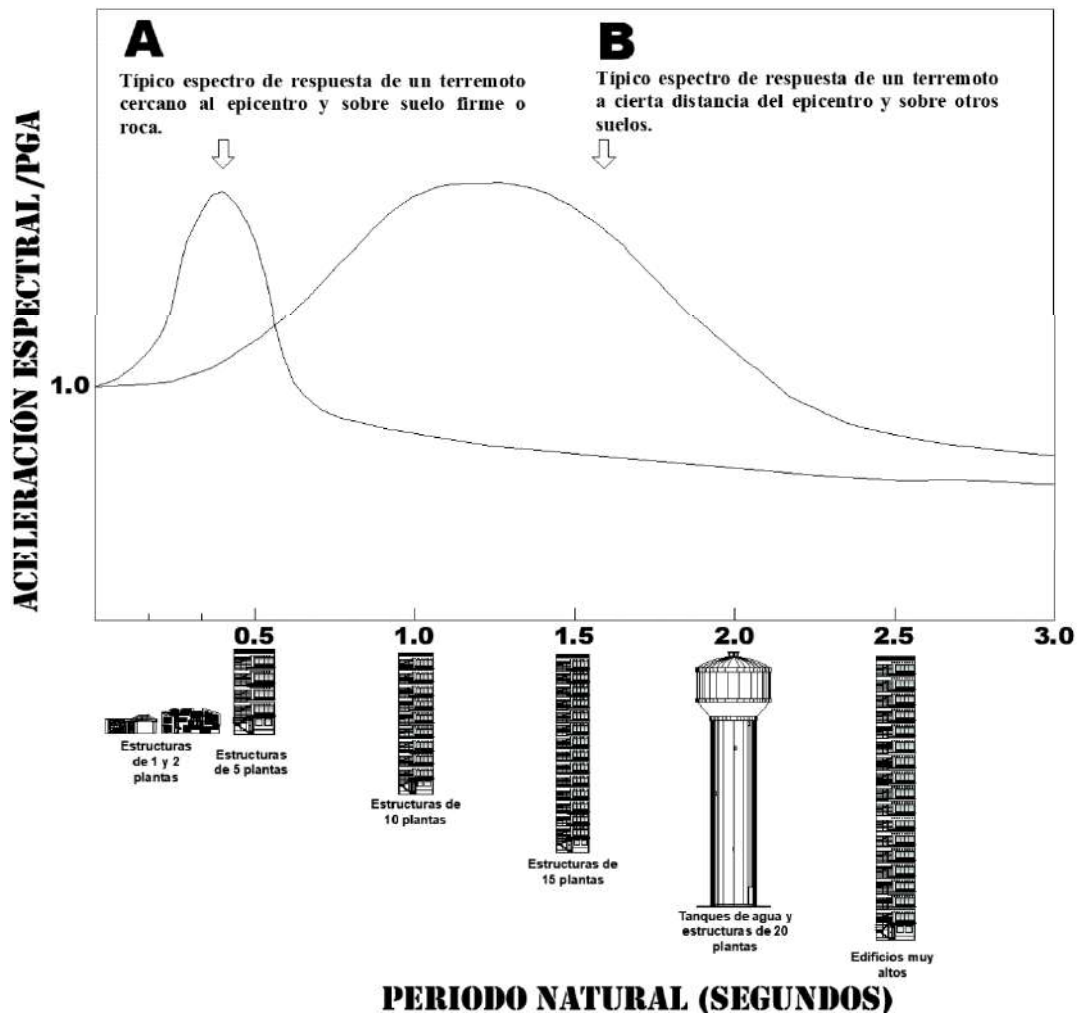
El espectro de respuesta brinda de manera enfatizada la respuesta máxima de todos los posibles sistemas lineales de 1GDL a un componente particular del movimiento terrenal (Chopra, 2014). Por otro lado, Duggal (2013) refiere que el espectro de respuesta provee información importante sobre los efectos potenciales del movimiento del suelo en la estructura.

#### 2.2.14.1. Factores que influyen en el espectro de respuesta.

En Elnashai y Di Sarno (2015) se enumeran seis factores que influyen en el espectro de respuesta los cuales son:

1. Magnitud.
2. Mecanismo fuente y características.
3. Distancia desde la fuente de liberación de energía.
4. Trayectoria de onda de viaje.
5. Directividad de ruptura.
6. Geología local y condiciones de sitio.

De los 6 factores antes mencionados se rescata a 3 como los más influyentes en la caracterización y forma del espectro de respuesta los cuales son la magnitud, distancia y las condiciones de sitio (Elnashai y Di Sarno, 2015), su influencia se puede apreciar claramente en la siguiente figura que muestra dos ejemplos de espectro de respuesta con los respectivos caracteres de edificios que pueden verse más afectados por estos 3 factores.

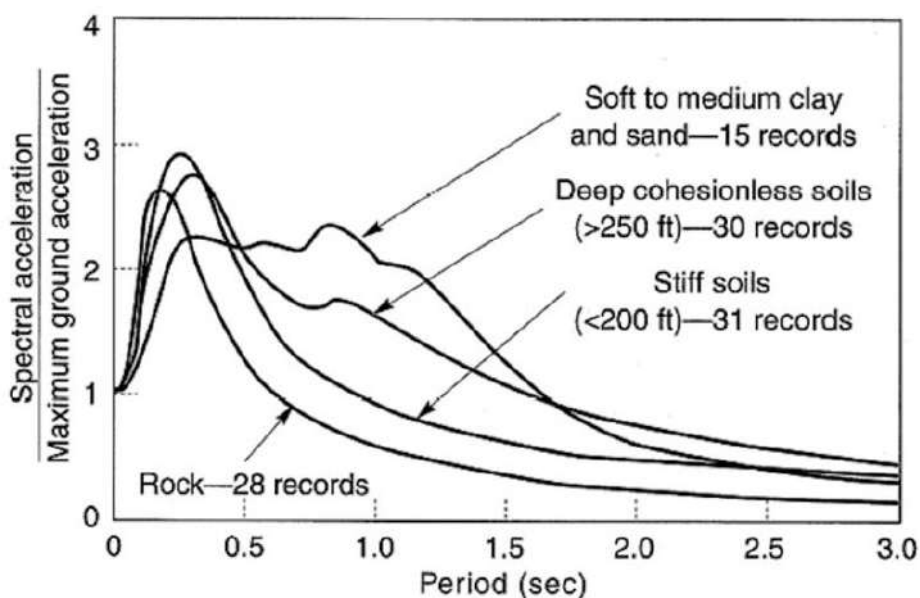


**Figura N° 12** Dos ejemplos típicos de espectros de respuesta, junto con el tipo de edificios que pueden verse más afectados

**Fuente:** Adaptado de Benito y Cabañas, 1999

De la figura anterior, el espectro A corresponde a un movimiento en un emplazamiento próximo al epicentro, situado sobre suelo firme o roca. El valor pico se establece en periodos relativamente cortos (0.3 segundos), ocasionando un movimiento más notable en estructuras rígidas o bajas. El espectro B denota una zona muy distante del epicentro, sobre suelo blando, trasladándose la aceleración máxima hacia periodos elevados (1 segundo), siendo perjudicial en construcciones flexibles y elevadas (Benito y Cabañas, 1999).

Acorde a lo detallado en Kramer (1996): Seed et al. (1976) en sus diferentes investigaciones computó el espectro de respuesta promedio para 4 clasificaciones de sitio. La siguiente figura muestra dichos espectros.



**Figura N° 13** Espectros de respuesta promedio para diferentes condiciones de sitio  
**Fuente:** Cimellaro y Marasco, 2018

Si se observa detalladamente la figura anterior se notará que para periodos superiores a 0.5 segundos, la aceleración en roca es mucho menor respecto a las aceleraciones espectrales correspondientes a las otras clasificaciones de sitio, siendo más evidente en suelos blandos, debido a que estos presentan baja frecuencia, y suelen incrementar las bajas frecuencias, estableciendo de esta forma los espectros (Benito y Cabañas, 1999), y para periodos mayores a 2.5 segundos se van emparejando y tendiendo a cero para cualquier clasificación de sitio.

Por otro lado, si bien las estructuras no pueden diseñarse específicamente para confrontar un sismo en particular y las características de los espectros de respuesta conllevan a un movimiento del sitio conforme a una respuesta máxima para un sismo dado (Picoita, 2011), se opta de una forma particular y casi general la utilización de espectros de diseño para obtener la demanda de la respuesta estructural de cualquier construcción.

### **2.2.15. ESPECTRO DE DISEÑO.**

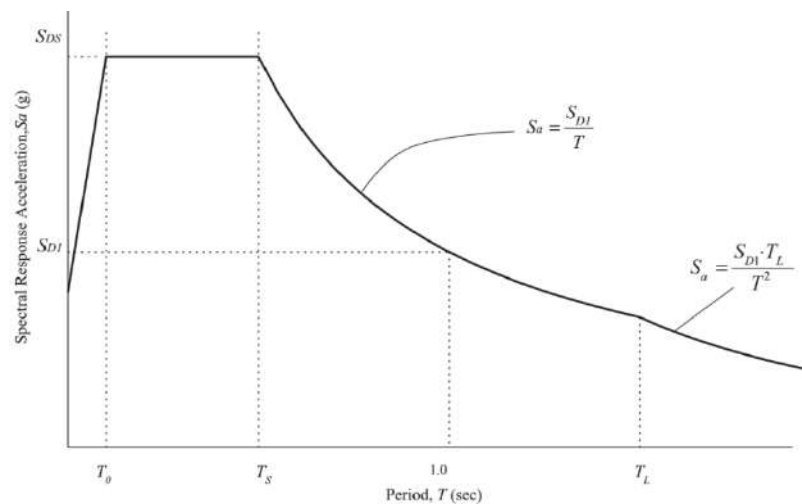
Los espectros de diseño son comúnmente usados para representar las sollicitaciones sísmicas durante el análisis dinámico de estructuras (Kramer, 1996), y actualmente forman la base de fuerzas del diseño sísmico en la mayoría de códigos y normas sísmicas (Gioncu y Mazzolani, 2011), Los cuales son caracterizados en base a movimientos sísmicos



acontecidos en el lugar de emplazamiento de interés o en otras áreas con características parecidas generando con estos datos un conjunto de curvas y líneas suavizadas que describen cada nivel de amortiguamiento (Chopra, 2014).

Luego, para construir un espectro de diseño, se computan los espectros de distintos sismos, los cuales posteriormente son envueltos y suavizados para producir una única curva que encapsula las características dinámicas de un número grande de posible acelerogramas del sismo (Duggal, 2013).

Por otro lado, si bien los espectros de diseño se obtienen de investigaciones estadísticas de registros sísmicos, por ende, no pueden ser iguales, lo que conlleva a que se tengan que normalizar de cierta forma (García, 1998). Esta normalización está en función de la zona, el tipo de suelo, uso de la estructura, entre otros factores que se han establecido en diferentes códigos y normativas internacionales, generando así una representación gráfica de líneas y/o curvas expresadas por ecuaciones funcionales simples como se muestra en la siguiente figura.

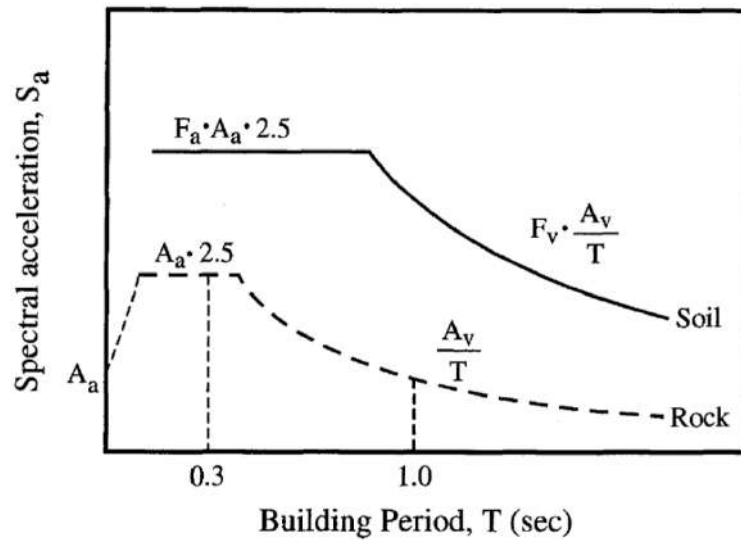


**Figura N° 14** Espectro de diseño según el ASCE/SEI 7-10  
**Fuente:** ASCE/SEI 7-10, 2010

### 2.2.15.1. Influencia de la clase de sitio en el espectro de diseño.

Normalmente los espectros de diseño son definidos en roca y posteriormente amplificados para un determinado sitio. Por lo que en casos diferenciados donde se encuentra depósitos profundos de suelos blandos, se efectúa un estudio de sitio (ensayos de campo como de laboratorio), generando una incorporación de estos parámetros locales de emplazamiento en el espectro de diseño (García, 1998). En este contexto, para obtener los espectros de diseño de otros tipos de suelo (ver Tablas 12, 13 y 14) se computa el espectro de diseño en roca modificado por los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  para periodos cortos y largos

respectivamente (descritos en el apartado 2.2.11.), incrementando así las ordenadas espectrales como se muestra en la siguiente figura y finalmente permitiendo la obtención de todos los espectros de diseño de los perfiles de suelo.

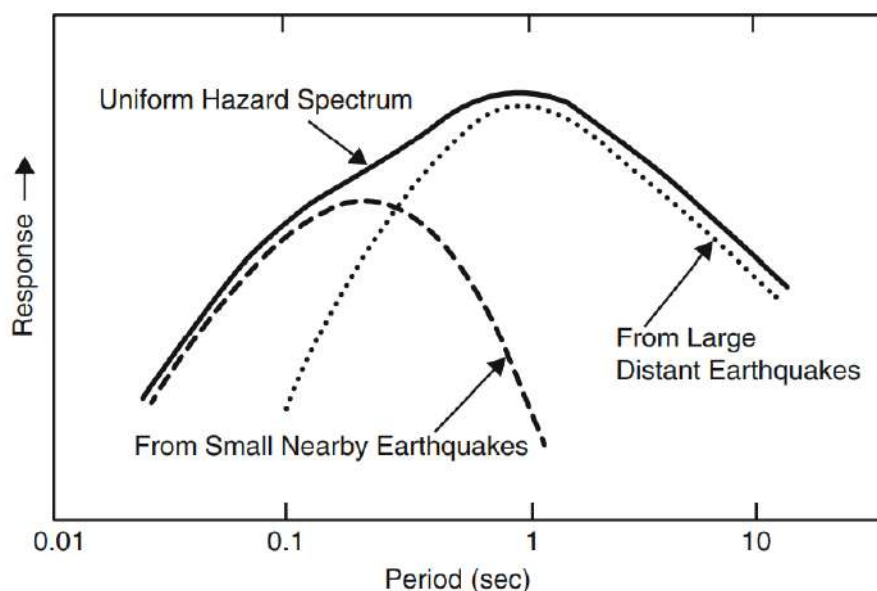


**Figura N° 15** Factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  que modifican las ordenadas espectrales en los espectros de diseño

**Fuente:** Dobry et al., 2000

### 2.2.16. ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME.

El espectro de peligro uniforme se encarga de definir el peligro sísmico formado por todas las fuentes sísmogénicas que afectan a un determinado emplazamiento en términos de intensidades, siendo clave para la elaboración de espectros de diseño en casi todos los reglamentos de construcción alrededor del mundo (Buendía Sánchez, 2016). Acorde a Cimellaro y Marasco (2018), las características de estos espectros fluctúan conforme a dos categorías sísmicas, las cuales están en función de la ocurrencia sísmica de eventos cercanos de moderada a baja magnitud que influyen en periodos cortos principalmente y eventos lejanos que tienen una contribución mayor en la definición de peligro para los períodos largos, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura N° 16** Esquema de espectro de peligro uniforme  
**Fuente:** Cimellaro y Marasco, 2018

### 2.2.17. ENSAYOS MASW.

Los ensayos MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) son ensayos de refracción sísmica, realizados a una determinada distancia del trazo sobre el área de la superficie de interés producto de una fuente de energía impulsiva (López Prado, 2016).

En el coliseo multiusos Qhapac Ñan se ha realizado un total de 21 ensayos MASW (Alva Hurtado, s.f). Estos servirán de base para obtener los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  los cuales ampliarán el espectro en roca de manera probabilística.

### 2.2.18. TEORÍA DE PROBABILIDAD.

La metodología de modelos de probabilidad y sistemas estadísticos para examinar una data se ha convertido en una de las prácticas más comunes en virtualmente todas las ramas científicas (Devore, 2008). La teoría de probabilidad está asentada en diversas asunciones o axiomas, que no están sujetos a pruebas (Cimellaro y Marasco, 2018).

### 2.2.19. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO.

Hidalgo Leiva (2017), denota que comúnmente en el ámbito profesional, se toman parámetros de una estructura de forma determinística, sin considerar la variabilidad que pueden causar estos en las estructuras, en tal sentido un análisis probabilístico nos ayuda a seleccionar mejor dichos parámetros y ver su variabilidad influyente en dichas estructuras, cabe recalcar que no se debe confundir este término con una metodología probabilista ya que este representa un conjunto de ideas y enseñanzas filosóficas y teológicas, en donde a falta del conocimiento verdadero es mejor el uso del criterio (Wikipedia, 2021).

## 2.2.20.FUNCIONES DE PROBABILIDAD.

Las funciones de probabilidad que guardan mayor relación a estudios de peligro sísmico y caracterización estructural son la exponencial, log-normal y normal; su uso típico de cada una de ellas se muestra a continuación.

**Tabla N° 20** Uso típico de funciones de probabilidad exponencial, log-normal y normal

FUNCIÓN DE PROBABILIDAD	USO TÍPICO
Exponencial	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Distribución de las magnitudes de terremotos en una fuente.</li><li>▪ Capacidad de respuesta del sistema.</li></ul>
Log-normal	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Parámetros de movimiento del terreno.</li><li>▪ Relaciones de escala de fuente.</li><li>▪ Intervalos de recurrencia de grandes terremotos en fallas.</li><li>▪ Propiedades mecánicas de los materiales.</li><li>▪ Propiedades geométricas del sistema.</li><li>▪ Capacidad de respuesta del sistema.</li></ul>
Normal	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Distribución de magnitudes de un terremoto dada una dimensión de ruptura.</li><li>▪ Procedimiento de errores.</li></ul>

**Fuente:** Adaptado de Elnashai y Di Sarno, 2015, p. 308

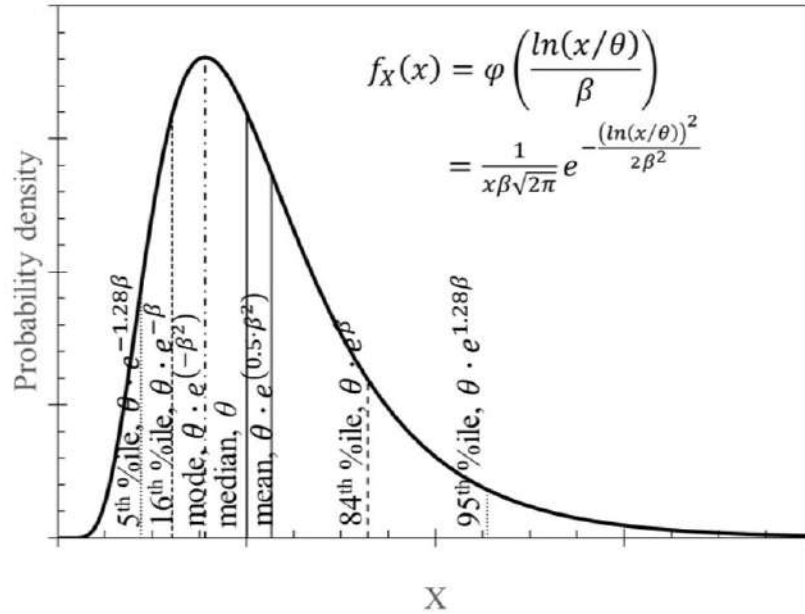
Porter (2017) refiere que la distribución log-normal es ubicada en estudios de peligro sísmico y como sabemos, las fuentes sismogénicas y leyes de atenuación son esenciales en estos estudios, representándose además estos en forma de aceleraciones, espectros de peligro uniforme, entre otros. Por otro lado, la tabla anterior también describe que otro uso típico de esta función son los parámetros de movimiento del terreno, donde estos dependen de los factores de sitio (materia de estudio en esta investigación). Por lo que concluimos que la función de probabilidad log-normal será la más adecuada en la presente investigación para cuantificar el nivel de confianza en el uso de probabilidades de las leyes de atenuación y la relación de la velocidad de onda de corte  $V_S$  para la obtención de los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$ . A continuación, describiremos dicha función en estudio.

### 2.2.20.1. Función de densidad probabilidad Log-normal.

La función de densidad de probabilidad para que una variable cualesquiera "x" adopte un parámetro determinado es como sigue:

$$f_X(x) = \frac{1}{x\beta\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\ln(\frac{x}{\theta}))^2}{2\beta^2}} = \varphi\left(\frac{\ln(\frac{x}{\theta})}{\beta}\right) \quad (17)$$

La siguiente figura muestra gráfica de la función de densidad de probabilidad log-normal de asimetría positiva.



**Figura N° 17** Función de densidad de probabilidad log-normal  
**Fuente:** Porter, 2017

### 2.2.20.2. Función de probabilidad acumulada Log-normal.

La función de densidad de probabilidad acumulada para que una variable cualesquiera "x" adopte un valor menor o igual a un parámetro determinado es como sigue:

$$\begin{aligned}
 P[X \leq x] &= F_X(x) \\
 P[X \leq x] &= \Phi\left(\frac{\ln x - \ln \theta}{\beta}\right) \\
 P[X \leq x] &= \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{x}{\theta}\right)}{\beta}\right) \\
 P[X \leq x] &= \Phi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln X}}{\sigma_{\ln X}}\right) \quad (18)
 \end{aligned}$$

Con:

$$\theta = e^{\mu_{\ln X}} \quad \wedge \quad \beta = \sigma_{\ln X}$$

Donde:

$\mu_{\ln X}$ : Media del logaritmo natural.

$\sigma_{\ln X}$ : Desviación estándar del logaritmo natural.

Para calcular  $\theta$  y  $\beta$  de manera más sencilla, se convierte las ecuaciones en función del coeficiente de variación, como se muestra a continuación.

$$v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (19)$$

$$\beta = \sqrt{\ln(1 + v^2)} \quad (20)$$

$$\theta = \frac{\mu}{\sqrt{1+v^2}} \quad (21)$$

Donde:

$v$ : Coeficiente de variación.

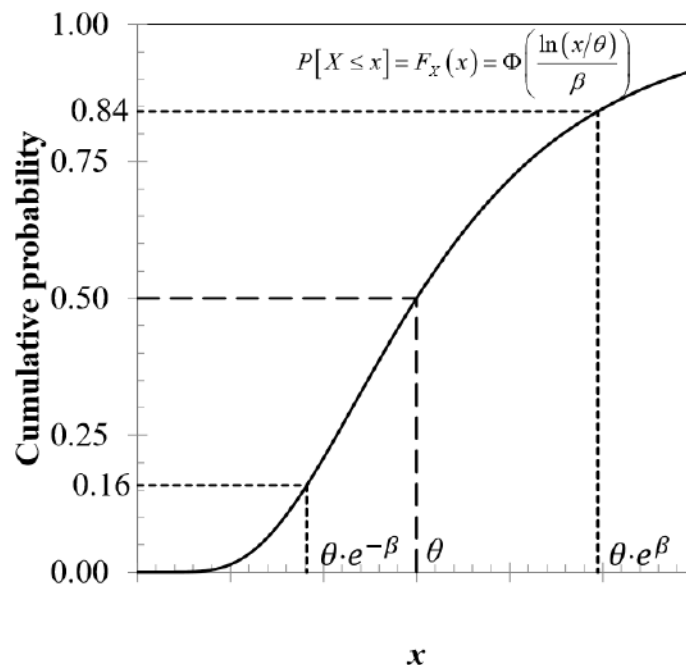
$\mu$ : Media.

$\sigma$ : Desviación estándar.

$\beta$ : Desviación estándar del logaritmo natural.

$\theta$ : Mediana logarítmica.

La siguiente figura muestra la gráfica de la función de probabilidad acumulada log-normal.



**Figura N° 18** Función de probabilidad acumulada log-normal  
**Fuente:** Porter, 2017

### 2.2.21. INCERTIDUMBRE.

Conforme a lo descrito en Benito y Jiménez (1999) y Elnashai y Di Sarno (2015), la incertidumbre es expresada en niveles de confianza en el estudio probabilístico, por lo que la estadística ayudará en la incertidumbre con el fin de obtener una toma de decisiones con cierto grado de confianza para cada proyecto. Es así que se detallará a continuación los dos tipos esenciales de incertidumbre que son las epistémicas y aleatorias.

### **2.2.21.1. Incertidumbre epistémica.**

Son aquellas incertidumbres que implican la escasez de información, propias al modelo tomado para la predicción del movimiento y que únicamente podrían estimarse si se supiera el modelo real (Benito y Jiménez, 1999).

### **2.2.21.2. Incertidumbre aleatoria.**

Las incertidumbres aleatorias están vinculadas a errores en la estimación de parámetros para un modelo determinado. Logran disminuir ampliando la calidad y cantidad de los datos existentes para estimar con mejor exactitud dichos parámetros (Benito y Jiménez, 1999).

Por ejemplo, Benito y Jiménez (1999) refieren que ambas incertidumbres se presentan en las diferentes fases de cálculo de la peligrosidad sísmica como son:

1. Definición de zonas sismogénicas y relaciones de recurrencia.
2. Leyes de atenuación.
3. Efectos de las condiciones locales del emplazamiento.

Las incertidumbres referentes a las zonas sismogénicas y relaciones de recurrencia ya ha sido resuelto por SENCICO (2016) en base a las fuentes de subducción y continentales estudiadas conjuntamente con la aplicación de la Ley de Gutenberg y Richter, en lo referente a las incertidumbres presentes en las leyes de atenuación. Sabemos que SENCICO ha utilizado diversas leyes de atenuación, por lo cual se ha planteado una correlación probabilística de algunas de estas leyes, cuantificándolas mediante el método del árbol lógico (descrito posteriormente), cabe recalcar que este método ya ha sido usado por Roncal Castro (2017), pero no se lo ha correlacionado probabilísticamente, generando así diferentes espectros probabilísticos. En cuanto a las incertidumbres concerniente a los efectos de sitio se verá atendida con la data de los ensayos MASW realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan que nos brindarán información sobre la velocidad de onda de corte  $V_s$  en nuestra ciudad, para consecuentemente obtener los factores de amplificación y finalmente obtener una elaboración probabilística de espectros de diseño, reorganizando de esta manera la incertidumbre que existe en la condición local del emplazamiento de Cajamarca y sus respectivos espectros.

Cabe recalcar que las incertidumbres irán aumentando, por ejemplo, en cuanto a la cuantificación apropiada de la respuesta estructural de una estructura, en la que se involucra la distribución de cargas, la variación de las características de un comportamiento inelástico, además de la incertidumbres de la poca contribución a la rigidez y resistencia de

elementos no estructurales, que comúnmente participan en la respuesta estructural dado que es dificultoso desligarlos adecuadamente de la estructura (CENAPRED, 1999).

### **2.2.22. CUANTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRE.**

Como se mencionó anteriormente en Benito y Jiménez (1999), existen dos incertidumbres en estudios de peligro sísmico, la incertidumbre aleatoria que depende implícitamente de la data que se tenga (cantidad y calidad); y, por otro lado, la incertidumbre científica presente en los modelos de ocurrencia de sismos y movimiento del suelo llamada incertidumbre epistémica (Abrahamson y Bommer, 2005). La incertidumbre a cuantificar en este y diversos estudios (ver por ejemplo, Roncal Castro, 2017) es la epistémica. Para realizar dicha cuantificación, se cuenta con los métodos del árbol lógico y el juicio de expertos, en el cual el segundo está relacionado con la opinión, estudios, validación y cuestionamiento de una gama de profesionales referidos al tema de investigación de interés, es por tanto que en la presente tesis se detallará y utilizará el método del árbol lógico como la herramienta para la cuantificación de la incertidumbre epistémica.

#### **2.2.22.1. Método del Árbol Lógico.**

Los árboles lógicos se usan ampliamente en el análisis probabilístico de peligro sísmico como una herramienta para detectar la incertidumbre epistémica asociada específicamente con las fuentes sismogénicas y los modelos de predicción de movimiento del suelo utilizados para estimar el peligro (Bommer et al., 2005). Este permite el uso de posibles modelos alternativos, a cada uno de los cuales se le asigna un factor de ponderación que se interpreta como la probabilidad de que ese modelo sea correcto (Kramer, 1996).

Según Benito y Jiménez (1999), el árbol está conformado por una serie de ramas y nodos, donde cada nodo constituye la estimación de un parámetro que debe ser usado en el estudio, a modo de ejemplo, este puede ser el cómputo de la máxima magnitud de un área.

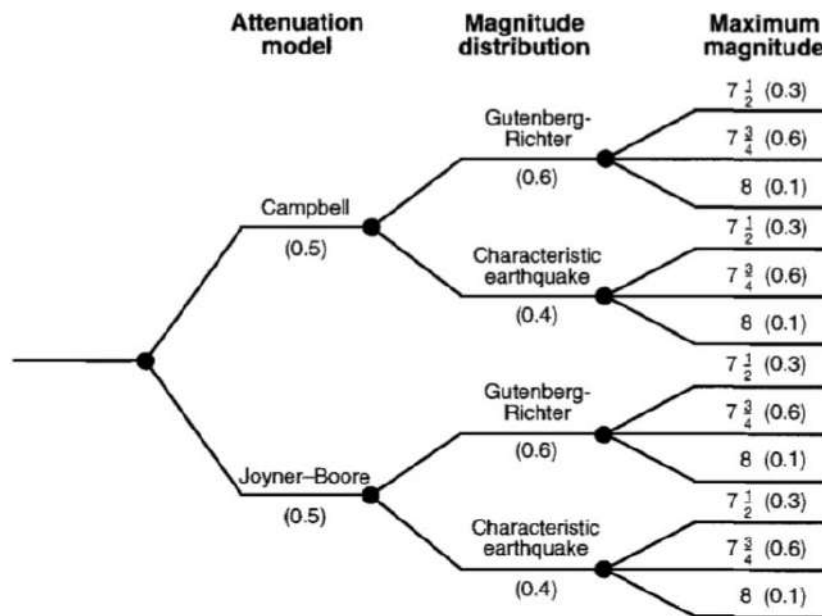
Cada rama que nace de un nodo simboliza una posible alternativa discreta para el parámetro o proceso en estudio, llevando asignada un cierto valor de probabilidad que muestra el nivel de credibilidad de que la rama constituya el valor adecuado. Siendo estas probabilidades condicionales, y se toma que cada una de las ramas que conllevan a un nodo simbolizan el estado verdadero de los parámetros precedentes, llegando a ser el cómputo de todas ellas, la unidad (Benito y Jiménez 1999).

Existen diferentes formas de asignar las probabilidades de las diversas ramas. La más común consiste en asumir hipótesis alternativas e indicar, mediante un factor peso, el grado



de preferencia de cada una de ellas, aunque también se usa de manera conjunta el juicio de expertos, en el cual un experto o un grupo de ellos designan valores del grado de aceptabilidad de los modelos de ramas pertinentes (Scherbaum y Kuehn, 2011).

A modo de ejemplo, se expone en la siguiente figura un modelo de árbol lógico, definida en la consecución de sus ramas las probabilidades de los modelos de atenuación, la magnitud de distribución y la magnitud máxima de un evento.



**Figura N° 19** Modelo de árbol lógico  
**Fuente:** Kramer, 1996

Debido a la gran cantidad de estudios en los cuales se ha utilizado los árboles lógicos (Delavaud et al., 2012; Roncal Castro, 2017), estos se han convertido actualmente en la herramienta más comúnmente usada en análisis de peligro sísmico (Bommer y Scherbaum, 2008) y en esta investigación también se hará uso de esta herramienta. Ahora bien, para construir el árbol lógico, en nuestro caso, a cada rama le asignaremos una ley de atenuación. En este contexto, en Perú, se han utilizado diversas leyes de atenuación y en su mayoría provenientes de otros ambientes sismotectónicos (Tavera et al., 2014), aunque existen algunas leyes de atenuación con registros sísmicos peruanos como por ejemplo las de Casaverde y Vargas en el año 1980 y Chávez et al. (2009) pero como menciona Charca et al. (2018), presentan inconvenientes como la escasez de datos. Es así que utilizaremos las leyes de atenuación que mejor se adapten a la realidad peruana, de las cuales la gran mayoría han sido materia de uso en diversas investigaciones y tesis referidas al tema (Bolaños Luna y Monroy Concha, 2004; Tavera et al., 2014; SENCICO, 2016; Malpartida

Pino, 2017; Roncal Castro, 2017; Charca et al., 2018; Campos Irigoín, 2019), las cuales son la de Youngs et al. (1997), Zhao et al. (2006), Atkinson y Boore (2003), Abrahamson et al. (2016), Sadigh et al. (1997), Campbell y Bozorgnia (2014) y la de Chiou y Youngs (2014), que ya fueron descritas anteriormente.

Definidas ya las leyes de atenuación a utilizar, procederemos a capturar la incertidumbre epistémica relacionadas a estas leyes de atenuación y el peligro sísmico. Una cuestión fundamental para decidir cómo tratar esta incertidumbre ante el peligro es la interpretación de lo que representan los pesos en las ramas de los árboles lógicos (Abrahamson y Bommer, 2005). Scherbaum y Kuehn (2011) describen que estos pesos son generados como probabilidades en el sentido de que una vez que un modelo ha sido asignado un peso particular como una estimación subjetiva del grado de certeza o de convicción expresado dentro del marco de la teoría de la probabilidad, dado que, como concluye Musson (2012), ninguna de cada una de las ramas del árbol lógico representa un modelo “verdadero”, sino útil o aceptable. De igual forma se debe tener en cuenta que los pesos en las ramas son desarrollados considerando las fortalezas y debilidades de los modelos alternativos en términos de su aplicabilidad al proyecto específico en consideración (Abrahamson y Bommer, 2005), aunque en ejemplos de implementación del árbol lógico, es muy común encontrar pesos uniformes en las ramas (Bommer y Scherbaum, 2008) por ejemplo, en el proyecto SHARE (Seismic Hazard haRmonization in Europe) que apunta a la evaluación de nuevos estándares del peligro sísmico probabilístico en la región Euro-Mediterránea, se asignó pesos iguales para los modelos con los que no están familiarizados o para los que carecen de información suficiente (Delavaud et al., 2012). Por otro lado, siguiendo estas descripciones y opiniones de diversos autores, parece razonable mencionar además que, si solo se incluyen dos o tres ecuaciones en el árbol lógico, los pesos pueden ejercer una fuerte influencia en los resultados (Bommer et al., 2005), ocasionando de esta manera apreciaciones erróneas, es así que tendremos presente en esta investigación lo mencionado por Delavaud et al. (2012) en donde, en el proyecto SHARE los expertos concluyeron que para prevenir que el árbol lógico sea muy complejo, las leyes de atenuación o ecuaciones de predicción del movimiento GMPes (por sus iniciales en inglés) deben estar entre dos y cinco debido a la magnitud de este proyecto (en nuestro caso se lo adaptará para cada proceso de sismogénesis entre dos y cinco leyes de atenuación).

Finalmente, si un modelo recibe un peso del 90 % de máximo de la escala de grado de creencia elegida, el analista del peligro debe estar casi seguro de que éste es el modelo correcto (independientemente si, por ejemplo, modelos son agregados después al conjunto

de modelos candidatos) (Scherbaum y Kuehn, 2011), para lo cual este no es el caso, dado que como se mencionó anteriormente, en el Perú se cuenta en su gran mayoría con leyes de atenuación de otros entornos y sería irracional asignar pesos cercanos al 90 % a cualquier ley de atenuación.

Como describimos en párrafos anteriores, la elección de leyes de atenuación y sobre todo la asignación de pesos correspondientes establecidos en las ramas del árbol lógico es algo complejo, en donde debemos tener en cuenta una gran cantidad de factores, y no obtendremos un modelo “verdadero” sino útil o aceptable como hace mención Musson (2012), por lo que haremos uso de curvas de distribución de probabilidades acumuladas Log-normal adecuadas para este caso (ver Tabla 20) en la combinación de diversos árboles lógicos. Pese a que no podremos responder las preguntas que se plantea Charca et al. (2018), entre una de ellas la relacionada a un coeficiente de asignación para las leyes de atenuación más usadas en nuestro territorio, podremos hacer un estudio probabilístico de ello, dado que esta investigación se centra más en la generación de espectros probabilísticos.

### 2.2.23.PROGRAMA CRISIS.

Según Aguilar et al. (2017), el programa CRISIS es un software de ingeniería, cuyo rol primordial es el de computar el peligro sísmico. Este peligro sísmico lo puede representar el programa generando mapas de peligro sísmico agrupados a diferentes periodos de retorno y/o curvas de peligro sísmico con diferentes intensidades para cada sitio en particular con su respectivo espectro de peligro uniforme.

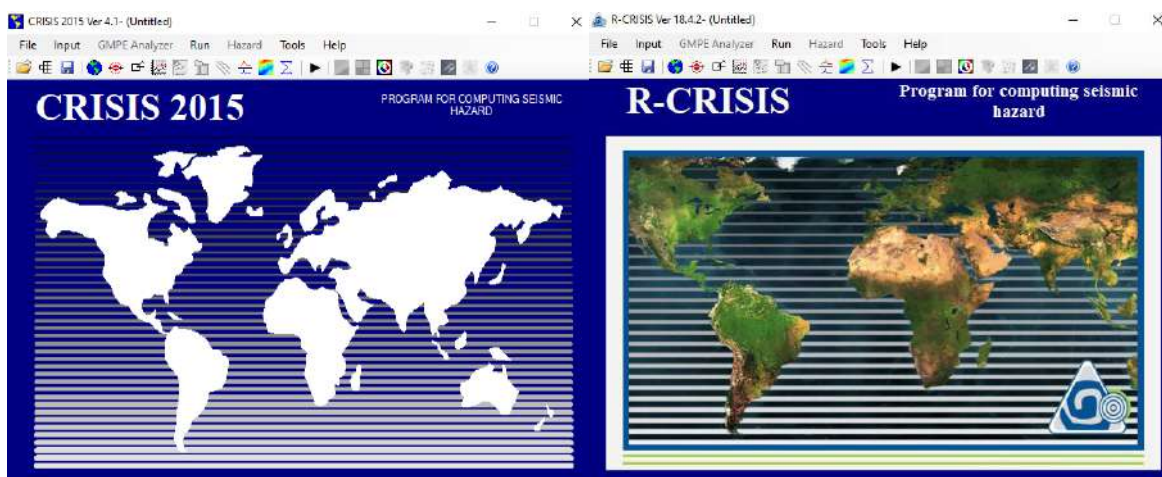


Figura N° 20 Pantalla de inicio del software CRISIS 2015 versión 4.1 y R-CRISIS versión 18.4.2

Además, el programa es de aceptación mundial y ha sido utilizado en más de 95 países (Ordaz et al., 2019) en diversos estudios, asimismo puede consultarse el trabajo de Aguilar et al. (2017) en la que se encuentra una gran lista proyectos que han hecho uso de diferentes versiones de este software.

A continuación, se describe de forma concisa la base matemática del presente programa.

#### a) Modelo de Ocurrencia.

El modelo de sismicidad utilizado para incorporar las fuentes sismogénicas y ocurrencia sísmica en este trabajo corresponde al modificado de Gutenberg y Richter. Ordaz y Salgado (2019) detallan que este modelo sigue un proceso poissoniano, lo que conlleva a considerar eventos independientes del espacio y tiempo (Muñoz, 1989), en donde Ordaz y Salgado (2019) dan a conocer que el incremento de magnitud en los eventos sísmicos que sigue el programa R-CRISIS está dado por:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{\exp(-\beta M) - \exp(-\beta M_U)}{\exp(-\beta M_0) - \exp(-\beta M_U)}, M_0 \leq M \leq M_U \quad (22)$$

Donde:

$\lambda_0$ : Tasa de excedencia de la magnitud mínima  $M_0$ .

$\beta$ : Parámetro de fuente en términos de logaritmo natural.

$M_U$ : Magnitud máxima.

Ordaz y Salgado (2019) también denotan que el software R-CRISIS considera variables aleatorias e independientes a  $\lambda_0$  y  $\beta$ , y que la incertidumbre de esta última se describe con una distribución de probabilidad Gamma.

#### b) Área y distancia de ruptura.

Por otro lado, el área y distancia de ruptura presentes en las leyes de atenuación que describen la energía sísmica y varían de acuerdo a este parámetro (CENAPRED, 2014); Ordaz y Salgado (2019) dan a conocer que el software R-CRISIS computan este valor con las siguientes expresiones:

$$A = \pi K_1^2 * e^{2K_2 M} \quad (23)$$

$$L = K_3 * e^{K_4 M} \quad (24)$$

Donde:

$A$ : Área de ruptura.

$K_1, K_2$ : Coeficientes de la relación entre magnitud y el área de ruptura.

$L$ : Longitud de ruptura.

$K_3, K_4$ : Coeficientes de la relación entre magnitud y la longitud de ruptura.

Además, conocida la magnitud y distancia, se considera a la intensidad como variable aleatoria generalmente de tipo lognormal (Ordaz y Salgado, 2019).

### c) Cálculo del peligro sísmico probabilístico

Finalmente, Ordaz y Salgado (2019) enmarcan que para el cálculo del peligro sísmico probabilístico, producido por un terremoto de magnitud  $M_i$  es dado por:

$$\Pr(A \geq a | M_i, T_j, k) = 1 - \sum_{s=0}^{N_s} P_k(s, M_i, T_j) [1 - \Pr(A \geq a | M_i, R_k)]^s \quad (25)$$

Donde:

$s$ : Número de eventos (0, 1, ...,  $N_s$ ).

$P_k(s, M_i, T_j)$ : Probabilidad Magnitud  $M_i$  de los eventos  $s$  para los siguientes  $T_j$  años de una fuente dada  $k$ .

$\Pr(A \geq a | M_i, R_k)$ : Probabilidad de que se supere la intensidad  $a$  dado que un terremoto de magnitud  $M_i$  que ocurrió en la fuente  $k$  y que está separado del emplazamiento a una distancia  $R_k$ .

## 2.2.24. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES QUE AFECTAN LA RESPUESTA SÍSMICA.

No todas las estructuras se comportan de igual manera ante un mismo sismo. Además, esta respuesta puede diferenciarse significativamente de zona en zona producto de alteraciones por parte de las condiciones del suelo. Por tal razón, después de la ocurrencia de un sismo fuerte se pueden ver estructuras críticamente dañadas, frente a otras que no tuvieron daños significativos (Schmidt, 2011). En CENAPRED (1999) se especifica que las principales características estructurales que perturban la respuesta de una estructura sometida a sollicitaciones sísmicas son el periodo fundamental de vibración y el amortiguamiento. A continuación, se detallan cada una de ellas.

### 2.2.24.1. Periodo Fundamental de vibración.

Los periodos de vibrar de una estructura se computan en base a sus valores de rigideces y masas; más explícitamente está en función de la relación de masas y rigideces. Una forma muy práctica de cuantificar el periodo de vibración en una estructura es multiplicando el número de niveles de esta por 0.1 (Bazán y Meli, 2002).

### 2.2.24.2. Amortiguamiento.

El amortiguamiento es una característica intrínseca de los materiales utilizados, los cuales están en función también de la forma en que se conecten los elementos estructurales y no estructurales (CENAPRED, 1999).

El amortiguamiento tiene un efecto favorecedor sobre la respuesta estructural debido a que disminuye los valores de velocidad, desplazamiento y aceleración máxima, gracias a que por acción del amortiguamiento se disipa energía, en la mayoría de los casos en forma de sonido y calor, reduciendo así la vibración de la estructura (Picoita, 2011).

### 2.2.25. PERÍODO DE RETORNO.

El período de retorno viene a ser el tiempo promedio acontecido durante dos movimientos sísmicos que poseen la misma aceleración del suelo (Aguiar Falconí, 2008). Este se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_r = -\frac{t}{\ln(1-P)} \quad (26)$$

Donde:

$T_r$ : Período de retorno.

$t$ : Tiempo o vida útil de la estructura.

$P$ : Probabilidad de excedencia.

Como se ve en la fórmula anterior, el periodo de retomo se establece acorde a la importancia y vida útil de la estructura (Benito y Cabañas, 1999).

El COMITÉ VISION 2000 precisó en los estudios de peligrosidad sísmica cuatro sismos de análisis, llamados sismo: frecuente, ocasional, raro y muy raro (Aguiar Falconí, 2003), estos se diferencian específicamente en el periodo de retorno y se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla N° 21** Periodos de retorno para diferentes sismos de análisis establecidos por el COMITÉ VISION 2000

SISMO	VIDA ÚTIL	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA	PERÍODO DE RETORNO
Frecuente	30 años	50 %	43 años
Ocasional	50 años	50 %	72 años
Raro	50 años	10 %	475 años
Muy raro	100 años	10 %	970 años

**Fuente:** Aguiar Falconí, 2003, p. 27

Es de particular interés que, el “Sismo Raro” es también acreditado como “Sismo Excepcional” o “Sismo de Diseño” (Aguiar Falconí, 2008).

## 2.2.26. ESPECTROS DE ESTUDIO.

### 2.2.26.1. Espectro de diseño según la norma peruana E.030.

Para la realización del Espectro de Diseño, la Norma Peruana E.030 (2019) estipula 5 características necesarias a requerir las cuales son: La zonificación (Z), el factor de uso (U), el factor de amplificación sísmica (C), el factor de suelo (S) y el coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas (R). La función espectral de pseudo-aceleración acorde a la norma es:

$$Sa = \frac{Z*U*C*S}{R} * g \quad (27)$$

$$\frac{C}{R} \geq 0.11 \quad (28)$$

Donde:

$Sa$  : Aceleración espectral.

$Z$  : Factor de zona.

$U$  : Factor de uso.

$C$  : Factor de amplificación sísmica.

$S$  : Factor de suelo.

$R$  : Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas.

#### a) Factor de zona (Z).

Para la norma E.030 (2019), el factor Z expresa la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años y es denotado como una fracción de la gravedad. Este factor se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla N° 22** Factores de zona “Z”

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

**Fuente:** Norma E.030, 2019, p. 8

**b) Factor de uso (U).**

La norma E.030 (2019) categoriza a las edificaciones en 4 clases siendo estas: A para edificaciones esenciales, B para edificaciones importantes, C para edificaciones comunes y D para edificaciones temporales. A cada una de ellas les asigna un factor de uso (U). Para mayor información, consultar la presente norma.

**c) Perfil de suelo.**

La clasificación de perfiles de suelo que adopta la norma E.030 (2019) está dividido en 5 clases siendo estos: S<sub>0</sub> para roca dura, S<sub>1</sub> para roca o suelos muy rígidos, S<sub>2</sub> para suelos intermedios, S<sub>3</sub> para suelos blandos y S<sub>4</sub> para condiciones excepcionales, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla N° 23** Clasificación de los perfiles de suelo

Perfil	$\overline{V_s}$	$\overline{N_{60}}$	$\overline{S_u}$
S <sub>0</sub>	> 1500 m/s	-	-
S <sub>1</sub>	500 m/s a 1500 m/s	> 50	> 100 kPa
S <sub>2</sub>	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S <sub>3</sub>	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S <sub>4</sub>	Clasificación basada en el EMS		

**Fuente:** Norma E.030, 2019, p. 10

**d) Parámetros de sitio (S, T<sub>P</sub>, T<sub>L</sub>).**

Los parámetros de sitio (S, T<sub>P</sub> y T<sub>L</sub>) son obtenidos de las siguientes tablas.

