



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR: ASTUDILLO RIERA, SILVIA DAYANA

**TEMA: FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DE SITIO
PARA LA CIUDAD DE QUITO**

DIRECTOR: DR. AGUIAR, ROBERTO

CODIRECTOR: ING. GUERRA, MARCELO

SANGOLQUÍ, DICIEMBRE 2013

CERTIFICACION

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Srta. **SILVIA DAYANA ASTUDILLO RIERA** como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniera Civil

Sangolquí, Diciembre de 2013

DR. ING. ROBERTO AGUIAR FALCONÍ

DIRECTOR DE TESIS

ING. MARCELO GUERRA M.I.

CODIRECTOR DE TESIS

REVISADO POR

ING. ALEX PATRICIO ROMERO, Msc.

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

SILVIA DAYANA ASTUDILLO RIERA

Declaro que:

El proyecto de grado denominado “**FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DE SITIO PARA LA CIUDAD DE QUITO**”, ha sido desarrollado en base a una investigación adecuada, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las referencias que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención parcial a la obtención del título de Ingeniera Civil.

Sangolquí, Diciembre de 2013

SILVIA DAYANA ASTUDILLO RIERA

AUTORIZACIÓN

Yo, SILVIA DAYANA ASTUDILLO RIERA

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, del trabajo “FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DE SITIO PARA LA CIUDAD DE QUITO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Diciembre de 2013

SILVIA DAYANA ASTUDILLO RIERA

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, con mucho cariño:

A mis padres, Silvio Leonardo Astudillo Astudillo y Yolanda Piedad Riera Gancino quienes me apoyaron incondicionalmente durante toda mi vida estudiantil, a ellos que han sido la razón de mi esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos; Yessenia y Paul por su cariño, comprensión; a quienes admiro y respeto muchísimo.

Silvia Dayana Astudillo Riera

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios, el cual con su bendición me permitió culminar con éxito una etapa más de mi vida.

De manera muy especial a mis padres quienes son mi inspiración y un ejemplo de dedicación, entrega y sacrificio, gracias por todo el apoyo mostrado en el transcurso del tiempo. A mis hermanos Yessenia y Paul. A Jonattan por su apoyo incondicional, por su cariño, amistad y sobre todo por su amor.

Al Dr. Ing. Roberto Aguiar Falconí por su guía y valiosa colaboración en la presente investigación.

Al Ing. Marcelo Guerra por sus consejos y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Francisco Fernández por su apoyo y consejos.

A mis amigos, especialmente a Diego; por su gran apoyo, consejos, comprensión y sobre todo paciencia.

Silvia Dayana Astudillo Riera

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACION	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
LISTADO DE TABLAS	xi
LISTADO DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xxiv
ABSTRACT	xxv
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2 SISMOS QUE HAN AFECTADO A LA CIUDAD DE	
QUITO	4
2.1. INTRODUCCIÓN.....	4
2.2. SISMICIDAD HISTÓRICA DE QUITO	4
2.2.1. Sismos Históricos registrados antes de 1900	8

2.2.2. Sismos Históricos registrados después de 1900.....	14
2.3. SISMO DE QUITO, 1859.....	29
CAPÍTULO 3 PROPAGACIÓN DE ONDAS EN UNA DIMENSIÓN.....	33
3.1. INTRODUCCIÓN.....	33
3.2. PROPAGACION DE ONDAS.....	34
3.2.2. ANALISIS DE LA ECUACIÓN SIN AMORTIGUAMIENTO.....	39
3.3. USO DEL PROGRAMA DEGTRA.....	41
3.3.1. Descripción del Programa.....	41
3.3.2. Ejemplo de Aplicación.....	47
CAPÍTULO 4 USO DEL SOFTWARE EDU SHAKE.....	56
4.1 INTRODUCCION.....	56
4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.....	57
4.2.1 CARACTERÍSTICAS.....	57
4.2.2 TEORÍA.....	58
4.3 INGRESO DE DATOS.....	70
4.4 EJECUCION DEL ANÁLISIS.....	78
4.5 REPORTE DE RESULTADOS.....	79
4.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	81
4.7 COMPARACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS.....	92