**Tabla N° 24** Factor de suelo “S”

	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Z <sub>4</sub>	0.80	1.00	1.05	1.10
Z <sub>3</sub>	0.80	1.00	1.15	1.20
Z <sub>2</sub>	0.80	1.00	1.20	1.40
Z <sub>1</sub>	0.80	1.00	1.60	2.00

**Fuente:** Norma E.030, 2019, p. 12

**Tabla N° 25** Periodos “T<sub>P</sub>” y “T<sub>L</sub>”

	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
T <sub>P</sub> (s)	0.3	0.4	0.6	1.0
T <sub>L</sub> (s)	3.0	2.5	2.0	1.6

**Fuente:** Norma E.030, 2019, p. 12



**e) Factor de amplificación símica (C).**

El factor C varía de acuerdo a los parámetros de sitio, expresado de la siguiente manera.

$$T < T_P, \quad C = 2.5 \quad (29)$$

$$T_P < T < T_L, \quad C = 2.5 \left( \frac{T_P}{T} \right) \quad (30)$$

$$T > T_L, \quad C = 2.5 \left( \frac{T_P * T_L}{T^2} \right) \quad (31)$$

Donde:

$T$  : Periodo fundamental de vibración de la estructura.

$T_P$  : Periodo que define la plataforma del factor C.

$T_L$  : Periodo que define el inicio de la zona del factor C.

**f) Coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas (R).**

El coeficiente R es definido con la siguiente expresión:

$$R = R_0 \cdot I_a \cdot I_p \quad (32)$$

Donde:

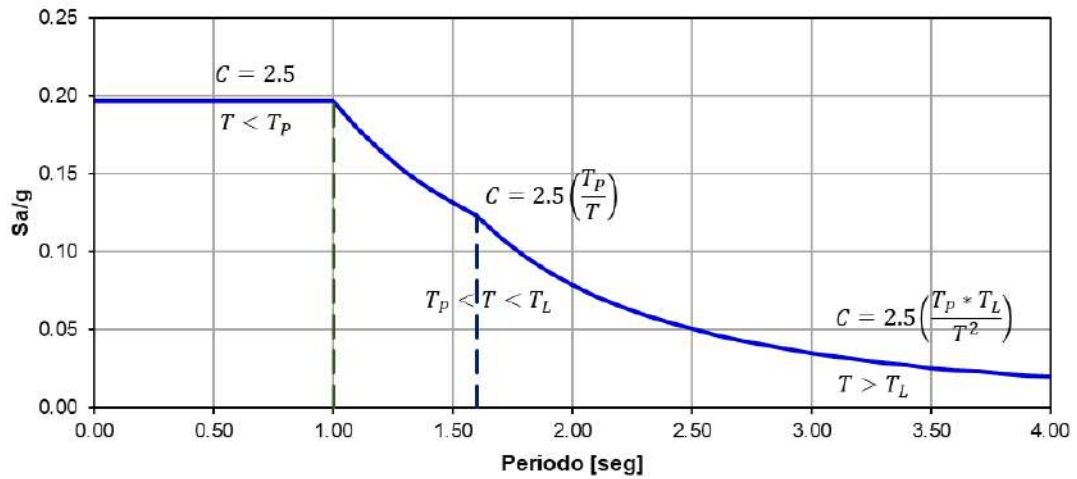
$R_0$  : Coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas.

$I_a$  : Factor de irregularidad en altura.

$I_p$  : Factor de irregularidad en planta.

De la ecuación anterior, el coeficiente  $R_0$  está en función del sistema estructural (ver norma E.030, 2019). Por ejemplo, para pórticos de concreto armado,  $R_0$  adopta un valor de 8. Por otro lado, los factores de irregularidad  $I_a$  e  $I_p$  son obtenidos de las tablas 8 y 9 de la presente norma, respectivamente.

Con todos los parámetros definidos que intervienen en la obtención del espectro de diseño según la norma peruana E.030 (2019), se muestra a continuación un ejemplo de modelado de dicho espectro.



**Figura N° 21** Ejemplo de modelado del espectro de diseño de la norma peruana E.030

### 2.2.26.2. Espectro según el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el 2014 desarrolló un estudio de peligro sísmico para nuestro país haciendo uso de datos sísmicos para el periodo 1960 – 2012 y del uso de 33 fuentes sismogénicas (Tavera et al., 2014). Los cálculos probabilísticos del peligro sísmico se realizaron con el software CRISIS 2007 con lo cual se pudo generar mapas de peligro sísmico concernientes a distintos periodos de retorno. La siguiente tabla muestra los valores de aceleraciones horizontales del suelo para cada capital de departamento del Perú.

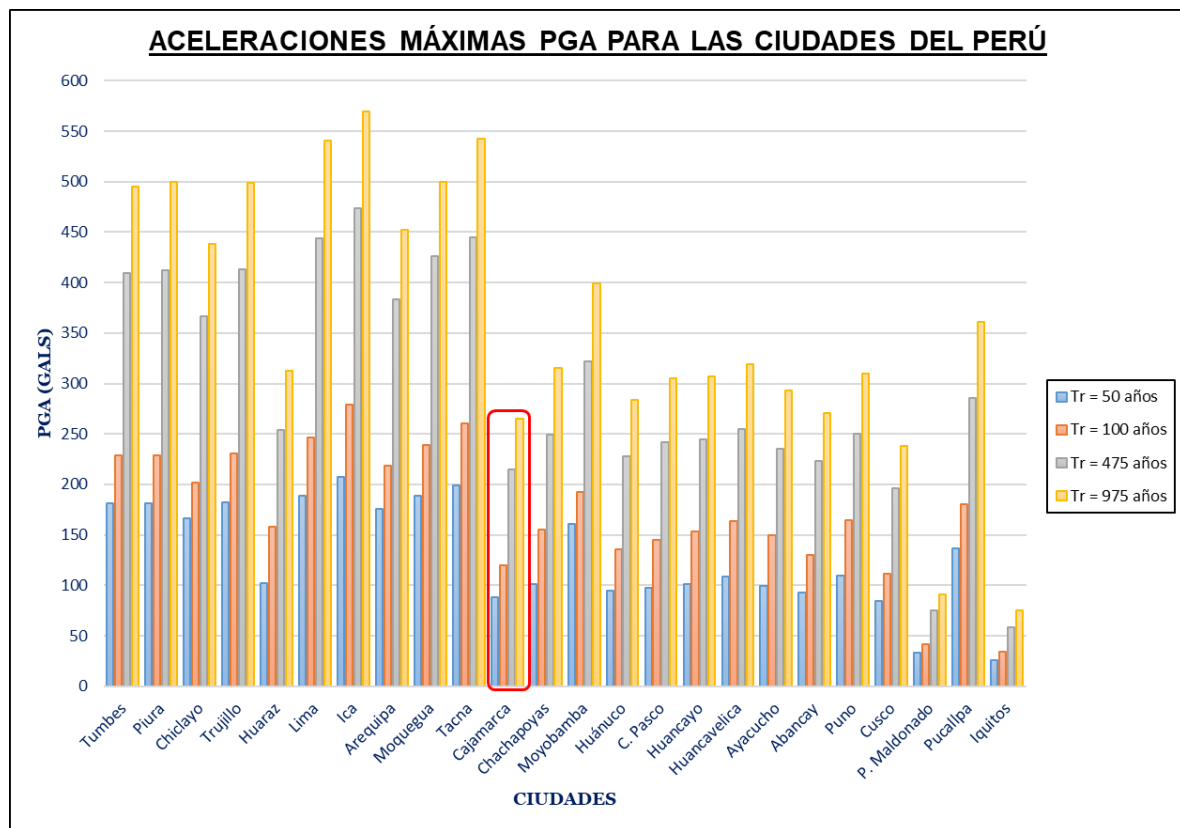
**Tabla N° 26** Valores de máximas aceleraciones esperadas (PGA) para las capitales de departamento del Perú

Ciudad	Coordenadas Geográficas		Aceleraciones Máximas PGA (gals) por periodo de retorno en años Tr			
	Latitud	Longitud	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 475	Tr = 975
Tumbes	-3.56	-80.45	181.72	228.43	409.05	494.84
Piura	-5.2	-80.63	181.32	228.89	412.19	499.87
Chiclayo	-6.77	-79.84	166.02	201.69	366.46	437.97
Trujillo	-8.11	-79.03	181.79	230.20	413.56	498.62
Huaraz	-9.53	-77.53	102.48	158.22	253.80	312.68
Lima	-12.05	-77.05	188.66	246.28	444.23	541.15
Ica	-14.07	-75.73	206.92	279.28	473.32	569.62
Arequipa	-16.4	-71.54	175.97	218.77	382.99	452.52
Moquegua	-16.93	-70.98	188.69	238.96	426.17	499.97
Tacna	-17.99	-70.24	198.93	260.60	445.10	543.08
Cajamarca	-7.17	-78.52	88.29	120.23	214.97	265.05
Chachapoyas	-6.21	-77.85	101.34	155.27	249.55	314.96
Moyobamba	-6.05	-76.97	160.98	192.42	321.88	399.27
Huánuco	-9.93	-76.24	94.63	135.73	228.31	283.42
C. Pasco	-10.43	-75.15	97.65	145.38	242.28	305.37
Huancayo	-12.07	-75.23	100.84	153.50	244.94	306.88
Huancavelica	-12.76	-74.98	108.30	164.01	255.14	318.98
Ayacucho	-13.16	-74.22	99.17	149.89	235.34	292.69
Abancay	-13.63	-72.88	92.59	129.96	222.82	271.12
Puno	-15.83	-70.03	109.45	164.54	250.60	309.96
Cusco	-13.52	-71.98	84.89	111.43	196.00	238.01
P. Maldonado	-12.61	-69.18	33.11	41.72	75.39	91.40
Pucallpa	-8.38	-74.54	136.61	180.17	285.73	360.72
Iquitos	-3.75	-73.25	25.37	34.18	57.95	74.68

**Fuente:** Tavera et al., 2014, p. 33

Si representamos los datos de forma gráfica (Figura 22) podemos observar que los mayores valores de aceleraciones máximas PGA para cualquier periodo de retorno le corresponden a la

ciudad de Ica. En tanto, la ciudad de Cajamarca se encuentra ubicada en cuarto lugar de los menores valores de aceleraciones máximas PGA, después de Iquitos, P. Maldonado y Cusco.



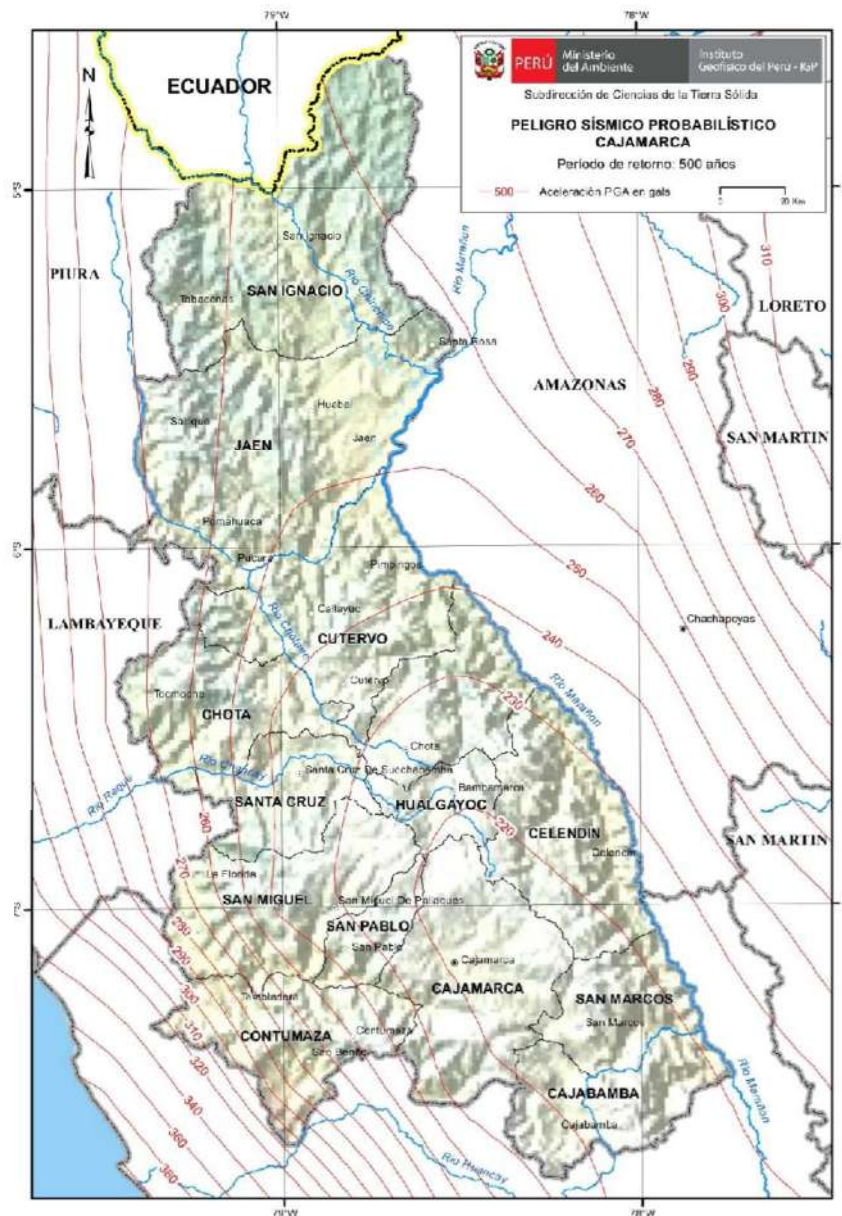
**Figura N° 22** Aceleraciones máximas PGA (gals) para las ciudades del Perú en diferentes periodos de retorno

Ordenando estos valores de PGA para diferentes periodos de retorno para la ciudad de Cajamarca, tendremos.

**Tabla N° 27** Aceleraciones máximas PGA para diferentes periodos de retorno en la ciudad de Cajamarca según el IGP

Tr	PGA (gals)	PGA (g)
50	88.29	0.09
100	120.23	0.12
475	214.97	0.22
975	265.05	0.27

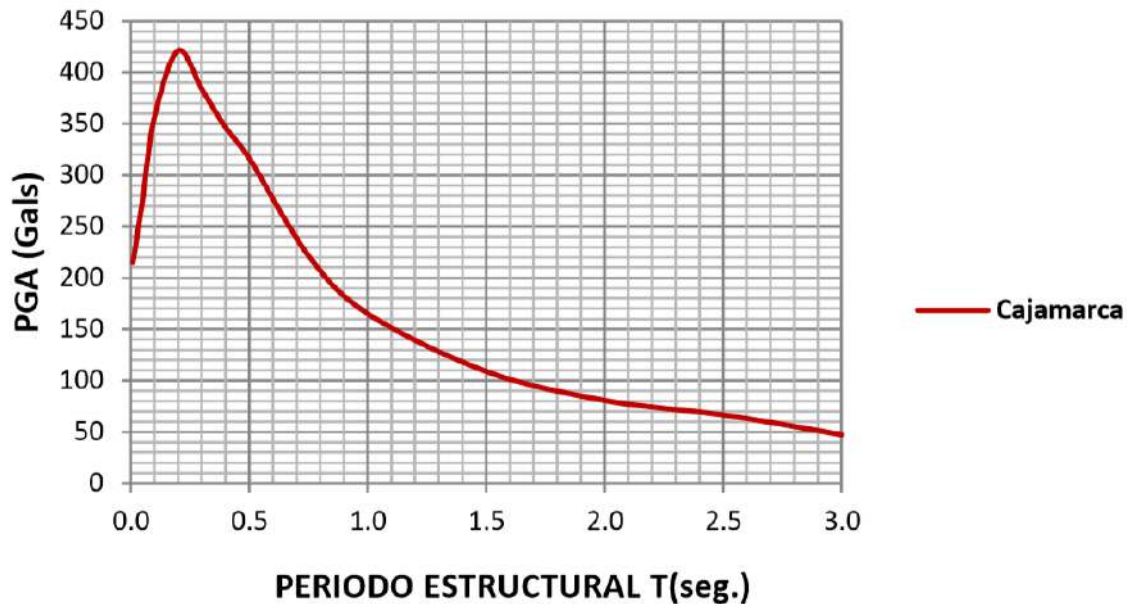
Así mismo, del estudio de peligro sísmico del IGP, se pudo obtener mapas de aceleraciones para periodos de retorno de 500 años (Tavera et al., 2014). En la siguiente figura se puede apreciar el correspondiente a la ciudad de Cajamarca.



**Figura N° 23** Mapa de aceleraciones para periodos de retorno de 500 años en el departamento de Cajamarca

**Fuente:** Tavera et al., 2014

Aparte de los mapas de peligro sísmico obtenidos en el estudio del IGP, también se procedió a generar espectros de peligro uniforme. Los espectros de peligro uniforme fueron construidos empleando curvas de peligro sísmico para diferentes periodos espectrales, cada uno con valores de aceleración obtenidos para una misma probabilidad de excedencia (Tavera et al., 2014). La siguiente figura muestra el espectro de peligro uniforme para el departamento de Cajamarca con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.



**Figura N° 24** Espectro del peligro uniforme para el departamento de Cajamarca con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años

**Fuente:** Tavera et al., 2014

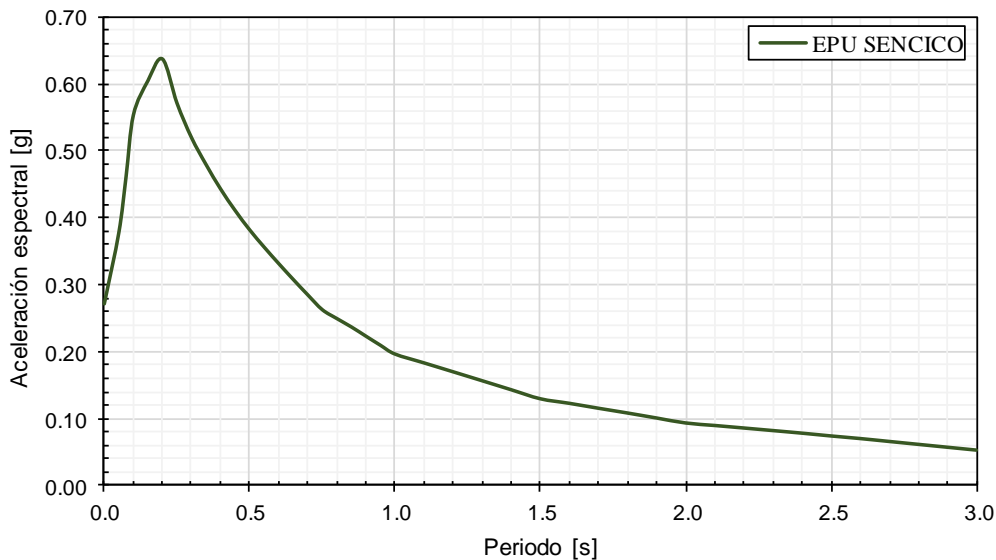
La data proporcionada del estudio del peligro sísmico realizada por el IGP ya ha sido tomada para diversos trabajos de estudio (ver por ejemplo Barreto, 2019).

### 2.2.26.3. Espectro según SENCICO.

El Servicio Nacional de Capacitación Para la Industria de la Construcción (SENCICO), es una entidad del Sector Vivienda, Construcción y Saneamiento; la cual brinda en su página web entre muchos de sus servicios, uno de consultas para la determinación del peligro sísmico probabilístico en el territorio nacional, elaborado a partir del análisis de la data del catálogo sísmico y haciendo uso de 29 fuentes sismogénicas. Por otro lado, en la obtención del peligro sísmico probabilístico, las leyes de atenuación propuestas (SENCICO, 2016, p.2) fueron combinadas mediante el uso del árbol lógico, y el aplicativo web está desarrollado en base a la tesis de Roncal Castro (2017). No se entrará en detalle en el aplicativo, pero según el autor mencionado, este cuenta con 4 partes fundamentales las cuales son:

1. Mapa de localización.
2. Ploteo de Curvas de Peligro Sísmico.
3. Ploteo de Espectros de Peligro Uniforme para periodos de retorno entre 1 y 10,000 años.
4. Ploteo de Espectros de Diseño.

El espectro de diseño propuesto por SENCICO para la ciudad de Cajamarca se muestra a continuación.

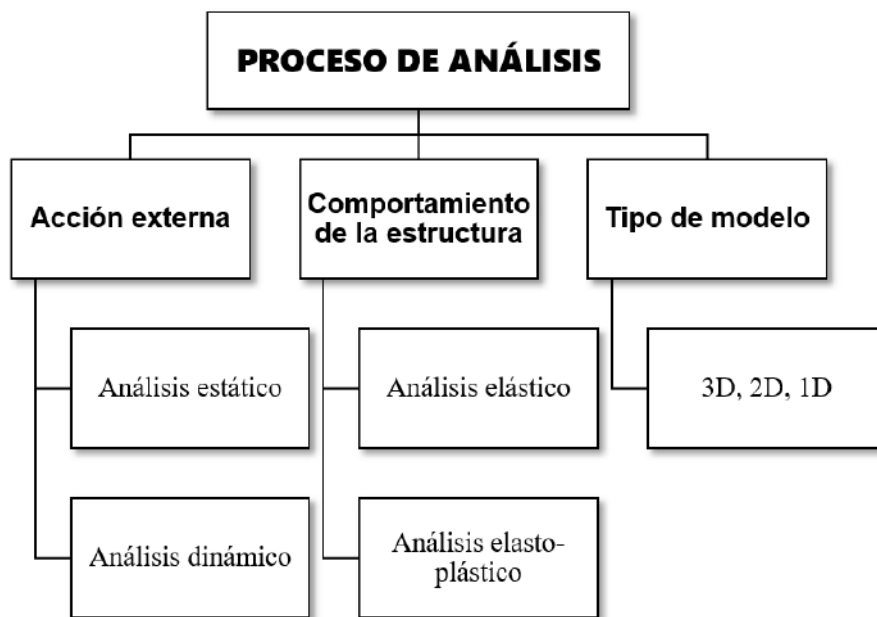


**Figura N° 25** Espectro de peligro uniforme para la ciudad de Cajamarca con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años

### 2.2.27. ANÁLISIS SÍSMICO.

Diversos autores como Chopra (2014) o Duggal (2013) dan a entender que el análisis sísmico es usado para comprender la respuesta de estructuras producto de excitaciones sísmicas, en donde el profesional responsable somete a una estructura a diferentes métodos (estáticos y dinámicos) que tratan de representar una actuación sísmica en dicha estructura y por consiguiente la esperada respuesta de la misma, permitiendo así considerar y definir la rigidez, resistencia, y ductilidad de la estructura acorde al peligro sísmico del sitio.

El proceso de análisis sísmico puede ser clasificado como se muestra en la siguiente figura.



**Figura N° 26** Proceso de análisis  
**Fuente:** Adaptado de Duggal, 2013

Debido a que, en el comportamiento dinámico del análisis de la respuesta estructural se abarca acciones tanto de forma global y de sismos en forma específica (Reboredo, 1996), se tomará como proceso de análisis el método dinámico.

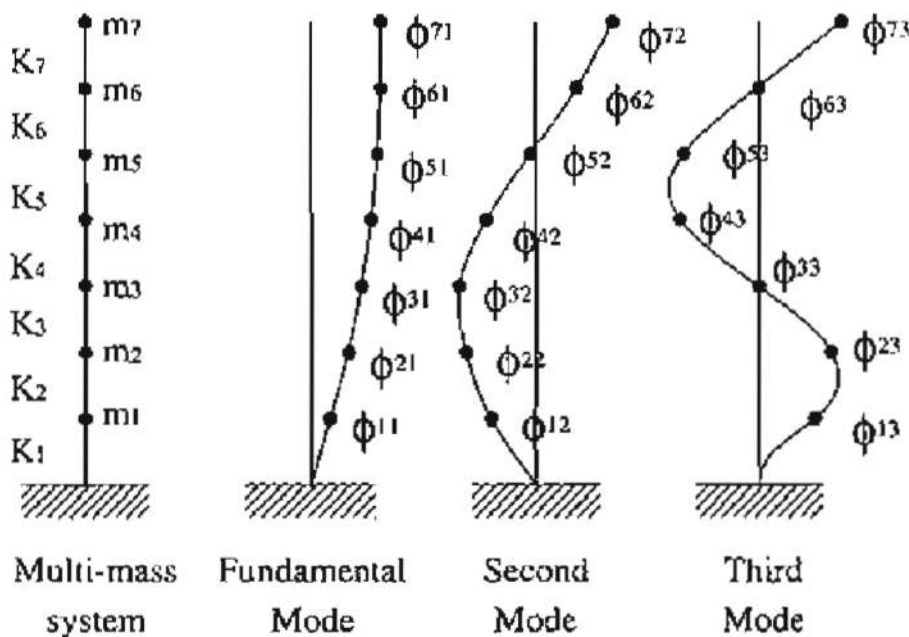
### 2.2.27.1. Métodos dinámicos.

Los métodos dinámicos son usados comúnmente en la determinación de las solicitaciones sísmicas de estructuras elevadas, donde la respuesta estructural suele complicarse por la mayor vibración de los modos, y de igual forma por las tendencias a las variaciones de rigidez y masa en altura (CENAPRED, 1999). Básicamente los métodos dinámicos se clasifican en estudios de análisis dinámico modal espectral y análisis dinámico tiempo-historia. En esta sección solo se describirá el análisis dinámico modal espectral.

#### 2.2.27.1.1. Análisis dinámico modal espectral.

El análisis modal es caracterizado por someter a una estructura a un espectro de pseudo aceleración. En este contexto, los espectros de diseño lograrán una respuesta máxima de los primeros modos de vibración de la estructura (Reboredo, 1996).

El número de modos de vibración depende del número de masas. Sin embargo, en la mayoría de casos, los tres primeros modos son los más importantes para el análisis estructural; además, el modo de vibración varía según el movimiento del suelo y las características estructurales, y suele ser el valor determinante para la respuesta estructural (Gioncu y Mazzolani, 2011).



**Figura N° 27** Formas típicas de los 3 primeros modos de vibración

**Fuente:** ATC 40, 1996



Una de las ventajas del análisis modal, como se mencionó anteriormente, es que solo se necesita saber la respuesta de fundamentalmente de los primeros modos, específicamente los tres primeros, dado a que en los demás modos la respuesta estructural es mucho menor (Bazán y Meli, 2002), donde el primer modo caracterizado con un largo período es conocido como “Modo fundamental”, debido a que generalmente brinda una descripción aceptable del comportamiento de la estructura (Reboredo, 1996).

### **2.2.27.1.2. Criterios de combinación para los modos de vibración.**

García (1998) da a entender que los modos de vibración son propios y característicos de un sistema estructural y además se sabe que para fines de diseño se busca obtener una respuesta total máxima paramétrica de la estructura, por lo que existe diversas formas y/o criterios de la combinación de los modos de vibración. A continuación, se presentan el criterio de combinación a emplear adoptado por la norma E.030 (2019).

#### **2.2.27.1.2.1. Criterio de la combinación cuadrática completa (CQC).**

En este criterio toma en cuenta el ensamblaje estadístico entre modos de vibración reducidamente espaciados ocasionados por el amortiguamiento (Goytia Torrez y Villanueva Inca, 2001). Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r = \sqrt{\sum \sum r_i p_{ij} r_j} \quad (33)$$

El término  $p_{ij}$  viene dado por:

$$p_{ij} = \frac{8\beta^2(1+\lambda)\lambda^{3/2}}{(1-\lambda^2)^2 + 4\beta^2\lambda(1+\lambda)^2} \quad \lambda = \frac{\omega_j}{\omega_i} \quad (34)$$

Donde:

$r$ : Representa las respuestas modales, desplazamientos o fuerzas.

$\beta$ : Fracción de amortiguamiento constante, que se puede suponer constante para todos los modos igual a 0.05.

$\omega_i, \omega_j$ : Frecuencias angulares de los modos  $i, j$ .

$\lambda$ : Relación entre las frecuencias angulares de los modos  $i, j$ .

### **2.2.28. RESPUESTA ESTRUCTURAL.**

En general, la respuesta estructural para cargas dinámicas está mejor detallada en términos de desplazamientos de la estructura en análisis (Duggal, 2013).

### **2.2.29.DISTORSIÓN DE ENTREPISO O DERIVA.**

Se conoce como distorsión de entrepiso o deriva al cociente entre la diferencia de desplazamientos laterales de dos niveles consecutivos de la estructura entre la altura de dicho entrepiso (SINAPRED, 2005), siendo este el parámetro más involucrado con el daño estructural (CENAPRED,1999).

Según la Norma E.030 (2019) los límites para la distorsión de entrepiso son los siguientes:

**Tabla N° 28** Límites para la distorsión de entrepiso

<b>Material Predominante</b>	<b>(<math>\Delta_i/h_{ei}</math>)</b>
Concreto Armado	0.007
Acero	0.010
Albañilería	0.005
Madera	0.010
Edificios de concreto armado con muros de ductilidad limitada	0.005

**Fuente:** Norma E.030, 2019, p. 27

## **2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.**

### **2.3.1. EFECTOS DE SITIO.**

*“Los efectos de sitio son amplificaciones del movimiento del suelo debido a ondas sísmicas en un determinado lugar”* (Frau, 2018).

### **2.3.2. ENSAYO MASW.**

*“Este método consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh u Ondas R) de un registro en arreglo multicanal, generada por una fuente de energía impulsiva sobre la superficie a una distancia predeterminada de la línea de estudio, obteniéndose el perfil de velocidades de onda de corte ( $V_S$ ) para el punto central de dicha línea”* (López Prado, 2016).

### **2.3.3. ESPECTRO DE DISEÑO.**

*“El espectro de diseño debe consistir en un conjunto de curvas suaves o en una serie de líneas rectas con una curva para cada nivel de amortiguamiento”* (Chopra, 2014).

#### **2.3.4. ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME.**

*“El espectro de peligro uniforme define al espectro que posee la misma probabilidad de ser excedida en un periodo dado en todo el rango de ordenadas espectrales. Este espectro toma en cuenta las posibles combinaciones entre la magnitud y la distancia del sismo al punto de interés; por lo tanto, puede ser usado en un análisis espectral de respuesta estructural”* (Tavera et al., 2014).

#### **2.3.5. ESPECTRO DE RESPUESTA.**

*“Se define el espectro de respuesta como la respuesta máxima de un conjunto de osciladores de 1 gdl que tienen el mismo amortiguamiento, sometidas a una historia de aceleraciones dadas”* (Aguilar Falconí, 2008).

#### **2.3.6. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.**

*“Representan la relación de las medidas de intensidad observada en un tipo de sitio respecto de otro tomado como referencia”* (Frau, 2018).

#### **2.3.7. FRECUENCIA NATURAL.**

*“Cuando ésta coincide con la frecuencia predominante del movimiento se produce resonancia y la energía se amplifique pudiendo causar mayor daño. Por ello las estructuras rígidas, de bajo periodo propio, se ven más afectadas por movimientos en los cuales la mayor parte de la energía está contenida en el rango de las altas frecuencias, mientras que lo contrario sucede con las estructuras flexibles”* (Benito y Cabañas, 1999).

#### **2.3.8. FUENTES SIMOGÉNICAS.**

*“La fuente sismogénica es aquella línea, área 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”* (Tavera et al., 2014).

#### **2.3.9. LEYES DE ATENUACIÓN.**

*“Son aquellas leyes que relacionan la magnitud, la posición de la fuente con relación a un sitio dado y la intensidad producida. Dichas leyes asumen el principio de que, en la medida que aumenta la distancia a partir de la fuente, la intensidad disminuye”* (CENAPRED, 2014).

### **2.3.10.PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN.**

*“El periodo fundamental de vibración de una estructura es el tiempo que la estructura toma para completar un ciclo completo de vibración, así mismo este está en función del número de niveles, altura del edificio y densidad de muros” (CENAPRED, 1999).*

### **2.3.11.PGA (Peak ground acceleration).**

*“Amplitud de aceleración máxima medida por un movimiento fuerte en un acelerograma durante un terremoto” (Gioncu y Mazzolani, 2011). “Por otra parte, la aceleración pico, PGA, que caracteriza inicialmente el movimiento sólo da información de la energía liberada en un rango de las altas frecuencias y no es representativa de la contenida en el resto del espectro” (Benito y Cabañas, 1999).*

### **2.3.12.PROBABILIDAD.**

*“El término probabilidad se refiere al estudio de azar y la incertidumbre en cualquier situación en la cual varios posibles sucesos pueden ocurrir” (Devore, 2008).*

### **2.3.13.RESPUESTA ESTRUCTURAL.**

*“La respuesta estructural es modelada como la máxima respuesta de un número de oscilaciones de un simple grado de libertad, cada uno representando un modo específico de vibración de la estructura real” (Goytia Torrez y Villanueva Inca, 2001).*

### **2.3.14.VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE.**

*“Es la velocidad correspondiente a la onda de cuerpo tipo S, estas ondas presentan una particularidad muy importante, y es que sólo se pueden transmitirse a través de materiales sólidos” (Rivera, 2005), “siendo así que su velocidad es mayor cuando viaja a través de roca y suelos duros, y disminuye cuando lo hace a través de suelos blandos, por esta razón la velocidad de la onda de corte se utiliza como una medida del tipo de suelo” (Rochel Awad, 2012).*

## **CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.**

En la presente investigación se pretende comparar la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de la normativa peruana vigente y espectros de diseño probabilísticos en la ciudad de Cajamarca, para lo cual se ha utilizado las fuentes sismogénicas proporcionadas por SENCICO y los ensayos MASW de coliseo multiusos Qhapac Ñan ubicado en esta ciudad. Teniendo presente lo dicho anteriormente, se considera como ubicación geográfica el departamento, provincia y distrito de Cajamarca.

### **3.2. ÉPOCA DE INVESTIGACIÓN.**

La presente investigación se ha realizado entre los meses de abril y julio del año 2021.

### **3.3. PROCEDIMIENTO.**

En esta sección se detalla el procedimiento y orden metodológico utilizado para el desarrollo de la investigación.

#### **3.3.1. TIPO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA.**

Como inicio metodológico de esta investigación se plantea seguir un análisis de peligro sísmico probabilístico (PSHA), ya que se utiliza fuentes sismogénicas supeditadas a diferentes leyes de atenuación combinadas de manera probabilística mediante el uso del árbol lógico obteniendo así diversos alcances en cuanto a aceleraciones espectrales.

#### **3.3.2. FUENTES SISMOGÉNICAS.**

Se ha hecho uso de la estimación principal de la sismicidad de las 29 fuentes sismogénicas del estudio de SENCICO (SENCICO, 2016). Esta base de datos es mostrada en páginas anteriores (Tablas 2, 3 y 4).

#### **3.3.3. LEYES DE ATENUACIÓN.**

En esta investigación se ha utilizado las leyes de atenuación de Youngs et al. (1997), Atkinson y Boore (2003), Zhao et al. (2006) y Abrahamson et al. (2016) para sismos de subducción, y las de Sadigh et al. (1997), Campbell y Bozorgnia (2014) y Chiou y Youngs (2014) para sismos corticales o superficiales.

Por otro lado, si bien existe una gran incertidumbre y gran variabilidad en la selección de qué ley o leyes de atenuación escoger para la obtención de un espectro de peligro uniforme, o en forma general en un estudio de peligro sísmico en nuestro país. Por ejemplo, esta

investigación hará uso de 7 leyes de atenuación, Malpartida Pino (2017) y Campos Irigoín (2019), en cambio utilizaron únicamente 2 leyes de atenuación; por otro lado, Charca et al. (2018) trabajó con 5 leyes de atenuación y Roncal Castro (2017) realizó su investigación con 7 leyes de atenuación. Cabe recalcar que estos dos últimos autores hicieron uso del árbol lógico. En este contexto, parece razonable mencionar que existe una gran incertidumbre en la selección de leyes de atenuación, aleatoria en la combinación de estas para la generación de espectros, por lo que se ha creído conveniente cuantificar esta incertidumbre utilizando un árbol lógico, generando así espectros de peligro uniforme probabilísticos.

### **3.3.4. ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME PROBABILÍSTICOS.**

#### **3.3.4.1. Método del árbol lógico.**

Se hará uso del árbol lógico con el cual se pretenderá generar una distribución de probabilidades para las diferentes leyes de atenuación, obteniendo así diversos espectros de diseño con diferentes rangos de intensidad, considerando a dichas leyes en un suelo tipo B (ASCE/SEI 7-16, 2017). El análisis se ha dividido en ocho fases, de las cuales las dos primeras consideran el 100 % de probabilidad para cada ley de atenuación involucrada.

1. La primera fase consiste en considerar de forma independiente únicamente las leyes de atenuación de las fuentes de subducción, por lo que tomaremos en primera instancia las leyes de Youngs et al. (1997), Zhao et al. (2006), Atkinson y Boore (2003) y Abrahamson et al. (2016). La denominación de esta primera fase lo conforman las combinaciones C1 a C4.
2. La segunda fase consiste en incorporar a cada una de las leyes antes mencionadas (las de la primera fase), las leyes de fuentes continentales, es decir, las leyes de Sadigh et al. (1997), Campbell y Bozorgnia (2014) y Chiou y Youngs (2014) de forma independiente, por lo que a cada una de las 4 leyes de fuentes de subducción se les añadirá una ley de fuente continental, generando un total de doce combinaciones. La denominación de esta segunda fase lo conforman las combinaciones C5 a C16.
3. La tercera fase consiste en tomar únicamente las fuentes de subducción y dos leyes de atenuación para cada fuente, a estas dos leyes se les asignará una probabilidad que indicará el grado de credibilidad de que la rama del árbol lógico represente el valor más adecuado. La denominación de esta tercera fase lo conforman las combinaciones C17 a C39.

4. La cuarta fase es similar a la tercera fase, con la salvedad de que se tomarán tres leyes de atenuación para cada fuente de subducción, de igual forma, a estas tres leyes se les asignará una probabilidad que indicará el grado de credibilidad de que la rama del árbol lógico represente el valor más adecuado. La denominación de esta cuarta fase lo conforman las combinaciones C40 a C53.
5. La quinta fase es similar a las dos anteriores, pero considerando las cuatro leyes de atenuación para cada fuente de subducción. La denominación de esta quinta fase lo conforman las combinaciones C54 a C60.
6. La sexta fase consiste en considerar tres leyes de atenuación para las fuentes de subducción y una ley de atenuación para las fuentes continentales, específicamente la ley de Sadigh et al. (1997). La denominación de esta sexta fase lo conforman las combinaciones C61 a C69.
7. La séptima fase consiste en considerar tres leyes de atenuación para las fuentes de subducción y tres leyes de atenuación para las fuentes continentales. La denominación de esta séptima fase lo conforman las combinaciones C70 a C78.
8. La octava y última fase consiste considerar todas las leyes de atenuación, es decir, las cuatro leyes de atenuación para las fuentes de subducción y las tres leyes de atenuación para las fuentes continentales. La denominación de esta octava fase lo conforman las combinaciones C79 a C88.

Cabe recalcar que cuando se tenga dos o más leyes de atenuación por fuente sismogénica, las probabilidades de grado de credibilidad que se les asignará a las leyes de atenuación se tendrá en cuenta el no generar una sobreestimación en cada uno de ellos.

Finalmente, para simplificar la asignación de cada ley de atenuación a cada fuente sismogénica, se ha designado la siguiente nomenclatura.

➤ **Fuentes de Subducción Interface: FSIF.**

1. Youngs et al. (1997) – Interface → Y1997IF.
2. Zhao et al. (2006) – Interface → Z2006IF.
3. Atkinson y Boore (2003) – Interface → AB2003IF.
4. Abrahamson et al. (2016) – Interface → A2016IF.

➤ **Fuentes de Subducción Intraplaca: FSIT.**

5. Youngs et al. (1997) – Intraplaca → Y1997IP.
6. Zhao et al. (2006) – Intraplaca → Z2006IP.
7. Atkinson y Boore (2003) – Intraplaca → AB2003IP.
8. Abrahamson et al. (2016) – Intraplaca → A2016IP.

➤ **Fuentes Corticales: FC.**

9. Sadigh et al. (1997) → S1997C.
10. Campbell y Bozorgnia (2014) → CB2014C.
11. Chiou y Youngs (2014) → CY2014C.

Las siguientes tablas mostrarán las combinaciones estimadas para cada ley de atenuación correspondientes a las ocho fases anteriormente descritas.

**Tabla N° 29** Combinaciones estimadas para la fase 1 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C1	FSIF	Y1997IF	1.00
	FSIP	Y1997IP	1.00
C2	FSIF	Z2006IF	1.00
	FSIP	Z2006IP	1.00
C3	FSIF	AB2003IF	1.00
	FSIP	AB2003IP	1.00
C4	FSIF	A2016IF	1.00
	FSIP	A2016IP	1.00

**Tabla N° 30** Combinaciones estimadas para la fase 2 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C5	FSIF	Y1997IF	1.00
	FSIT	Y1997IP	1.00
	FC	S1997C	1.00
C6	FSIF	Y1997IF	1.00
	FSIT	Y1997IT	1.00
	FC	CB2014C	1.00
C7	FSIF	Y1997IF	1.00
	FSIT	Y1997IP	1.00
	FC	CY2014C	1.00
C8	FSIF	Z2006IF	1.00
	FSIT	Z2006IP	1.00
	FC	S1997C	1.00
C9	FSIF	Z2006IF	1.00
	FSIT	Z2006IP	1.00
	FC	CB2014C	1.00
C10	FSIF	Z2006IF	1.00
	FSIT	Z2006IP	1.00
	FC	CY2014C	1.00



**Tabla N° 30** Combinaciones estimadas para la fase 2 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C11	FSIF	AB2003IF	1.00
	FSIT	AB2003IP	1.00
	FC	S1997C	1.00
C12	FSIF	AB2003IF	1.00
	FSIT	AB2003IP	1.00
	FC	CB2014C	1.00
C13	FSIF	AB2003IF	1.00
	FSIT	AB2003IP	1.00
	FC	CY2014C	1.00
C14	FSIF	A2016IF	1.00
	FSIT	A2016IP	1.00
	FC	S1997C	1.00
C15	FSIF	A2016IF	1.00
	FSIT	A2016IP	1.00
	FC	CB2014C	1.00
C16	FSIF	A2016IF	1.00
	FSIT	A2016IP	1.00
	FC	CY2014C	1.00

**Tabla N° 31** Combinaciones estimadas para la fase 3 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C17	FSIF	Y1997IF	0.50
		Z2006IF	0.50
	FSIP	Y1997IP	0.50
		Z2006IP	0.50
C18	FSIF	Y1997IF	0.55
		Z2006IF	0.45
	FSIP	Y1997IP	0.55
		Z2006IP	0.45
C19	FSIF	Y1997IF	0.60
		Z2006IF	0.40
	FSIP	Y1997IP	0.60
		Z2006IP	0.40
C20	FSIF	Y1997IF	0.65
		Z2006IF	0.35
	FSIP	Y1997IP	0.65
		Z2006IP	0.35

**Tabla N° 31** Combinaciones estimadas para la fase 3 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C21	FSIF	Y1997IF	0.70
		Z2006IF	0.30
	FSIP	Y1997IP	0.70
		Z2006IP	0.30
C22	FSIF	Y1997IF	0.75
		Z2006IF	0.25
	FSIP	Y1997IP	0.75
		Z2006IP	0.25
C23	FSIF	Y1997IF	0.50
		AB2003IF	0.50
	FSIP	Y1997IP	0.50
		AB2003IP	0.50
C24	FSIF	Y1997IF	0.55
		AB2003IF	0.45
	FSIP	Y1997IP	0.55
		AB2003IP	0.45
C25	FSIF	Y1997IF	0.60
		AB2003IF	0.40
	FSIP	Y1997IP	0.60
		AB2003IP	0.40
C26	FSIF	Y1997IF	0.65
		AB2003IF	0.35
	FSIP	Y1997IP	0.65
		AB2003IP	0.35
C27	FSIF	Y1997IF	0.70
		AB2003IF	0.30
	FSIP	Y1997IP	0.70
		AB2003IP	0.30
C28	FSIF	Y1997IF	0.75
		AB2003IF	0.25
	FSIP	Y1997IP	0.75
		AB2003IP	0.25
C29	FSIF	Y1997IF	0.50
		A2016IF	0.50
	FSIP	Y1997IP	0.50
		A2016IP	0.50

**Tabla N° 31** Combinaciones estimadas para la fase 3 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C30	FSIF	Y1997IF	0.55
		A2016IF	0.45
	FSIP	Y1997IP	0.55
		A2016IP	0.45
C31	FSIF	Y1997IF	0.60
		A2016IF	0.40
	FSIP	Y1997IP	0.60
		A2016IP	0.40
C32	FSIF	Y1997IF	0.65
		A2016IF	0.35
	FSIP	Y1997IP	0.65
		A2016IP	0.35
C33	FSIF	Y1997IF	0.70
		A2016IF	0.30
	FSIP	Y1997IP	0.70
		A2016IP	0.30
C34	FSIF	Y1997IF	0.75
		A2016IF	0.25
	FSIP	Y1997IP	0.75
		A2016IP	0.25
C35	FSIF	Y1997IF	0.45
		A2016IF	0.55
	FSIP	Y1997IP	0.45
		A2016IP	0.55
C36	FSIF	Y1997IF	0.40
		A2016IF	0.60
	FSIP	Y1997IP	0.40
		A2016IP	0.60
C37	FSIF	Y1997IF	0.35
		A2016IF	0.65
	FSIP	Y1997IP	0.35
		A2016IP	0.65
C38	FSIF	Y1997IF	0.30
		A2016IF	0.70
	FSIP	Y1997IP	0.30
		A2016IP	0.70

**Tabla N° 31** Combinaciones estimadas para la fase 3 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C39	FSIF	Y1997IF	0.25
		A2016IF	0.75
	FSIP	Y1997IP	0.25
		A2016IP	0.75

**Tabla N° 32** Combinaciones estimadas para la fase 4 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C40	FSIF	Y1997IF	0.333
		Z2006IF	0.333
		A2016IF	0.333
	FSIP	Y1997IP	0.333
		Z2006IP	0.333
		A2016IP	0.333
C41	FSIF	Y1997IF	0.450
		Z2006IF	0.275
		A2016IF	0.275
	FSIP	Y1997IP	0.450
		Z2006IP	0.275
		A2016IP	0.275
C42	FSIF	Y1997IF	0.500
		Z2006IF	0.250
		A2016IF	0.250
	FSIP	Y1997IP	0.500
		Z2006IP	0.250
		A2016IP	0.250
C43	FSIF	Y1997IF	0.600
		Z2006IF	0.200
		A2016IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.600
		Z2006IP	0.200
		A2016IP	0.200
C44	FSIF	Y1997IF	0.275
		Z2006IF	0.275
		A2016IF	0.450
	FSIP	Y1997IP	0.275
		Z2006IP	0.275
		A2016IP	0.450

**Tabla N° 32** Combinaciones estimadas para la fase 4 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C45	FSIF	Y1997IF	0.250
		Z2006IF	0.250
		A2016IF	0.500
	FSIP	Y1997IP	0.250
		Z2006IP	0.250
		A2016IP	0.500
C46	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.200
		A2016IF	0.600
	FSIP	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.200
		A2016IP	0.600
C47	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.600
		A2016IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.600
		A2016IP	0.200
C48	FSIF	Y1997IF	0.333
		Z2006IF	0.333
		AB2003IF	0.333
	FSIP	Y1997IP	0.333
		Z2006IP	0.333
		AB2003IP	0.333
C49	FSIF	Y1997IF	0.450
		Z2006IF	0.275
		AB2003IF	0.275
	FSIP	Y1997IP	0.450
		Z2006IP	0.275
		AB2003IP	0.275
C50	FSIF	Y1997IF	0.500
		Z2006IF	0.250
		AB2003IF	0.250
	FSIP	Y1997IP	0.500
		Z2006IP	0.250
		AB2003IP	0.250

**Tabla N° 32** Combinaciones estimadas para la fase 4 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C51	FSIF	Y1997IF	0.600
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.600
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.200
C52	FSIF	Y1997IF	0.250
		Z2006IF	0.250
		AB2003IF	0.500
	FSIP	Y1997IP	0.250
		Z2006IP	0.250
		AB2003IP	0.500
C53	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.600
	FSIP	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.600

**Tabla N° 33** Combinaciones estimadas para la fase 5 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C54	FSIF	Y1997IF	0.250
		Z2006IF	0.250
		AB2003IF	0.250
		A2016IF	0.250
	FSIP	Y1997IP	0.250
		Z2006IP	0.250
		AB2003IP	0.250
		A2016IP	0.250
C55	FSIF	Y1997IF	0.350
		Z2006IF	0.150
		AB2003IF	0.150
		A2016IF	0.350
	FSIP	Y1997IP	0.350
		Z2006IP	0.150
		AB2003IP	0.150
		A2016IP	0.350

**Tabla N° 33** Combinaciones estimadas para la fase 5 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C56	FSIF	Y1997IF	0.150
		Z2006IF	0.350
		AB2003IF	0.350
		A2016IF	0.150
	FSIF	Y1997IP	0.150
		Z2006IP	0.350
		AB2003IP	0.350
		A2016IP	0.150
C57	FSIF	Y1997IF	0.400
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.200
	FSIF	Y1997IP	0.400
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.200
		A2016IP	0.200
C58	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.400
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.400
	FSIF	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.400
		AB2003IP	0.200
		A2016IP	0.400
C59	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.400
		A2016IF	0.200
	FSIF	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.400
		A2016IP	0.200

**Tabla N° 33** Combinaciones estimadas para la fase 5 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C60	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.400
	FSIF	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.200
		A2016IP	0.400

**Tabla N° 34** Combinaciones estimadas para la fase 6 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C61	FSIF	Y1997IF	0.330
		Z2006IF	0.330
		AB2003IF	0.330
	FSIP	Y1997IP	0.330
		Z2006IP	0.330
		AB2003IP	0.330
FC	S1997C	1.000	
C62	FSIF	Y1997IF	0.450
		Z2006IF	0.275
		AB2003IF	0.275
	FSIP	Y1997IP	0.450
		Z2006IP	0.275
		AB2003IP	0.275
FC	S1997C	1.000	
C63	FSIF	Y1997IF	0.500
		Z2006IF	0.250
		AB2003IF	0.250
	FSIP	Y1997IP	0.500
		Z2006IP	0.250
		AB2003IP	0.250
FC	S1997C	1.000	



**Tabla N° 34** Combinaciones estimadas para la fase 6 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C64	FSIF	Y1997IF	0.600
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.600
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.200
	FC	S1997C	1.000
C65	FSIF	Y1997IF	0.250
		Z2006IF	0.250
		AB2003IF	0.500
	FSIP	Y1997IP	0.250
		Z2006IP	0.250
		AB2003IP	0.500
	FC	S1997C	1.000
C66	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.600
	FSIP	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.600
	FC	S1997C	1.000
C67	FSIF	Y1997IF	0.333
		AB2003IF	0.333
		A2016IF	0.333
	FSIP	Y1997IP	0.333
		AB2003IP	0.333
		A2016IP	0.333
	FC	S1997C	1.000
C68	FSIF	Y1997IF	0.250
		AB2003IF	0.250
		A2016IF	0.500
	FSIP	Y1997IP	0.250
		AB2003IP	0.250
		A2016IP	0.500
	FC	S1997C	1.000

**Tabla N° 34** Combinaciones estimadas para la fase 6 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C69	FSIF	Y1997IF	0.200
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.600
	FSIP	Y1997IP	0.200
		AB2003IP	0.200
		A2016IP	0.600
	FC	S1997C	1.000

**Tabla N° 35** Combinaciones estimadas para la fase 7 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C70	FSIF	Y1997IF	0.333
		AB2003IF	0.333
		A2016IF	0.333
	FSIP	Y1997IP	0.333
		AB2003IP	0.333
		A2016IP	0.333
	FC	S1997C	0.333
CB2014C		0.333	
CY2014C		0.333	
C71	FSIF	Y1997IF	0.450
		AB2003IF	0.275
		A2016IF	0.275
	FSIP	Y1997IP	0.450
		AB2003IP	0.275
		A2016IP	0.275
	FC	S1997C	0.333
CB2014C		0.333	
CY2014C		0.333	
C72	FSIF	Y1997IF	0.500
		AB2003IF	0.250
		A2016IF	0.250
	FSIP	Y1997IP	0.500
		AB2003IP	0.250
		A2016IP	0.250
	FC	S1997C	0.333
CB2014C		0.333	
CY2014C		0.333	

**Tabla N° 35** Combinaciones estimadas para la fase 7 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C73	FSIF	Y1997IF	0.600
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.600
		AB2003IP	0.200
		A2016IP	0.200
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C74	FSIF	Y1997IF	0.250
		AB2003IF	0.500
		A2016IF	0.250
	FSIP	Y1997IP	0.250
		AB2003IP	0.500
		A2016IP	0.250
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C75	FSIF	Y1997IF	0.200
		AB2003IF	0.600
		A2016IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.200
		AB2003IP	0.600
		A2016IP	0.200
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C76	FSIF	Y1997IF	0.250
		AB2003IF	0.250
		A2016IF	0.500
	FSIP	Y1997IP	0.250
		AB2003IP	0.250
		A2016IP	0.500
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333

**Tabla N° 35** Combinaciones estimadas para la fase 7 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C77	FSIF	Y1997IF	0.200
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.600
	FSIP	Y1997IP	0.200
		AB2003IP	0.200
		A2016IP	0.600
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C78	FSIF	Y1997IF	0.150
		AB2003IF	0.150
		A2016IF	0.700
	FSIP	Y1997IP	0.150
		AB2003IP	0.150
		A2016IP	0.700
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333

**Tabla N° 36** Combinaciones estimadas para la fase 8 en la generación del árbol lógico

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C79	FSIF	Y1997IF	0.250
		Z2006IF	0.250
		AB2003IF	0.250
		A2016IF	0.250
		Y1997IP	0.250
	FSIP	Z2006IP	0.250
		AB2003IP	0.250
		A2016IF	0.250
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333

**Tabla N° 36** Combinaciones estimadas para la fase 8 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C80	FSIF	Y1997IF	0.300
		Z2006IF	0.150
		AB2003IF	0.250
		A2016IF	0.300
	FSIP	Y1997IP	0.300
		Z2006IP	0.150
		AB2003IP	0.250
		A2016IF	0.300
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C81	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.400
	FSIP	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.200
		A2016IF	0.400
	FC	S1997C	0.300
		CB2014C	0.400
		CY2014C	3.000
C82	FSIF	Y1997IF	0.400
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.400
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.200
		A2016IF	0.200
	FC	S1997C	0.250
		CB2014C	0.500
		CY2014C	0.250

**Tabla N° 36** Combinaciones estimadas para la fase 8 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C83	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.400
		AB2003IF	0.200
		A2016IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.400
		AB2003IP	0.200
		A2016IF	0.200
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C84	FSIF	Y1997IF	0.200
		Z2006IF	0.200
		AB2003IF	0.400
		A2016IF	0.200
	FSIP	Y1997IP	0.200
		Z2006IP	0.200
		AB2003IP	0.400
		A2016IF	0.200
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C85	FSIF	Y1997IF	0.500
		Z2006IF	0.166
		AB2003IF	0.166
		A2016IF	0.166
	FSIP	Y1997IP	0.500
		Z2006IP	0.166
		AB2003IP	0.166
		A2016IF	0.166
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333

**Tabla N° 36** Combinaciones estimadas para la fase 8 en la generación del árbol lógico  
(continuación)

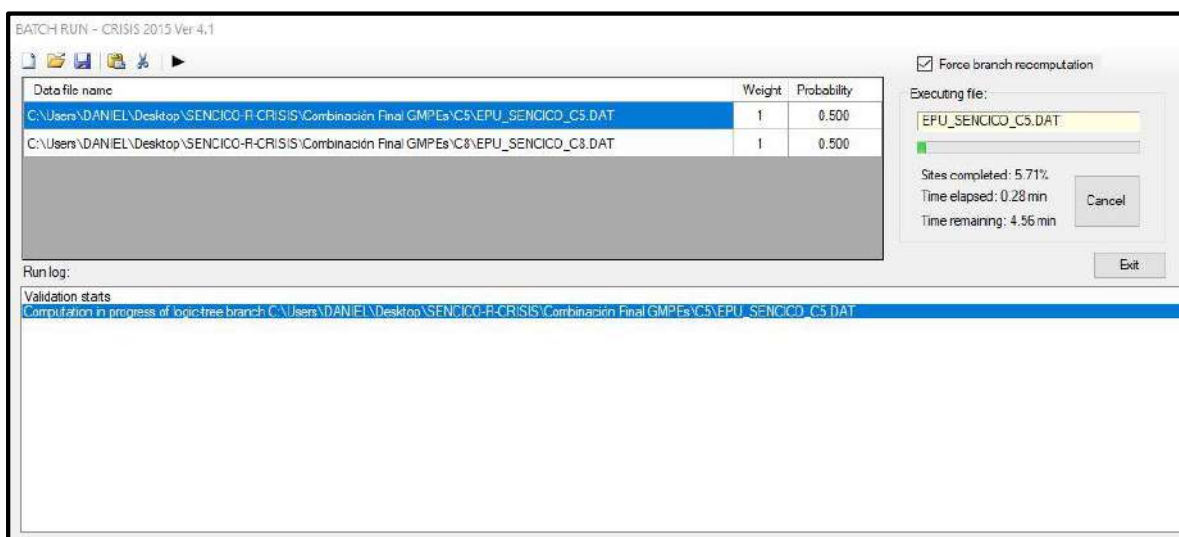
<b>Combinaciones</b>	<b>Fuentes Sismogénicas</b>	<b>Leyes de Atenuación</b>	<b>Prob. en rama de Árbol Lógico</b>
C86	FSIF	Y1997IF	0.166
		Z2006IF	0.500
		AB2003IF	0.166
		A2016IF	0.166
	FSIP	Y1997IP	0.166
		Z2006IP	0.500
		AB2003IP	0.166
		A2016IF	0.166
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C87	FSIF	Y1997IF	0.166
		Z2006IF	0.166
		AB2003IF	0.500
		A2016IF	0.166
	FSIP	Y1997IP	0.166
		Z2006IP	0.166
		AB2003IP	0.500
		A2016IF	0.166
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333
C88	FSIF	Y1997IF	0.166
		Z2006IF	0.166
		AB2003IF	0.166
		A2016IF	0.500
	FSIP	Y1997IP	0.166
		Z2006IP	0.166
		AB2003IP	0.166
		A2016IF	0.500
	FC	S1997C	0.333
		CB2014C	0.333
		CY2014C	0.333

### 3.3.4.2. Generación de espectros de peligro uniforme mediante el software CRISIS.

Como se mencionó anteriormente, el software CRISIS es un programa de aceptación mundial para el cómputo del peligro sísmico, por lo cual será utilizado en la obtención de espectros de peligro uniforme bajo las solicitaciones de las 88 combinaciones descritas

anteriormente. Existen diversas versiones de este programa, desde 1986 en la que se publicó su primera versión (Ordaz et al., 2019), pero, en la presente tesis se utilizará la versión CRISIS 2015 Ver 4.1 y R-CRISIS Ver 18.4.2, esto es debido a que en esta última algunas leyes de atenuación como la de Sadigh et al. (1997) están en unidades originales “g” y las mayoría de leyes con las que se está trabajando están en unidades de “cm/s<sup>2</sup>”, si bien se puede configurar las unidades con el factor de conversión de 0.0010197 como se especifica en Ordaz y Salgado (2019), lo cual se ha hecho para algunas leyes de atenuación, no obstante también se usó la versión 2015 ya que se trató en lo posible de trabajar con las unidades requeridas que aparecían por defecto en esta versión.

En este software se introdujeron los parámetros necesarios para su adecuado funcionamiento, como los archivos de mapas y ciudades, la geometría de las 29 fuentes sismogénicas y sus parámetros sismológicos (SENCICO, 2016), se definieron las leyes de atenuación en estudio, se estableció como parámetro de salida de 32 ordenadas espectrales, con un amortiguamiento de 5 % y una probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años, es decir, para un periodo de retorno de 475 años, en cada espectro de peligro uniforme y se usó el botón *Logic tree calculations* para configurar los pesos y sus respectivas probabilidades para los modelos de combinación del árbol lógico como se muestra en la siguiente figura, obteniendo finalmente los espectros de peligro uniforme.



**Figura N° 28** Ejemplo de cálculo del árbol lógico en CRISIS 2015 Ver 4.1

### 3.3.4.3. Espectro de peligro uniforme promedio.

Con todos los espectros de peligro uniforme obtenidos, se los agrupó en dos grupos, uno para aquellos que solo consideran las fuentes de subducción, es decir, los de combinación C1 a C4 y C17 a C60 y el otro para aquellos que consideran tanto las fuentes de subducción



como las fuentes continentales, es decir, los de combinación C5 a C16 y C61 a C88, con el fin de obtener en cada grupo los valores promedio, percentil 15 y percentil 85.

### 3.3.5. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.

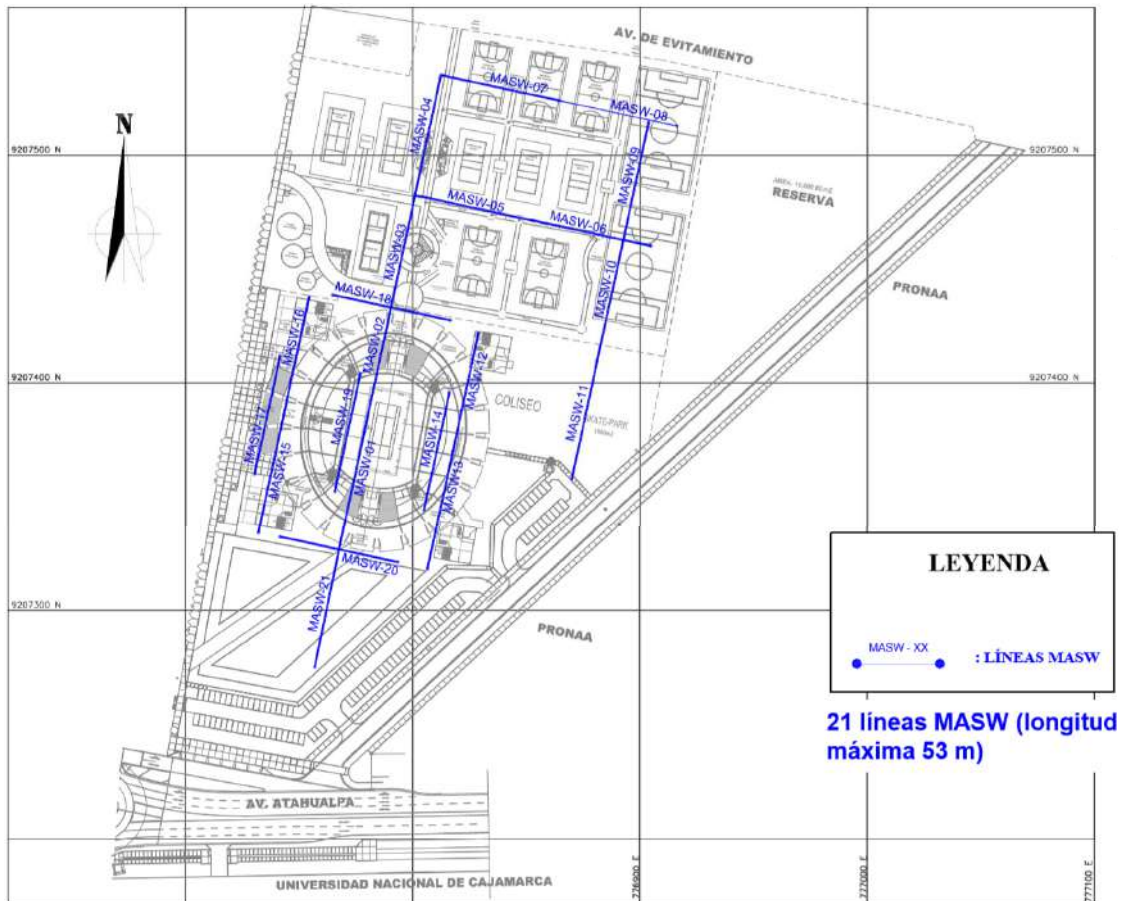
Si bien se ha elaborado espectros de peligro uniforme para la ciudad de Cajamarca con un periodo de retorno de 475 años combinados probabilísticamente en gran variedad con el método del árbol lógico, pero es necesario conocer además los factores de amplificación de sitio para reflejar de manera más detallada los espectros obtenidos en cuanto a la relación y diferenciación concerniente entre estos y los de la normativa vigente. En este contexto, detallaremos a continuación la obtención de los factores de amplificación.

#### 3.3.5.1. Ensayos MASW.

Para la obtención de los factores de amplificación se partió de los datos de los 21 ensayos MASW realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan de esta ciudad. La ubicación de estos ensayos se muestra en las siguientes figuras.



Figura N° 29 Ubicación del coliseo multiusos Qhapac Ñan



**Figura N° 30** Ubicación de las líneas MASW  
**Fuente:** Alva Hurtado, s.f.

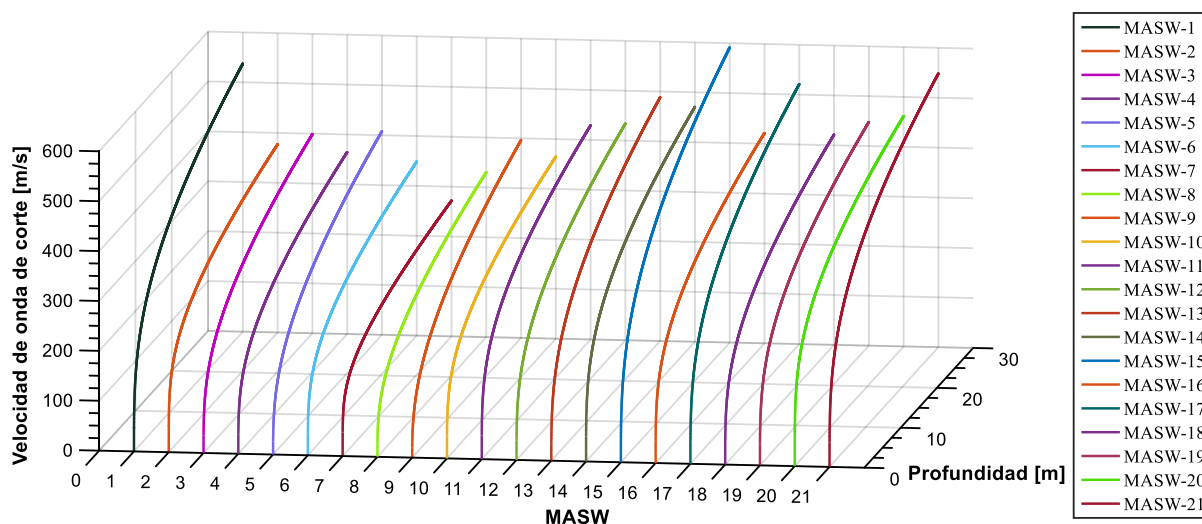
Debido a que estos ensayos MASW solo nos proporcionan información de la velocidad de onda de corte  $V_s$  a los primeros 20 m de profundidad del perfil estratigráfico del suelo y para la obtención de los factores de amplificación es necesario tener esta velocidad a una profundidad de 30 m, se optó en ampliar este rango mediante correlaciones, las cuales se detallarán a continuación.

### 3.3.5.2. Correlación de velocidad de onda de corte a 30 m y velocidad de onda de corte a otras profundidades.

Para correlacionar la velocidad de onda de corte a 30 m con la velocidad de onda de corte a otras profundidades se ha seguido dos modelos matemáticos.

#### a) Primer modelo matemático.

El primero modelo consiste en relacionar la profundidad y la velocidad de onda de corte  $V_s$  mediante una ecuación potencial que mejor se ajuste a cada línea de los ensayos MASW. En la siguiente figura se puede observar en forma conjunta la obtención del primer modelo matemático para los 21 ensayos MASW.

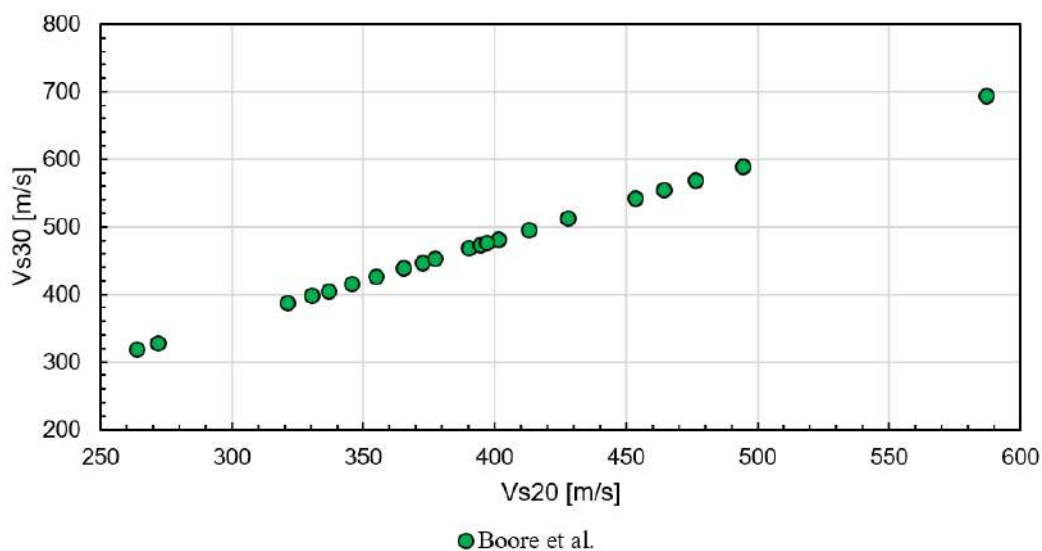


**Figura N° 31** Correlación entre  $V_{S20}$  y  $V_{S30}$  según aproximación potencial para ensayos MASW

Las gráficas y ecuaciones potenciales de aproximación para cada uno de estos 21 ensayos MASW pueden ser apreciados en el Anexo N°02.

**b) Segundo modelo matemático.**

El segundo modelo es elaborado mediante la ecuación obtenida de Boore et al. (2011), en la cual se utilizó los coeficientes correspondientes a una profundidad de velocidad de onda de corte de 20 m/s conocida. En la siguiente figura se aprecia esta correlación.



**Figura N° 32** Correlación entre  $V_{S20}$  y  $V_{S30}$  según Boore et al. (2011) para ensayos MASW

**3.3.5.3. Comparación de modelos matemáticos.**

Finalmente, se procedió a realizar una comparación entre estos dos modelos matemáticos, para representar la diferencia cuantitativa que se obtuvieron en sus resultados.

#### **3.3.5.4. Velocidad promedio de onda de corte.**

Con la velocidad de onda de corte a profundidades de 30 m (calculada mediante los dos modelos matemáticos), se computó la velocidad promedio de onda de corte acorde a la ecuación (16) para cada modelo matemático y se clasificó al suelo según la norma E.030 y el IBC (2006).

#### **3.3.5.5. Factores de amplificación.**

Definida ya la velocidad promedio de onda de corte, se procedió a obtener los factores de amplificación para periodos cortos y largos ( $F_a$  y  $F_v$ , respectivamente) como se denota en las fórmulas de las figuras 10 y 11 para cada ensayo MASW de cada modelo matemático. En tanto, los factores implícitos que dependen del input sísmico ( $m_a$  y  $m_v$ ) fueron obtenidos mediante interpolación, para un PGA de 0.2745 g acorde al espectro de peligro uniforme promedio para sismos de subducción y continentales obtenido en el presente estudio.

#### **3.3.5.6. Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal para la velocidad promedio de onda de corte y los factores de amplificación.**

Como se describió anteriormente (Tabla 20), la función de probabilidad log-normal es de uso típico en los parámetros de movimiento del terreno, por lo que modelaremos tanto la velocidad promedio de onda de corte  $V_S$  a 30 m, calculada en los pasos anteriores como los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  para periodos cortos y largos, respectivamente, con el fin de cuantificarlos probabilísticamente. En este contexto, se tendrá que, los factores de amplificación obtenidos en la curva de distribución de probabilidad acumulada log-normal pertenecen a la clasificación del perfil del suelo que estipula la norma E.030 como la del IBC (2006). Si bien la norma E.030 considera un único valor de factor de amplificación del suelo, el ASCE/SEI 7-16 (2017), antes ASCE/SEI 7-10 (2010) considera los dos factores de amplificación tanto para periodos cortos como largos, es así que con la data obtenida compararemos los factores de amplificación con las normas antes mencionadas y verificaremos la variación que existe en estos resultados.

#### **3.3.6. ESPECTRO DE DISEÑO.**

Con la obtención de los factores de amplificación y sabiendo el tipo de perfil estratigráfico que se tiene a profundidades de 30 m, se procederá a graficar un espectro de diseño elástico acorde a los detallado en la norma E.030, el cual será comparado con el espectro de diseño elástico típico bajo el mismo perfil de suelo.

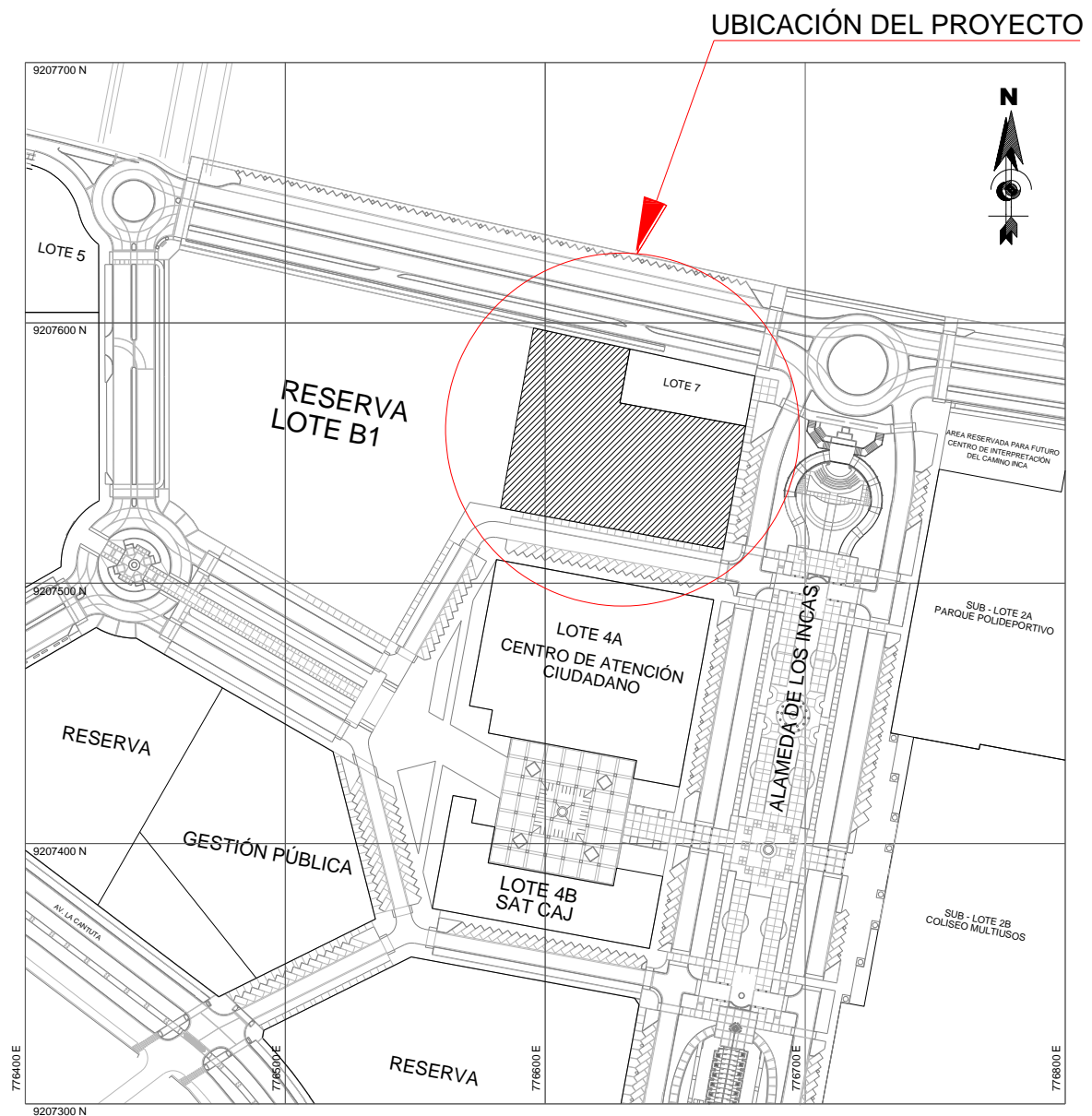
### **3.3.7. EDIFICACIÓN OBJETIVO EN EL ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL.**

Para comparar la respuesta estructural de una edificación con los espectros de peligro uniforme obtenidos, el espectro de diseño modificado en cuanto a sus factores de amplificación se refiere y los espectros de la normativa vigente, se optó por utilizar una edificación lo más cercana a la zona de estudio, eligiendo así a la construcción del proyecto: “MEJORAMIENTO DE LOS SERVICIOS DE ADMINISTRACIÓN DE JUSTICIA DE LOS ÓRGANOS JURISDICCIONALES E IMPLEMENTACIÓN DEL NCPP EN LA SEDE DEL DISTRITO JUDICIAL DE CAJAMARCA”, que se encuentra a una distancia no mayor de 200 m.

Según la distribución arquitectónica hecha por la gerencia de infraestructura de la empresa Hurteco S.R.L. este proyecto comprende la construcción de siete edificios, que varían en el número de niveles desde uno hasta cinco, los que se han denominado Bloques: A, B, C, D, E, F y G y dos casetas de control, de los cuales los cinco primeros (A, B, C, D, E) son independientes y corresponden al edificio principal. Por otro lado, con el fin de aseverar la respuesta estructural a la demanda sísmica a la que va a ser sometida, se optó únicamente por la selección de un único bloque independiente de la construcción principal, siendo este el Bloque A.

#### **3.3.7.1. Ubicación.**

La ubicación del proyecto y por ende de la edificación a analizar (Bloque A) se muestra en la siguiente figura.



**Figura N° 33** Ubicación del proyecto

### 3.3.7.2. Descripción.

La edificación a analizar presenta un área por nivel de 688.97 m<sup>2</sup>, cuya distribución arquitectónica es la siguiente:

- **Primer Nivel:** Área de alimentación, área de recreación, sala de archivos y servicios higiénicos.
- **Segundo Nivel:** Sala de archivos, sala de reuniones, sala de vocales, sala penal y servicios higiénicos.
- **Tercer Nivel:** Sala de vocales, secretaría, sala de audiencias, despacho de juez y servicios higiénicos.

Los ambientes anteriormente mencionados están divididos con tabiquería no portante, alternándose según su ubicación albañilería de ladrillo o de drywall.

Por otro lado, el sistema estructural de la presente edificación comprende muros estructurales de concreto armado, con losas macizas de 0.18 m. de espesor. En cuanto a su cimentación, consiste en plateas de cimentación apoyadas sobre un suelo conformado por un relleno GW compactado al 95% de la máxima densidad seca, reforzado con Geomalla biaxial MacGrid EGB 20 y aislado del terreno natural mediante Geotextil MacTex N40.1.

### 3.3.7.3. Propiedades de los materiales.

#### ✓ Concreto armado.

- Resistencia nominal a la compresión :  $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .
- Módulo de Elasticidad :  $E_c = 218819.789 \text{ kg/cm}^2$ .
- Coeficiente de poisson :  $\nu = 0.20$ .

#### ✓ Acero de refuerzo.

- Grado 60.
- Esfuerzo de fluencia :  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ .
- Módulo de Elasticidad :  $E_s = 2100000 \text{ kg/cm}^2$ .

### 3.3.7.4. Parámetros sísmicos.

La siguiente tabla muestra los parámetros sísmicos de la estructura, los cuales fueron tomados del Expediente Técnico del edificio en estudio.

**Tabla N° 37** Parámetros sísmicos

Variable	Factor	Descripción	Parámetro	Valor
Factor de zona	Z	Ciudad de Cajamarca	$Z_3$	0.35
Factor de uso	U	Edificaciones de uso común (viviendas y hoteles)	Edificaciones comunes (C)	1.00
Factor de suelo	S	Suelo intermedio	$S_2$	1.15
Coeficiente básico de reducción	$R_0$	Edificación de sistema de muros estructurales	Concreto Armado: Muros estructurales	6
	$I_a$	Edificación sin irregularidad en altura	Estructura regular	1.0
Regularidad estructural	$I_p$	Edificación sin irregularidad en planta	Estructura regular	1.0
	R	Estructura regular de muros estructurales	R	6
Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas	$T_P$	En función del factor de suelo	$T_P$	0.6
	$T_L$		$T_L$	2.0
Factor de amplificación sísmica	C	En función del periodo	$T < T_P, C=2.5$	
			$T_P < T < T_L, C=2.5(T_P/T_L)$	
			$T > T_L, C=2.5(T_P * T_L / T^2)$	
			$C/R \geq 0.11$	

### 3.3.8. RESPUESTA ESTRUCTURAL

Para obtener la respuesta estructural del edificio objetivo con los espectros obtenidos en este estudio y los de la normativa vigente, se usó el análisis dinámico modal espectral.

#### 3.3.8.1. Análisis dinámico modal espectral.

Para el modelado de la estructura y su respectivo análisis dinámico modal espectral se usó del software Etabs v.18. (Figura 34). Se incorporó los espectros en estudio (de diseño y de peligro uniforme), luego se usó el criterio CQC para la combinación de los modos de vibración y obtener así la respuesta máxima bajo las consideraciones de la norma E.030, para lo cual se verificó primeramente la participación de la masa efectiva y la fuerza cortante mínima en la base. Si bien, también se tuvo que verificar la regularidad estructural del edificio, así como el sistema estructural que depende ampliamente de la fuerza cortante actuante ya sea en columnas, muros, etc. para estructuras de concreto armado, este ya ha sido obtenido en base al estudio realizado en el expediente técnico, por lo que no se entrará en detalles.

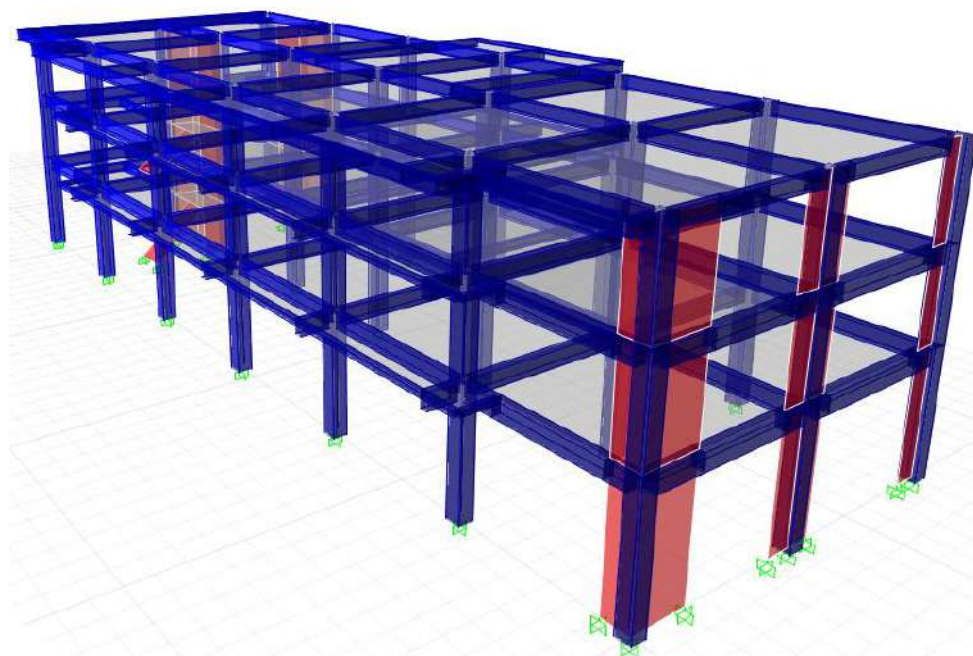


Figura N° 34 Modelado del edificio objetivo (Bloque A)

##### 3.3.8.1.1. Verificación de la masa efectiva.

Según la norma E.030, se establece que en cada dirección se considerarán aquellos modos de vibración cuya suma de masas efectivas sea por lo menos el 90 % de la masa total, pero deberá tomarse en cuenta por lo menos los tres primeros modos predominantes en la dirección de análisis.



El edificio objetivo a analizar cuenta con 3 niveles y considerando 3 modos de vibración por cada nivel se tendrá un total de 9 modos de vibración para el análisis. La siguiente tabla da a conocer los periodos de vibración de la estructura con su respectiva masa efectiva en porcentaje parcial y acumulada para cada modo.

**Tabla N° 38** Participación de masa efectiva

Modo	Periodo T (s)	Masa efectiva (%)			
		Dirección X		Dirección Y	
		Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado
1	0.359	78.700	78.70	1.250	1.25
2	0.323	0.230	78.93	73.100	74.35
3	0.276	3.330	82.26	10.190	84.54
4	0.096	13.540	95.80	0.880	85.42
5	0.09	0.620	96.42	11.900	97.32
6	0.073	0.800	97.22	0.650	97.97
7	0.047	0.080	97.30	1.080	99.05
8	0.044	1.610	98.91	0.030	99.08
9	0.034	0.110	99.02	0.003	99.08

### 3.3.8.1.2. Verificación de la fuerza cortante mínima.

Para la sollicitación sísmica del espectro de diseño, según la norma E.030 se debe verificar que la fuerza cortante dinámica en el primer entrepiso no puede ser menor al 80 % de su respectivo cortante estático, para el caso de estructuras regulares. En caso de no cumplirse esta consideración, se usa un factor de escala que incrementa al cortante dinámico en lo mínimo especificado y de forma proporcional a todos los resultados obtenidos, exceptuando los desplazamientos.

La siguiente tabla muestra el requerimiento de verificación mencionado.

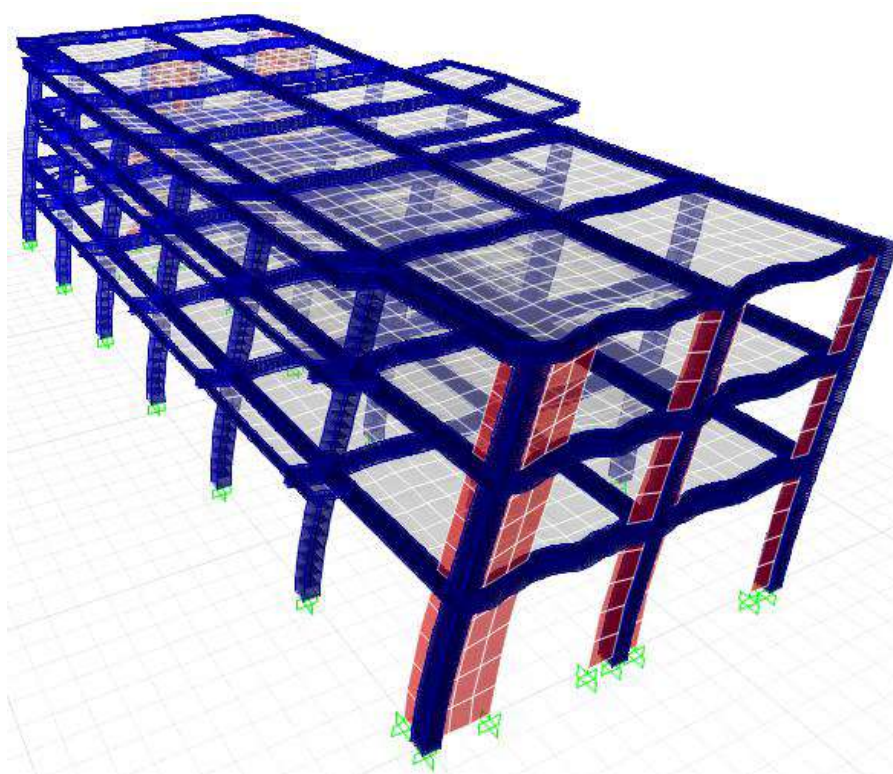
**Tabla N° 39** Verificación de la fuerza cortante mínima para el espectro de diseño

Dirección X (Tn)		Dirección Y (Tn)	
Vest.	345.61	Vest.	345.61
Vdin.	278.77	Vdin.	273.20
Config.	Regular	Config.	Regular
0.8*Vest.	276.488	0.8*Vest.	276.488
<i>Cumple</i>		<i>Escalar</i>	
<b>Vdin ≥ 0.8Vest</b>		<b>1.012</b>	

#### **3.3.8.1.3. Desplazamientos laterales máximos y distorsión de entrepiso.**

Con los espectros obtenidos en este estudio y de la norma E.030, se procedió a calcular y comparar los desplazamientos laterales máximos y la distorsión de entrepiso (derivas) tanto elásticas como inelásticas, estas últimas fueron obtenidas multiplicando a las derivas elásticas por  $0.75R$  (para estructuras regulares), como lo detalla la norma E.030.

La siguiente figura muestra la forma deformada del edificio en estudio, debido a las solicitaciones dinámicas actuantes dando una idea de los desplazamientos laterales obtenidos. Además, se verificó si se cumplía para las solicitaciones dadas, las limitaciones de distorsión del entrepiso (Tabla 28).



**Figura N° 35** Forma deformada del edificio en estudio

#### **3.3.8.1.4. Distribución de cortantes en la base por niveles.**

Para cada espectro en estudio y de la norma E.030, se calculó y comparó la distribución de cortantes en la base por niveles.

#### **3.3.8.1.5. Cortantes máximos en columnas y momentos máximos en vigas.**

Finalmente, para cada espectro en estudio y de la norma E.030, se calculó y comparó la distribución de cortantes y momentos máximos en algunas columnas vigas tomadas como ejemplo en la respuesta estructural del edificio en estudio

### **3.4. TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.**

#### **3.4.1. TRATAMIENTO DE DATOS.**

##### **3.4.1.1. Población y muestra de estudio.**

Sabiendo que se emplea un procedimiento probabilístico para la obtención de espectros de peligro uniforme y factores de amplificación del perfil del suelo de la ciudad de Cajamarca; los cuales serán usados en la respuesta estructural de una edificación, podemos por consiguiente afirmar que la población de estudio en esta investigación son todas las edificaciones de la ciudad de Cajamarca y la muestra vendría a hacer la edificación denominada Bloque A, perteneciente al proyecto: “MEJORAMIENTO DE LOS SERVICIOS DE ADMINISTRACIÓN DE JUSTICIA DE LOS ÓRGANOS JURISDICCIONALES E IMPLEMENTACIÓN DEL NCPP EN LA SEDE DEL DISTRITO JUDICIAL DE CAJAMARCA”.

#### **3.4.2. ANÁLISIS DE DATOS.**

##### **3.4.2.1. Tipo de investigación.**

El siguiente cuadro mostrará el tipo de investigación según los criterios más importantes.

**Tabla N° 40** Tipo de investigación

<b>Criterio</b>	<b>Tipo de investigación</b>
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque teórico metodológico	Cuantitativa
Objetivos (alcances)	Correlacional
Fuente de datos	Primaria
Diseño de prueba de la hipótesis	No experimental
Temporalidad	Transversal (sincrónica)
Contexto donde se desarrolla	Gabinete
Intervención disciplinaria	Interdisciplinaria

#### **3.4.2.2. Tipo de análisis.**

El tipo de análisis utilizado es Cuantitativo Probabilístico – Comparativo. Se generan combinaciones y modelos matemáticos probabilísticos en base a la recolección de información para luego ser comparadas en la respuesta estructural de una edificación.

#### **3.4.2.3. Recolección de datos.**

La data utilizada en el desarrollo de esta investigación ha sido la obtención de las 29 fuentes sismogénicas establecidas por SENCICO (SENCICO, 2016) del estudio de peligro sísmico probabilístico para el Perú, las leyes de atenuación más utilizadas en nuestro país, los ensayos MASW realizados en el coliseo multiusos Qhapac Ñan de la ciudad de Cajamarca, la correlación empírica de velocidad de onda de corte de Boore et al. (2011) y el edificio denominado Bloque A, perteneciente al proyecto: “MEJORAMIENTO DE LOS SERVICIOS DE ADMINISTRACIÓN DE JUSTICIA DE LOS ÓRGANOS JURISDICCIONALES E IMPLEMENTACIÓN DEL NCPP EN LA SEDE DEL DISTRITO JUDICIAL DE CAJAMARCA”, el cual ha sido empleado para la obtención de la comparación de la respuesta estructural.

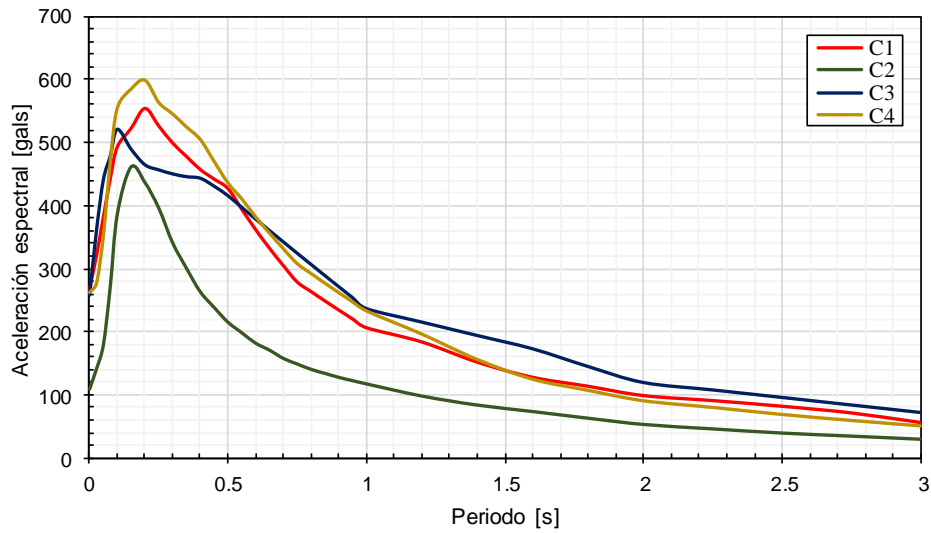
#### **3.4.2.4. Procesamiento de datos.**

El procesamiento de datos ha sido realizado de manera computarizada, haciendo uso de los softwares Microsoft Excel 2016 y Matlab 2015 (para operaciones matemáticas y gráficos), CRISIS 2015 Ver 4.1 y R-CRISIS Ver 18.4.2 (para el estudio de peligro sísmico, específicamente obtención de espectros de peligro uniforme), AutoCAD 2020 (para el manejo de planos) y Etabs v.18 (para el cálculo de la respuesta estructural).