CAPÍTULO 5 ESPECTROS DE DISEÑO DEL NEC – 11 Y

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE QUITO	97
5.1 ZONIFICACIÓN SÍSMICA	97
5.1.1 Factor de Zona “Z”	98
5.2 TIPOS DE SUELO	98
5.3 FACTORES DE SITIO DEL NEC-11	101
5.4 ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES	103
5.5 ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN DESPLAZAMIENTOS ..	104
5.6 ESPECTROS REDUCIDOS	106
5.7 Análisis de los puntos ubicados en la Zona Norte	107
5.7.1 Colegio Benalcázar (Sector 30)	107
5.7.2 El Condado (Sector 60).....	109
5.7.3 La Gasca (Sector 12)	111
5.8 Análisis de los puntos ubicados en la Zona Sur	113
5.8.1 Chimbacalle (Sector 31).....	113
5.9 FACTORES DE SITIO DE LA MICROZONIFICACION SISMICA DE QUITO.....	115
5.9.1 INTRODUCCIÓN	115
5.9.2 ESTUDIOS REALIZADOS	120
CAPÍTULO 6 FACTORES DE SITIO ENCONTRADOS EN ESTE ESTUDIO	140

6.1	INTRODUCCIÓN.....	140
6.2	SISMOS DE ANÁLISIS.....	140
6.3	TIPOS DE SUELO CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO.....	143
6.3.1	Análisis de los puntos ubicados en la Zona Norte.....	144
6.3.2	Análisis de los puntos ubicados en la Zona Centro.....	145
6.3.3	Análisis de los puntos ubicados en la Zona Sur.....	146
6.4	FACTORES AMPLIFICACIÓN DE DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN.....	147
6.5	IMPLEMENTACION DE ESTOS FACTORES AL PROGRAMA MIZOSIQ.....	152
6.5.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	153
6.5.2	EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	155
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		174
7.1	CONCLUSIONES	174
7.2	RECOMENDACIONES.....	176
7.3	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177
7.4	ARTICULOS PUBLICADOS	185
ANEXOS		186
A.1	ESPECTROS DE ACELERACION.....	187
A1.1.	Análisis de los puntos ubicados en la Zona Norte.....	187
A1.1.2.	El Condado (Sector 60).....	187

A1.1.3. Marisol (Avenida Real Audiencia) (Sector 62).....	189
A1.1.4. Andalucía (Sector 40).....	190
A1.1.5. Quito Tennis (Sector 38)	192
A1.2. Análisis de los puntos ubicados en la Zona Centro.....	193
A1.2.1. La Gasca (Sector 12)	193
A1.3. Análisis de los puntos ubicados en la Zona Sur	195
A1.3.1. Chimbacalle (Sector 31)	195
A1.3.2. Solanda (Sector 53)	196
A1.4. Análisis de las Unidades Educativas	198
A1.4.1. Colegio Benalcázar (Sector 30).....	198
A1.4.2. Sucre Longitudinal (Sector 11)	199
A1.4.3. Sucre Transversal	201
A1.4.4. Espejo (Sector 6).....	202
A1.4.5. Fernández Madrid (Sector 11).....	204

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Sismos Corticales que han Afectado a Quito.....	7
Tabla 2: Sismos de Subducción que han afectado a Quito	7
Tabla 3.1: Estratigrafía para el ejemplo de aplicación	48
Tabla 4: Factor de zona “Z”. NEC-11	98
Tabla 5: Clasificación de los perfiles de suelo. NEC-11.....	99
Tabla 6: Clasificación de los perfiles de suelo. NEC-11.....	100
Tabla 7: Tipo de suelo y factores de sitio Fa. NEC-11	101
Tabla 8: Tipo de suelo y factores de sitio Fd. NEC-11	102
Tabla 9: Tipo de suelo y factor del comportamiento inelástico del subsuelo Fs. (NEC-11).....	102
Tabla 10: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 30	108
Tabla 11: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 60	109
Tabla 12: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 12	111
Tabla 13: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 31	113
Tabla 14: Puntos de estudio de suelos ERN	123
Tabla 15: Información de Eventos Sísmicos empleados en el estudio	140
Tabla 16: Información de Eventos Sísmicos empleados en el estudio (Continuación).....	141
Tabla 17: Información de Eventos Sísmicos empleados en el estudio (Continuación).....	142
Tabla 18: Datos con los que el programa realizó las gráficas de los Espectros.....	166