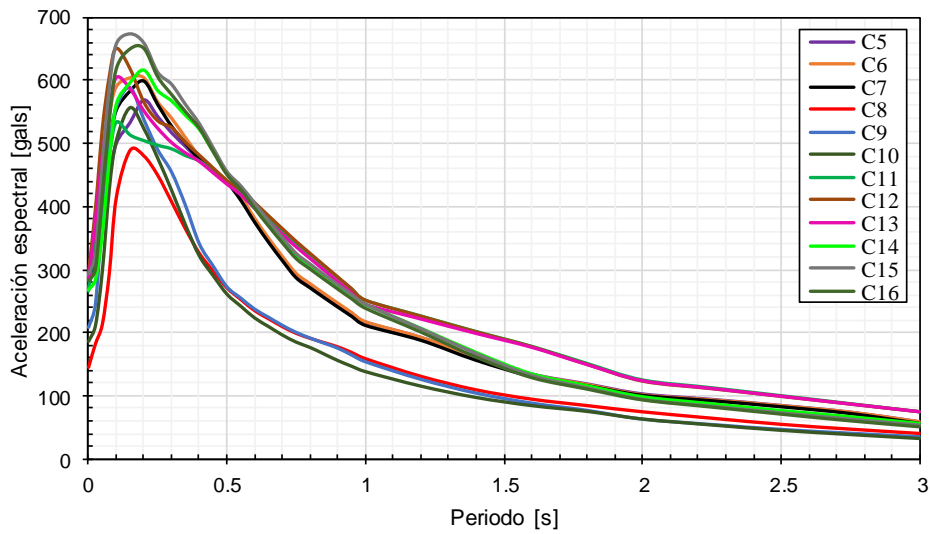
### **3.4.3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.**

#### **3.4.3.1. Espectros de peligro uniforme probabilísticos.**

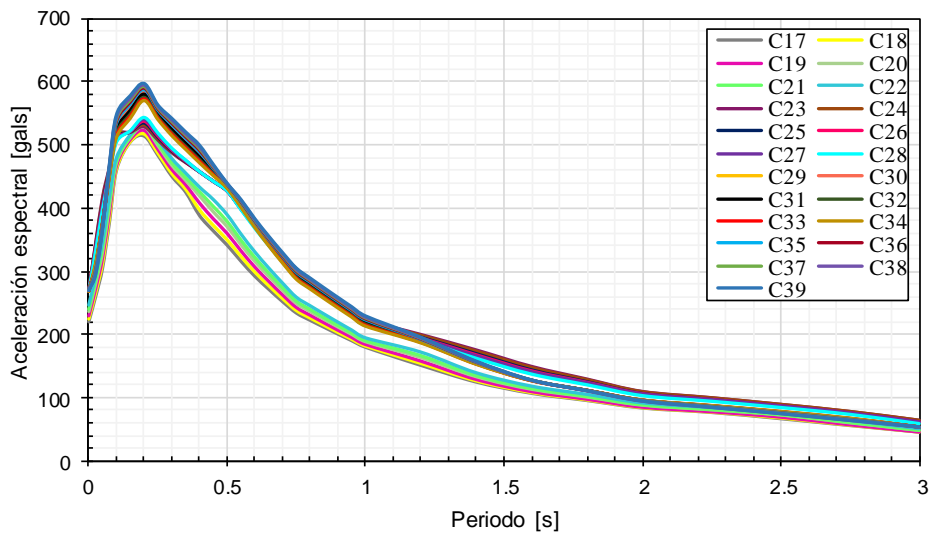
A continuación, se presentan los espectros de peligro uniforme probabilísticos con un periodo de retorno de 475 años obtenidos para cada una de las combinaciones realizadas, agrupados conforme a lo detallado en las tablas 29 – 36 descritas anteriormente.



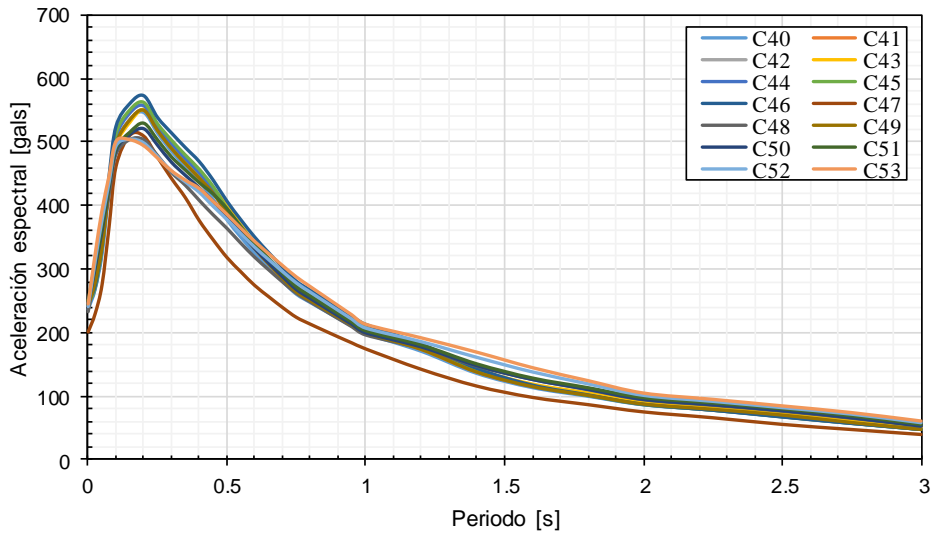
**Figura N° 36** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C1 a C4 para la ciudad de Cajamarca



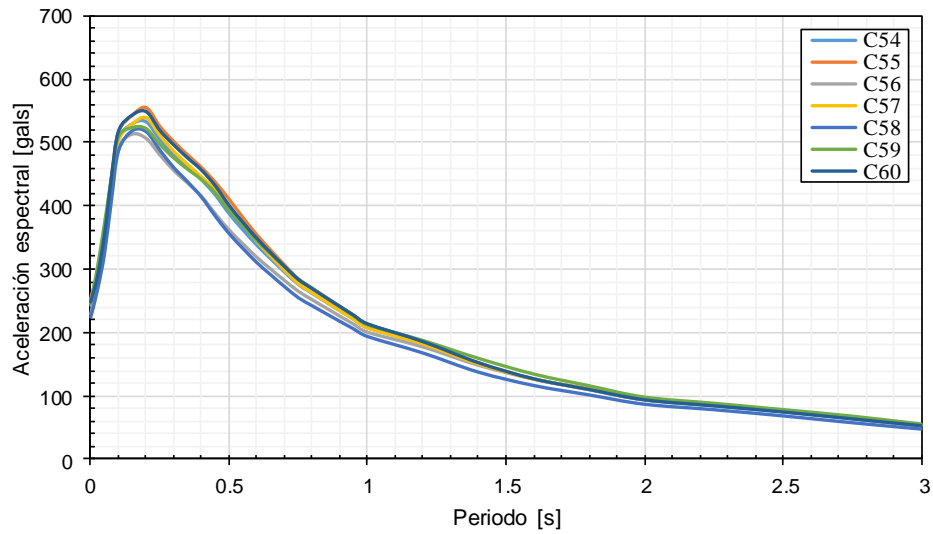
**Figura N° 37** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C5 a C16 para la ciudad de Cajamarca



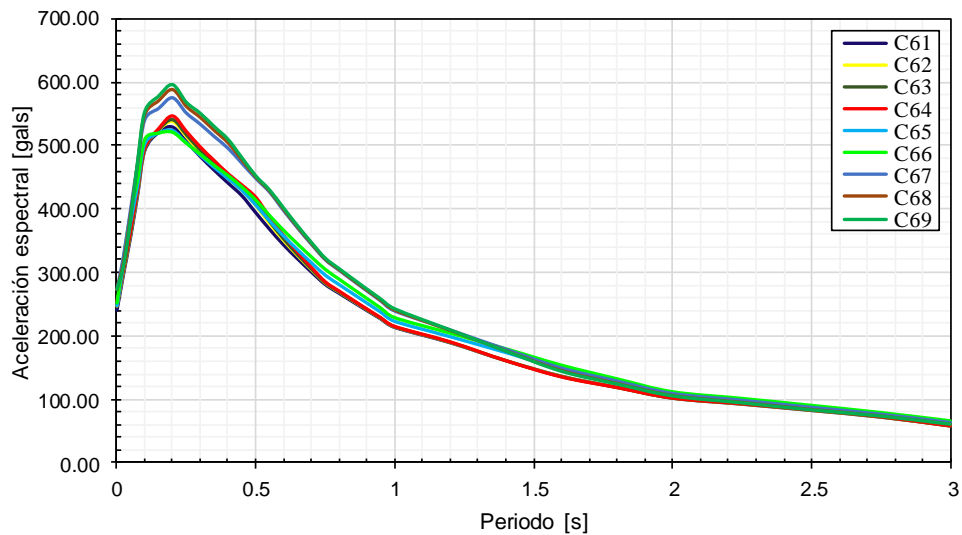
**Figura N° 38** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C17 a C38 para la ciudad de Cajamarca



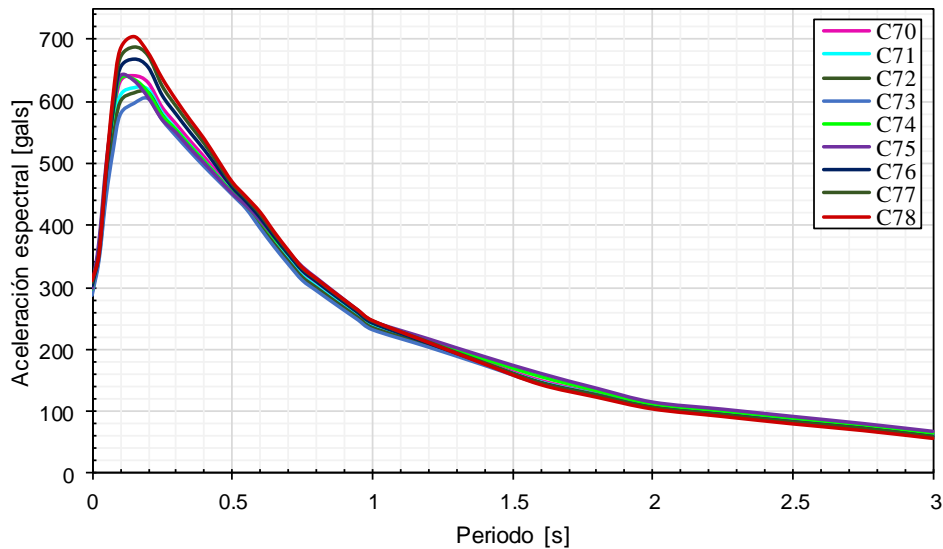
**Figura N° 39** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C40 a C53 para la ciudad de Cajamarca



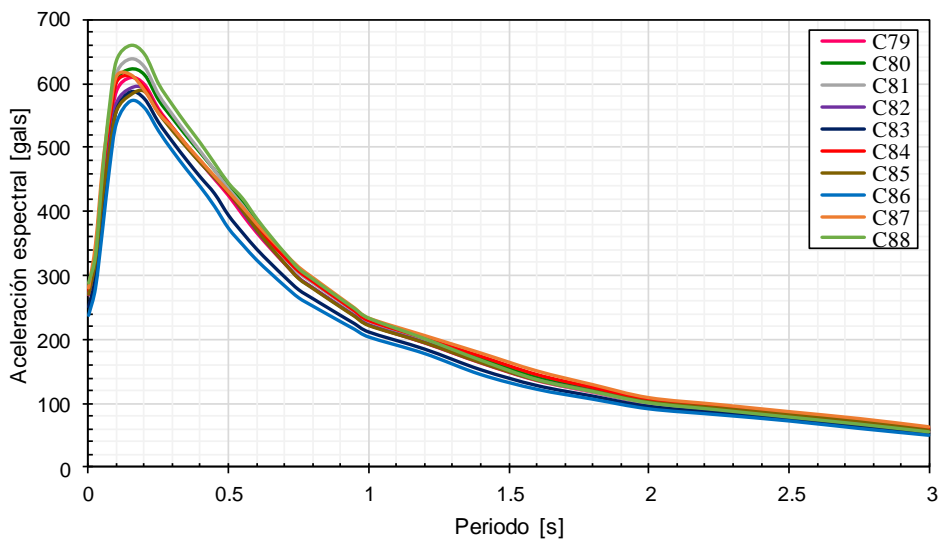
**Figura N° 40** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C54 a C60 para la ciudad de Cajamarca



**Figura N° 41** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C61 a C69 para la ciudad de Cajamarca



**Figura N° 42** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C70 a C78 para la ciudad de Cajamarca



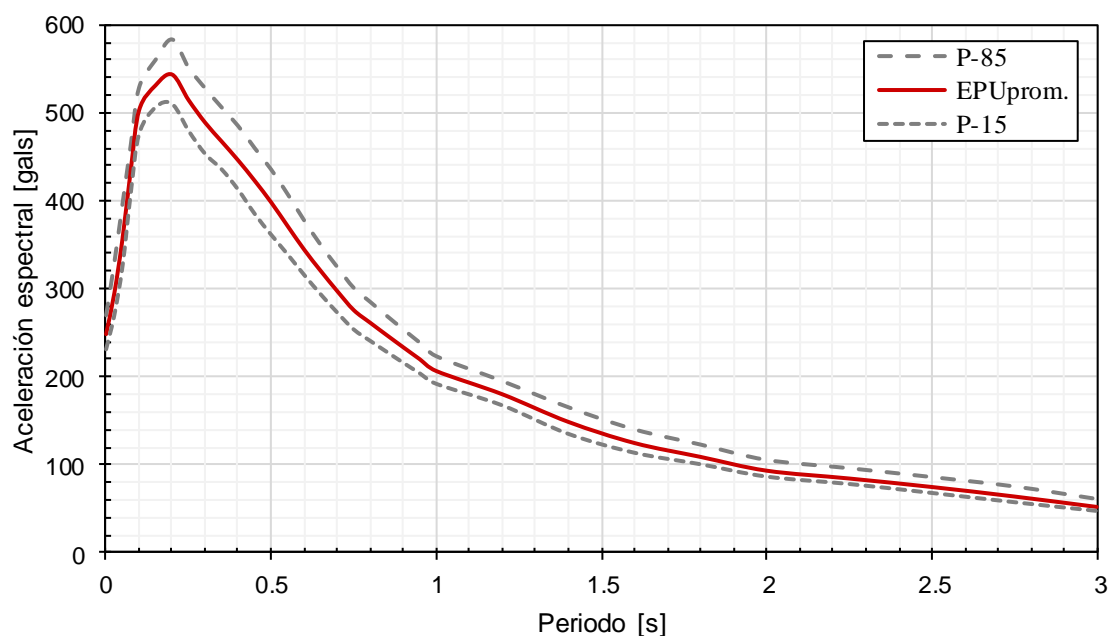
**Figura N° 43** Espectro de peligro uniforme con las combinaciones C79 a C88 para la ciudad de Cajamarca

**3.4.3.2. Espectro de peligro uniforme promedio.**

Con todas las combinaciones realizadas para la obtención del espectro de peligro uniforme probabilístico, se procedió a obtener el promedio de este y los percentiles 85 y 15 para las combinaciones que solo consideran las fuentes de subducción (C1 a C4 y C17 a C60) y las que consideran las fuentes de subducción y continentales (C5 a C16 y C61 a C88), dichos valores se muestran en las tablas 41 y 42, y representan en las Figuras 44 y 45.

**Tabla N° 41** Ordenadas espectrales del Espectro de Peligro Uniforme considerando fuentes de subducción para un periodo de retorno de 475 años

N°	Periodo [s]	Ordenada espectral [gals]			N°	Periodo [s]	Ordenada espectral [gals]		
		P-85	EPUprom	P-15			P-85	EPUprom	P-15
1	0.000	269.209	248.436	231.311	17	0.700	324.338	297.351	273.221
2	0.025	329.208	294.900	270.340	18	0.750	300.525	275.768	253.966
3	0.050	396.898	357.389	326.703	19	0.800	284.491	261.383	240.947
4	0.075	463.969	435.366	410.013	20	0.850	268.679	247.408	228.410
5	0.100	528.737	502.434	476.604	21	0.900	253.243	233.619	216.045
6	0.150	560.245	530.724	507.149	22	0.950	238.165	220.078	203.968
7	0.200	583.415	542.887	510.885	23	1.000	222.690	206.666	192.010
8	0.250	551.335	513.866	480.223	24	1.200	194.338	180.305	167.443
9	0.300	527.801	488.377	454.003	25	1.400	164.542	148.980	135.010
10	0.350	506.071	466.990	436.403	26	1.600	139.348	125.050	113.508
11	0.400	484.851	445.584	413.196	27	1.800	122.084	109.308	100.405
12	0.450	459.731	422.500	385.714	28	2.000	104.629	93.696	86.343
13	0.500	435.288	397.913	361.848	29	2.250	95.145	84.808	77.921
14	0.550	407.178	370.975	339.399	30	2.500	85.080	75.194	67.723
15	0.600	377.289	344.292	316.042	31	2.750	74.380	64.402	57.194
16	0.650	349.425	320.228	293.994	32	3.000	60.134	52.578	47.239

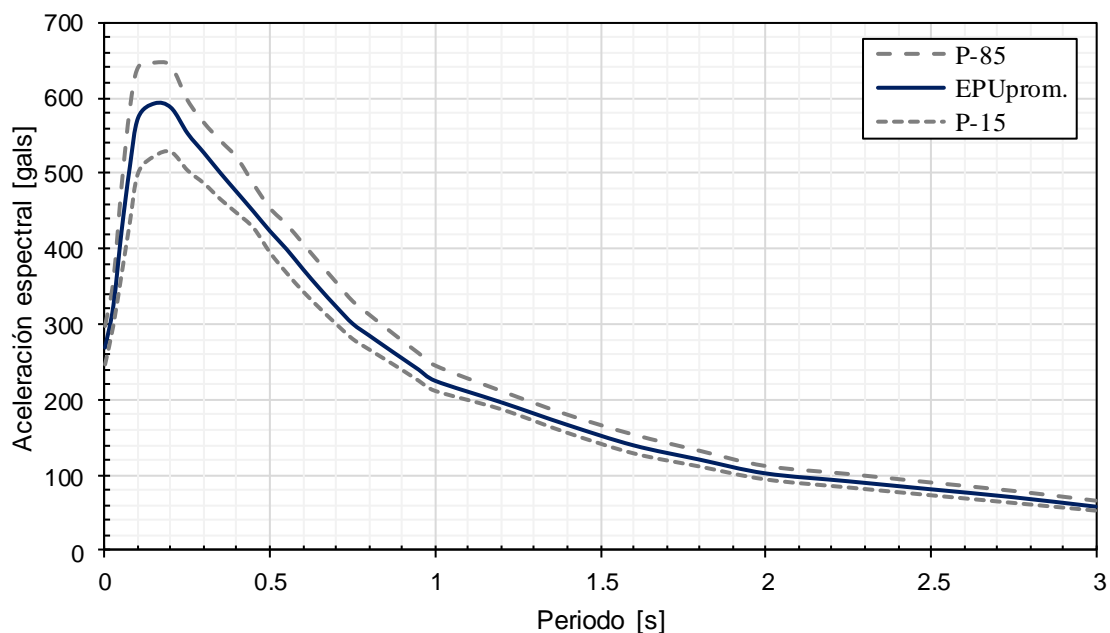


**Figura N° 44** Espectro de peligro uniforme promedio con fuentes de subducción en la ciudad de Cajamarca para un periodo de retorno de 475 años



**Tabla N° 42** Ordenadas espectrales del Espectro de Peligro Uniforme considerando fuentes de subducción y continentales para un periodo de retorno de 475 años

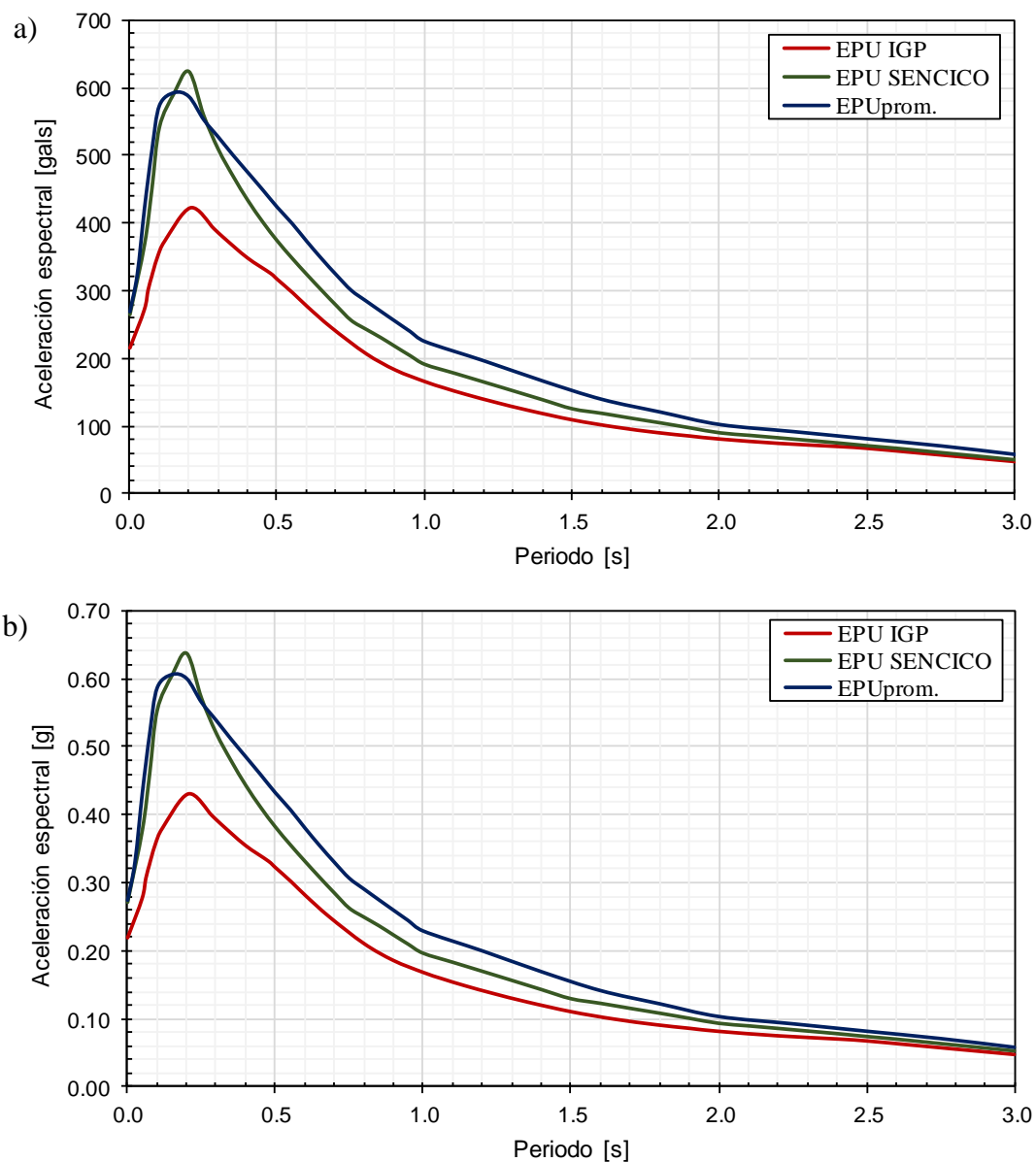
N°	Periodo [s]	Ordenada espectral [gals]			N°	Periodo [s]	Ordenada espectral [gals]		
		P-85	EPUprom	P-15			P-85	EPUprom	P-15
1	0.000	297.535	269.315	247.166	17	0.700	355.689	323.536	300.777
2	0.025	358.338	324.483	298.788	18	0.750	330.501	300.893	280.932
3	0.050	483.832	423.885	366.762	19	0.800	312.698	285.269	266.976
4	0.075	586.416	509.125	435.611	20	0.850	295.217	269.986	253.372
5	0.100	641.565	574.140	501.228	21	0.900	278.004	254.920	239.683
6	0.150	647.904	593.246	523.885	22	0.950	261.284	239.972	225.458
7	0.200	642.957	587.405	529.306	23	1.000	244.924	225.160	211.950
8	0.250	597.679	553.352	504.782	24	1.200	211.146	196.667	187.581
9	0.300	567.695	527.341	487.438	25	1.400	179.619	166.767	156.342
10	0.350	543.768	500.523	466.320	26	1.600	153.190	139.658	129.131
11	0.400	521.027	475.060	447.890	27	1.800	131.672	120.713	111.631
12	0.450	486.131	449.562	428.197	28	2.000	111.360	102.425	94.462
13	0.500	454.055	423.439	395.504	29	2.250	100.754	91.989	83.794
14	0.550	432.615	399.646	368.558	30	2.500	89.432	81.350	73.446
15	0.600	406.880	372.973	343.898	31	2.750	78.234	70.823	63.277
16	0.650	381.073	347.548	321.831	32	3.000	65.245	58.298	52.999



**Figura N° 45** Espectro de peligro uniforme promedio con fuentes de subducción y continentales en la ciudad de Cajamarca para un periodo de retorno de 475 años

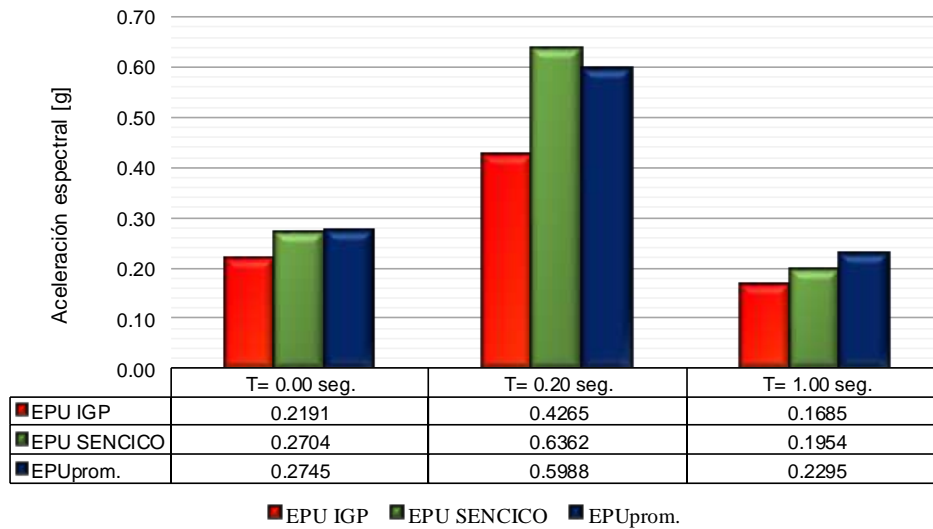
### 3.4.3.3. Comparación de espectros de peligro uniforme.

En esta sección se mostrará la comparación gráfica de los espectros de peligro uniforme del estudio de peligro sísmico del IGP (Tavera et al., 2014), de SENCICO (SENCICO, 2016) y el espectro de peligro uniforme promedio obtenido en esta investigación para un periodo de retorno de 475 años.



**Figura N° 46** Espectros de peligro uniforme del IGP, SENCICO y el espectro promedio obtenido, para un periodo de retorno de 475 años a) en gals, b) en g.

Los valores de aceleraciones espectrales para los periodos de 0 segundos, 0.2 segundos y 1.0 segundos se muestran en la siguiente gráfica.

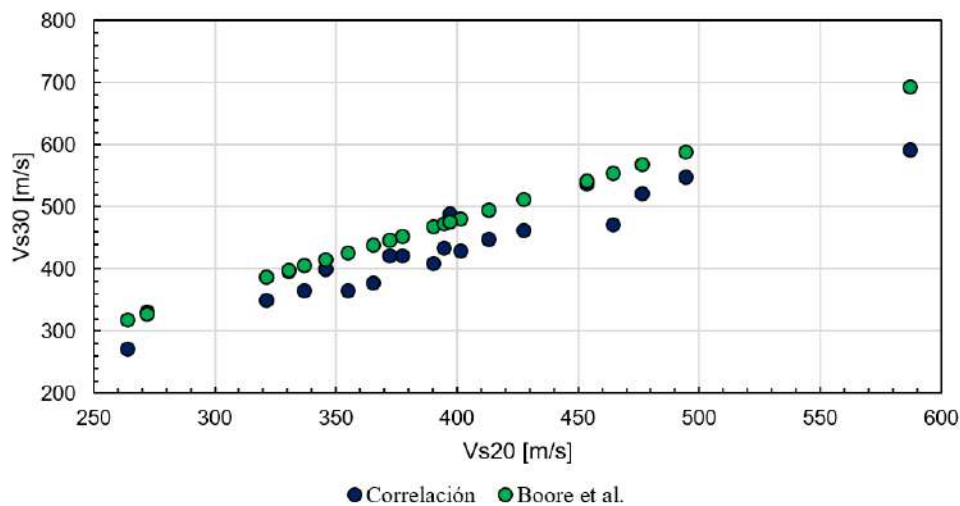


**Figura N° 47** Aceleraciones espectrales de espectros de peligro uniforme en periodos de 0.00, 0.20 y 1.00 segundos para un periodo de retorno de 475 años

#### 3.4.3.4. Factores de amplificación.

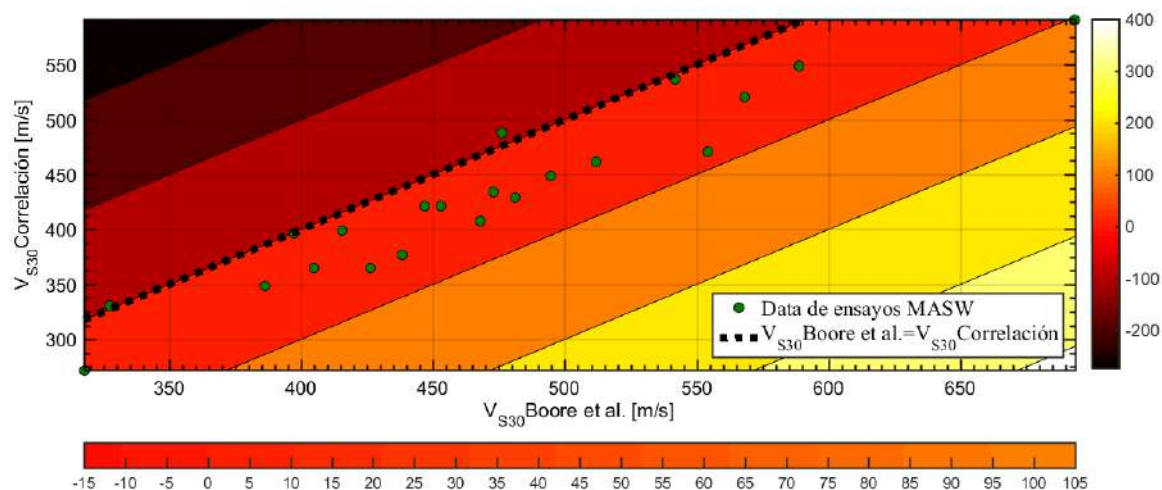
##### 3.4.3.4.1. Comparación de la velocidad de onda de corte a profundidades de 30 m en los modelos matemáticos.

Para observar la discrepancia que existe entre los modelos matemáticos obtenidos mediante la correlación de las ecuaciones potenciales para cada ensayo MASW y la ecuación empírica de Boore et al. (2011), se procedió a graficar los valores obtenidos, como se muestra en la siguiente figura. En el eje  $x$  se muestra la velocidad a profundidades de 20 m (datos de ensayos MASW) y en el eje  $y$  se observa el resultado objetivo, es decir, la velocidad a profundidades de 30 m.



**Figura N° 48** Obtención de  $V_{S30}$  mediante el modelo matemático de Boore et al. (2011) y los modelos matemáticos de correlación para cada ensayo MASW

Además, se obtuvo una gráfica de contornos de los residuos que se generan entre estos dos modelos, en base a la diferencia entre los valores obtenidos mediante la ecuación de Boore et al. (2011) y la correlación de las ecuaciones potenciales obtenidas como se puede apreciar en la siguiente figura, cabe recalcar que la escala gráfica vertical muestra de manera completa los valores que fluctúan para cada color y la escala gráfica horizontal muestra los valores más detallados y específicos para los residuos obtenidos en la comparación de estos dos modelos matemáticos.



**Figura N° 49** Gráfica de contornos de residuos entre los valores  $V_{S30}$  obtenidos mediante el modelo matemático de Boore et al. (2011) y los modelos matemáticos de correlación para cada ensayo MASW

#### 3.4.3.4.2. Velocidad promedio de onda de corte.

La velocidad promedio para cada ensayo MASW y su clasificación de sitio según el IBC (2006) y la norma E.030 (2019) para los dos modelos matemáticos se puede apreciar en la siguiente tabla.

**Tabla N° 43** Velocidad promedio de onda de corte para cada ensayo MASW

Ensayos	$V_s$ promedio (m/s)		Clasificación de sitio	
	Correlación potencial	Boore et al. (2011)	IBC (2006)	E.030 (2019)
MASW-1	400.446	401.273	C	S2
MASW-2	297.526	308.913	D	S2
MASW-3	298.807	301.806	D	S2
MASW-4	277.320	287.857	D	S2
MASW-5	290.215	299.304	D	S2
MASW-6	272.824	279.931	D	S2
MASW-7	221.436	230.436	D	S2
MASW-8	243.632	243.052	D	S2
MASW-9	275.454	275.625	D	S2
MASW-10	285.197	292.760	D	S2

**Tabla N° 43** Velocidad promedio de onda de corte para cada ensayo MASW (continuación)

Ensayos	Vs promedio (m/s)		Clasificación de sitio	
	Correlación potencial	Boore et al. (2011)	IBC (2006)	E.030 (2019)
MASW-11	329.702	339.094	D	S2
MASW-12	324.539	331.302	D	S2
MASW-13	354.673	352.451	D	S2
MASW-14	360.698	375.093	C	S2
MASW-15	426.163	441.811	C	S2
MASW-16	322.828	327.586	D	S2
MASW-17	381.149	388.997	C	S2
MASW-18	319.407	325.127	D	S2
MASW-19	339.677	347.908	D	S2
MASW-20	363.347	372.952	C	S2
MASW-21	409.518	416.617	C	S2

Los cálculos de forma detallada de la obtención de la velocidad promedio de onda de corte mostrada en la tabla anterior se encuentran en el Anexo N° 03.

#### 3.4.3.4.3. Factores de amplificación.

Las siguientes tablas muestran los factores de amplificación para el PGA obtenido anteriormente de 0.2745 g tanto para el primer modelo (ecuación potencial de ajuste a la línea de ensayos MASW) como el segundo modelo (en base a la ecuación de Boore et al. (2011)).

**Tabla N° 44** Factores de amplificación para el primer modelo matemático

ENSAYO	Vs promedio (m/s)	Fa			Fv		
		0.20 g ma=0.25	0.2745 g ma=0.138	0.30 g ma=0.10	0.20 g mv=0.60	0.2295 g mv=0.579	0.30 g mv=0.53
MASW-1	400.446	1.2725	<b>1.1426</b>	1.1012	1.7831	<b>1.7480</b>	1.6668
MASW-2	297.526	1.3706	<b>1.1905</b>	1.1344	2.1311	<b>2.0763</b>	1.9510
MASW-3	298.807	1.3691	<b>1.1898</b>	1.1339	2.1256	<b>2.0711</b>	1.9466
MASW-4	277.320	1.3949	<b>1.2021</b>	1.1424	2.2229	<b>2.1626</b>	2.0251
MASW-5	290.215	1.3792	<b>1.1946</b>	1.1372	2.1631	<b>2.1064</b>	1.9769
MASW-6	272.824	1.4006	<b>1.2048</b>	1.1443	2.2448	<b>2.1832</b>	2.0427
MASW-7	221.436	1.4757	<b>1.2401</b>	1.1684	2.5443	<b>2.4638</b>	2.2817
MASW-8	243.632	1.4408	<b>1.2238</b>	1.1573	2.4026	<b>2.3312</b>	2.1690
MASW-9	275.454	1.3973	<b>1.2032</b>	1.1432	2.2319	<b>2.1711</b>	2.0324
MASW-10	285.197	1.3852	<b>1.1974</b>	1.1392	2.1859	<b>2.1278</b>	1.9953
MASW-11	329.702	1.3359	<b>1.1737</b>	1.1228	2.0037	<b>1.9564</b>	1.8477
MASW-12	324.539	1.3412	<b>1.1762</b>	1.1246	2.0228	<b>1.9743</b>	1.8632
MASW-13	354.673	1.3117	<b>1.1619</b>	1.1146	1.9179	<b>1.8754</b>	1.7775
MASW-14	360.698	1.3062	<b>1.1592</b>	1.1128	1.8986	<b>1.8571</b>	1.7618

**Tabla N° 44** Factores de amplificación para el primer modelo matemático (continuación)

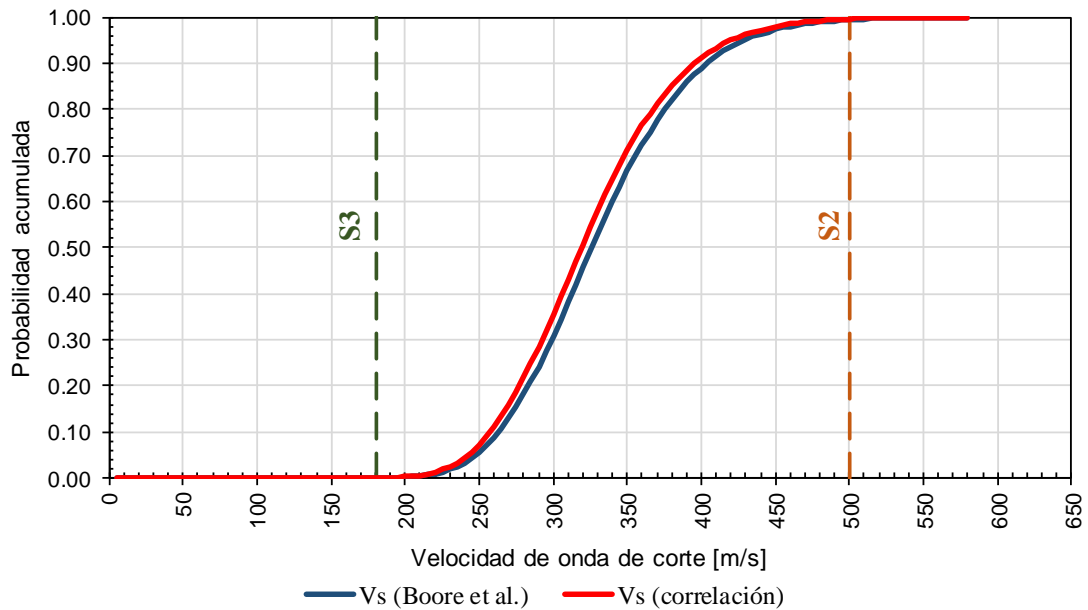
ENSAYO	V <sub>s</sub> promedio (m/s)	Fa			Fv		
		0.20 g ma=0.25	0.2745 g ma=0.138	0.30 g ma=0.10	0.20 g mv=0.60	0.2295 g mv=0.579	0.30 g mv=0.53
MASW-15	426.163	1.2529	<b>1.1328</b>	1.0944	1.7178	<b>1.6861</b>	1.6127
MASW-16	322.828	1.3429	<b>1.1771</b>	1.1252	2.0292	<b>1.9804</b>	1.8684
MASW-17	381.149	1.2883	<b>1.1504</b>	1.1066	1.8368	<b>1.7987</b>	1.7110
MASW-18	319.407	1.3465	<b>1.1788</b>	1.1264	2.0422	<b>1.9927</b>	1.8790
MASW-19	339.677	1.3260	<b>1.1689</b>	1.1195	1.9682	<b>1.9229</b>	1.8187
MASW-20	363.347	1.3038	<b>1.1580</b>	1.1120	1.8903	<b>1.8493</b>	1.7549
MASW-21	409.518	1.2654	<b>1.1390</b>	1.0987	1.7593	<b>1.7255</b>	1.6471

**Tabla N° 45** Factores de amplificación para el segundo modelo matemático

ENSAYO	V <sub>s</sub> promedio (m/s)	Fa			Fv		
		0.20 g ma=0.25	0.2745 g ma=0.138	0.30 g ma=0.10	0.20 g mv=0.60	0.2295 g mv=0.548	0.30 g mv=0.53
MASW-1	401.273	1.2719	<b>1.1422</b>	1.1010	1.7809	<b>1.7459</b>	1.6650
MASW-2	308.913	1.3578	<b>1.1843</b>	1.1301	2.0836	<b>2.0316</b>	1.9126
MASW-3	301.806	1.3657	<b>1.1881</b>	1.1328	2.1129	<b>2.0592</b>	1.9363
MASW-4	287.857	1.3820	<b>1.1959</b>	1.1382	2.1737	<b>2.1164</b>	1.9855
MASW-5	299.304	1.3686	<b>1.1895</b>	1.1337	2.1235	<b>2.0691</b>	1.9449
MASW-6	279.931	1.3917	<b>1.2005</b>	1.1413	2.2105	<b>2.1509</b>	2.0151
MASW-7	230.436	1.4610	<b>1.2333</b>	1.1638	2.4842	<b>2.4076</b>	2.2340
MASW-8	243.052	1.4417	<b>1.2242</b>	1.1576	2.4060	<b>2.3344</b>	2.1718
MASW-9	275.625	1.3971	<b>1.2031</b>	1.1431	2.2311	<b>2.1703</b>	2.0317
MASW-10	292.760	1.3762	<b>1.1931</b>	1.1362	2.1518	<b>2.0958</b>	1.9678
MASW-11	339.094	1.3265	<b>1.1691</b>	1.1197	1.9702	<b>1.9248</b>	1.8204
MASW-12	331.302	1.3343	<b>1.1729</b>	1.1223	1.9979	<b>1.9509</b>	1.8429
MASW-13	352.451	1.3138	<b>1.1629</b>	1.1153	1.9251	<b>1.8822</b>	1.7835
MASW-14	375.093	1.2935	<b>1.1529</b>	1.1084	1.8545	<b>1.8155</b>	1.7256
MASW-15	441.811	1.2416	<b>1.1271</b>	1.0904	1.6810	<b>1.6512</b>	1.5822
MASW-16	327.586	1.3380	<b>1.1747</b>	1.1235	2.0115	<b>1.9637</b>	1.8540
MASW-17	388.997	1.2818	<b>1.1471</b>	1.1044	1.8145	<b>1.7776</b>	1.6926
MASW-18	325.127	1.3406	<b>1.1759</b>	1.1244	2.0206	<b>1.9723</b>	1.8614
MASW-19	347.908	1.3180	<b>1.1650</b>	1.1168	1.9401	<b>1.8964</b>	1.7958
MASW-20	372.952	1.2953	<b>1.1538</b>	1.1091	1.8609	<b>1.8215</b>	1.7308
MASW-21	416.617	1.2600	<b>1.1363</b>	1.0968	1.7413	<b>1.7084</b>	1.6322

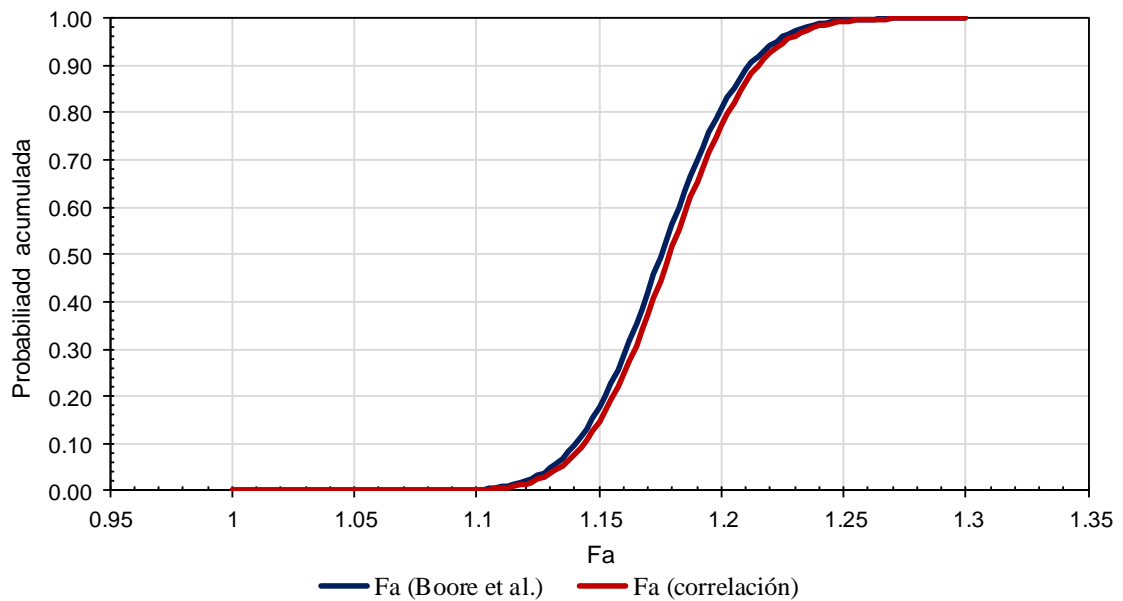
#### 3.4.3.4.4. Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal.

- Curva de distribución de probabilidad acumulada log-normal de la velocidad promedio de onda de corte.



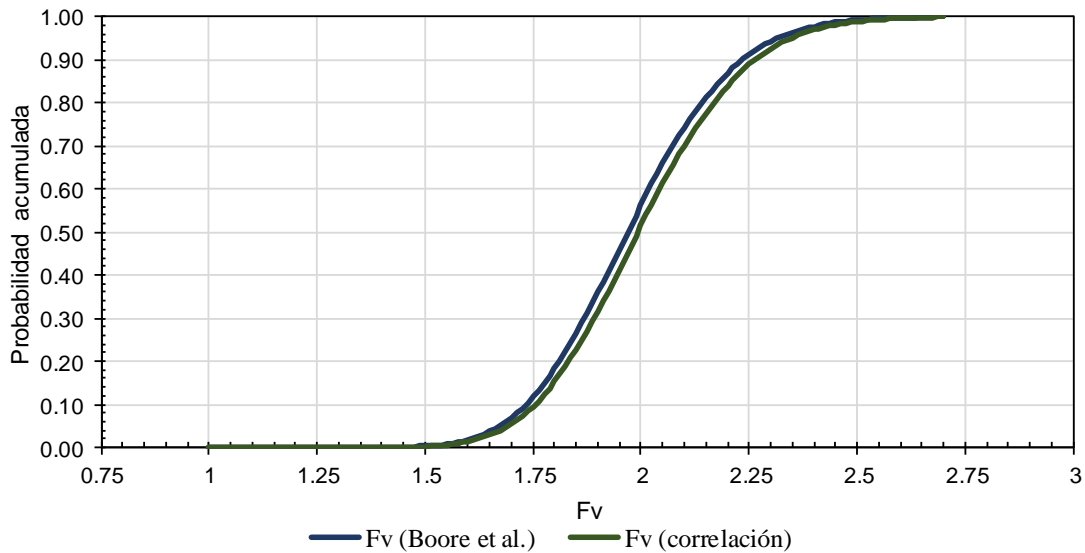
**Figura N° 50** Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal de la velocidad promedio de onda de corte

- Curva de distribución de probabilidad acumulada log-normal del factor de amplificación para periodos cortos ( $F_a$ ).