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Fallas ciegas de Quito. PGM (2009)	5
Figura 2: Sismos históricos en la Sierra. (Beauval et al. 2010).....	6
Figura 3: Isosistas del sismo del 1797 (Barahona, 2002)	11
Figura 4: Isosistas del Sismo de Otavalo	13
Figura 5: Isosistas del sismo de Esmeraldas de 1906. (García, 2010)	14
Figura 6: Destrucción total de viviendas	15
Figura 7: Isosistas del Sismo de Antisana	16
Figura 8: Viviendas destruidas después del evento telúrico	17
Figura 9: Isosistas del Sismo de Sangolquí.	19
Figura 10: Consecuencias del Sismo de 1938.(Quishpe, 2012)	19
Figura 11: Isosistas Sismo de Manabí 1942. (Quishpe, 2012).....	20
Figura 12: Isosistas del Sismo de Pasto Calle	21
Figura 13: Isosistas del Sismo de Pasa	23
Figura 14: Isosistas del Sismo de Pastocalle.....	24
Figura 15: Edificaciones de adobe afectadas en el terremoto de 1987	25
Figura 16: Destrucción de varios tramos del oleoducto Trans-Ecuatoriano	25
Figura 17: Isosistas del sismo de Baeza 1987	26
Figura 18: Vivienda de hormigón armado afectada por el sismo.Pomasqui	27
Figura 19: Isosistas del Sismo de Bahía 1998.	28
Figura 20: Isosista del Sismo de Quito (22-Marzo-1859)	29
Figura 21: Daños registrados en la Iglesia de San Francisco	30

Figura 22: Resultados de la aplicación de la metodología de Blake-Shebalín. (García H. , 2013)	32
Figura 23: Trayectoria de las ondas.....	33
Figura 24: Barra sometida a vibraciones	35
Figura 25: Elemento diferencial	36
Figura 26: Condición espacio-tiempo asociada a un desplazamiento x_0	40
Figura 27: Nueva ventana en DEGTRA A4.	42
Figura 28: Ventana para escoger el registro acelerográfico.	43
Figura 29: Pantalla para lectura del acelerograma	43
Figura 30: Acelerograma	44
Figura 31: Opción “Espectro de Respuesta” y “Espectro de Fourier”	44
Figura 32: Ventana para la determinación del Espectro de Respuesta y el Espectro de Fourier	45
Figura 33: Espectro de respuesta de aceleración.....	45
Figura 34: Espectro de Fourier	46
Figura 35: Opción copiar datos del espectro.	46
Figura 36: Barra de herramientas. Opción “Propagación 1D”	46
Figura 37: Datos de estratigrafía.....	47
Figura 38: Definición del tipo de archivo de datos.	47
Figura 39: Acelerograma correspondiente al sismo “El Centro”.....	48
Figura 40: Gráfica Vs & Profundidad, La Gasca (MSQ 6).....	49
Figura 41: Espectro de Respuesta de aceleración en roca	49
Figura 42: Espectro de Respuesta de velocidad en roca.....	50

Figura 43: Espectro de Respuesta de desplazamientos en roca	50
Figura 44: Espectro de Fourier en roca	51
Figura 45: Espectro de Respuesta de aceleración a cielo libre	51
Figura 46: Espectro de Respuesta de velocidad a cielo libre	52
Figura 47: Espectro de Respuesta de desplazamientos a cielo libre.....	52
Figura 48: Espectro de Fourier a cielo libre	53
Figura 49: Factor de Amplificación de Aceleración	53
Figura 50: Factor de Amplificación de Velocidad	54
Figura 51: Factor de Amplificación de Desplazamientos	54
Figura 52: Factor de Amplificación (Fourier).....	55
Figura 53: Secuencia de operaciones de EduShake	58
Figura 54: Perfil de suelo	59
Figura 55: Depósito de suelo con varias capas	63
Figura 56: Modelo Lineal equivalente	66
Figura 57: Pantalla de instalación del software.....	68
Figura 58: Proceso de instalación del programa.....	69
Figura 59: Icono del programa	69
Figura 60: Menús del programa	70
Figura 61: Información general del perfil de suelo	70
Figura 62: Selección de la “Curva de reducción de módulo”	71
Figura 63: Datos de entrada de la primera capa.....	71
Figura 64: Formulario de resumen.....	72
Figura 65: Selección de las opciones de salida	73

Figura 66: Perfil de suelo ingresado	74
Figura 67: Movimientos de Entrada (Registro sísmico)	75
Figura 68: Datos del registro sísmico.....	76
Figura 69: Opciones para visualizar los espectros.....	76
Figura 70: Aceleración & Tiempo.....	77
Figura 71: Velocidad & Tiempo.....	77
Figura 72: Desplazamiento & Tiempo.....	78
Figura 73: Opciones para ver los resultados del análisis.....	79
Figura 74: Reporte mostrado por EduShake	81
Figura 75: Ingreso de datos de la estratigrafía	82
Figura 76: Opciones para visualizar las gráficas una vez terminado el análisis.....	82
Figura 77: Gráfico del perfil estratigráfico ingresado.....	83
Figura 78: Selección del registro sísmico.	84
Figura 79: Gráficas de aceleración, velocidad y desplazamiento	84
Figura 80: Espectro de Fourier	85
Figura 81: Ventana para guardar el archivo creado.....	85
Figura 82: Ventana de análisis de EduShake	86
Figura 83: Selección del archivo con la extensión “.LYR”	86
Figura 84: Opción de graficas a plotear	87
Figura 85: Espectro de Fourier	87
Figura 86: Obtención del espectro de respuesta	88
Figura 87: Espectro de Respuesta.....	88

Figura 88: Opciones: Picos máximos de aceleración, velocidad, desplazamiento.....	89
Figura 89: Pico máximo de aceleración.....	89
Figura 90: Parámetros adicionales presentados por el programa.....	89
Figura 91: Animación del estrato de suelo ingresado.....	90
Figura 92: Función de transferencia. Selección de capas.....	90
Figura 93: Función de transferencia.....	91
Figura 94: Reporte proporcionado por EduShake.....	91
Figura 95: Acelerograma mostrado - EduShake.....	92
Figura 96: Acelerograma mostrado - Degtra.....	92
Figura 97: Espectro de aceleración a cielo libre- Degtra.....	93
Figura 98: Espectro de aceleración a cielo libre- EduShake.....	94
Figura 99: Espectro de aceleración roca – Degtra.....	94
Figura 100: Espectro de aceleración roca - EduShake.....	95
Figura 101: Espectro de aceleración roca & cielo libre - DEGTRA.....	96
Figura 102: Espectro de aceleración roca & cielo libre - EduShake.....	96
Figura 103: Ecuador, zonas sísmica para propósitos de diseño y valor del factor de zona “Z”. NEC-11.....	97
Figura 104: Espectro Sísmico Elástico de Aceleraciones que representa el sismo de diseño. NEC-11.....	104
Figura 105: Espectro sísmico elástico de desplazamientos para diseño. NEC-11.....	105
Figura 106: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN.....	108

Figura 107: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años	108
Figura 108: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=2475 Años	109
Figura 109: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN	110
Figura 110: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años	110
Figura 111: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=2475 Años	111
Figura 112: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN	112
Figura 113: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años	112
Figura 114: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=2475 Años	113
Figura 115: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN	114
Figura 116: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años	114
Figura 117: Espectro de diseño & Espectro Reducido. T=2475 Años	115
Figura 118: Localización geográfica Valparaíso	116
Figura 119: Mapa de Intensidades.....	117
Figura 120: Amplificación de ondas sísmicas	118
Figura 121: Ubicación de la ciudad de Quito con respecto al DMQ.....	120
Figura 122: Ubicación de sondeos realizados para el Metro de Quito.....	121
Figura 123: Ubicación de los puntos de estudio de suelos.....	122
Figura 124: Curvas de degradación del módulo de corte y del factor de amortiguamiento	125
Figura 125: Factor de sitio que define la plataforma de aceleración máxima del espectro.....	126
Figura 126: Factor de sitio que depende del tipo de suelo	126