**Figura N° 51** Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal del factor de amplificación para periodos cortos ( $F_a$ )

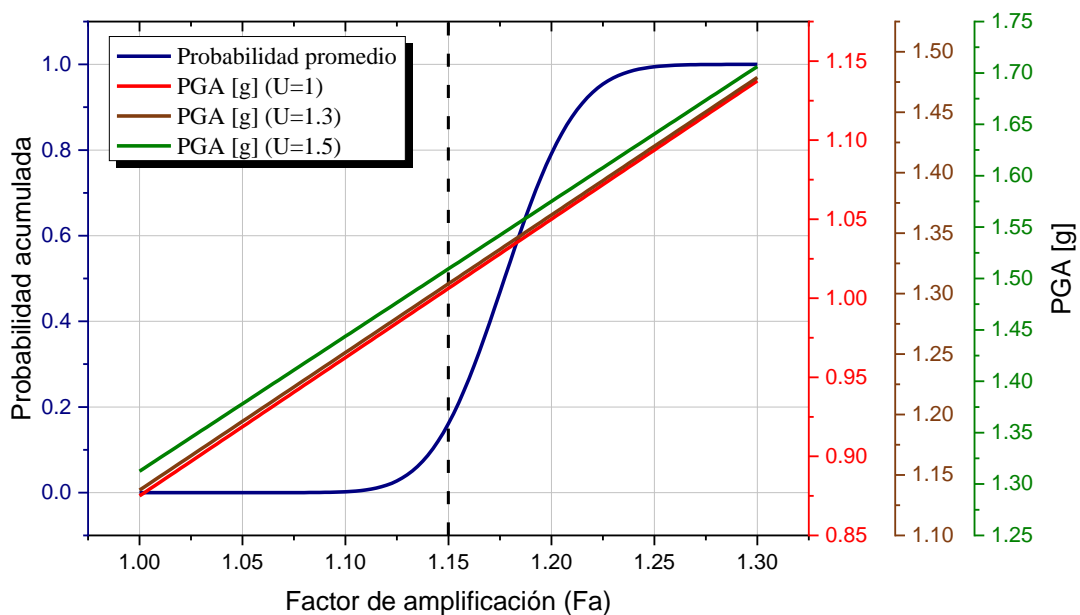
- **Curva de distribución de probabilidad acumulada log-normal del factor de amplificación para periodos largos ( $F_v$ ).**



**Figura N° 52** Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal del factor de amplificación para periodos largos ( $F_v$ )

### 3.4.3.5. Curvas de distribución de probabilidad acumulada log-normal promedio para los factores de amplificación.

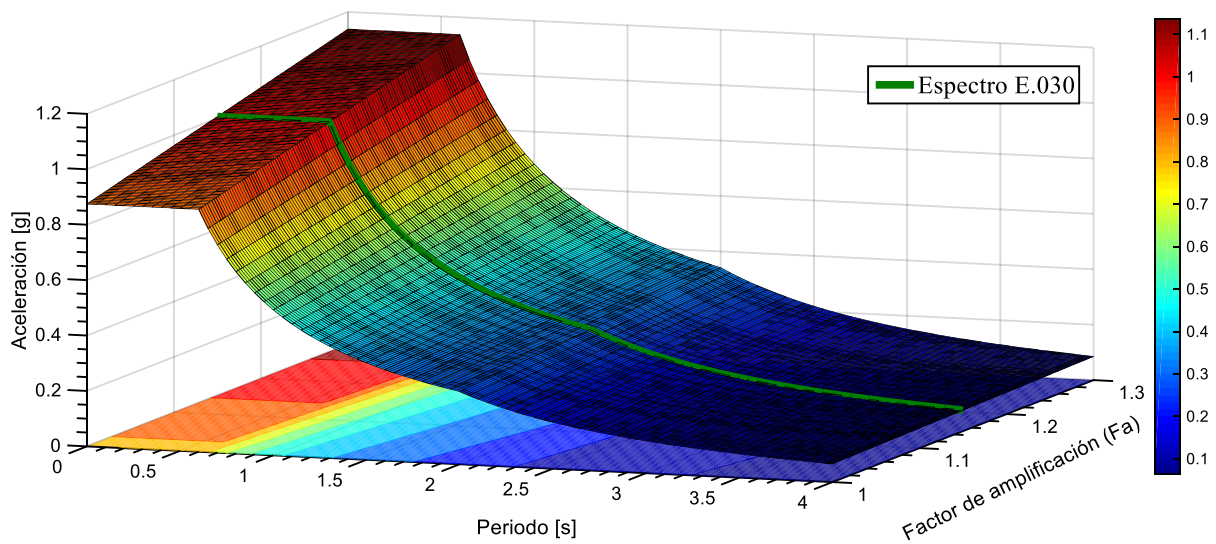
Se ha tomado el promedio de las curvas de probabilidad acumuladas del factor de amplificación para periodos cortos ( $F_a$ ), con lo cual se calculó los valores de la aceleración espectral pico (PGA) a los 0 segundos para los tres Factores de Uso ( $U$ ) que detalla la norma E.030 para un espectro elástico ( $R=1$ ) correspondiente a la Zona 3, variando el Factor de Suelo conforme aumenta la probabilidad del factor de amplificación  $F_a$ .



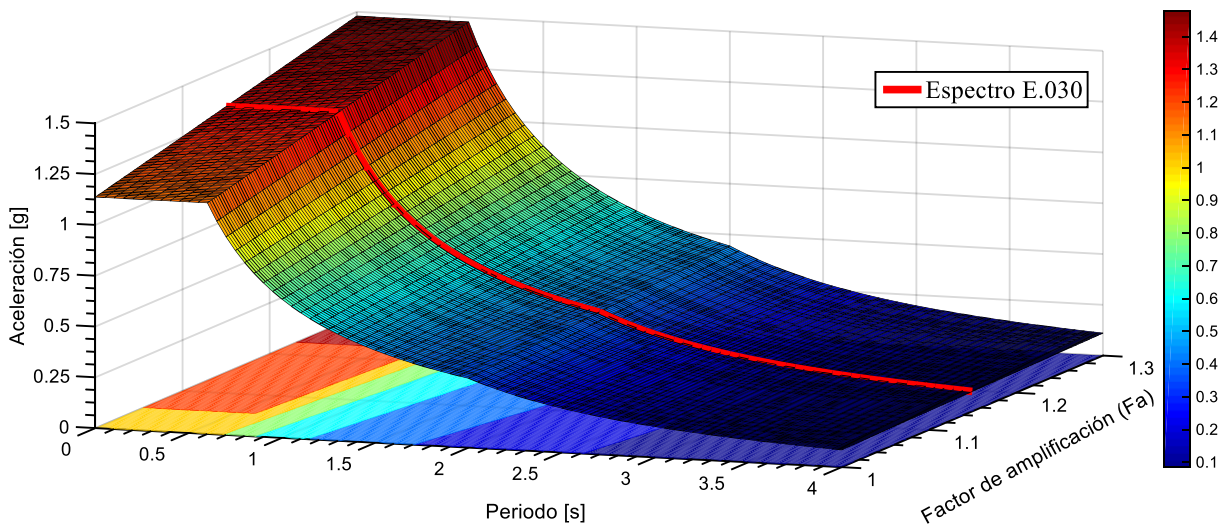
**Figura N° 53** Variación del PGA para el espectro de diseño elástico según la norma E.030 acorde a la variación de probabilidad promedio del factor de amplificación de suelo



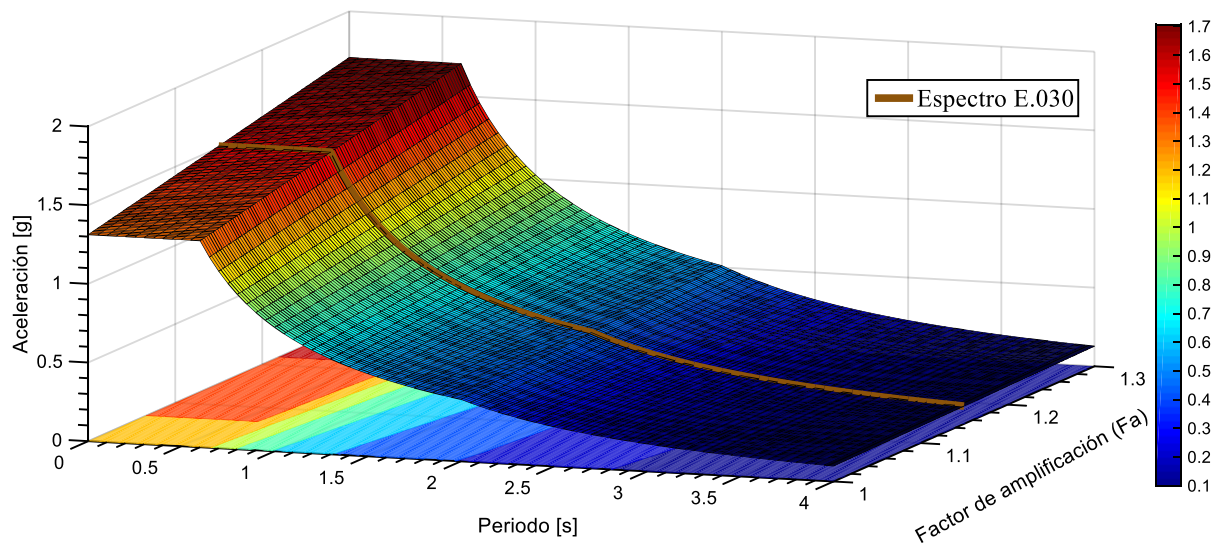
Como se pudo apreciar en la figura anterior, los factores de amplificación obtenidos conciernen a un suelo tipo  $S_2$  (según norma E.030) y sabiendo que los estudios realizados en la zona de Cajamarca pertenecen a la Zona 3 podemos decir que en la figura anterior la probabilidad promedio calculada para un factor de suelo de 1.15 genera un grado de confianza promedio de aproximadamente 16.1 %, siendo necesario obtener un valor de probabilidad de 50 % como mínimo, es decir, de 1.18 como factor de amplificación. En este contexto, se procedió a graficar la variación de los espectros elásticos según el factor de amplificación obtenido es este estudio, cuyos valores de probabilidad promedio se mostraron en la figura anterior. Las siguientes figuras muestran estos espectros elásticos para los diferentes Factores de Uso ( $U$ ).



**Figura N° 54** Variación del espectro elástico para diferentes factores de amplificación de suelo considerando  $U=1$



**Figura N° 55** Variación del espectro elástico para diferentes factores de amplificación de suelo considerando  $U=1.3$

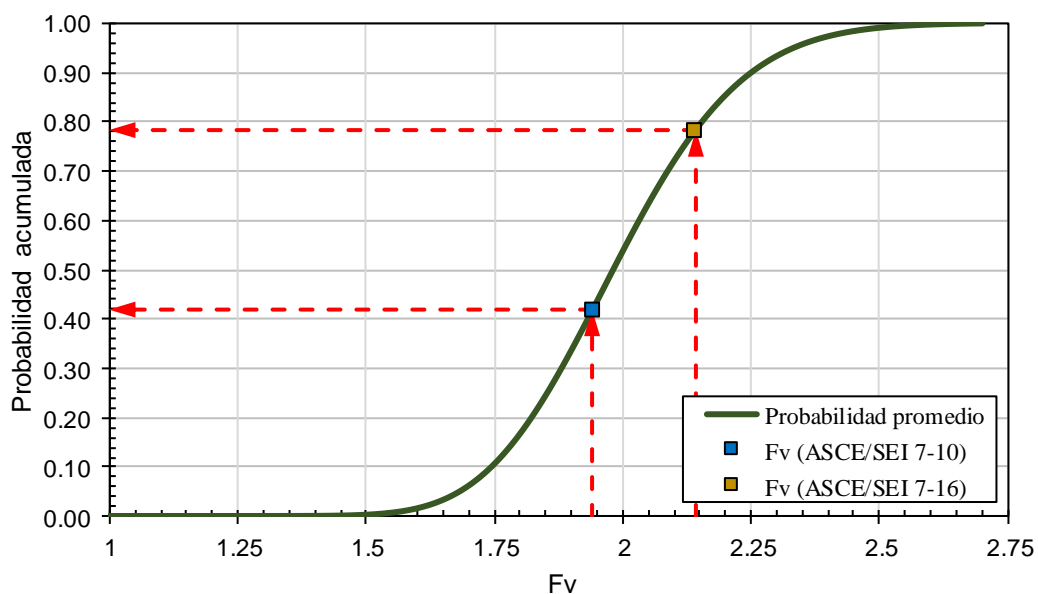


**Figura N° 56** Variación del espectro elástico para diferentes factores de amplificación de suelo considerando  $U=1.5$

Además, si bien la norma E.030 solo considera un único factor de amplificación para suelo a diferencia del ASCE/SEI 7-10 (2010) y el ASCE/SEI 7-16 (2017) que como se vio anteriormente consideran estos dos factores de amplificación. Y, si verificamos el nivel de confianza que generan en la curva de probabilidad acumulada promedio obtenida en cada modelo matemático, para un periodo largo ( $F_v$ ) para la aceleración espectral de 1.0 segundos obtenido del espectro de peligro uniforme probabilístico, es decir, para 0.2295g (Figura 46) obtendremos los siguientes resultados.

**Tabla N° 46** Valores de probabilidad para los factores amplificación de periodo largo

Código	T (s)	Suelo	$S_1$	$F_v$	Prob.
ASCE/SEI 7-10	1.0	D	0.2295	1.941	0.4192
ASCE/SEI 7-16	1.0	D	0.2295	2.141	0.7827



**Figura N° 57** Probabilidad promedio del factor de amplificación para periodos largos

### 3.4.3.6. Espectros de diseño.

Con los resultados anteriormente obtenidos consideraremos un nuevo espectro de diseño denominado “Espectro ER1”, el cual estará caracterizado con un factor de zona  $Z=0.2745g$  y un factor de suelo  $S=1.20$  para un suelo  $S_2$  (este valor corresponde según la Figura 53 de distribución de probabilidad promedio para periodos cortos, con una probabilidad del 80 % de confiabilidad). No obstante, si bien la norma E.030 indica la connotación de estudios de sitio, también recalca que no deben de emplearse parámetros de diseño inferiores a los estipulados, en este contexto, a la ciudad de Cajamarca le corresponde una aceleración espectral de  $0.35g$ , que no es más que un valor determinístico de zona, dado que si se opta por estudios más detallados en cuanto a la ubicación geográfica se puede observar una diferencia de este valor de aceleración espectral indicado en la presente norma, con los obtenidos en otras investigaciones. Por ejemplo, el PGA para Cajamarca según SENCICO (SENCICO, 2016) es  $0.2704g$ , según el IGP (Tavera et al., 2014) es  $0.2191g$ , para una edificación en la ciudad de Cajamarca (Campos Irigoín, 2019) fue de  $0.2719g$  y en esta investigación como se mencionó anteriormente es de  $0.2745g$  en promedio. Si bien estos valores no superan a lo mínimo establecido en el parámetro de factor de zona de la norma E.030, se debe tener en cuenta que estos resultados provienen de un estudio de peligro sísmico, es decir considera la sismogénesis, la distancia y diversas leyes de atenuación. Ahora bien, si se sigue el razonamiento de trabajar con el valor mínimo de aceleración espectral establecido, es decir,  $0.35g$ , y con el mismo nivel de probabilidad para el factor de suelo establecido anteriormente en el espectro denominado “Espectro ER1”, obtendremos otro espectro, al cual lo denominaremos “Espectro ER2”, los cuales serán comparados con el espectro de la norma E.030. La siguiente figura muestra dichos espectros.

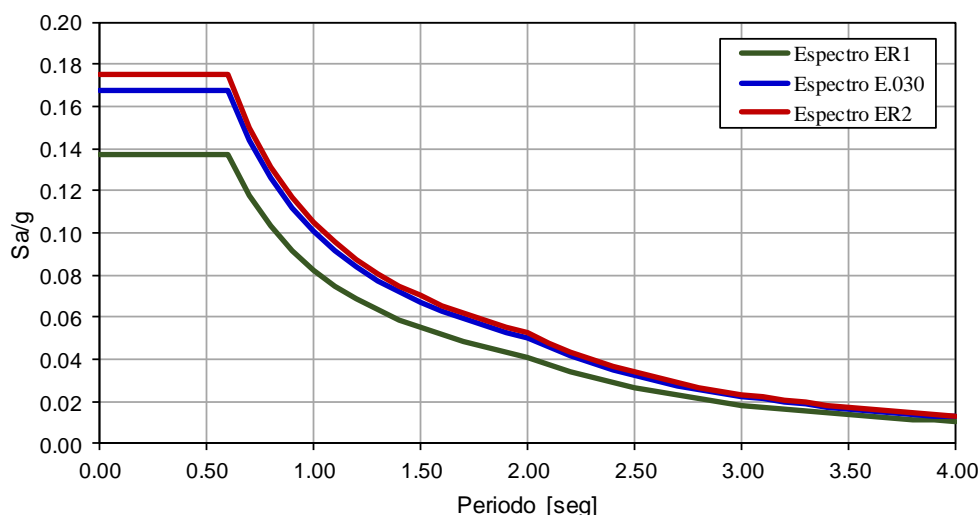


Figura N° 58 Espectros de diseño en comparación

### 3.4.3.7. Respuesta estructural.

La respuesta estructural de la edificación será obtenida para las solicitaciones de los espectros de peligro uniforme de SENCICO (SENCICO, 2016), IGP (Tavera et al., 2014) y el obtenido en este estudio (la Figura 46 muestra dichos espectros) y los espectros de diseño de la norma E.030, ER1 y ER2 mostrados en la Figura 58.

#### 3.4.3.7.1. Desplazamientos laterales máximos y derivas.

##### a) Para los espectros de peligro uniforme.

Para cada dirección de análisis, se muestran las gráficas de los desplazamientos laterales máximos por nivel y derivas inelásticas.

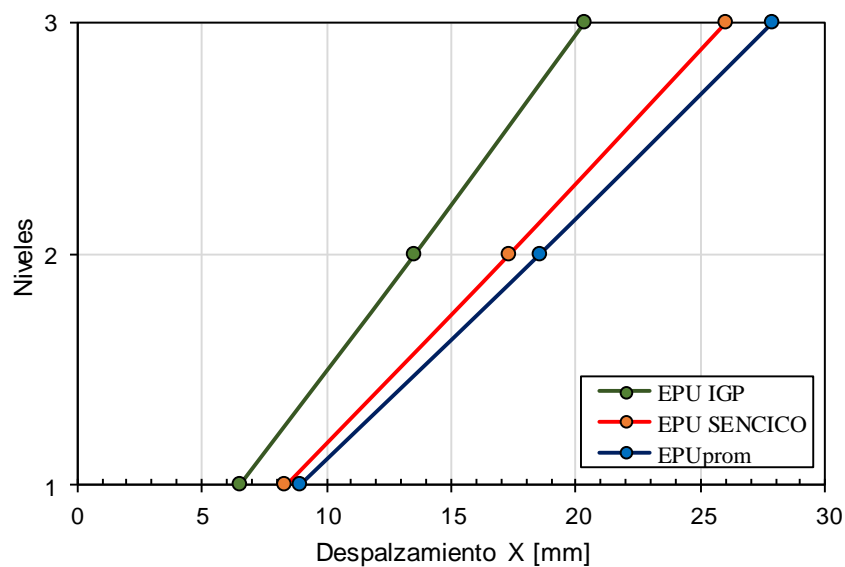


Figura N° 59 Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección X

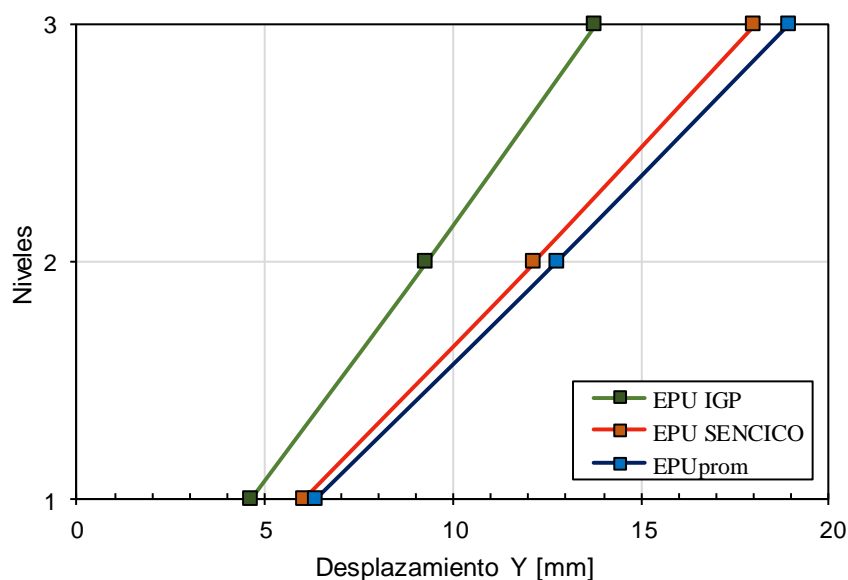
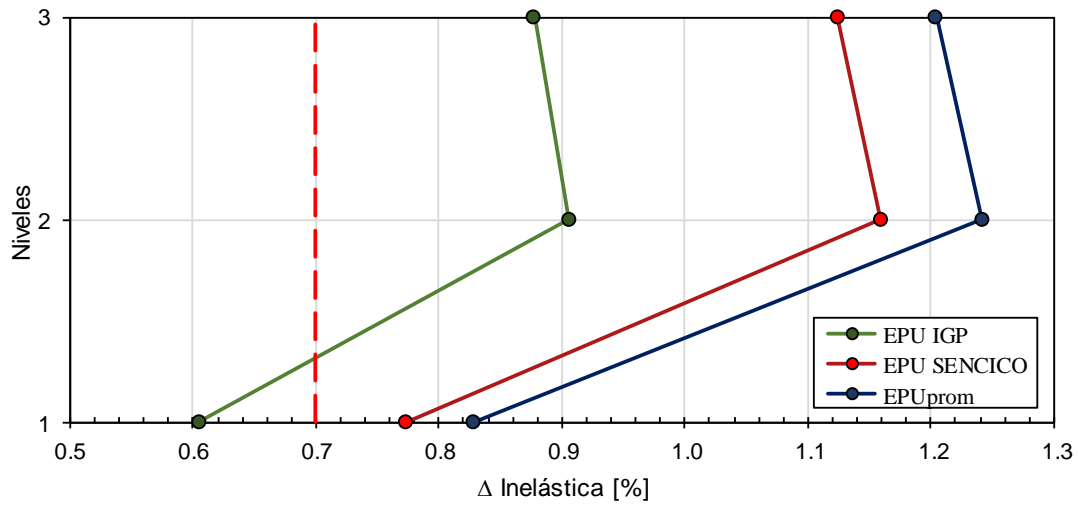
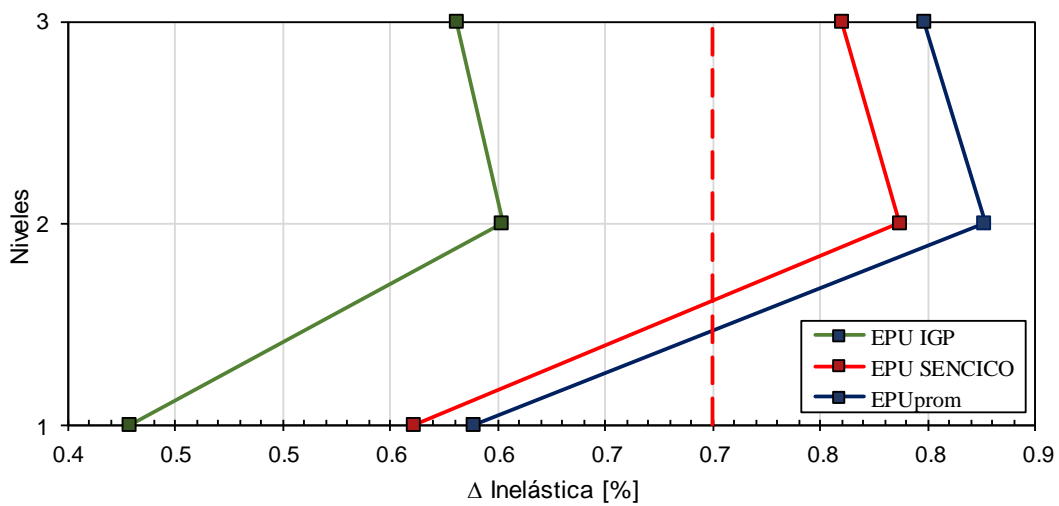


Figura N° 60 Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección Y



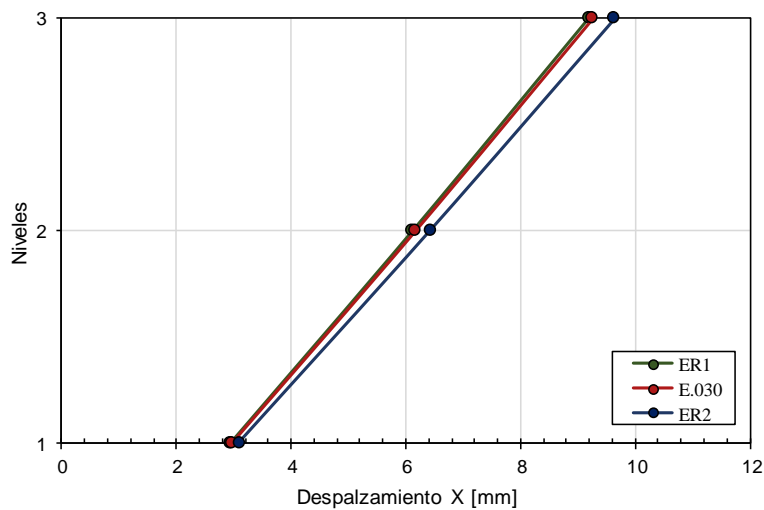
**Figura N° 61** Derivas inelásticas en la dirección X



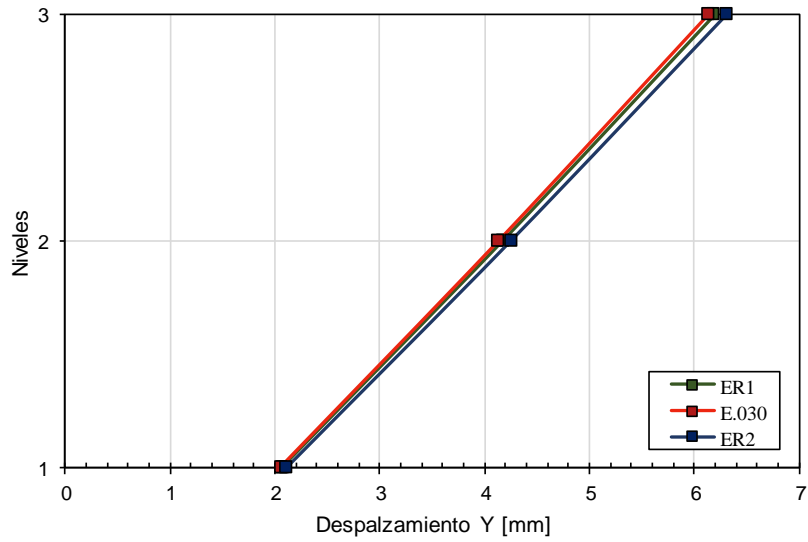
**Figura N° 62** Derivas inelásticas en la dirección Y

**b) Para los espectros de diseño.**

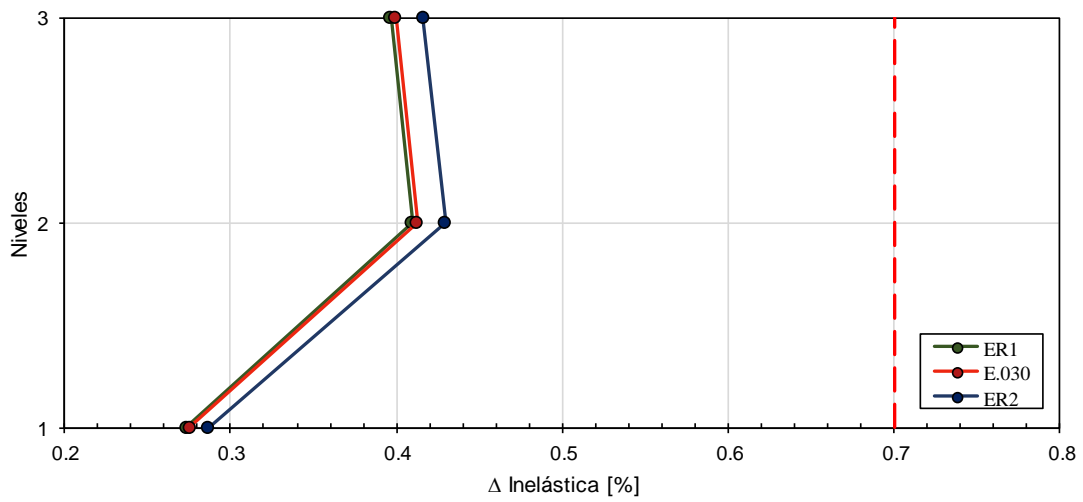
Para cada dirección de análisis, se muestran las gráficas de los desplazamientos laterales máximos por nivel y derivas inelásticas.



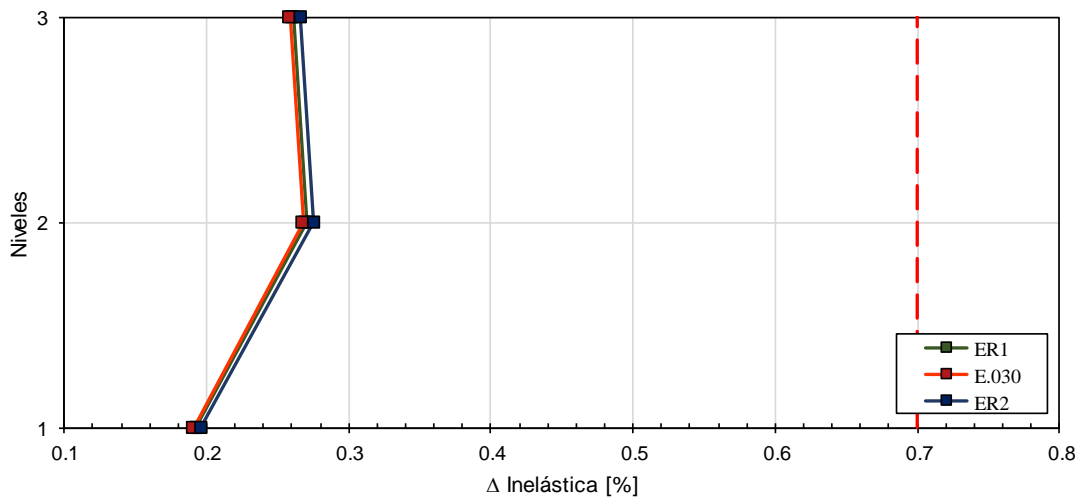
**Figura N° 63** Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección X



**Figura N° 64** Desplazamientos laterales máximos por nivel para la dirección Y



**Figura N° 65** Derivas inelásticas en la dirección X



**Figura N° 66** Derivas inelásticas en la dirección Y

### 3.4.3.7.2. Cortante basal.

#### a) Para los espectros de peligro uniforme.

Las siguientes gráficas muestran la distribución de cortante basal por nivel para cada dirección de análisis.

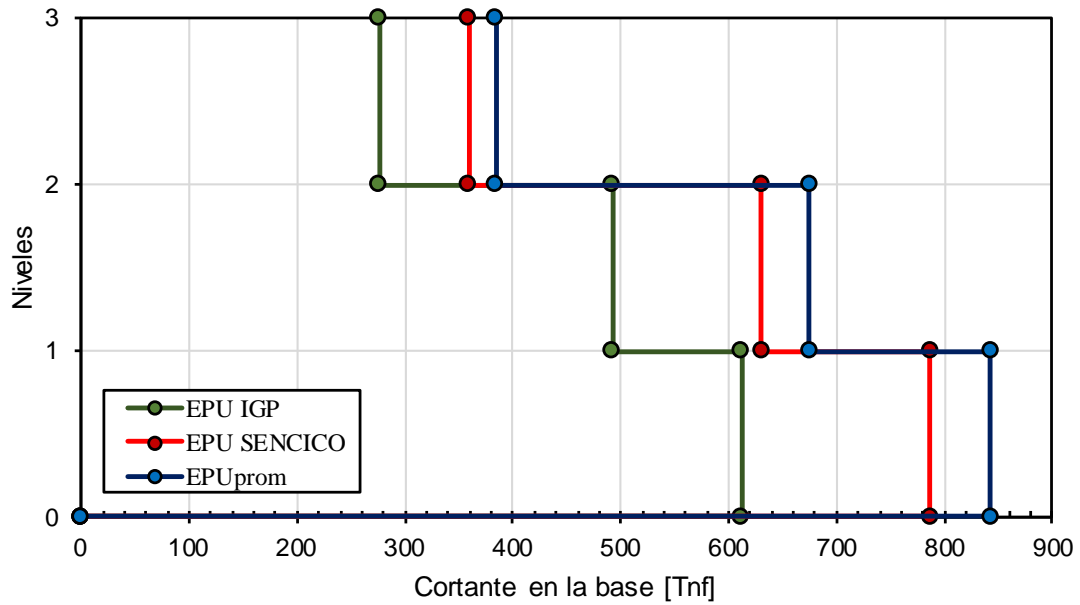


Figura N° 67 Cortante basal por nivel para la dirección X

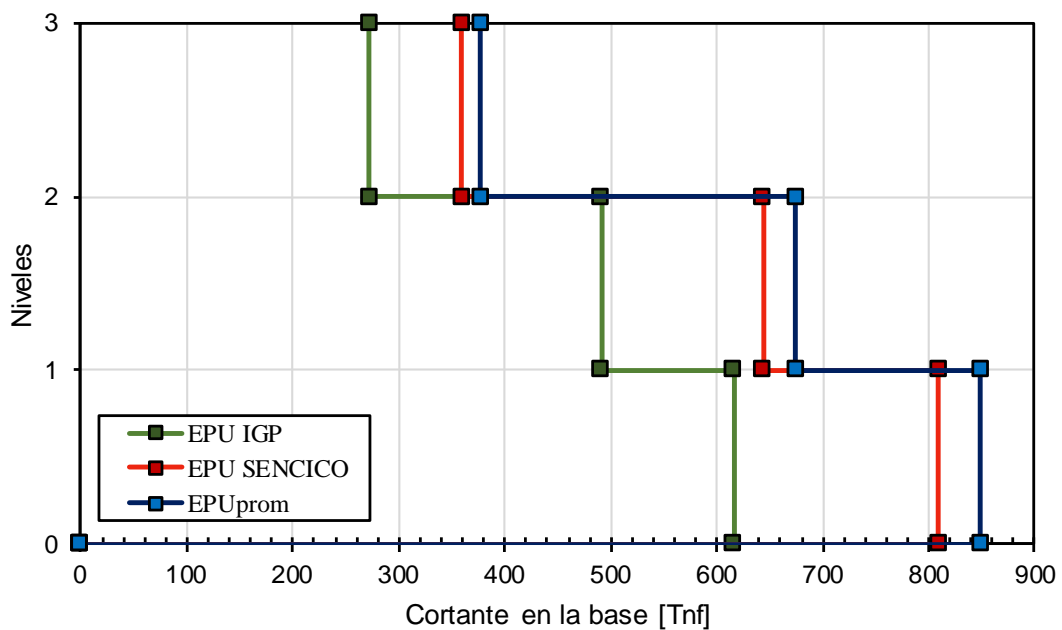
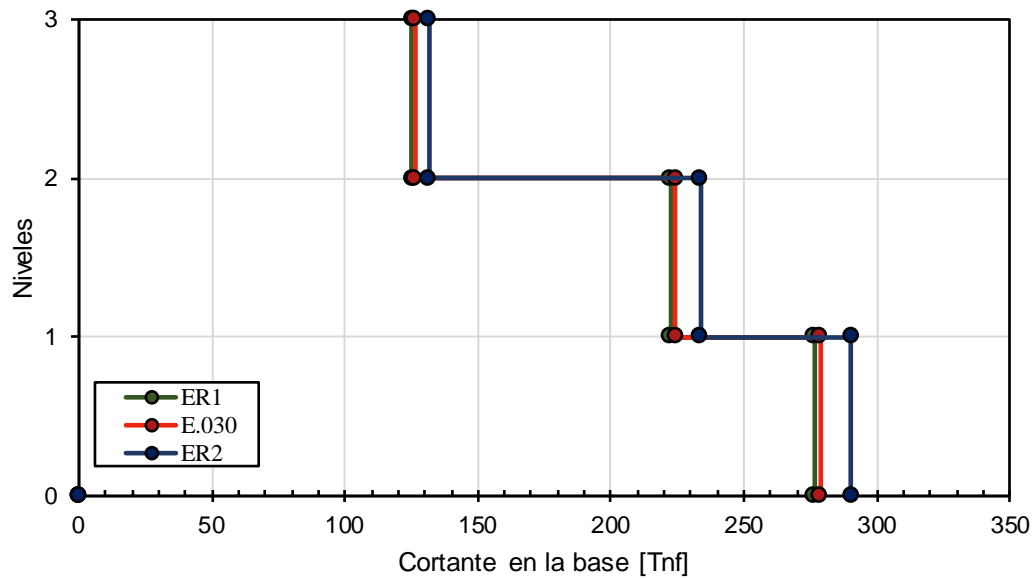


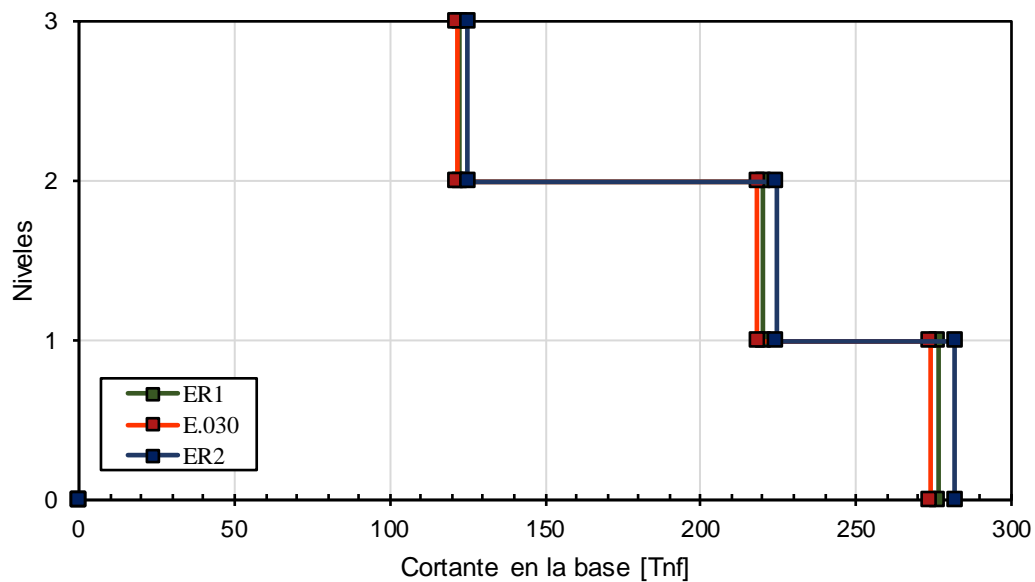
Figura N° 68 Cortante basal por nivel para la dirección Y

**b) Para los espectros de diseño.**

Las siguientes gráficas muestran la distribución de cortante basal por nivel para cada dirección de análisis.



**Figura N° 69** Cortante basal por nivel para la dirección X



**Figura N° 70** Cortante basal por nivel para la dirección Y

**3.4.3.7.3. Cortantes máximos en columnas.**

Para la obtención de los cortantes máximos en columnas, se ha tomado como referencia únicamente algunas columnas. En este caso, se escogieron las columnas denominadas C13, C14 y C15 de dimensiones de 60x60.



a) Para los espectros de peligro uniforme.

Las siguientes gráficas muestran los cortantes máximos por columna para cada dirección de análisis.

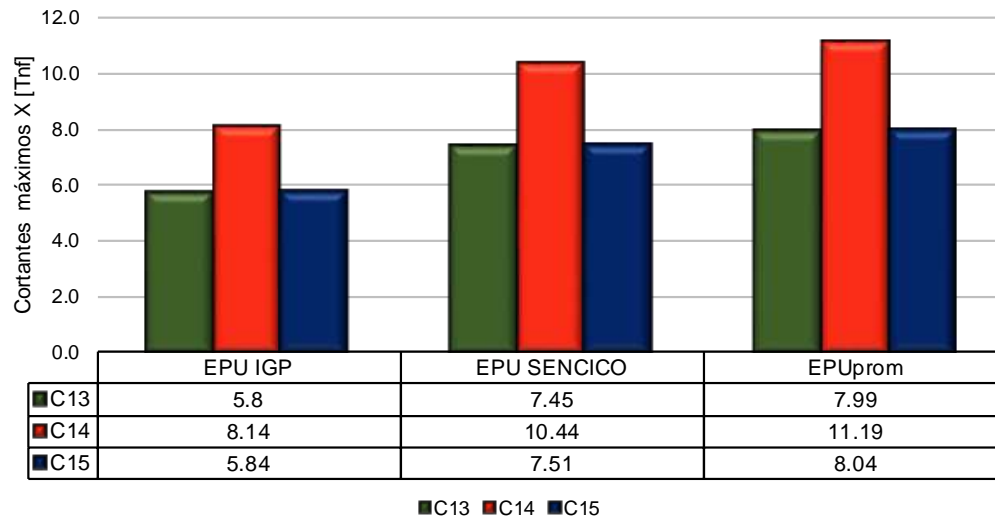


Figura N° 71 Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección X

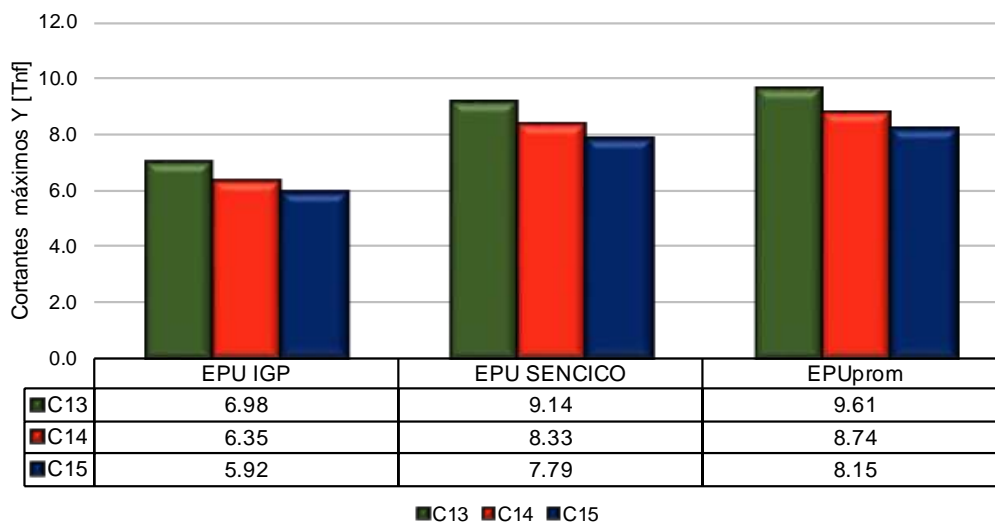
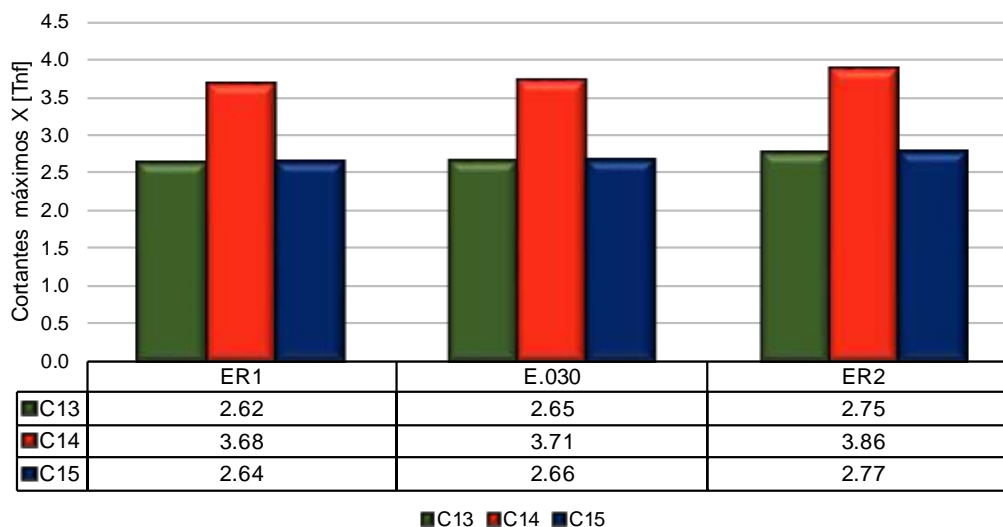


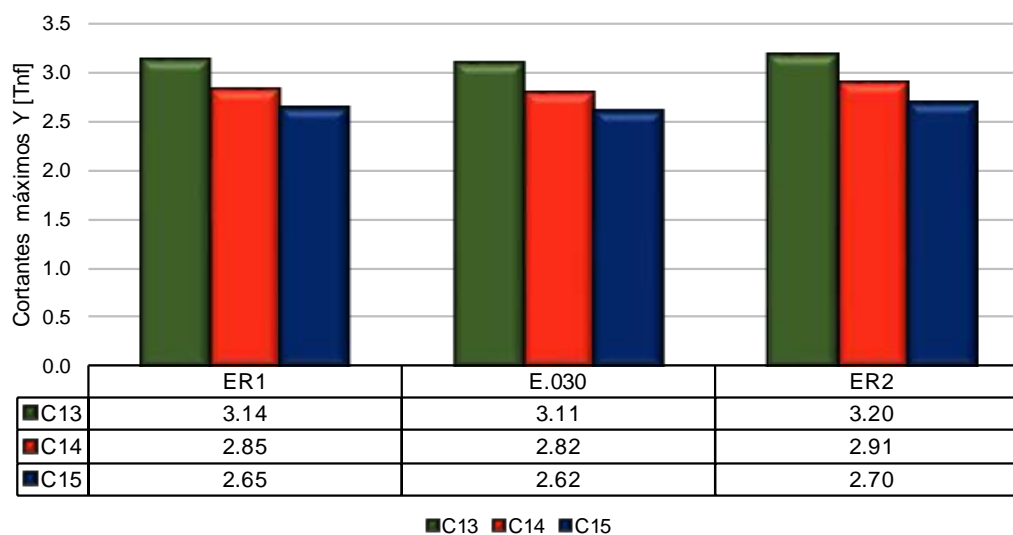
Figura N° 72 Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección Y

**b) Para los espectros de diseño.**

Las siguientes gráficas muestran los cortantes máximos por columna para cada dirección de análisis.



**Figura N° 73** Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección X



**Figura N° 74** Cortante máximo en columnas C13, C14 y C15 para la dirección Y

**3.4.3.7.4. Momentos máximos en vigas.**

Para la obtención de los momentos máximos en vigas, se ha tomado como referencia únicamente algunas de ellas. En este caso, se escogieron las vigas denominadas V105a, V107a y V108a.

a) Para los espectros de peligro uniforme.

Las siguientes gráficas muestran los momentos máximos por viga para cada dirección de análisis.