Figura 127: Factor de sitio que considera el comportamiento no lineal del suelo	127
Figura 128: Zonas geológicas en Quito	129
Figura 129: Método de las relaciones espectrales tradicionales.....	131
Figura 130: Método de las Relaciones espectrales HN ruido de fondo	132
Figura 131: Síntesis de las diversas técnicas utilizadas.	136
Figura 132: Mapas de las iso - curvas obtenidas considerando la amplificación máxima entre 1 y 20Hz. (A): Frecuencias en Hz, cada curva corresponde a un intervalo de 1Hz.	138
Figura 133: Mapas de las iso – curvas obtenidas considerando la amplificación máxima entre 1 y 20Hz. (B): Amplificaciones, cada curva corresponde a un intervalo de 1 grado.	139
Figura 134: Acelerograma Sismo 1a.....	141
Figura 135: Acelerograma Sismo 1b.....	141
Figura 136: Acelerograma Sismo 22a.....	142
Figura 137: Acelerograma Sismo 22b.....	142
Figura 138: Acelerograma Sismo 34a.....	143
Figura 139: Acelerograma Sismo 34b.....	143
Figura 140: Gráfica Vs & Profundidad, El Condado (MSQ 1)	144
Figura 141: Gráfica Vs & Profundidad, La Gasca (MSQ 6).....	145
Figura 142: Gráfica Vs & Profundidad, Chimbacalle (MSQ 10)	146
Figura 143: Período & Factor de Amplificación de aceleración, El Condado (MSQ 1-Sector 60)	147

Figura 144: Período & Factor de Amplificación de velocidad, El Condado (MSQ 1-Sector 60).....	148
Figura 145: Período & Factor de Amplificación de desplazamiento, El Condado (MSQ 1- Sector 60)	148
Figura 146: Período & Factor de Amplificación de aceleración, El Condado (MSQ 1-Sector 12)	149
Figura 147: Período & Factor de Amplificación de velocidad, La Gasca (MSQ 6- Sector 12).....	149
Figura 148: Período & Factor de Amplificación de desplazamiento, La Gasca (MSQ 6 – Sector 12).....	150
Figura 149: Periodo & Factor de Amplificación de aceleración, Chimbacalle (MSQ 10 –Sector 31)	150
Figura 150: Período & Factor de Amplificación de velocidad, Chimbacalle (MSQ 10 – Sector 31)	151
Figura 151: Período & Factor de Amplificación de desplazamiento, Chimbacalle (MSQ 10 – Sector 31)	151
Figura 152: Resultados generales dentro de la ventana principal	153
Figura 153: Información de la zona de análisis.....	154
Figura 154: Valores relevantes de la zona analizada	154
Figura 155: Espectros presentados a la derecha del programa.....	155
Figura 156: Pantalla inicial de programa MIZOSIQ V2.0	156
Figura 157: Ventana con el Mapa del Distrito Metropolitano de Quito	156
Figura 158: Selección del sector a analizar	157

Figura 159: Selección del barrio a analizar	157
Figura 160: Ampliación de los barrios del sector 60	158
Figura 161: Selección del Barrio	159
Figura 162: Ventana principal con los datos seleccionados	159
Figura 163: Opciones presentadas por el programa.....	160
Figura 164: Espectros de aceleración para un período de retorno de 475 años & 970 años.....	160
Figura 165: Datos de análisis.....	161
Figura 166: Características principales del Barrio.....	161
Figura 167: Análisis para un período dado	162
Figura 168: Espectro de aceleración. (475 Años).....	162
Figura 169: Espectro de aceleración. (970 Años).....	162
Figura 170: Espectros de desplazamiento para un período de retorno de 475 años & 970 años	163
Figura 171: Características principales del Barrio.....	163
Figura 172: Análisis para un período dado	164
Figura 173: Espectro de desplazamiento (475 Años).	164
Figura 174: Espectro de desplazamiento (970 Años).	165
Figura 175: Opción que permite copiar la tabla con los valores de espectro	165
Figura 176: Factores de sitio.....	166
Figura 177: Factores de Sitio del NEC-11	167
Figura 178: Factores de Sitio empleados en el programa	167

Figura 179: Factores de Sitio Barrio “El Condado”	168
Figura 180: Espectros Reducidos de Aceleración. Ingreso de datos	169
Figura 181: Espectros de Diseño & Espectros reducidos de aceleración..	169
Figura 182: Análisis para un período dado	170
Figura 183: Espectros de Diseño & Espectros reducidos de aceleración. Período dado	170
Figura 184: Espectros reducidos de desplazamiento para un período de retorno de 475 años & 2475 años.....	171
Figura 185: Análisis para un período dado	171
Figura 186: Espectros de Diseño & Espectros reducidos de desplazamientos. Período dado.....	172
Figura 187: Botones de mando.....	172
Figura 188: Cuadro de dialogo, utilizar el botón salir	173
Figura 189: Espectros de aceleración. (Sector 60)	187
Figura 190: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	188
Figura 191: Comparación de espectros	188
Figura 192: Espectros de aceleración. (Sector 62)	189
Figura 193: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	189
Figura 194: Comparación de espectros	190
Figura 195: Espectros de aceleración. (Sector 40)	190
Figura 196: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	191
Figura 197: Comparación de espectros	191
Figura 198: Espectros de aceleración. (Sector 38)	192