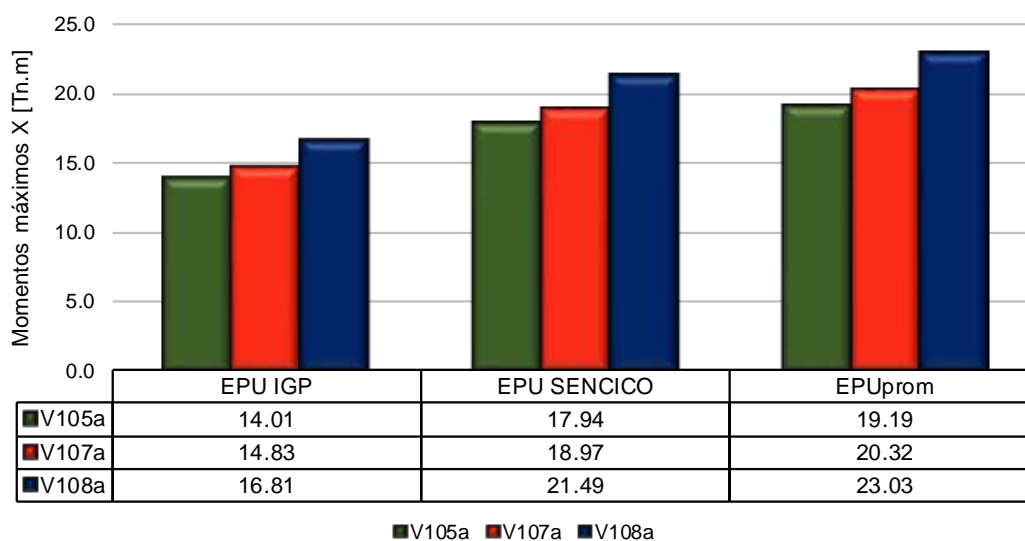


Figura N° 75 Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección X

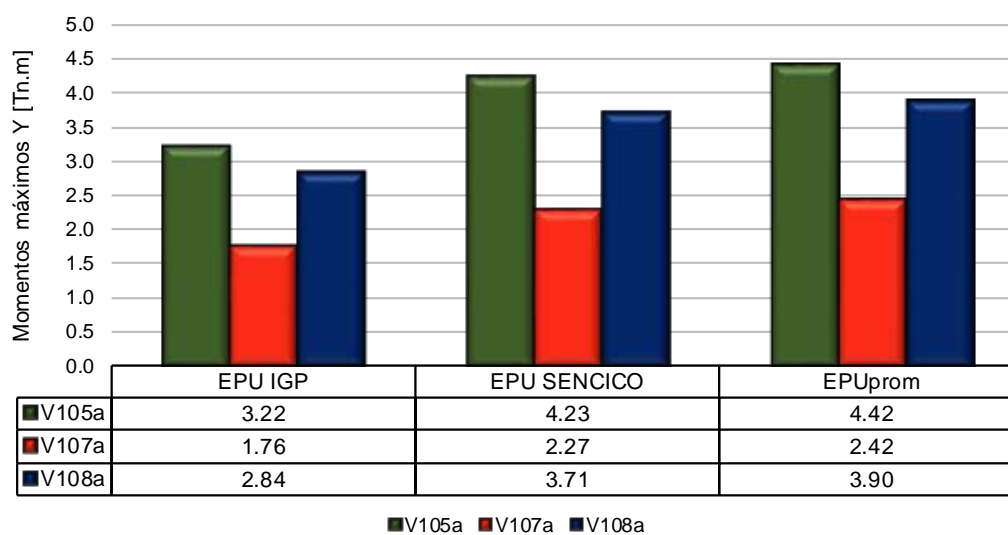
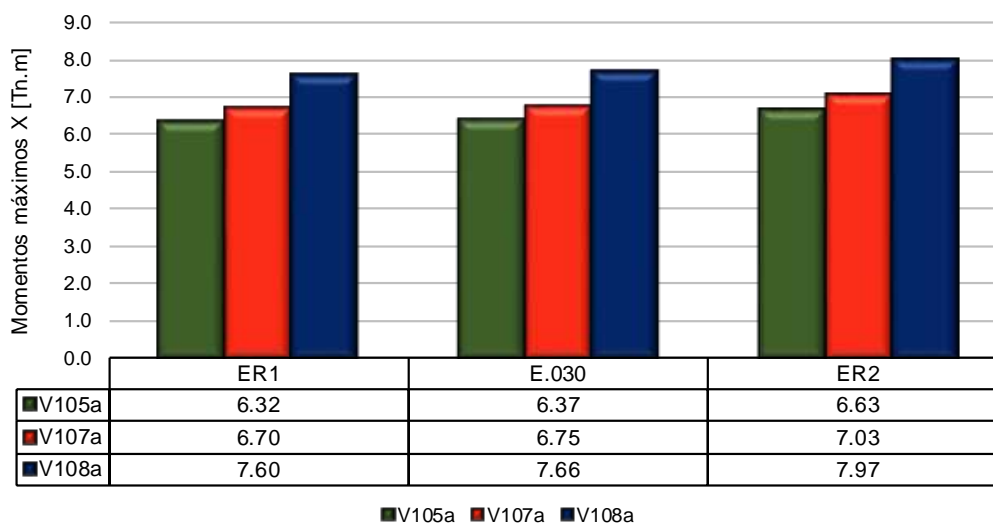


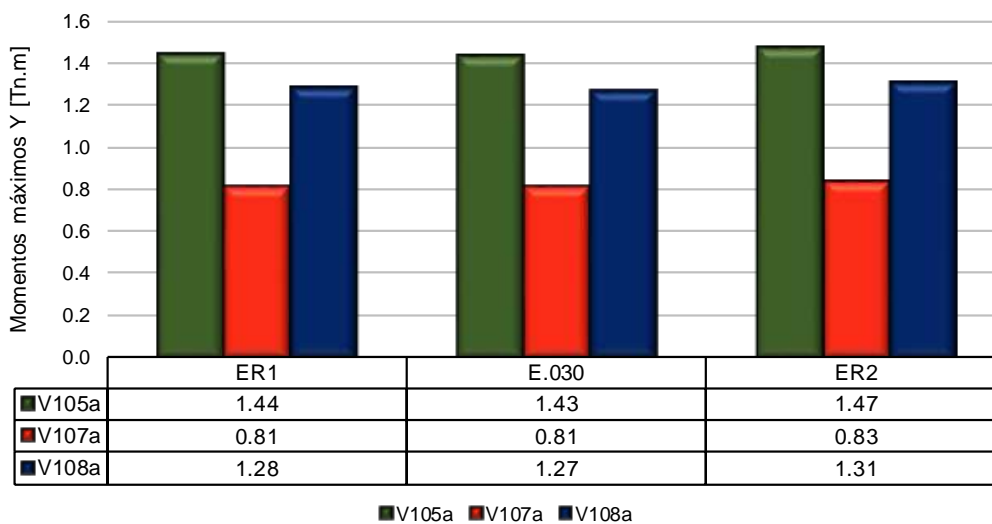
Figura N° 76 Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección Y

**b) Para los espectros de diseño.**

Las siguientes gráficas muestran los momentos máximos por viga para cada dirección de análisis.



**Figura N° 77** Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección X

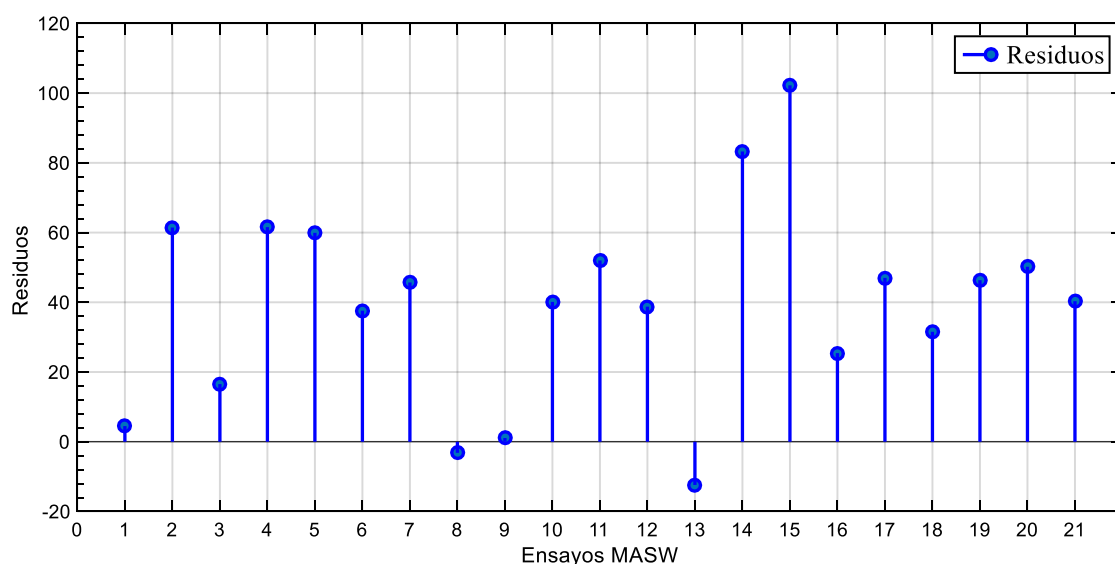


**Figura N° 78** Momentos máximos en vigas V105a, V107a y V108a para la dirección Y

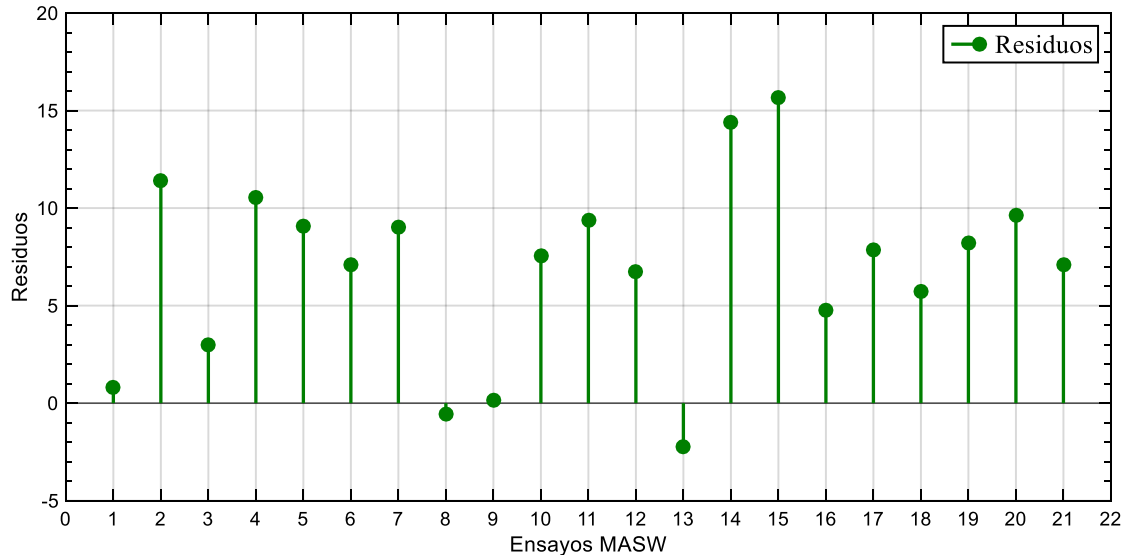
## CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE A PROFUNDIDADES DE 30 m.

Los dos modelos matemáticos usados para obtener la velocidad de onda de corte a profundidades de 30 m tuvieron resultados similares, dado que en casi todos los ensayos MASW la diferencia de dicha velocidad fue menor a 60 m/s, salvo en el ensayo MASW-15 que se notó una diferencia de aproximadamente 100 m/s como muestra la Figura 79), no obstante, la diferencia obtenida para la obtención de la velocidad de onda de corte promedio para ambos modelos fue ínfima, como se muestra en la Figura 80. Por consiguiente, se puede mencionar que la ecuación empírica de Boore et al. (2011) que relaciona específicamente los coeficientes pertenecientes a la velocidad de onda de corte de 20 m con la de 30 m es conveniente para esta zona de Cajamarca.



**Figura N° 79** Residuos de la diferencia de velocidades de ondas de corte a profundidades de 30 m entre los dos modelos matemáticos



**Figura N° 80** Residuos de la diferencia de velocidades de ondas de corte promedio a profundidades de 30 m entre los dos modelos matemáticos

## 4.2. PERFIL DE SUELO.

El perfil del suelo obtenido mediante el parámetro de velocidad promedio de ondas de corte (Tabla 43) clasifica para los dos modelos matemáticos analizados, una misma condición de suelo, teniendo como resultado que más del 70 % clasifica como suelo Tipo D (IBC, 2006) y el 100 % como suelo Tipo S<sub>2</sub> (E.030, 2019).

## 4.3. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.

### 4.3.1. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN PARA PERIODOS CORTOS (F<sub>a</sub>).

Teniendo en cuenta que la ciudad de Cajamarca se encuentra ubicada en una Zona 3 y el perfil de suelo encontrado corresponde a un Tipo S<sub>2</sub>, por consiguiente, se tiene como factor de suelo un valor de 1.15. Al comparar este resultado con la curva promedio de probabilidad log-normal (Figura 53), se obtiene una confianza de alrededor del 16.1 %, generando así una baja probabilidad de acotación a la realidad del efecto de sitio, siendo el factor de suelo un parámetro determinante en la amplificación de un espectro, esto se ve reflejado en las Figuras 54 – 56, en donde se aprecia claramente el espectro de diseño elástico para diferentes Factores de Uso (*U*) y la variación con respecto al factor de suelo, el cual está relacionado a diferentes probabilidades de confiabilidad obtenidas en este estudio.

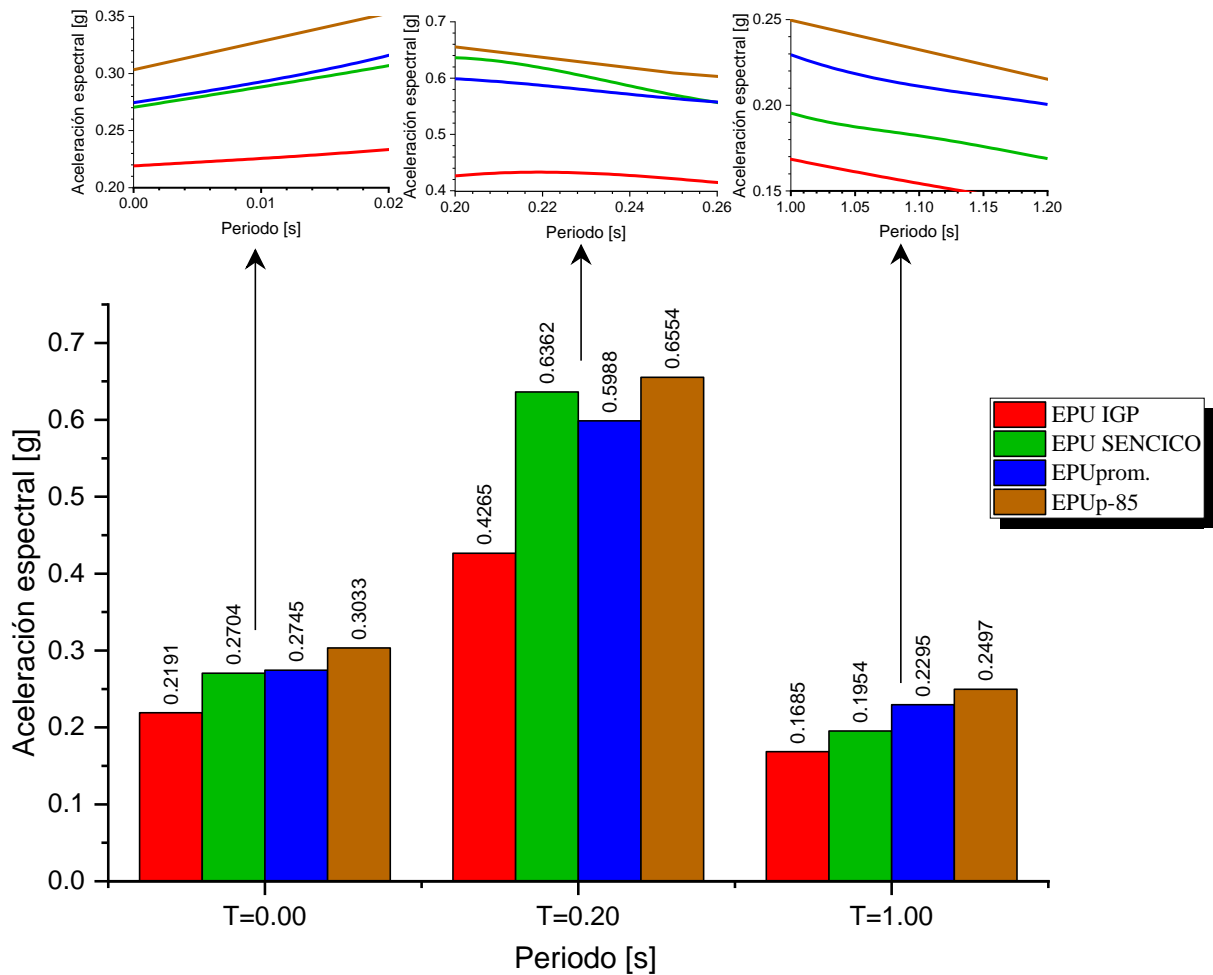
### 4.3.2. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN PARA PERIODOS LARGOS (F<sub>v</sub>).

Con la aceleración espectral del espectro de peligro uniforme promedio a 1.0 s, se tiene un S<sub>1</sub>=0.2295g. Interpolando este valor de forma lineal se tendrá para el caso del ASCE/SEI 7-10 (2010) un valor de 1.941, que representa el 57.11 % de probabilidad de nivel de

confianza y para el ASCE/SEI 7-16 (2017) un valor de 2.141, que representa el 88.90 % de probabilidad de nivel de confianza de la curva promedio log-normal para periodos largos, mostrada en la Figura 58. Pese a que la norma E.030 no indica factores de amplificación para periodos largos, sino de forma general un único factor de amplificación de suelo, podemos ver que existe un buen grado de conformidad entre la curva promedio de probabilidad log-normal de este estudio y el factor obtenido por interpolación acorde a la Tabla N° 45 presentada anteriormente perteneciente al ASCE/SEI 7-16 (2017).

#### **4.4. ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME.**

Con las combinaciones probabilísticas realizadas en el árbol lógico (Tabla N° 28 a Tabla N° 35) se obtuvieron espectros promedios de peligro uniforme y sus percentiles 15 y 85. Al considerar aquel espectro promedio y su percentil 85 obtenido tanto de las fuentes de subducción como continentales y comparándolo con los espectros de peligro uniforme de los estudios de Tavera et al. (2014) y SENCICO (2016) para los periodos de 0.00, 0.20 y 1.00 segundos, se obtuvo de forma general para el espectro promedio (EUprom.) valores mayores a los 0.00 y 1.00 segundos, y para los 0.20 segundos se obtuvo un valor mayor al de Tavera et al. (2014) pero menor al de SENCICO (2016). Por otro lado, al analizar el espectro de percentil 85 (EUp-85), se obtuvo en todos los casos valores mayores a los espectros en comparación. En la siguiente figura se puede apreciar los valores comparados de dichos espectros para los periodos ya mencionados.



**Figura N° 81** Diferencias de aceleraciones espectrales de espectros de peligro uniforme en periodos de 0.00, 0.20 y 1.00 segundos para un periodo de retorno de 475 años

#### 4.5. ESPECTROS DE DISEÑO.

Los espectros de diseño denominados Espectro ER1 y Espectro ER2 presentan un decremento del 18.16 % con respecto a la norma E.030 para el primer caso y un incremento del 4.35 % con respecto a la norma E.030 para el segundo caso, considerando además que se ha hecho uso de un factor de amplificación de suelo de 1.20 que constituye el 80 % de confiabilidad y teniendo como máximo un valor de 1.30 que indica el 100 %. Además, si bien el Espectro ER1 presenta valores debajo al de la norma E.030 debido a que el PGA es menor al estipulado en dicha norma, pero es relativamente mayor al estudio del IGP (Tavera et al., 2014) y SENCICO (SENCICO, 2016) como se muestra en la Figura 81, siendo este representado de mejor manera ya que proviene de datos de estudios de peligro sísmico y el factor de suelo obtenido en este estudio a un nivel de confianza del 80 %. Por otro lado, el Espectro ER2 presenta el mismo factor de zona que establece la norma E.030, y es afectado por el mismo factor de suelo que el Espectro ER1.



## 4.6. RESPUESTA ESTRUCTURAL.

### 4.6.1. Desplazamientos.

Los desplazamientos de la estructura tanto para los espectros de peligro uniforme como los espectros de diseño se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla N° 47** Desplazamientos laterales debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y

Nivel	Desplazamiento X (mm)			Desplazamiento Y (mm)		
	EPU IGP	EPU SENCICO	EPUprom.	EPU IGP	EPU SENCICO	EPUprom.
3	20.34	26.02	27.87	13.79	18.02	18.92
2	13.55	17.33	18.56	9.30	12.14	12.75
1	6.52	8.34	8.94	4.62	6.05	6.35

**Tabla N° 48** Desplazamientos laterales debido a espectros de diseño en dirección X y Y

Nivel	Desplazamiento X (mm)			Desplazamiento Y (mm)		
	ER1	E.030	ER2	ER1	E.030	ER2
3	9.19	9.26	9.64	6.19	6.13	6.31
2	6.12	6.17	6.42	4.17	4.13	4.25
1	2.94	2.97	3.09	2.08	2.06	2.12

### 4.6.2. Derivas.

Las derivas de la estructura tanto para los espectros de peligro uniforme como los espectros de diseño se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla N° 49** Derivas inelásticas debido a espectros de peligro uniforme en dirección X

Nivel	Derivas Inelásticas X (%)			$\Delta$ límite (%)
	EPU IGP	EPU SENCICO	EPUprom.	
3	0.878	1.125	1.205	0.7
2	0.906	1.159	1.242	0.7
1	0.605	0.774	0.829	0.7

**Tabla N° 50** Derivas inelásticas debido a espectros de diseño en dirección X

Nivel	Derivas Inelásticas X (%)			$\Delta$ límite (%)
	ER1	E.030	ER2	
3	0.396	0.400	0.416	0.7
2	0.410	0.413	0.430	0.7
1	0.273	0.275	0.287	0.7

**Tabla N° 51** Derivas inelásticas debido a espectros de peligro uniforme en dirección Y

Nivel	Derivas Inelásticas Y (%)			$\Delta$ límite (%)
	EPU IGP	EPU SENCICO	EPU <sub>prom.</sub>	
3	0.581	0.760	0.798	0.7
2	0.602	0.787	0.827	0.7
1	0.429	0.561	0.589	0.7

**Tabla N° 52** Derivas inelásticas debido a espectros de diseño en dirección Y

Nivel	Derivas Inelásticas Y (%)			$\Delta$ límite (%)
	ER1	E.030	ER2	
3	0.261	0.259	0.266	0.7
2	0.270	0.268	0.276	0.7
1	0.193	0.191	0.196	0.7

#### 4.6.3. Cortantes en la base.

Los cortantes en la base de la estructura tanto para los espectros de peligro uniforme como los espectros de diseño se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla N° 53** Cortantes en la base debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y

Nivel	Cortante X (Tnf)			Cortante Y (Tnf)		
	EPU IGP	EPU SENCICO	EPU <sub>prom.</sub>	EPU IGP	EPU SENCICO	EPU <sub>prom.</sub>
3	276.38	358.77	384.1	271.86	359.25	377.62
2	492.56	630.19	674.83	491.45	643.52	674.37
1	611.87	787.04	842.72	616.31	809.35	848.82

**Tabla N° 54** Cortantes en la base debido a espectros de diseño en dirección X y Y

Nivel	Cortante X (Tnf)			Cortante Y (Tnf)		
	ER1	E.030	ER2	ER1	E.030	ER2
3	125.18	126.15	131.36	122.61	121.5	125.01
2	222.55	224.29	233.56	220.11	218.11	224.42
1	276.61	278.77	290.29	276.49	273.98	281.90

#### 4.6.4. Cortantes máximos en columnas.

Los cortantes máximos de las columnas en estudio tanto para los espectros de peligro uniforme como los espectros de diseño se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla N° 55** Cortantes máximos en columnas debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y

Elemento	Cortantes máximos X (Tnf)			Cortantes máximos Y (Tnf)		
	EPU IGP	EPU SENCICO	EPU <sub>prom</sub>	EPU IGP	EPU SENCICO	EPU <sub>prom</sub>
C13	5.8	7.45	7.99	6.98	9.14	9.61
C14	8.14	10.44	11.19	6.35	8.33	8.74
C15	5.84	7.51	8.04	5.92	7.79	8.15

**Tabla N° 56** Cortantes máximos en columnas debido a espectros de diseño en dirección X y Y

Elemento	Cortantes máximos X (Tnf)			Cortantes máximos Y (Tnf)		
	ER1	E.030	ER2	ER1	E.030	ER2
C13	2.62	2.65	2.75	3.14	3.11	3.20
C14	3.68	3.71	3.86	2.85	2.82	2.91
C15	2.64	2.66	2.77	2.65	2.62	2.70

#### 4.6.5. Momentos máximos en vigas.

Los momentos máximos de las vigas en estudio tanto para los espectros de peligro uniforme como los espectros de diseño se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla N° 57** Momentos máximos en vigas debido a espectros de peligro uniforme en dirección X y Y

Elemento	Momentos máximos X (Tnf.m)			Momentos máximos Y (Tnf.m)		
	EPU IGP	EPU SENCICO	EPU <sub>prom</sub>	EPU IGP	EPU SENCICO	EPU <sub>prom</sub>
V105a	14.01	17.94	19.19	3.22	4.23	4.42
V107a	14.83	18.97	20.32	1.76	2.27	2.42
V108a	16.81	21.49	23.03	2.84	3.71	3.90

**Tabla N° 58** Momentos máximos en vigas debido a espectros de diseño en dirección X y Y

Elemento	Momentos máximos X (Tnf.m)			Momentos máximos Y (Tnf.m)		
	ER1	E.030	ER2	ER1	E.030	ER2
V105a	6.32	6.37	6.63	1.44	1.43	1.47
V107a	6.70	6.75	7.03	0.81	0.81	0.83
V108a	7.60	7.66	7.97	1.28	1.27	1.31

De todas las tablas anteriormente mostradas pertenecientes al edificio en estudio, se puede visualizar que, considerando un espectro de peligro uniforme, el que adquiere mayores demandas resulta ser el EPU<sub>prom</sub>. obtenido en la presente investigación y considerando un espectro de diseño, el de mayores demandas vendría a ser el ER2.

# **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **5.1. CONCLUSIONES.**

- ❖ Se valida la hipótesis ya que la respuesta estructural de la edificación es mayor tanto para derivas, cortantes basales, cortantes en columnas y en momentos en vigas en alrededor de 37.5% y 7.1% para los espectros probabilísticos de peligro uniforme EPU prom. con EPU IGP y EPU prom. con EPU SENCICO, respectivamente, y es mayor en alrededor del 4.1% en derivas, cortantes basales, cortantes en columnas y momentos en vigas para espectros probabilísticos de diseño con respecto al de la norma E.030 (2019).
  
- ❖ Se determinó la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros probabilísticos y de la normativa vigente; donde, para espectros de peligro uniforme el que generó mayores demandas estructurales fue el EPU prom, seguido del EPU SENCICO y finalmente el EPU IGP, y en cuanto a los espectros de diseño fue el “Espectro ER2”, seguido del de la norma E.030 (2019) y en tercer lugar el “Espectro ER1”.
  
- ❖ Se determinó de la velocidad de onda de corte promedio a profundidades de 30 m mediante ecuaciones potenciales de aproximación y mediante la ecuación empírica de Boore et al. (2011).
  
- ❖ Se obtuvo los factores de amplificación de suelo  $F_a$  y  $F_v$  (para periodos cortos y largos, respectivamente) bajo un rango probabilístico para la zona de Cajamarca estudiada.

## **5.2. RECOMENDACIONES.**

Todo trabajo de investigación da a conocer nuevas perspectivas y futuras líneas de estudio de interés por lo que se recomienda lo siguiente:

- ❖ Aplicar los espectros obtenidos en estructuras con periodo de retorno de 475, tales como edificaciones. No obstante, si estos espectros se los desean aplicar en otras estructuras como puentes o presas se deberá cambiar el periodo de retorno. En este contexto, para puentes el periodo de retorno sería 1000 años si es de tipo esencial y 2500 años si es de tipo crítico y en el caso de presas se podría usar por ejemplo un periodo de retorno de 475 años o 2475 años.

- ❖ Considerar estos espectros para futuros estudios en el cálculo estructural ya que asumen valores considerando un rango probabilístico bajo un cierto grado de confiabilidad y no de forma generalizada como lo estipulado en algunas tablas de la norma vigente.
- ❖ Realizar estudios de microzonificación sísmica en la ciudad de Cajamarca para obtener valores de aceleraciones espectrales que relacionan mejor los efectos de sitio.
- ❖ Obtener factores de amplificación calculados con velocidades de onda de corte obtenidos de otros métodos como los ensayos *Crosshole Seismic (CH)*, el *Seismic Cone Penetrometer Test (SCPT)*, el *Refraction Microtremor Analysis (ReMi)*, entre otros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ☞ Abrahamson, N. A. y Bommer, J. J. 2005. Probability and uncertainty in seismic hazard analysis. *Earthquake Spectra* 21(2):603-607.
- ☞ Abrahamson, N., Gregor, N., y Addo, K. 2016. BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra* 32(1):23-44.
- ☞ Aguiar Falconí, R. 2003. Análisis Sísmico por Desempeño. Quito, EC, Centro de Investigaciones Científicas. 329 p.
- ☞ Aguiar Falconí, R. 2008. Análisis Sísmico de Edificios. Quito, EC, Centro de Investigaciones Científicas. 322 p.
- ☞ Aguilar, A., Ordaz, M. G., De la Puente, J., González, S. N., Rodríguez, H. E., Córdova, A., García A., Calderón, C., Escalante, J. E., Laguna, J. R. y Campos, A. 2017. Development and Validation of Software CRISIS to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment with Emphasis on the Recent CRISIS2015. *Computación y Sistemas* 21(1):67-90.
- ☞ Alva Hurtado, J. E. s.f. Estudio geotécnico con fines de cimentación del parque polideportivo y nuevo coliseo de Cajamarca (diapositivas). Perú. 57 diapositivas, color.
- ☞ Angulo Adrianzén, J. y Azañedo Martínez, W. M. 2013. Propuesta para la modificación del espectro elástico de la actual norma peruana de diseño sismo resistente. Tesis de pregrado. Lima, PE, PUCP.
- ☞ Arnold, C. y Reitherman, R. 1987. Configuración y Diseño Sísmico de Estructuras. México, Limusa. 298 p.
- ☞ ASCE/SEI 7-10. 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers.
- ☞ ASCE/SEI 7-16. 2017. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers.
- ☞ ATC (Applied Technology Council, US). 1996. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council. Redwood City, California, US.
- ☞ Atkinson, G. M. y Boore, D. M. 2003. Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93(4):1703-1729.
- ☞ Barreto Jimenez, D. A. 2019. Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico Para el Diseño de una Presa de Enrocado en Huancavelica. Tesis de pregrado. Lima, PE, PUCP.
- ☞ Bazán, E. y Meli, R. 2002. Diseño Sísmico de Edificios. México, Limusa. 317 p.

- ☞ Benito, B. y Cabañas, L. 1999. Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica. *Física de la Tierra* 11:49-79.
- ☞ Benito, B. y Jiménez, E. 1999. Peligrosidad Sísmica. *Física de la Tierra* 11:13-47.
- ☞ Bernal, I., Tavera, H. y Antayhua, Y. 2002. Zonas sismogénicas en Perú: volúmenes de deformación, gráficos polares y zonificación preliminar. *Boletín de la Sociedad del Perú* 93:31-44.
- ☞ Bolaños Luna, A. M. y Monroy Concha, O. M. 2004. Espectros de peligro sísmico uniforme. Tesis de maestría. Lima, PE, PUCP.
- ☞ Bommer, J., Scherbaum, F., Bungum H., Cotton, F., Sabetta, F. y Abrahamson, N. A. 2005. On the use of logic trees for ground-motion prediction equations in seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(2):377-389.
- ☞ Bommer, J. y Scherbaum, F. 2008. The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. *Earthquake Spectra* 24(4):997-1009.
- ☞ Boore, D. M., Thompson, E. M. y Cadet, H. 2011. Regional correlations of  $V_{S30}$  and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters. *Bulletin of the Seismological Society of America* 101(6):3046-3029.
- ☞ Borchardt, R. D. 1994a. Simplified site classes and empirical amplification factors for site dependent code provisions. U.S. Geological Survey. Menlo Park, California.
- ☞ Borchardt, R. D. 1994b. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra* 10(4):617-653.
- ☞ Borchardt, R. D. 2012.  $V_{S30}$  – A Site-Characterization Parameter for Use in Building Codes, Simplified Earthquake Resistant Design, GMPEs, and ShakeMaps. 15 WCEE. Lisboa 2012.
- ☞ Buendía Sánchez, L. M. 2016. Estimación de espectros de vulnerabilidad uniforme para el diseño sísmico de estructuras. Tesis de maestría. México, UNAM.
- ☞ Cameron, W. I. y Green, R. A. 2004. Soil Nonlinearity versus Frequency Effects. Opinion Paper, International Workshop on the Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Response.
- ☞ Campbell, K. W. y Bozorgnia, Y. 2014. NGA-West2 Ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra* 30(3):1087-1115.
- ☞ Campos Irigoín, R. 2019. Riesgo sísmico del edificio del comedor universitario de la Universidad Nacional de Cajamarca. Tesis de pregrado. Cajamarca, PE, UNC.

- ☞ CEN (European Committee for Normalisation). 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. British Standard.
- ☞ CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres, MX). 1999. Curso Sobre Diseño y Construcción Sismorresistente de Estructuras. México. 423 p.
- ☞ CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres, MX). 2014. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Serie Atlas Nacional de Riesgos. México. 280 p.
- ☞ Charca, O., Gamarra, C. y Parra, D. 2018. Selección de leyes de atenuación sísmica de subducción para la evaluación del peligro sísmico en el Perú. XX Congreso Nacional de Ingeniería Civil. 12 p.
- ☞ Chávez, J., Alva, J., Aguilar, Z., y Lázares, F. 2009. Actualización de las relaciones de atenuación CISMID para aceleraciones espectrales de sismos de subducción en el Perú. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Civil 576–579.
- ☞ Chopra, A. K. 2014. Dinámica de Estructuras. Trad. JE Murrieta Murrieta. 4 ed. México, Pearson. 944 p.
- ☞ Cimellaro, G. P., Marasco, S. 2018. Introduction to Dynamics of Structures and Earthquake Engineering. Springer. 598 p.
- ☞ Delavaud, E., Cotton, F., Beauval, C., Akkar, S., Scherbaum, F. y Danciu, L. 2012. Construction of a ground-motion logic tree for PSHA in Europe within the SHARE project. 15 WCEE. Lisboa 2012.
- ☞ Devore, J. L. 2008. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Trad. JH Romo. 7 ed. México, Cengage Learning. 720 p.
- ☞ Dobry, R. Borchardt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., Power, M. S., Rinne, E. E. y Seed R. B. 2000. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. Earthquake Spectra 16(1):41-67.
- ☞ Douglas, J. 2019. Ground motion prediction equations 1964 – 2019. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Strathclyde. Glasgow, UK.
- ☞ Duggal, S. K. 2013. Earthquake-Resistant Design of Structures. 2 ed. Estados Unidos, Oxford. 505 p.
- ☞ Elnashai, A. S. y Di Sarno, L. 2015. Fundamentals of Earthquake Engineering. From Source to Fragility. 2 ed. Estados Unidos, Wiley. 469 p.



- ☞ FEMA 450. 2003. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C.
- ☞ Frau, C. D. 2018. Clasificación Sísmica de Sitios. National University of Technology. 20 p.
- ☞ García Reyes, L. E. 1998. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá Colombia.
- ☞ GB 50011–2010. 2010. Code for Seismic Design of Buildings. National Standard of People's Republic of China. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Beijing, CN.
- ☞ Gioncu, V. y Mazzolani, F. M. 2011. Earthquake Engineering for Structural Design. New York, Spon Press. 566 p.
- ☞ Goytia Torrez, I. R. y Villanueva Inca, R. 2001. Modernización de la Enseñanza Aprendizaje en la Asignatura de Ingeniería Antisísmica. 240 p.
- ☞ Hidalgo Leiva, D. A. 2017. Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño sísmico con aplicaciones a tipologías constructivas empleadas en Costa Rica. Tesis doctoral. Barcelona, ES, Universidad Politécnica de Catalunya.
- ☞ IBC (International Building Code, US). 2006. International Building Code. International Code Council. Estados Unidos.
- ☞ Kramer, S. L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Estados Unidos, Prentice Hall. 653 p.
- ☞ López Prado, A. R. 2016. Evaluación geofísica geotécnica del proyecto Central Hidroeléctrica Chilia, región Huánuco-Ancash. Tesis de pregrado. Arequipa, PE, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- ☞ Malpartida Pino, K. J. 2017. Obtención del factor de zona sísmico "Z" mediante el software CRISIS 2015 ver.4.1 en la ciudad de Huánuco 2017. Tesis de pregrado. Huánuco, PE, UDH.
- ☞ Manual de Puentes. 2018. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Lima, PE.
- ☞ Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Rodríguez, J. y Terán. 2016. Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un sismo de grado 7.1 en magnitud Richter ocurrido en Japón. Ingeniería 20(3):137-146.
- ☞ Muñoz, D. 1989. Conceptos básicos en riesgo sísmico. Física de la tierra no. 1:199-215.

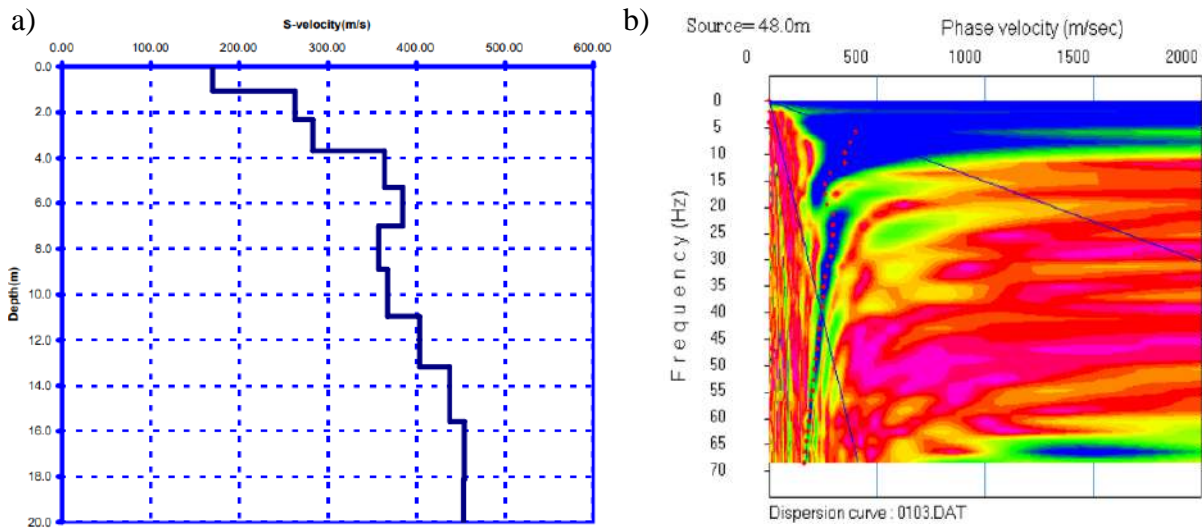
- ☞ Musson, R. 2012. On the nature of logic trees in probabilistic seismic hazard assessment. *Earthquake Spectra* 28(3):1291-1296.
- ☞ MVCS (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, PE). 2019. Diseño Sismorresistente. Norma Técnica E.030. Lima, PE.
- ☞ Ordaz, M., Salgado-Gálvez, M. A., Cardona, O. D. y Contreras, M. 2019. R-CRISIS: 30 años de desarrollos y mejoras continuas encaminadas a una mejor evaluación probabilista del peligro sísmico. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. México. 9 p.
- ☞ Ordaz, M. y Salgado-Gálvez, M. A. 2019. R-CRISIS Validation and Verification Document. ERN Technical Report. Mexico.
- ☞ Parra Cárdenas, H. A. 2016. Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador Continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito. Tesis doctoral. Madrid, ES, UPM.
- ☞ Picoita, D. M. 2011. Elaboración de nuevos espectros sísmicos de diseño en aceleraciones para el código ecuatoriano de la construcción 2011. Universidad San Francisco de Quito. Quito Ecuador.
- ☞ Pinilla Ramos, C. I. 2012. Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuesta en suelos. Tesis de pregrado. Santiago de Chile, CL, Universidad de Chile.
- ☞ Porter, K. 2017. A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. University of Colorado Boulder. Estados Unidos. 103 p.
- ☞ Power, M., Chiou, B., Abrahamson, N., Bozorgnia, Y. y Shantz T. 2008. An overview of the NGA Project. *Earthquake Spectra* 24(1):3-21.
- ☞ Quinde Martínez, P. y Reinoso Angulo, E. 2016. Estudio de Peligro Sísmico de Ecuador y Propuesta de Espectros de Diseño para la Ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería Sísmica* no. 94:1-26.
- ☞ Reboredo, A. B. 1996. El análisis dinámico de construcciones sismo resistentes. Monografía. Mendoza, AR. 40 p.
- ☞ Rivera Mantilla, H. 2005. Geología General. 2 ed. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica. Lima Perú.
- ☞ Rochel Awad, R. 2012. Análisis y diseño sísmico de edificios. 2 ed. Medellín, CO, Universidad EAFIT. 388 p.

- ☞ Roncal Castro, M. A. 2017. Determinación del peligro sísmico en el territorio nacional y elaboración de aplicativo web. Tesis de pregrado. Lima, PE, UNI.
- ☞ Sadigh, K., Chang, CY., Egan, J., Makdisi, F. y Youngs, R. 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismological Research Letters* 68(1):180-189.
- ☞ Scherbaum, F. y Kuehn, N. 2011. Logic tree branch weights and probabilities: Summing up to one is not enough. *Earthquake Spectra* 27(4):1237-1251.
- ☞ Schmidt, V. 2011. Factores de Amplificación del Suelo en Función del Periodo Obtenidos a Partir de Regresiones para Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 44:27-39.
- ☞ SENCICO (Servicio Nacional de Capacitación Para la Industria de la Construcción, PE), 2016. Actualización del Programa de Cómputo Orientado a la determinación del Peligro Sísmico en el País. Manual de Uso de Aplicativo Web.
- ☞ SINAPRED (Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres, NI), 2005. Requisitos generales de diseño y construcción. Nicaragua.
- ☞ Tapia Hernández, E., Reddy, E. A., y Oros Avilés, L. J. 2017. Retos e Incertidumbres en la Predicción y Prevención del Riesgo Sísmico. *Ingeniería Sísmica* no. 96:66-87.
- ☞ Tavera, H. y Buforn, E. 1998. Sismicidad y sismotectónica de Perú. *Física de la Tierra*. 10:187-219.
- ☞ Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., Ishizawa, O. 2014. Re-Evaluación del Peligro Sísmico Probabilístico para el Perú. Proyecto en Cooperación con el Banco Mundial. Ministerio del Ambiente. Instituto Geofísico del Perú. Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida – SCTS.
- ☞ Vidal Sánchez, F. 1994. Los terremotos y sus causas. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos.
- ☞ Wikipedia, enciclopedia libre. Probabilism (en línea). Consultado 19 set. 2021. Disponible en <https://en.wikipedia.org/wiki/Probabilism>
- ☞ Youngs, R. R., Chiou, SJ., Silva, W. J. y Humphrey, J. R. 1997. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters* 68(1):58-73.
- ☞ Zhao, J., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H., Somerville, P., Fukushima, Y. y Fukushima, Y. 2006. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96(3):898-913.

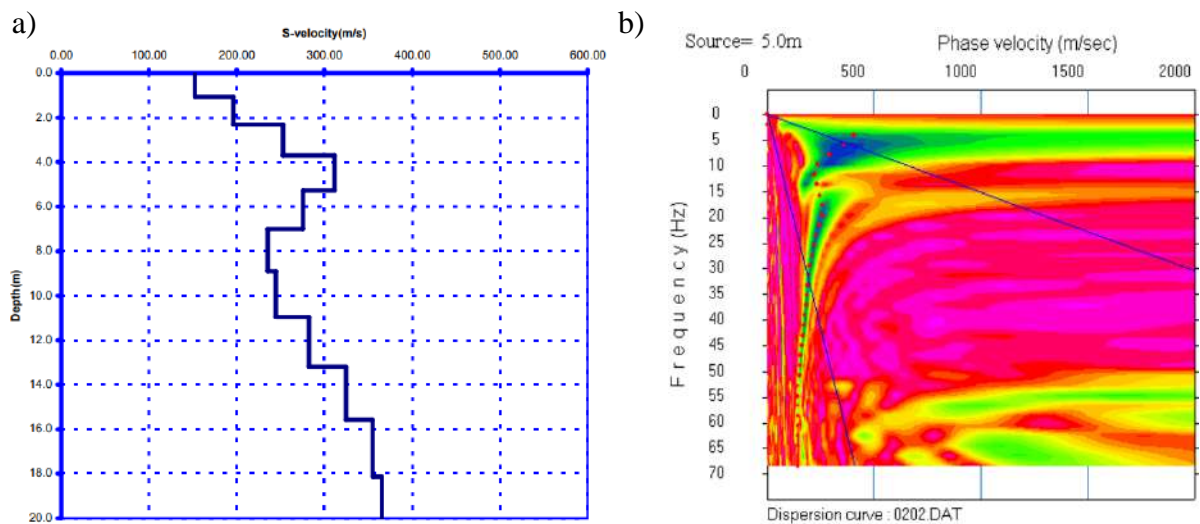
# ANEXOS

## ANEXO N° 01: ENSAYOS MASW.

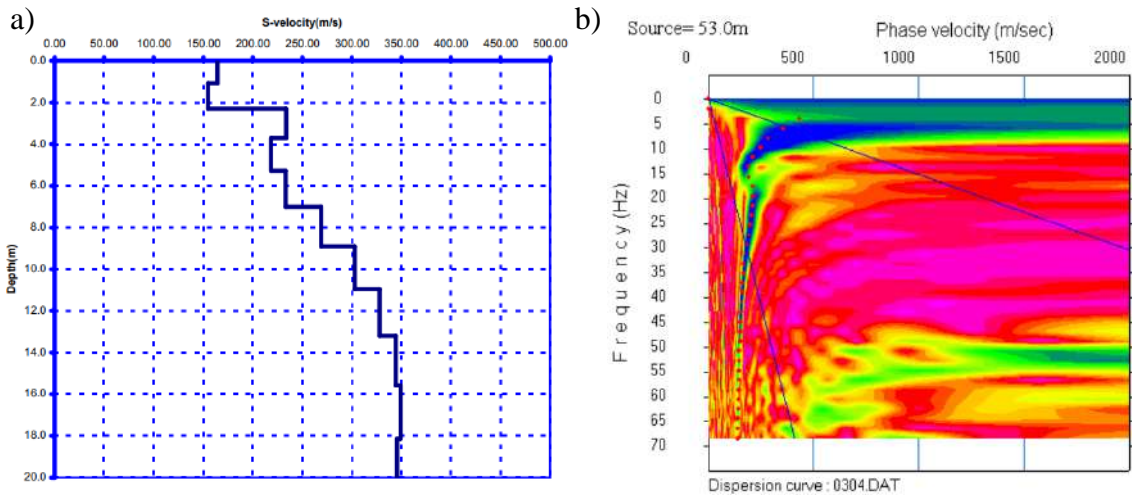
Los ensayos MASW presentes en este anexo fueron tomados del “*Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Nuevo Coliseo y Polideportivo de Cajamarca*” realizado por HIDROENERGIA Consultores en Ingeniería S.R.L.



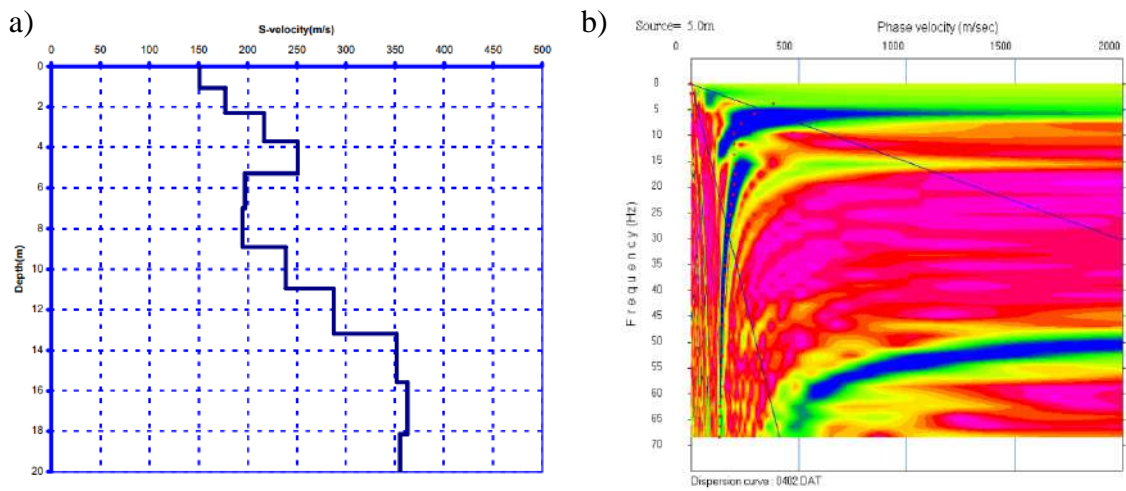
**Figura A1 N° 1** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-1



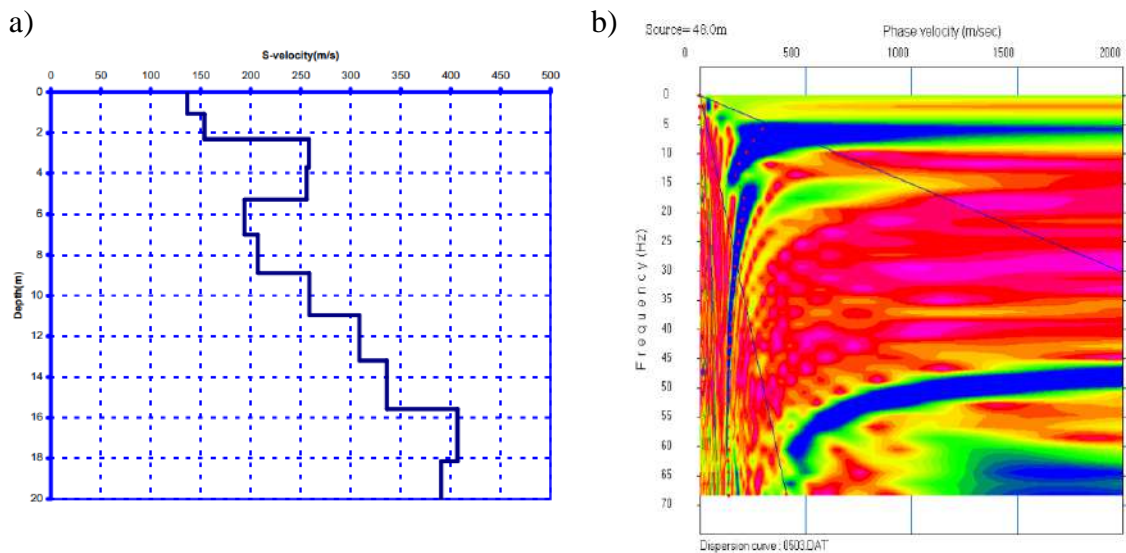
**Figura A1 N° 2** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-2



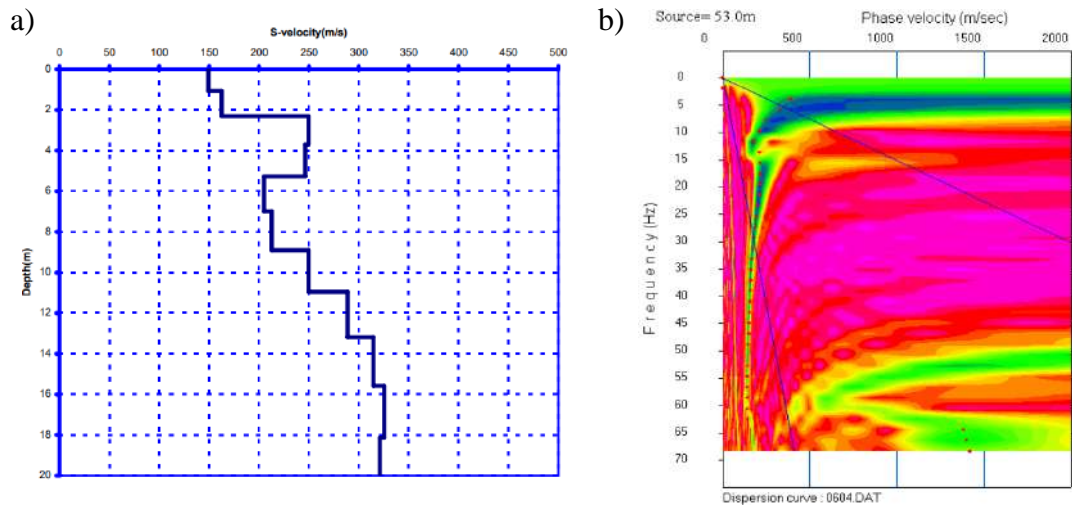
**Figura A1 N° 3** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-3



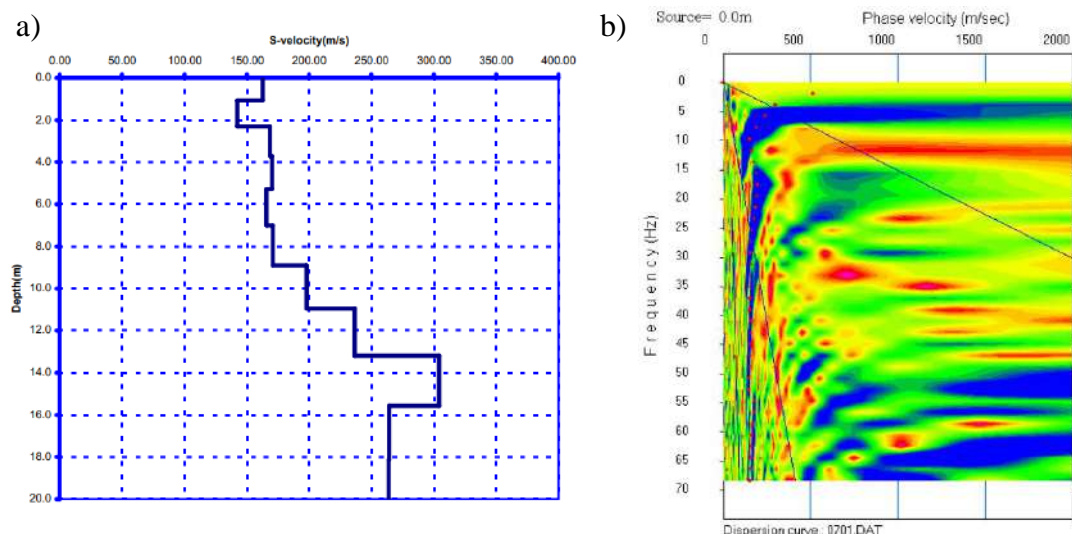
**Figura A1 N° 4** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-4



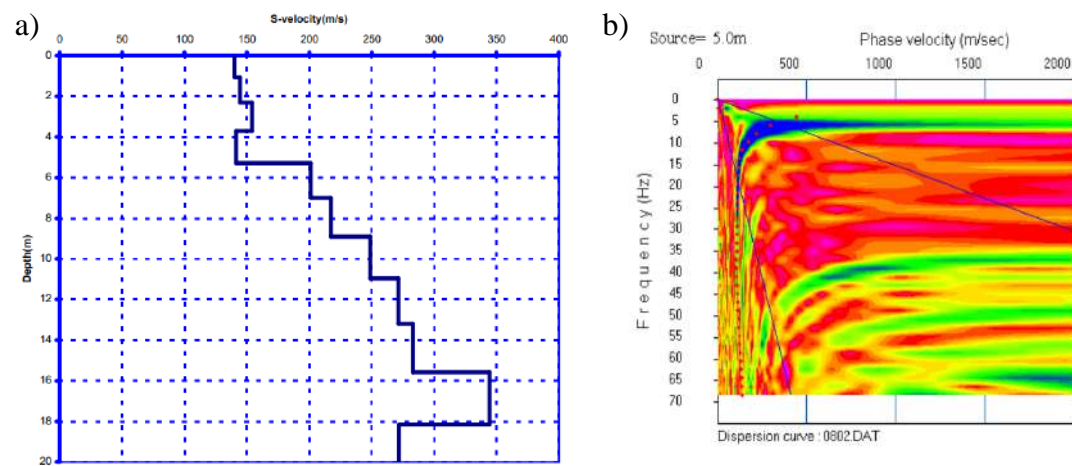
**Figura A1 N° 5** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-5



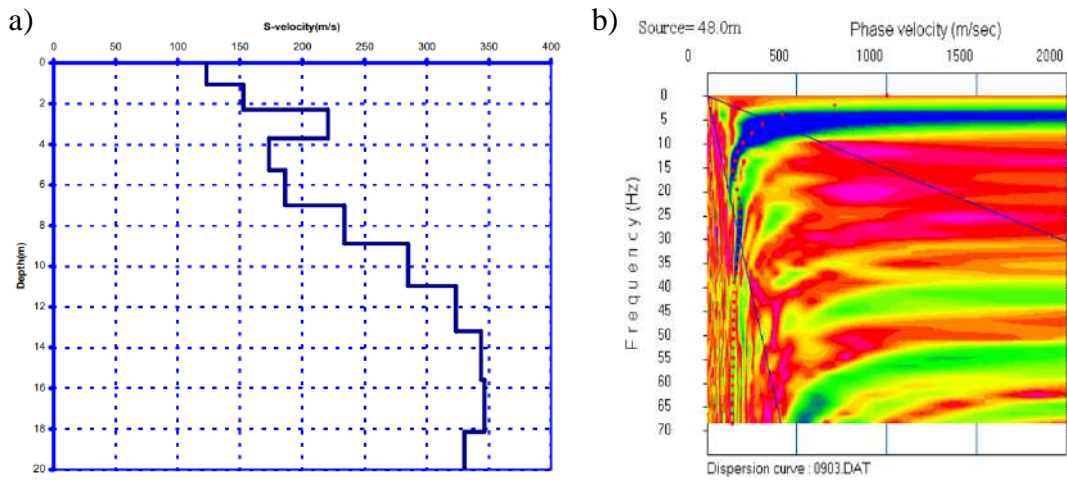
**Figura A1 N° 6** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-6



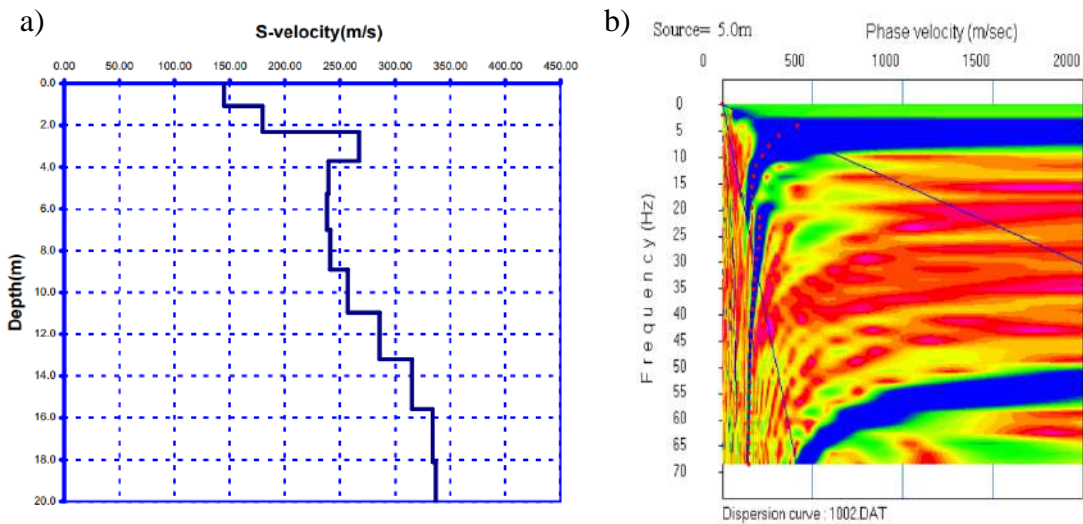
**Figura A1 N° 7** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-7



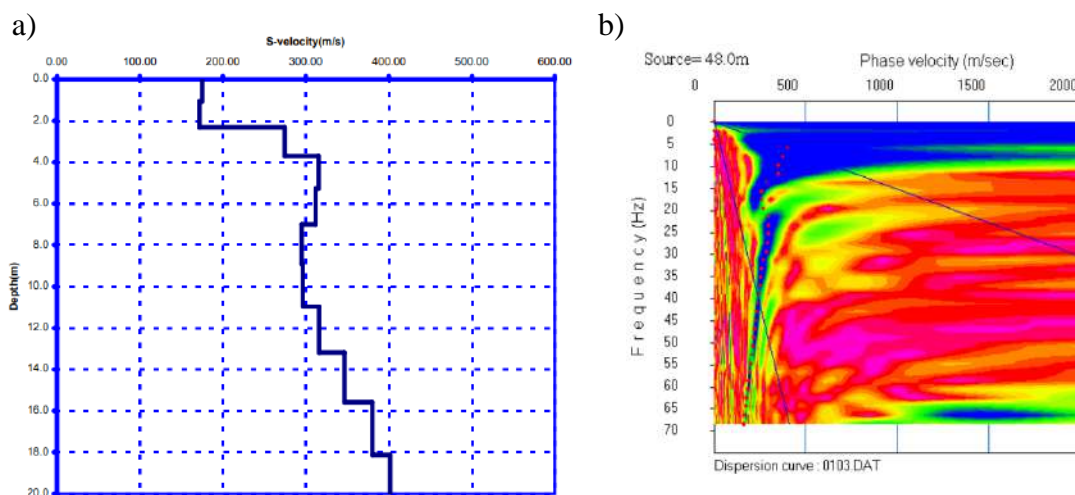
**Figura A1 N° 8** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-8



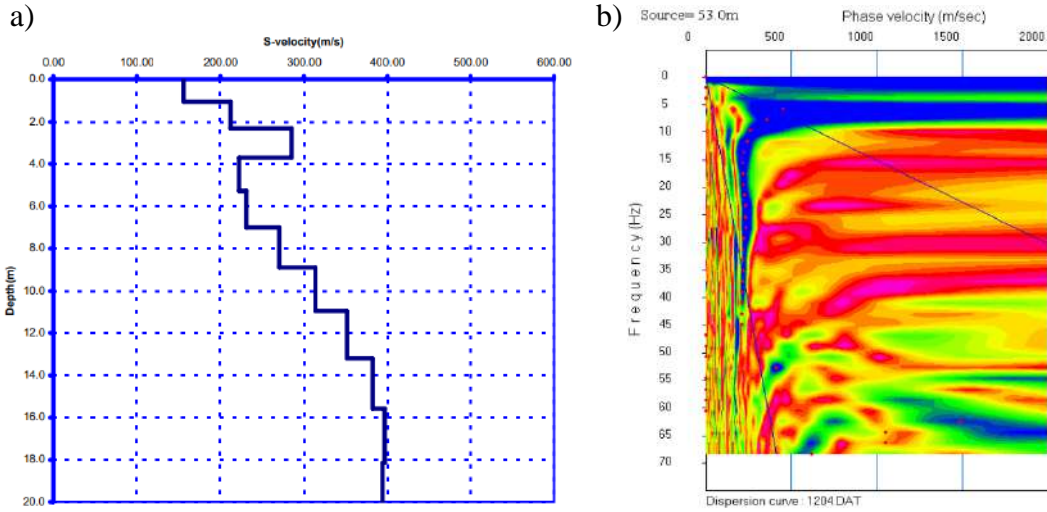
**Figura A1 N° 9** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-9



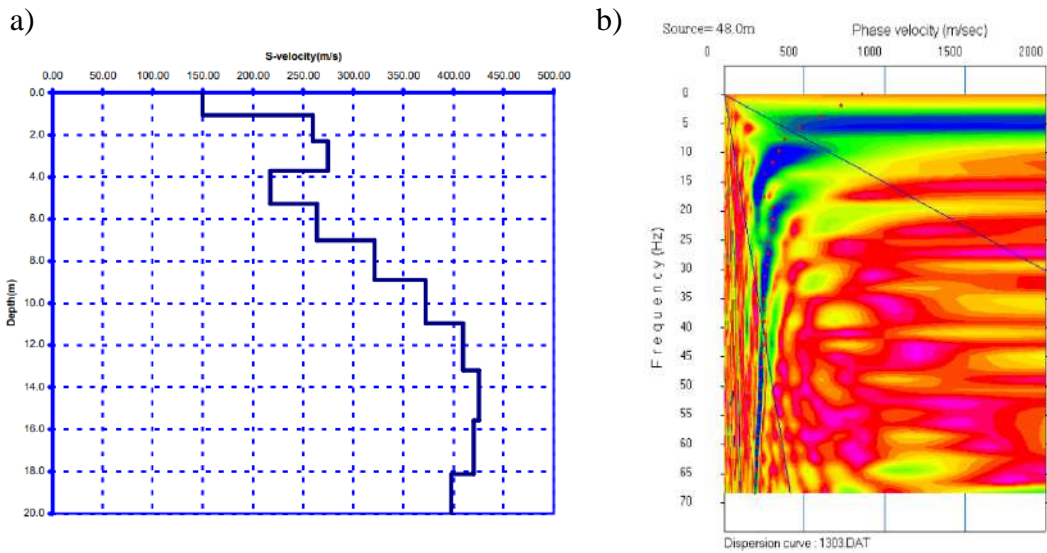
**Figura A1 N° 10** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-10



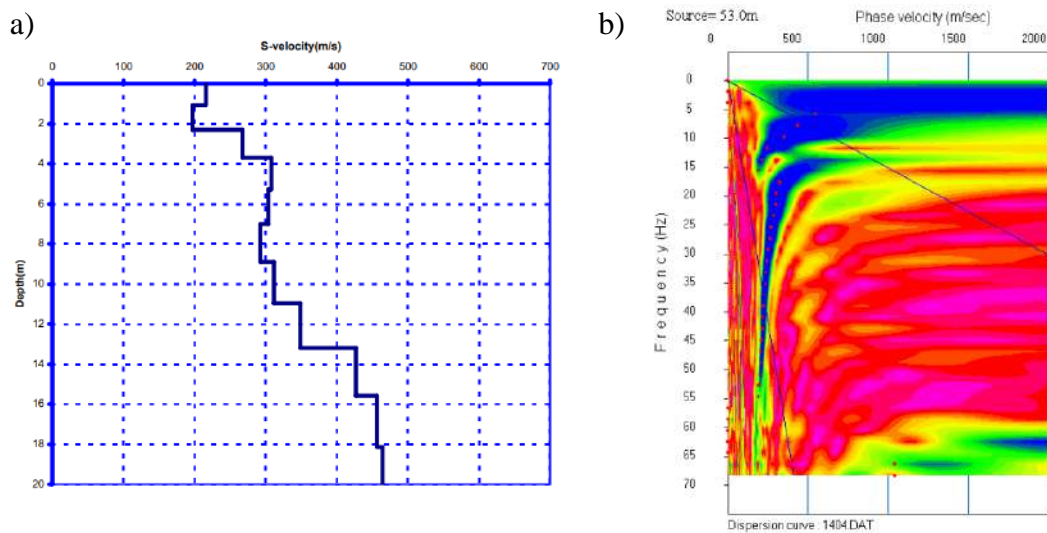
**Figura A1 N° 11** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-11



**Figura A1 N° 12** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-12

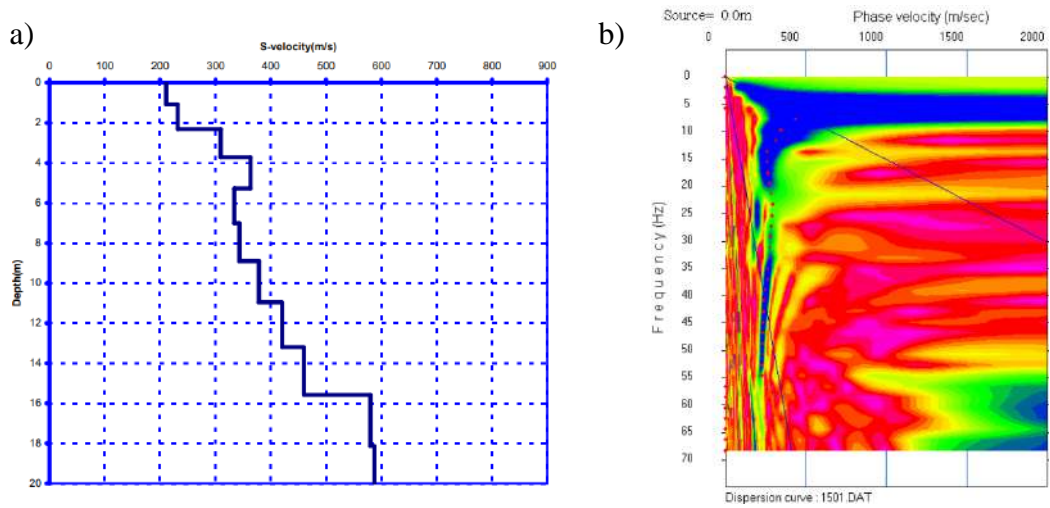


**Figura A1 N° 13** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-13

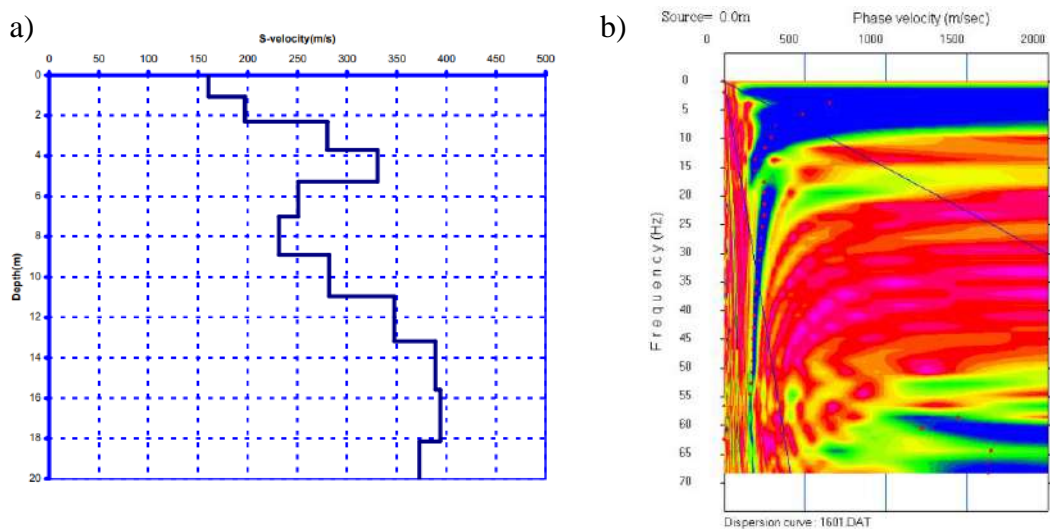


**Figura A1 N° 14** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-14

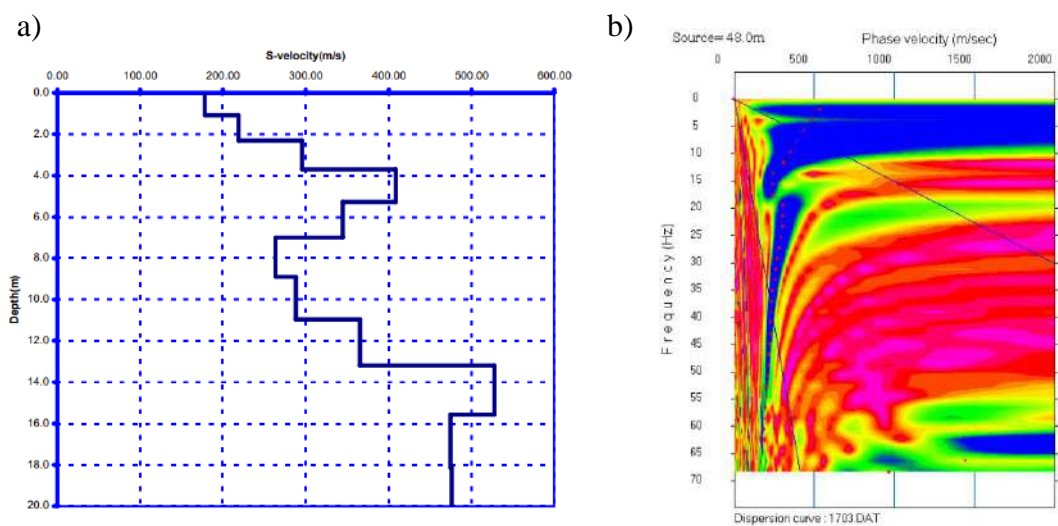




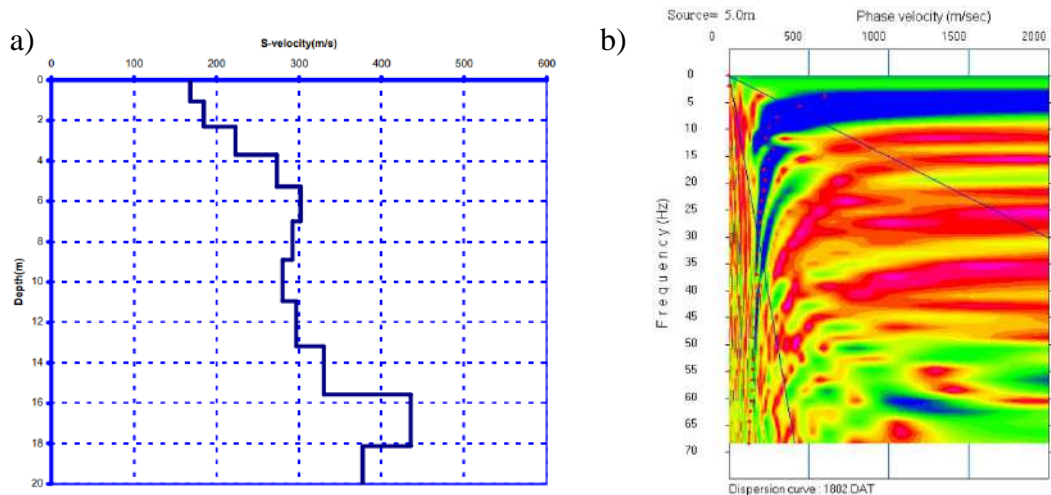
**Figura A1 N° 15** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-15



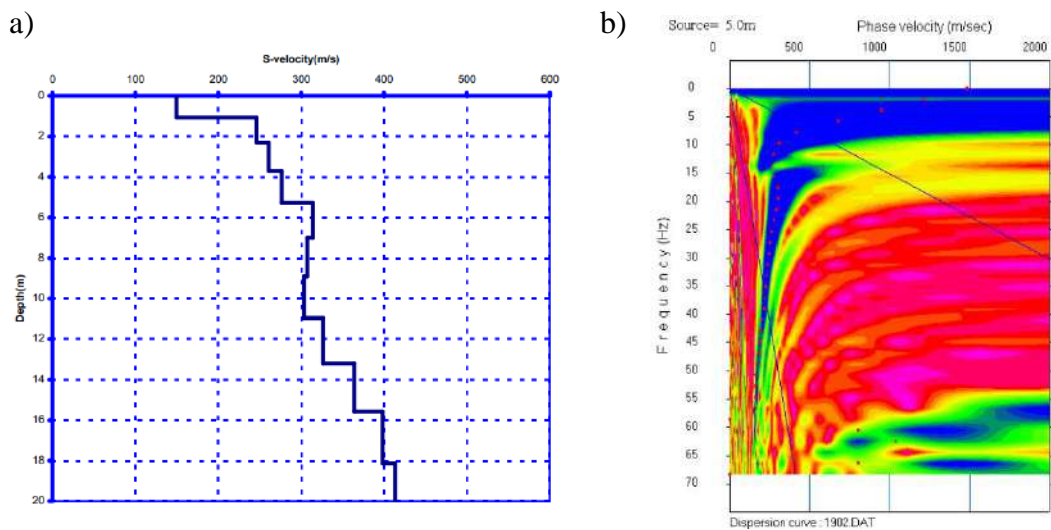
**Figura A1 N° 16** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-16



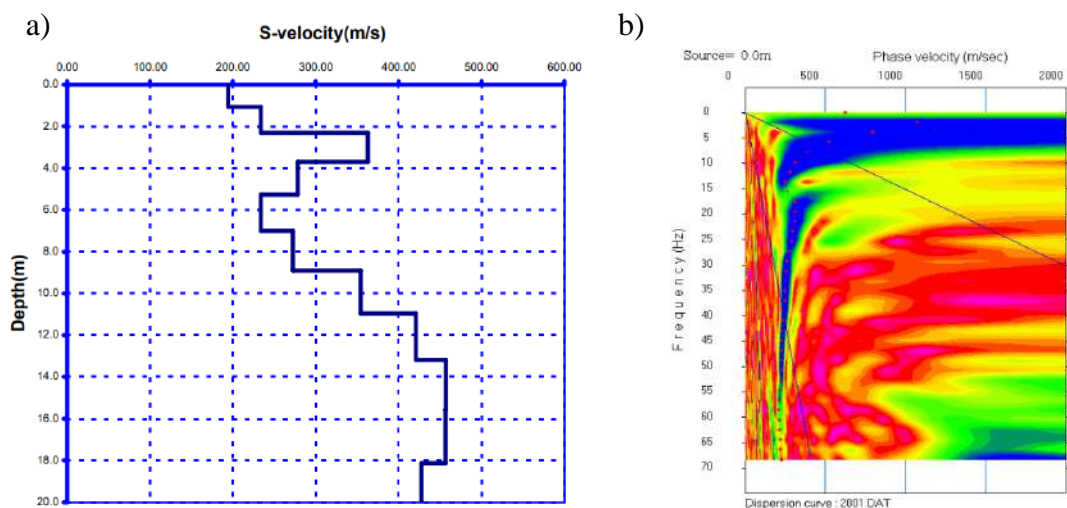
**Figura A1 N° 17** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-17



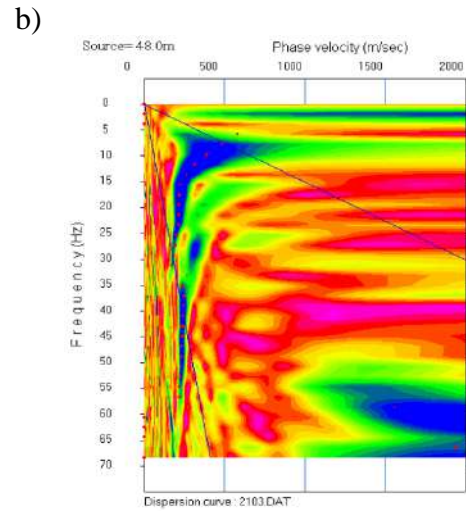
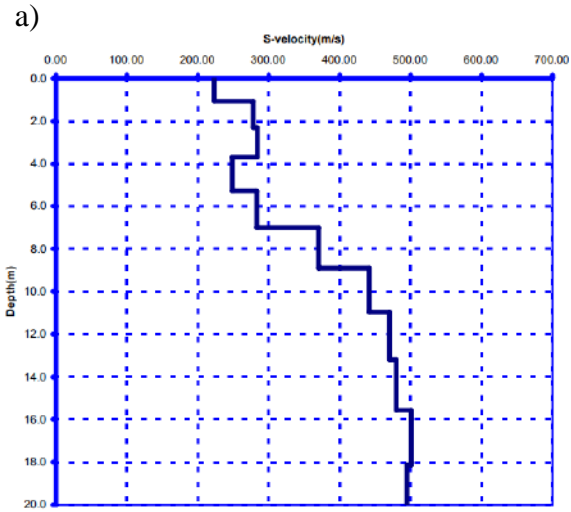
**Figura A1 N° 18** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-18



**Figura A1 N° 19** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-19



**Figura A1 N° 20** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-20



**Figura A1 N° 21** Registro de velocidad de ondas de corte y profundidad de sondaje (a), y curva de dispersión (b) para el ensayo de línea sísmica MASW-21

## ANEXO N° 02: ECUACIONES POTENCIALES DE CORRELACIÓN PARA ENSAYOS MASW.

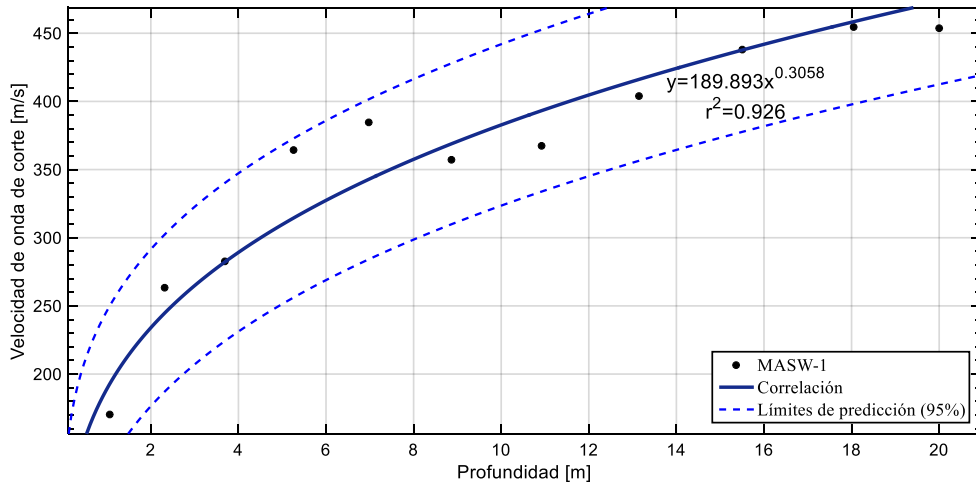


Figura A2 N° 1 Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-1

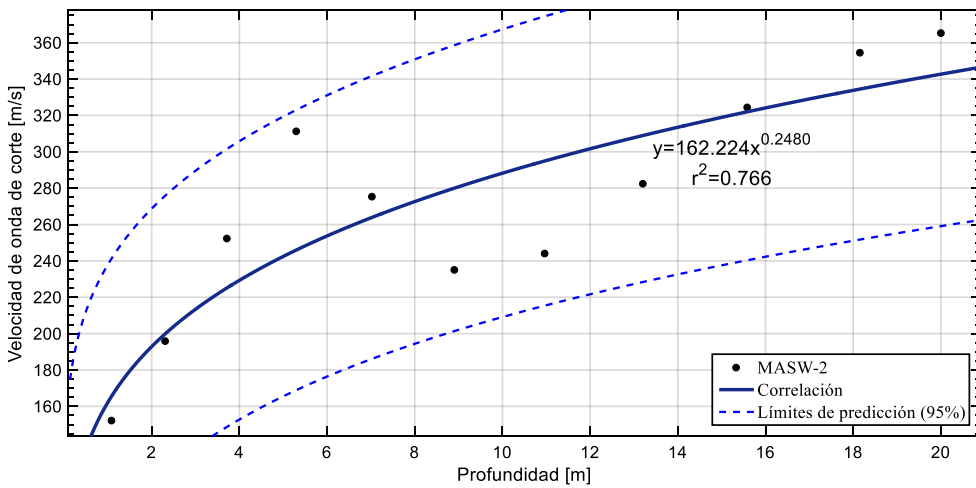


Figura A2 N° 2 Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-2

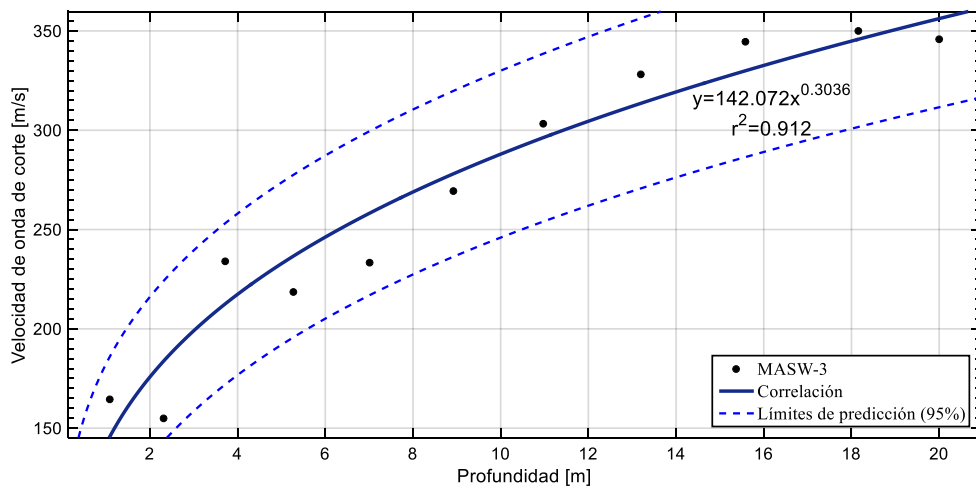
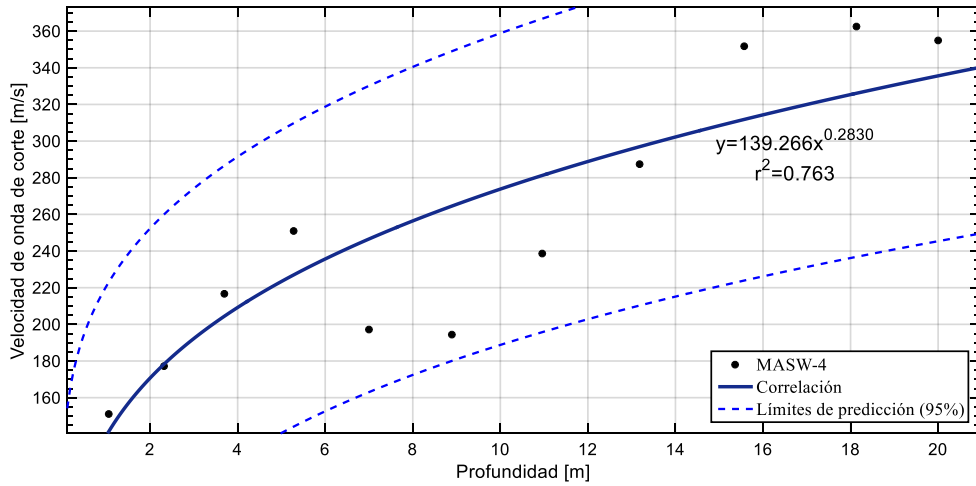
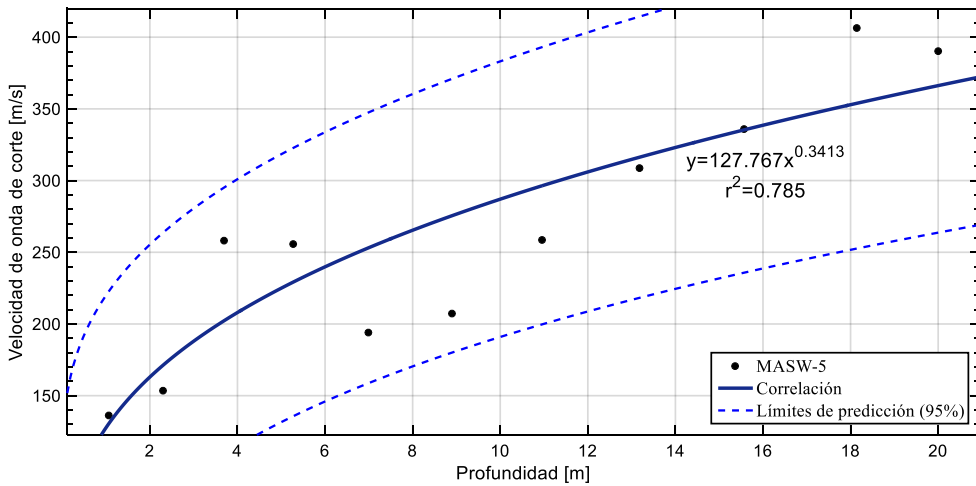


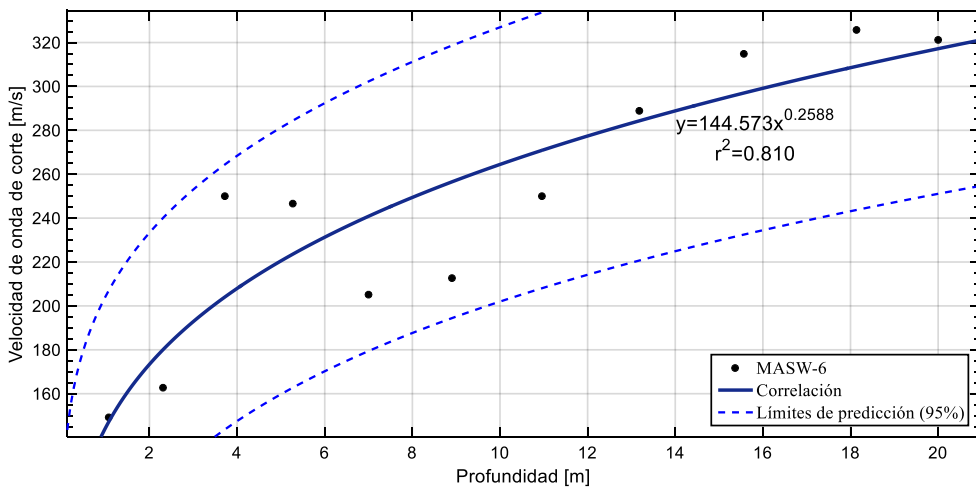
Figura A2 N° 3 Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-3



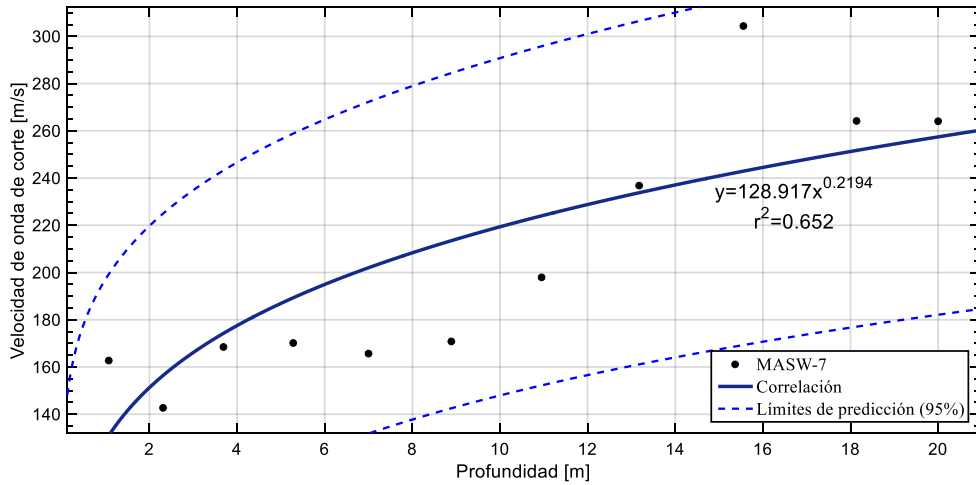
**Figura A2 N° 4** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-4



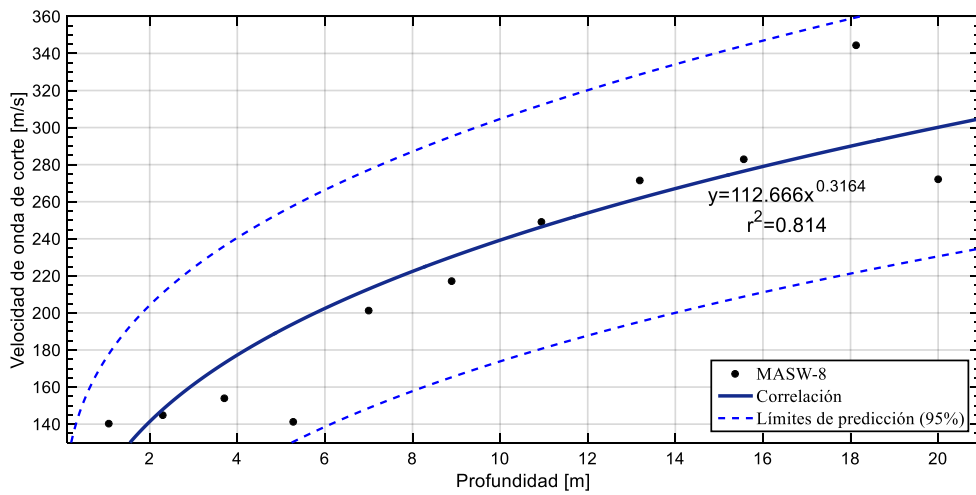
**Figura A2 N° 5** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-5



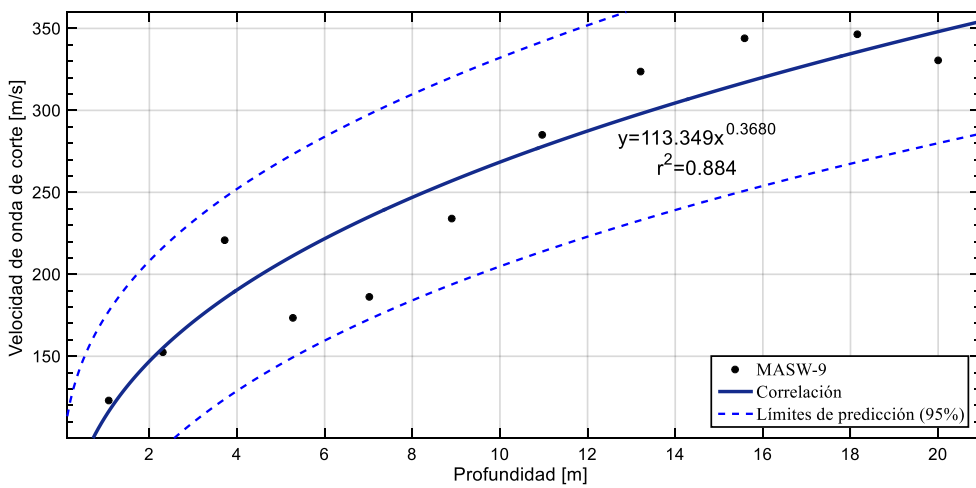
**Figura A2 N° 6** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-6