Figura 199: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	192
Figura 200: Comparación de espectros	193
Figura 201: Espectros de aceleración. (Sector 12)	193
Figura 202: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	194
Figura 203: Comparación de espectros	194
Figura 204: Espectros de aceleración. (Sector 31)	195
Figura 205: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	195
Figura 206: Comparación de espectros	196
Figura 207: Espectros de aceleración. (Sector 53)	196
Figura 208: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	197
Figura 209: Comparación de espectros	197
Figura 210: Espectros de aceleración. (Sector 30)	198
Figura 211: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	198
Figura 212: Comparación de espectros	199
Figura 213: Espectros de aceleración. (Sector 11)	199
Figura 214: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	200
Figura 215: Comparación de espectros	200
Figura 216: Espectros de aceleración. (Sector 11)	201
Figura 217: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	201
Figura 218: Comparación de espectros.	202
Figura 219: Espectros de aceleración. (Sector 6)	202
Figura 220: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	203
Figura 221: Comparación de espectros	203

Figura 222: Espectros de aceleración. (Sector 11)	204
Figura 223: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN.....	204
Figura 224: Comparación de espectros	205

RESUMEN

Las Normativas Sísmicas presentan espectros de diseño a nivel macro por lo que es muy importante realizar estudios de Micro Zonificación sísmica de ciudades que tienen más de cien mil habitantes, para tomar en cuenta las condiciones locales del suelo. En efecto las normativas presentan valores de amplificación de las ondas sísmicas en función del tipo de suelo, en cambio la microzonificación sísmica reporta estos valores para toda la ciudad. Por otra parte, una vez determinados los factores de amplificación por efecto del tipo de suelo, las normativas con un solo valor amplifican las ordenadas de todo el espectro, lo cual no es correcto ya que los factores de sitio dependen también del período de vibración de la estructura. La elaboración de este proyecto complementará el trabajo realizado en el programa MIZOSIQ, ya que este en su inicio solo reporta espectros de aceleración y lo que se pretende es que su base de datos sea reprogramada de manera que reporte **espectros de desplazamiento; factores de sitio; y espectros reducidos.** El programa **MIZOSIQ V.2.0**, es de fácil interpretación y manejo, su programación se la realizó en el Visual Basic de Microsoft Excel.

Palabras Claves:

Sismicidad Histórica,

Microzonificación,

Factores de Sitio,

Espectros,

Degtra

ABSTRACT

The Seismic Standards, show design spectra at the macro level so it is very important to realize studies Seismic Micro-zoning of cities that have more than one hundred thousand habitants, to take into account local soil conditions. In fact, standards show values of amplified seismic waves depending on the type of soil, instead, seismic micro-zoning show these values for the entire city. Moreover, once certain amplification factors, by soil type effect, standards with a single value amplify the ordinates of the spectrum, which is not correct as site factors also depend on the period of vibration of structure. The development of this project will complement the work done in the MIZOSIQ program as this in the beginning only reports acceleration spectra and the aim is that your database, be reprogrammed, so that show **the spectrum shift, site factors, and reduced spectra.**

The program, MIZOSIQ V.2.0 is easy to interpret and use.

Keywords:

Historical Seismicity,

Microzonification,

Site Factors,

Spectra,

Degtra.

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

Factores de Amplificación de Sitio para la ciudad de Quito

La capital del Ecuador, Quito, es una ciudad que tiene un alto grado de amenaza sísmica e históricamente ha sido sacudida por fuertes sismos. Estudios de la sismicidad histórica de Quito revelan que la ciudad ha experimentado, cada 50 años en promedio, daños causados por terremotos que ocurrieron tanto en la vecindad inmediata como en sitios más lejanos. (Valverde, Fernández, Jiménez, & Vaca, 2008)

Sismos importantes a considerarse fueron los de 1755, 1797, 1859 y 1868, producidos cuando Quito era significativamente menos desarrollado y menos poblado que hoy en día. Esto hace que los efectos causados por terremotos anteriores no puedan servir de referencia para analizar los efectos de un terremoto esperado de similares características; sin embargo el historial sísmico de la ciudad ayuda a visualizar el potencial de amenaza sísmica existente.