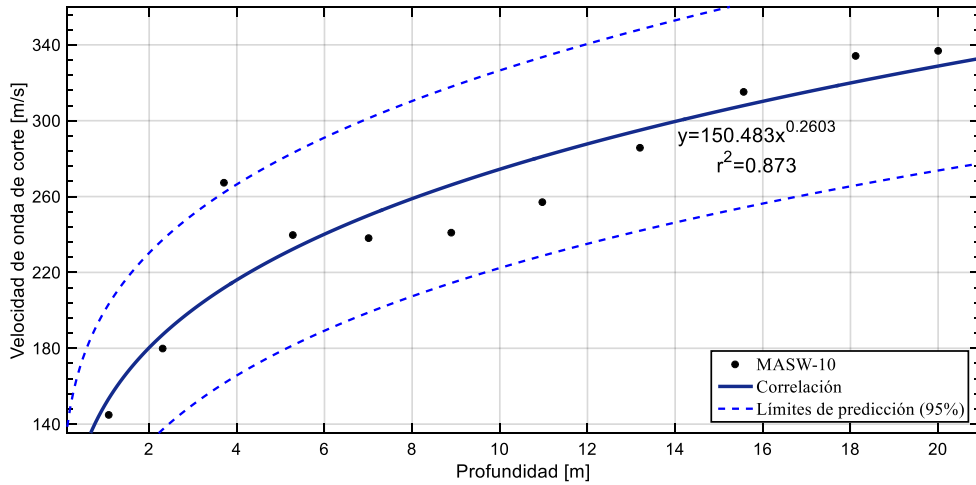
**Figura A2 N° 7** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-7



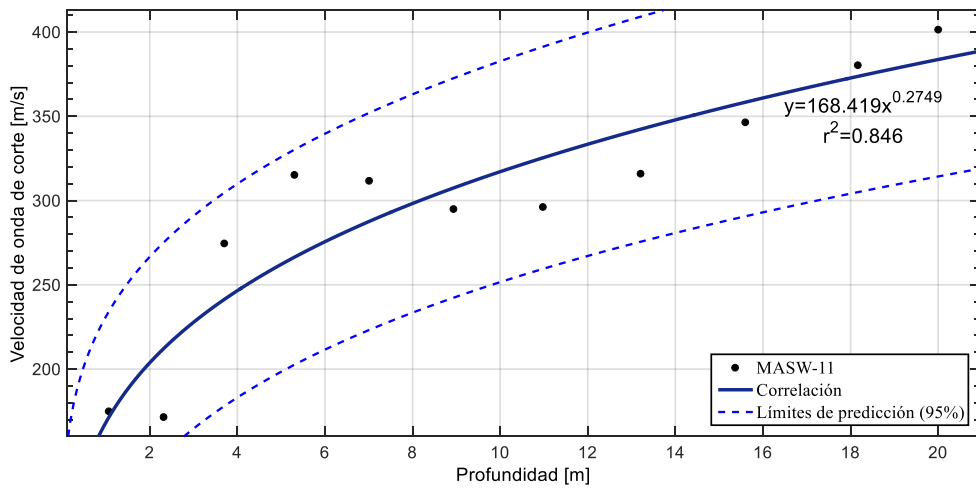
**Figura A2 N° 8** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-8



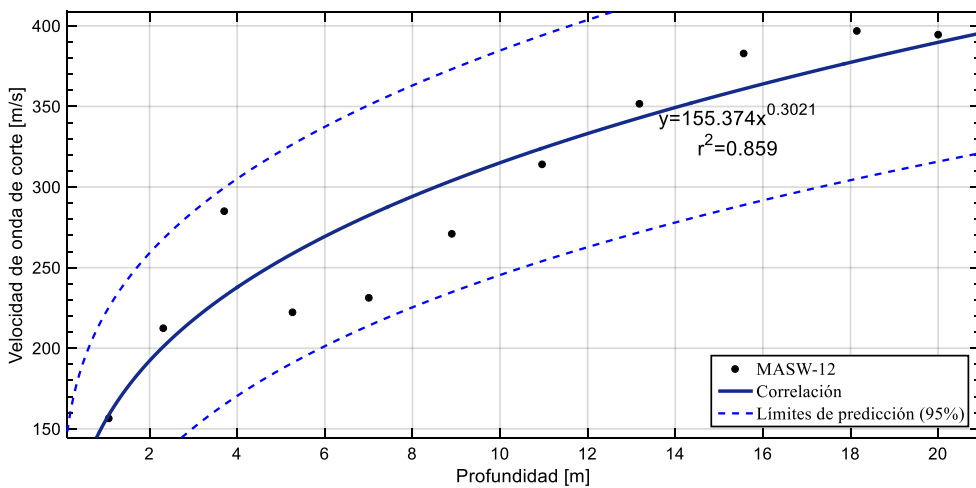
**Figura A2 N° 9** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-9



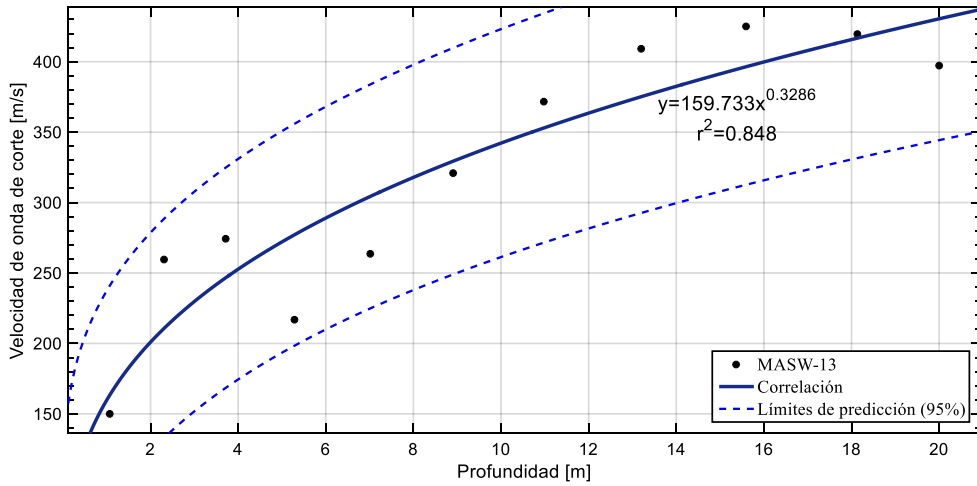
**Figura A2 N° 10** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-10



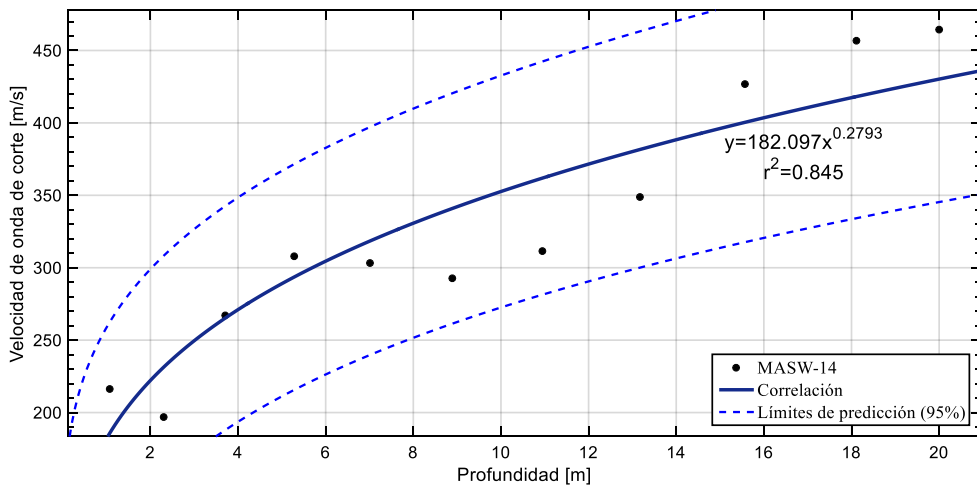
**Figura A2 N° 11** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-11



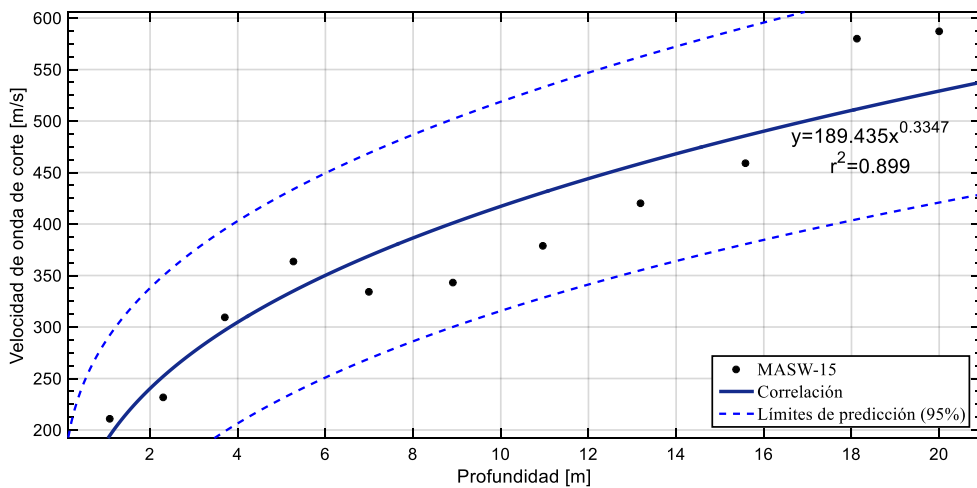
**Figura A2 N° 12** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-12



**Figura A2 N° 13** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-13

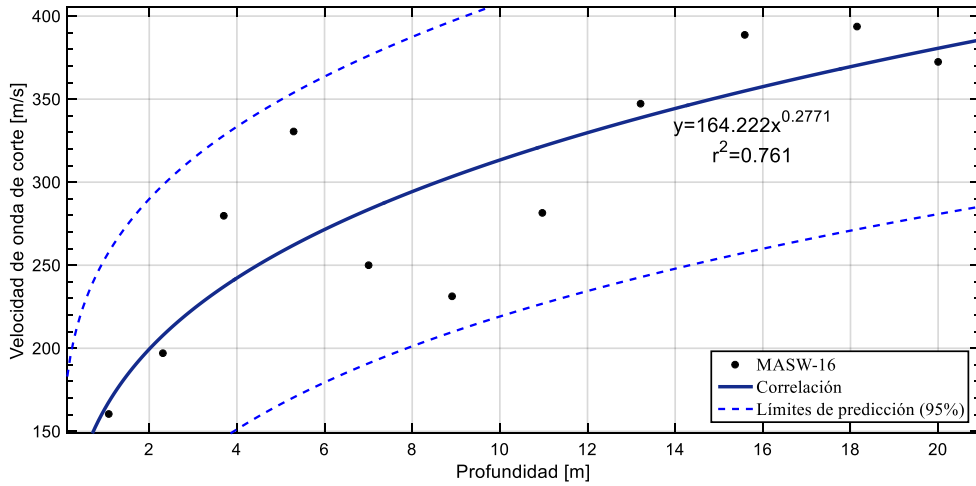


**Figura A2 N° 14** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-14

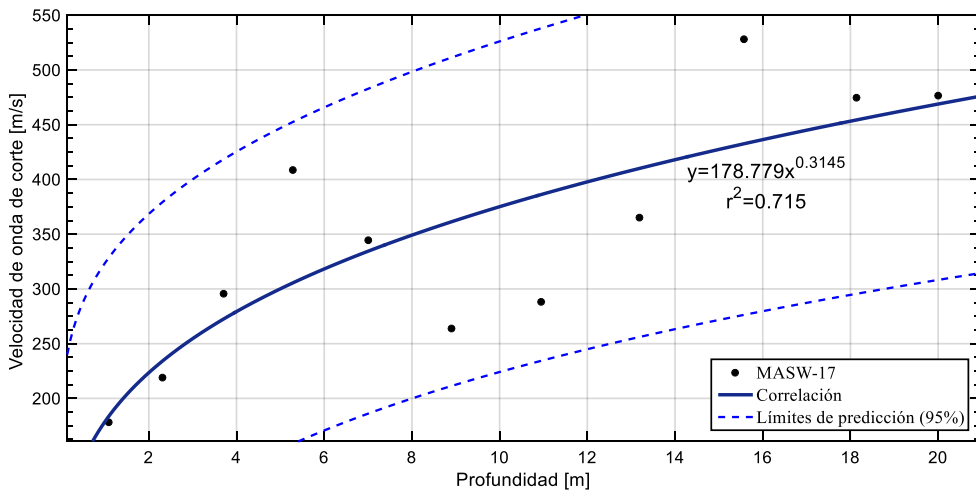


**Figura A2 N° 15** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-15

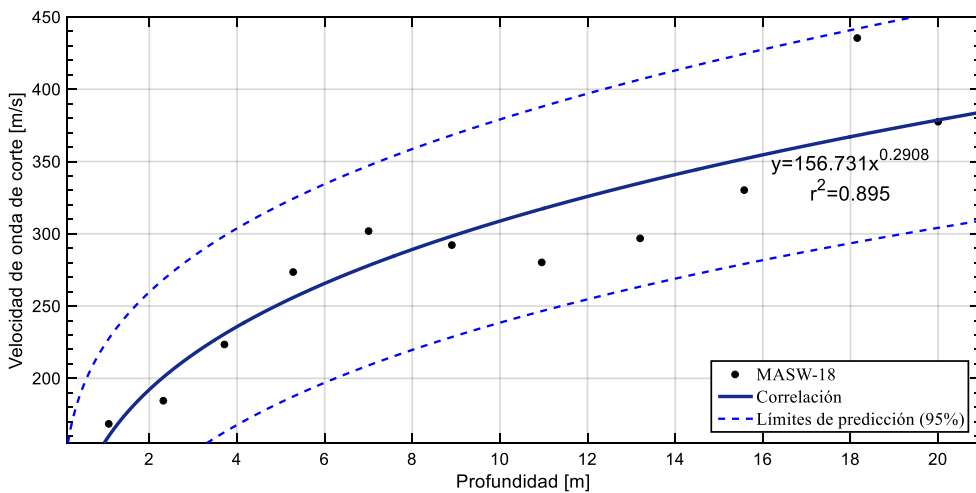




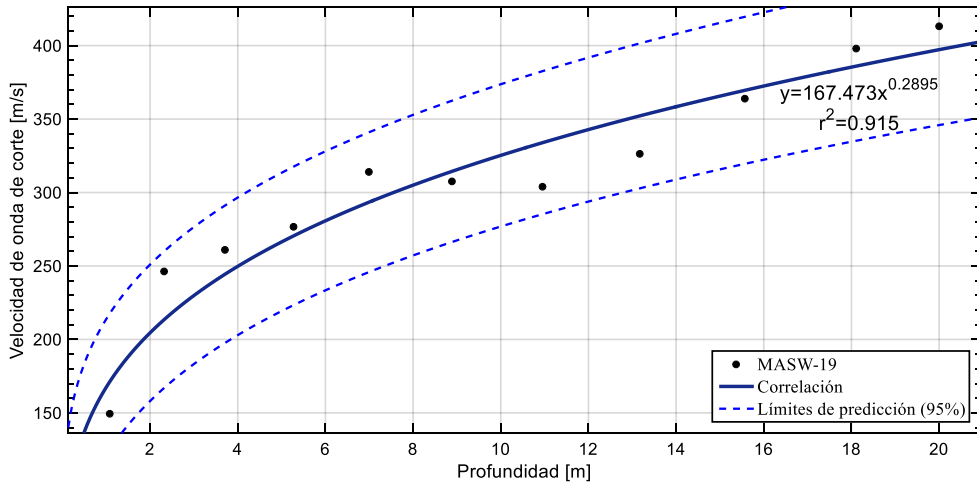
**Figura A2 N° 16** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-16



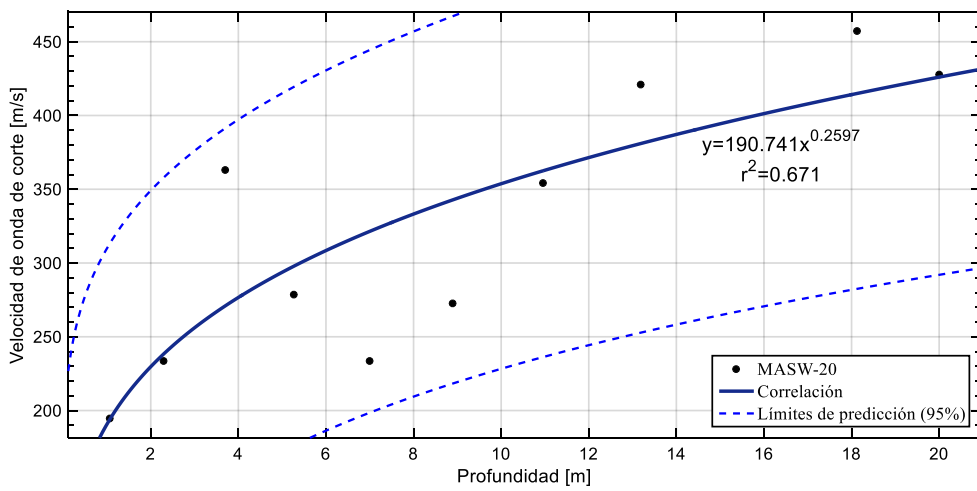
**Figura A2 N° 17** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-17



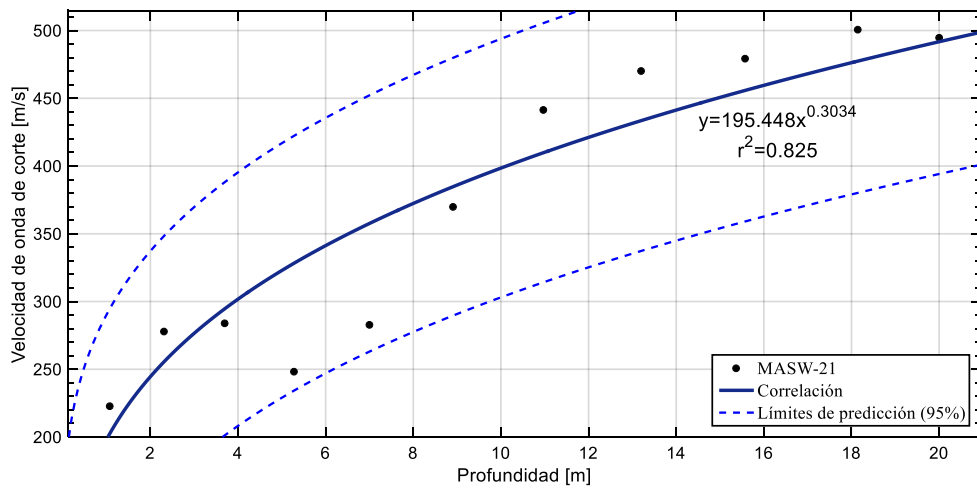
**Figura A2 N° 18** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-18



**Figura A2 N° 19** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-19



**Figura A2 N° 20** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-20



**Figura A2 N° 21** Ecuación potencial de correlación para ensayo MASW-21

## ANEXO N° 03: VELOCIDAD PROMEDIO DE ONDAS DE CORTE A PROFUNDIDAD DE 30 m.

**Tabla A3 N° 1** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-1

MASW-1					MASW-1				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.06	1.06	170.343	0.006231	0.00	1.06	1.06	170.343	0.006231
1.06	2.31	1.25	263.348	0.004759	1.06	2.31	1.25	263.348	0.004759
2.31	3.69	1.38	282.670	0.004866	2.31	3.69	1.38	282.670	0.004866
3.69	5.26	1.57	364.328	0.004305	3.69	5.26	1.57	364.328	0.004305
5.26	6.98	1.72	384.616	0.004463	5.26	6.98	1.72	384.616	0.004463
6.98	8.86	1.89	357.194	0.005286	6.98	8.86	1.89	357.194	0.005286
8.86	10.92	2.06	367.415	0.005602	8.86	10.92	2.06	367.415	0.005602
10.92	13.15	2.22	403.929	0.005505	10.92	13.15	2.22	403.929	0.005505
13.15	15.51	2.36	438.014	0.005388	13.15	15.51	2.36	438.014	0.005388
15.51	18.05	2.54	454.567	0.005594	15.51	18.05	2.54	454.567	0.005594
18.05	20.00	1.95	453.703	0.004302	18.05	20.00	1.95	453.703	0.004302
20.00	30.00	10.00	537.206	0.018615	20.00	30.00	10.00	541.702	0.018460
<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total 0.074917</b>		<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total 0.074762</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>400.446</b>		<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>401.273</b>	

**Tabla A3 N° 2** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-2

MASW-2					MASW-2				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.08	1.08	152.179	0.007111	0.00	1.08	1.08	152.179	0.007111
1.08	2.31	1.22	195.874	0.006248	1.08	2.31	1.22	195.874	0.006248
2.31	3.71	1.41	252.309	0.005579	2.31	3.71	1.41	252.309	0.005579
3.71	5.30	1.58	311.245	0.005083	3.71	5.30	1.58	311.245	0.005083
5.30	7.02	1.73	275.315	0.006269	5.30	7.02	1.73	275.315	0.006269
7.02	8.90	1.88	235.053	0.007999	7.02	8.90	1.88	235.053	0.007999
8.90	10.96	2.06	244.038	0.008443	8.90	10.96	2.06	244.038	0.008443
10.96	13.20	2.24	282.424	0.007929	10.96	13.20	2.24	282.424	0.007929
13.20	15.58	2.38	324.411	0.007337	13.20	15.58	2.38	324.411	0.007337
15.58	18.15	2.57	354.487	0.007249	15.58	18.15	2.57	354.487	0.007249
18.15	20.00	1.85	365.266	0.005060	18.15	20.00	1.85	365.266	0.005060
20.00	30.00	10.00	377.029	0.026523	20.00	30.00	10.00	438.472	0.022806
<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total 0.100832</b>		<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total 0.097115</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>297.526</b>		<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>308.913</b>	

**Tabla A3 N° 3** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-3

MASW-3					MASW-3				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.08	1.08	164.488	0.006594	0.00	1.08	1.08	164.488	0.006594
1.08	2.31	1.23	154.908	0.007925	1.08	2.31	1.23	154.908	0.007925
2.31	3.72	1.41	233.989	0.006006	2.31	3.72	1.41	233.989	0.006006
3.72	5.27	1.55	218.556	0.007112	3.72	5.27	1.55	218.556	0.007112
5.27	7.01	1.74	233.327	0.007455	5.27	7.01	1.74	233.327	0.007455
7.01	8.92	1.91	269.370	0.007090	7.01	8.92	1.91	269.370	0.007090
8.92	10.97	2.05	303.277	0.006757	8.92	10.97	2.05	303.277	0.006757
10.97	13.20	2.23	328.129	0.006783	10.97	13.20	2.23	328.129	0.006783
13.20	15.58	2.39	344.565	0.006923	13.20	15.58	2.39	344.565	0.006923
15.58	18.16	2.58	350.000	0.007358	15.58	18.16	2.58	350.000	0.007358
18.16	20.00	1.84	345.806	0.005330	18.16	20.00	1.84	345.806	0.005330
20.00	30.00	10.00	398.932	0.025067	20.00	30.00	10.00	415.462	0.024070
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.100399</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.099402</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>298.807</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>301.806</b>		

**Tabla A3 N° 4** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-4

MASW-4					MASW-4				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.06	1.06	151.086	0.006988	0.00	1.06	1.06	151.086	0.006988
1.06	2.32	1.26	177.196	0.007127	1.06	2.32	1.26	177.196	0.007127
2.32	3.70	1.38	216.676	0.006358	2.32	3.70	1.38	216.676	0.006358
3.70	5.28	1.58	250.948	0.006307	3.70	5.28	1.58	250.948	0.006307
5.28	7.00	1.72	197.170	0.008726	5.28	7.00	1.72	197.170	0.008726
7.00	8.89	1.89	194.403	0.009741	7.00	8.89	1.89	194.403	0.009741
8.89	10.96	2.06	238.634	0.008649	8.89	10.96	2.06	238.634	0.008649
10.96	13.18	2.22	287.403	0.007739	10.96	13.18	2.22	287.403	0.007739
13.18	15.57	2.39	351.734	0.006792	13.18	15.57	2.39	351.734	0.006792
15.57	18.13	2.56	362.488	0.007073	15.57	18.13	2.56	362.488	0.007073
18.13	20.00	1.87	354.906	0.005256	18.13	20.00	1.87	354.906	0.005256
20.00	30.00	10.00	364.682	0.027421	20.00	30.00	10.00	426.236	0.023461
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.108178</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.104218</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>277.320</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>287.857</b>		

**Tabla A3 N° 5** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-5

MASW-5					MASW-5				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.06	1.06	136.207	0.007788	0.00	1.06	1.06	136.207	0.007788
1.06	2.30	1.24	153.484	0.008072	1.06	2.30	1.24	153.484	0.008072
2.30	3.69	1.39	258.118	0.005399	2.30	3.69	1.39	258.118	0.005399
3.69	5.27	1.58	255.726	0.006173	3.69	5.27	1.58	255.726	0.006173
5.27	6.99	1.72	194.017	0.008850	5.27	6.99	1.72	194.017	0.008850
6.99	8.90	1.91	207.263	0.009211	6.99	8.90	1.91	207.263	0.009211
8.90	10.95	2.06	258.588	0.007953	8.90	10.95	2.06	258.588	0.007953
10.95	13.18	2.23	308.692	0.007210	10.95	13.18	2.23	308.692	0.007210
13.18	15.57	2.39	335.911	0.007106	13.18	15.57	2.39	335.911	0.007106
15.57	18.14	2.57	406.385	0.006335	15.57	18.14	2.57	406.385	0.006335
18.14	20.00	1.86	390.249	0.004762	18.14	20.00	1.86	390.249	0.004762
20.00	30.00	10.00	407.942	0.024513	20.00	30.00	10.00	467.855	0.021374
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.103372</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.100233</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>290.215</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>299.304</b>		

**Tabla A3 N° 6** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-6

MASW-6					MASW-6				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	149.202	0.007172	0.00	1.07	1.07	149.202	0.007172
1.07	2.31	1.24	162.727	0.007610	1.07	2.31	1.24	162.727	0.007610
2.31	3.72	1.41	250.000	0.005645	2.31	3.72	1.41	250.000	0.005645
3.72	5.27	1.55	246.610	0.006288	3.72	5.27	1.55	246.610	0.006288
5.27	7.00	1.73	205.132	0.008428	5.27	7.00	1.73	205.132	0.008428
7.00	8.90	1.90	212.658	0.008955	7.00	8.90	1.90	212.658	0.008955
8.90	10.96	2.05	250.000	0.008212	8.90	10.96	2.05	250.000	0.008212
10.96	13.18	2.22	288.883	0.007695	10.96	13.18	2.22	288.883	0.007695
13.18	15.57	2.39	314.858	0.007578	13.18	15.57	2.39	314.858	0.007578
15.57	18.14	2.57	325.750	0.007893	15.57	18.14	2.57	325.750	0.007893
18.14	20.00	1.86	321.208	0.005801	18.14	20.00	1.86	321.208	0.005801
20.00	30.00	10.00	348.628	0.028684	20.00	30.00	10.00	386.219	0.025892
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.109961</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.107169</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>272.824</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>279.931</b>		

**Tabla A3 N° 7** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-7

MASW-7					MASW-7				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	162.740	0.006575	0.000	1.070	1.070	162.74	0.006575
1.07	2.31	1.24	142.699	0.008687	1.070	2.310	1.240	142.699	0.008687
2.31	3.69	1.38	168.467	0.008181	2.310	3.688	1.378	168.467	0.008181
3.69	5.28	1.59	170.150	0.009358	3.688	5.280	1.592	170.150	0.009358
5.28	7.00	1.72	165.671	0.010374	5.280	6.999	1.719	165.671	0.010374
7.00	8.89	1.89	170.818	0.011067	6.999	8.890	1.891	170.818	0.011067
8.89	10.95	2.06	197.945	0.010408	8.890	10.950	2.060	197.945	0.010408
10.95	13.18	2.23	236.793	0.009399	10.950	13.175	2.226	236.793	0.009399
13.18	15.56	2.38	304.359	0.007818	13.175	15.555	2.380	304.359	0.007818
15.56	18.14	2.58	264.164	0.009777	15.555	18.138	2.583	264.164	0.009777
18.14	20.00	1.86	264.041	0.007053	18.138	20.000	1.862	264.041	0.007053
20.00	30.00	10.00	271.885	0.036780	20.000	30.000	10.000	317.571	0.031489
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.135479</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.130188</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>221.436</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>230.436</b>		

**Tabla A3 N° 8** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-8

MASW-8					MASW-8				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	140.265	0.007598	0.00	1.07	1.07	140.265	0.007598
1.07	2.30	1.23	144.829	0.008511	1.07	2.30	1.23	144.829	0.008511
2.30	3.70	1.41	153.938	0.009132	2.30	3.70	1.41	153.938	0.009132
3.70	5.28	1.57	141.236	0.011134	3.70	5.28	1.57	141.236	0.011134
5.28	7.00	1.72	201.261	0.008559	5.28	7.00	1.72	201.261	0.008559
7.00	8.89	1.89	217.149	0.008723	7.00	8.89	1.89	217.149	0.008723
8.89	10.94	2.05	249.104	0.008227	8.89	10.94	2.05	249.104	0.008227
10.94	13.19	2.25	271.466	0.008272	10.94	13.19	2.25	271.466	0.008272
13.19	15.56	2.37	282.890	0.008392	13.19	15.56	2.37	282.890	0.008392
15.56	18.13	2.56	344.407	0.007445	15.56	18.13	2.56	344.407	0.007445
18.13	20.00	1.87	272.100	0.006885	18.13	20.00	1.87	272.100	0.006885
20.00	30.00	10.00	330.489	0.030258	20.00	30.00	10.00	327.307	0.030552
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.123136</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.123431</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>243.632</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>243.052</b>		

**Tabla A3 N° 9** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-9

MASW-9					MASW-9				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	123.015	0.008719	0.00	1.07	1.07	123.015	0.008719
1.07	2.31	1.23	152.451	0.008098	1.07	2.31	1.23	152.451	0.008098
2.31	3.72	1.41	220.795	0.006394	2.31	3.72	1.41	220.795	0.006394
3.72	5.28	1.56	173.427	0.008977	3.72	5.28	1.56	173.427	0.008977
5.28	7.02	1.74	186.228	0.009363	5.28	7.02	1.74	186.228	0.009363
7.02	8.90	1.88	234.001	0.008038	7.02	8.90	1.88	234.001	0.008038
8.90	10.96	2.06	285.068	0.007242	8.90	10.96	2.06	285.068	0.007242
10.96	13.21	2.25	323.681	0.006938	10.96	13.21	2.25	323.681	0.006938
13.21	15.58	2.37	343.966	0.006897	13.21	15.58	2.37	343.966	0.006897
15.58	18.16	2.57	346.417	0.007427	15.58	18.16	2.57	346.417	0.007427
18.16	20.00	1.84	330.509	0.005580	18.16	20.00	1.84	330.509	0.005580
20.00	30.00	10.00	396.231	0.025238	20.00	30.00	10.00	397.297	0.025170
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.108911</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.108843</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>275.454</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>275.625</b>		

**Tabla A3 N° 10** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-10

MASW-10					MASW-10				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.08	1.08	144.862	0.007436	0.00	1.08	1.08	144.862	0.007436
1.08	2.31	1.23	179.865	0.006843	1.08	2.31	1.23	179.865	0.006843
2.31	3.71	1.40	267.295	0.005230	2.31	3.71	1.40	267.295	0.005230
3.71	5.28	1.57	239.713	0.006557	3.71	5.28	1.57	239.713	0.006557
5.28	7.01	1.73	238.079	0.007261	5.28	7.01	1.73	238.079	0.007261
7.01	8.89	1.89	240.961	0.007826	7.01	8.89	1.89	240.961	0.007826
8.89	10.97	2.08	257.045	0.008083	8.89	10.97	2.08	257.045	0.008083
10.97	13.20	2.23	285.730	0.007796	10.97	13.20	2.23	285.730	0.007796
13.20	15.56	2.37	315.190	0.007506	13.20	15.56	2.37	315.190	0.007506
15.56	18.12	2.56	334.154	0.007647	15.56	18.12	2.56	334.154	0.007647
18.12	20.00	1.88	336.833	0.005586	18.12	20.00	1.88	336.833	0.005586
20.00	30.00	10.00	364.700	0.027420	20.00	30.00	10.00	404.815	0.024703
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.105190</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.102473</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>285.197</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>292.760</b>		

**Tabla A3 N° 11** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-11

MASW-11					MASW-11				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.06	1.06	174.949	0.006080	0.00	1.06	1.06	174.949	0.006080
1.06	2.31	1.25	171.544	0.007294	1.06	2.31	1.25	171.544	0.007294
2.31	3.70	1.39	274.560	0.005045	2.31	3.70	1.39	274.56	0.005045
3.70	5.30	1.60	315.250	0.005080	3.70	5.30	1.60	315.250	0.005080
5.30	7.01	1.71	311.724	0.005471	5.30	7.01	1.71	311.724	0.005471
7.01	8.93	1.93	294.973	0.006532	7.01	8.93	1.93	294.973	0.006532
8.93	10.97	2.04	296.191	0.006890	8.93	10.97	2.04	296.191	0.006890
10.97	13.21	2.23	315.951	0.007061	10.97	13.21	2.23	315.951	0.007061
13.21	15.60	2.39	346.442	0.006900	13.21	15.60	2.39	346.442	0.006900
15.60	18.17	2.57	380.317	0.006757	15.60	18.17	2.57	380.317	0.006757
18.17	20.00	1.83	401.438	0.004570	18.17	20.00	1.83	401.438	0.004570
20.00	30.00	10.00	428.959	0.023312	20.00	30.00	10.00	480.958	0.020792
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.090991</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.088471</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>329.702</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>339.094</b>		

**Tabla A3 N° 12** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-12

MASW-12					MASW-12				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	156.496	0.006826	0.00	1.07	1.07	156.496	0.006826
1.07	2.31	1.24	212.423	0.005857	1.07	2.31	1.24	212.423	0.005857
2.31	3.70	1.39	285.027	0.004881	2.31	3.70	1.39	285.027	0.004881
3.70	5.26	1.56	222.297	0.007011	3.70	5.26	1.56	222.297	0.007011
5.26	7.00	1.74	231.293	0.007533	5.26	7.00	1.74	231.293	0.007533
7.00	8.90	1.89	270.991	0.006991	7.00	8.90	1.89	270.991	0.006991
8.90	10.96	2.06	314.084	0.006559	8.90	10.96	2.06	314.084	0.006559
10.96	13.18	2.22	351.667	0.006317	10.96	13.18	2.22	351.667	0.006317
13.18	15.56	2.38	382.876	0.006217	13.18	15.56	2.38	382.876	0.006217
15.56	18.14	2.58	396.857	0.006508	15.56	18.14	2.58	396.857	0.006508
18.14	20.00	1.86	394.540	0.004705	18.14	20.00	1.86	394.540	0.004705
20.00	30.00	10.00	434.145	0.023034	20.00	30.00	10.00	472.884	0.021147
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.092439</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.090552</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>324.539</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>331.302</b>		



**Tabla A3 N° 13** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-13

MASW-13					MASW-13				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	150.000	0.007127	0.00	1.07	1.07	150.000	0.007127
1.07	2.31	1.24	259.574	0.004773	1.07	2.31	1.24	259.574	0.004773
2.31	3.72	1.41	274.321	0.005130	2.31	3.72	1.41	274.321	0.005130
3.72	5.29	1.57	216.861	0.007239	3.72	5.29	1.57	216.861	0.007239
5.29	7.02	1.73	263.634	0.006562	5.29	7.02	1.73	263.634	0.006562
7.02	8.91	1.89	320.910	0.005893	7.02	8.91	1.89	320.910	0.005893
8.91	10.98	2.07	371.667	0.005570	8.91	10.98	2.07	371.667	0.005570
10.98	13.20	2.22	409.186	0.005431	10.98	13.20	2.22	409.186	0.005431
13.20	15.59	2.39	425.056	0.005630	13.20	15.59	2.39	425.056	0.005630
15.59	18.13	2.54	419.599	0.006055	15.59	18.13	2.54	419.599	0.006055
18.13	20.00	1.87	397.234	0.004700	18.13	20.00	1.87	397.234	0.004700
20.00	30.00	10.00	488.438	0.020473	20.00	30.00	10.00	476.038	0.021007
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.084585</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.085118</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>354.673</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>352.451</b>		

**Tabla A3 N° 14** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-14

MASW-14					MASW-14				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	216.281	0.004955	0.00	1.07	1.07	216.281	0.004955
1.07	2.30	1.23	196.900	0.006254	1.07	2.30	1.23	196.900	0.006254
2.30	3.71	1.40	267.094	0.005258	2.30	3.71	1.40	267.094	0.005258
3.71	5.28	1.57	307.914	0.005111	3.71	5.28	1.57	307.914	0.005111
5.28	7.01	1.73	303.250	0.005704	5.28	7.01	1.73	303.250	0.005704
7.01	8.89	1.88	292.717	0.006417	7.01	8.89	1.88	292.717	0.006417
8.89	10.95	2.06	311.494	0.006600	8.89	10.95	2.06	311.494	0.006600
10.95	13.17	2.23	348.836	0.006382	10.95	13.17	2.23	348.836	0.006382
13.17	15.57	2.40	426.799	0.005615	13.17	15.57	2.40	426.799	0.005615
15.57	18.11	2.54	456.755	0.005570	15.57	18.11	2.54	456.755	0.005570
18.11	20.00	1.89	464.411	0.004065	18.11	20.00	1.89	464.411	0.004065
20.00	30.00	10.00	470.796	0.021241	20.00	30.00	10.00	554.057	0.018049
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.083172</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.079980</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>360.698</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>375.093</b>		

**Tabla A3 N° 15** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-15

MASW-15					MASW-15				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.08	1.08	210.888	0.005125	0.00	1.08	1.08	210.888	0.005125
1.08	2.30	1.22	231.676	0.005261	1.08	2.30	1.22	231.676	0.005261
2.30	3.71	1.41	309.371	0.004545	2.30	3.71	1.41	309.371	0.004545
3.71	5.27	1.56	363.596	0.004304	3.71	5.27	1.56	363.596	0.004304
5.27	6.99	1.72	334.161	0.005151	5.27	6.99	1.72	334.161	0.005151
6.99	8.91	1.92	343.142	0.005583	6.99	8.91	1.92	343.142	0.005583
8.91	10.96	2.05	378.820	0.005418	8.91	10.96	2.05	378.820	0.005418
10.96	13.19	2.23	420.128	0.005302	10.96	13.19	2.23	420.128	0.005302
13.19	15.58	2.39	459.019	0.005216	13.19	15.58	2.39	459.019	0.005216
15.58	18.12	2.54	579.969	0.004385	15.58	18.12	2.54	579.969	0.004385
18.12	20.00	1.88	587.094	0.003195	18.12	20.00	1.88	587.094	0.003195
20.00	30.00	10.00	591.271	0.016913	20.00	30.00	10.00	693.506	0.014419
<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.070396</b>	<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.067902</b>
<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>426.163</b>		<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>441.811</b>	

**Tabla A3 N° 16** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-16

MASW-16					MASW-16				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.08	1.08	160.433	0.006706	0.00	1.08	1.08	160.433	0.006706
1.08	2.31	1.24	197.045	0.006268	1.08	2.31	1.24	197.045	0.006268
2.31	3.70	1.39	279.768	0.004968	2.31	3.70	1.39	279.768	0.004968
3.70	5.29	1.59	330.513	0.004821	3.70	5.29	1.59	330.513	0.004821
5.29	7.01	1.71	250.000	0.006843	5.29	7.01	1.71	250.000	0.006843
7.01	8.91	1.90	231.296	0.008234	7.01	8.91	1.90	231.296	0.008234
8.91	10.97	2.06	281.512	0.007316	8.91	10.97	2.06	281.512	0.007316
10.97	13.21	2.24	347.252	0.006456	10.97	13.21	2.24	347.252	0.006456
13.21	15.59	2.38	388.686	0.006116	13.21	15.59	2.38	388.686	0.006116
15.59	18.15	2.56	393.692	0.006505	15.59	18.15	2.56	393.692	0.006505
18.15	20.00	1.85	372.428	0.004970	18.15	20.00	1.85	372.428	0.004970
20.00	30.00	10.00	421.491	0.023725	20.00	30.00	10.00	446.914	0.022376
<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.092929</b>	<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.091579</b>
<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>322.828</b>		<b>Vs promedio (m/s)</b>			<b>327.586</b>	

**Tabla A3 N° 17** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-17

MASW-17					MASW-17				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.09	1.09	178.182	0.006094	0.00	1.09	1.09	178.182	0.006094
1.09	2.31	1.23	218.992	0.005597	1.09	2.31	1.23	218.992	0.005597
2.31	3.71	1.39	295.625	0.004715	2.31	3.71	1.39	295.625	0.004715
3.71	5.28	1.58	408.603	0.003864	3.71	5.28	1.58	408.603	0.003864
5.28	7.00	1.72	344.470	0.004994	5.28	7.00	1.72	344.470	0.004994
7.00	8.90	1.90	263.836	0.007194	7.00	8.90	1.90	263.836	0.007194
8.90	10.95	2.04	288.175	0.007093	8.90	10.95	2.04	288.175	0.007093
10.95	13.19	2.24	365.132	0.006140	10.95	13.19	2.24	365.132	0.006140
13.19	15.57	2.38	528.069	0.004513	13.19	15.57	2.38	528.069	0.004513
15.57	18.14	2.57	474.674	0.005407	15.57	18.14	2.57	474.674	0.005407
18.14	20.00	1.86	476.571	0.003907	18.14	20.00	1.86	476.571	0.003907
20.00	30.00	10.00	521.053	0.019192	20.00	30.00	10.00	568.050	0.017604
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.078709</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.077121</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>381.149</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>388.997</b>		

**Tabla A3 N° 18** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-18

MASW-18					MASW-18				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.07	1.07	168.501	0.006367	0.00	1.07	1.07	168.501	0.006367
1.07	2.32	1.25	184.493	0.006752	1.07	2.32	1.25	184.493	0.006752
2.32	3.71	1.39	223.419	0.006243	2.32	3.71	1.39	223.419	0.006243
3.71	5.28	1.57	273.527	0.005734	3.71	5.28	1.57	273.527	0.005734
5.28	7.00	1.72	301.861	0.005702	5.28	7.00	1.72	301.861	0.005702
7.00	8.90	1.90	292.177	0.006502	7.00	8.90	1.90	292.177	0.006502
8.90	10.95	2.05	280.204	0.007320	8.90	10.95	2.05	280.204	0.007320
10.95	13.20	2.25	296.829	0.007565	10.95	13.20	2.25	296.829	0.007565
13.20	15.57	2.38	330.205	0.007193	13.20	15.57	2.38	330.205	0.007193
15.57	18.15	2.58	435.412	0.005924	15.57	18.15	2.58	435.412	0.005924
18.15	20.00	1.85	377.527	0.004889	18.15	20.00	1.85	377.527	0.004889
20.00	30.00	10.00	421.376	0.023732	20.00	30.00	10.00	452.915	0.022079
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.093924</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.092272</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>319.407</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>325.127</b>		

**Tabla A3 N° 19** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-19

MASW-19					MASW-19				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.08	1.08	149.417	0.007225	0.00	1.08	1.08	149.417	0.007225
1.08	2.32	1.24	246.285	0.005034	1.08	2.32	1.24	246.285	0.005034
2.32	3.71	1.39	260.963	0.005320	2.32	3.71	1.39	260.963	0.005320
3.71	5.27	1.56	276.682	0.005656	3.71	5.27	1.56	276.682	0.005656
5.27	6.99	1.72	314.029	0.005473	5.27	6.99	1.72	314.029	0.005473
6.99	8.89	1.89	307.569	0.006160	6.99	8.89	1.89	307.569	0.006160
8.89	10.95	2.07	303.957	0.006798	8.89	10.95	2.07	303.957	0.006798
10.95	13.17	2.22	326.341	0.006799	10.95	13.17	2.22	326.341	0.006799
13.17	15.57	2.40	363.900	0.006586	13.17	15.57	2.40	363.900	0.006586
15.57	18.11	2.54	397.996	0.006383	15.57	18.11	2.54	397.996	0.006383
18.11	20.00	1.89	413.159	0.004580	18.11	20.00	1.89	413.159	0.004580
20.00	30.00	10.00	448.312	0.022306	20.00	30.00	10.00	494.645	0.020217
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.088319</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.086230</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>339.677</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>347.908</b>		

**Tabla A3 N° 20** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-20

MASW-20					MASW-20				
Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs	Prof. (m)		di (m)	Vs (m/s)	di/Vs
Desde	Hasta				Desde	Hasta			
0.00	1.06	1.06	194.627	0.005463	0.00	1.06	1.06	194.627	0.005463
1.06	2.29	1.23	233.584	0.005262	1.06	2.29	1.23	233.584	0.005262
2.29	3.70	1.41	363.054	0.003875	2.29	3.70	1.41	363.054	0.003875
3.70	5.27	1.57	278.587	0.005623	3.70	5.27	1.57	278.587	0.005623
5.27	7.00	1.73	233.584	0.007411	5.27	7.00	1.73	233.584	0.007411
7.00	8.89	1.89	272.630	0.006951	7.00	8.89	1.89	272.630	0.006951
8.89	10.95	2.06	354.214	0.005823	8.89	10.95	2.06	354.214	0.005823
10.95	13.19	2.23	420.962	0.005300	10.95	13.19	2.23	420.962	0.005300
13.19	18.12	4.94	457.261	0.010801	13.19	18.12	4.94	457.261	0.010801
18.12	20.00	1.88	427.743	0.004385	18.12	20.00	1.88	427.743	0.004385
20.00	30.00	10.00	461.425	0.021672	20.00	30.00	10.00	511.624	0.019546
<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.082566</b>		<b>Total</b>	<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.080439</b>	
<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>363.347</b>			<b>Vs promedio (m/s)</b>		<b>372.952</b>		

**Tabla A3 N° 21** Velocidad promedio de ondas de corte a profundidad de 30 m para el primer y segundo modelo matemático correspondiente al ensayo MASW-21

<b>MASW-21</b>					<b>MASW-21</b>				
<b>Prof. (m)</b>		<b>di (m)</b>	<b>V<sub>s</sub> (m/s)</b>	<b>di/V<sub>s</sub></b>	<b>Prof. (m)</b>		<b>di (m)</b>	<b>V<sub>s</sub> (m/s)</b>	<b>di/V<sub>s</sub></b>
<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>				<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>			
0.00	1.07	1.07	222.743	0.004816	0.00	1.07	1.07	222.743	0.004816
1.07	2.31	1.24	277.850	0.004452	1.07	2.31	1.24	277.850	0.004452
2.31	3.70	1.39	283.909	0.004880	2.31	3.70	1.39	283.909	0.004880
3.70	5.28	1.58	248.226	0.006372	3.70	5.28	1.58	248.226	0.006372
5.28	7.00	1.72	282.792	0.006090	5.28	7.00	1.72	282.792	0.006090
7.00	8.91	1.91	369.827	0.005157	7.00	8.91	1.91	369.827	0.005157
8.91	10.97	2.06	441.380	0.004669	8.91	10.97	2.06	441.380	0.004669
10.97	13.20	2.23	470.127	0.004745	10.97	13.20	2.23	470.127	0.004745
13.20	15.57	2.37	479.235	0.004952	13.20	15.57	2.37	479.235	0.004952
15.57	18.14	2.57	500.637	0.005136	15.57	18.14	2.57	500.637	0.005136
18.14	20.00	1.86	494.654	0.003755	18.14	20.00	1.86	494.654	0.003755
20.00	30.00	10.00	548.475	0.018232	20.00	30.00	10.00	588.786	0.016984
<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.073257</b>	<b>Total</b>		<b>30.00</b>	<b>Total</b>	<b>0.072009</b>
<b>V<sub>s</sub> promedio (m/s)</b>			<b>409.518</b>		<b>V<sub>s</sub> promedio (m/s)</b>			<b>416.617</b>	