El evidente desarrollo económico y fenómenos demográficos en la ciudad de Quito han causado una considerable expansión física (especialmente a lo largo de la ciudad) y un considerable aumento de la densidad poblacional. (Valverde, Fernández, Jiménez, & Vaca, 2008)

Por lo mencionado, se hace necesario contar con registros que permitan visualizar adecuadamente tanto los espectros de diseño como los factores de amplificación de las zonas de la ciudad, para poder realizar un análisis

estructural que se acerque más a la realidad, y que esté de acuerdo a la normativa vigente (NEC-11).

1.1. ANTECEDENTES

El crecimiento de la ciudad de Quito en sentido horizontal está llegando a sus límites por lo que se están construyendo grandes edificios en varios sectores de la ciudad, de tal manera que el crecimiento vertical, que es una realidad, conlleva a tener un mayor riesgo sísmico por la gran cantidad de gente que está viviendo o va a vivir en edificios de altura. (Aguar, 2013).

Los efectos potenciales que un evento sísmico causa, pueden ser devastadores como se lo ha comprobado en los últimos años. Las pérdidas de vidas y de recursos pueden ser de grandes proporciones afectando la economía de los pueblos. El contar con una información que permita regir y controlar el uso del suelo, de las construcciones y edificaciones, fijar los requerimientos que la técnica con sus últimos avances aconseja y definir responsabilidades técnicas podrá reducir las pérdidas y daños ocasionados por este tipo de desastre natural. (Valverde, Fernández, Jiménez, & Vaca, 2008)

En el afán de determinar una adecuada caracterización del suelo de la ciudad se han realizado varios estudios, entre los cuales se pueden mencionar los realizados por la ORSTOM, por la Escuela Politécnica Nacional (1994 & 2002), por ERN (2012) y estudios que en su mayoría han sido impulsados por la construcción del Metro de Quito.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Obtener los factores de amplificación de sitio; espectros de desplazamiento; y espectros reducidos, para los distintos sectores del Distrito Metropolitano de Quito.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Presentar los factores amplificación de sitio, en función del período de vibración, encontrados para determinadas zonas de la ciudad de Quito, empleando registros de sismos en roca.
- Actualizar el programa MIZOSIQ a una versión 2.0 donde se incorporará la base de datos que permita la obtención de espectros de desplazamiento, factores de sitio y espectros reducidos.

CAPÍTULO 2 SISMOS QUE HAN AFECTADO A LA CIUDAD DE QUITO

2.1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Quito, enmarcada en la falda del volcán Pichincha, a 2800 metros de altura en el interior de los Andes, se ha visto perjudicada por una amplia actividad sísmica y volcánica. (Sánchez, 2001)

En el valle interandino han ocurrido un gran número de sismos. La capital ha sido afectada por sismos bajo la ciudad, en la falla de Quito, y por grandes sismos ocurridos en las cordilleras.

El último gran terremoto que afectó a Quito fue en 1868, en esa época, la población de la ciudad era de 45.000 personas que vivían en un área de 4 km². (EPN G. I., 1995)

El crecimiento acelerado y desordenado del Distrito Metropolitano de Quito ha generado la proliferación de edificaciones de pobre calidad de construcción y la urbanización de espacios peligrosos (laderas inestables, quebradas rellenas con tierra suelta. entre otras), lo que hace que estas áreas sean aún más vulnerables ante la ocurrencia de un evento sísmico. De tal manera, que si ocurriera un sismo grande, los daños serían considerables. (Naya, 2010)

2.2. SISMICIDAD HISTÓRICA DE QUITO

A lo largo de los 460 años de historia escrita que tiene la ciudad de Quito, se han registrado varios eventos sísmicos que alcanzaron

intensidades de hasta IX grados en la escala MKS. Dentro de las numerosas fuentes sísmo genéticas que pueden generar daños en la ciudad, se identifican la falla de Quito, cuya actividad es susceptible de producir intensidades superiores a VIII grados, haciendo de ella una fuente de alto peligro para la ciudad. (Hibsch, Alvarado, Yepes, Sébrier, & Pérez, 1996).

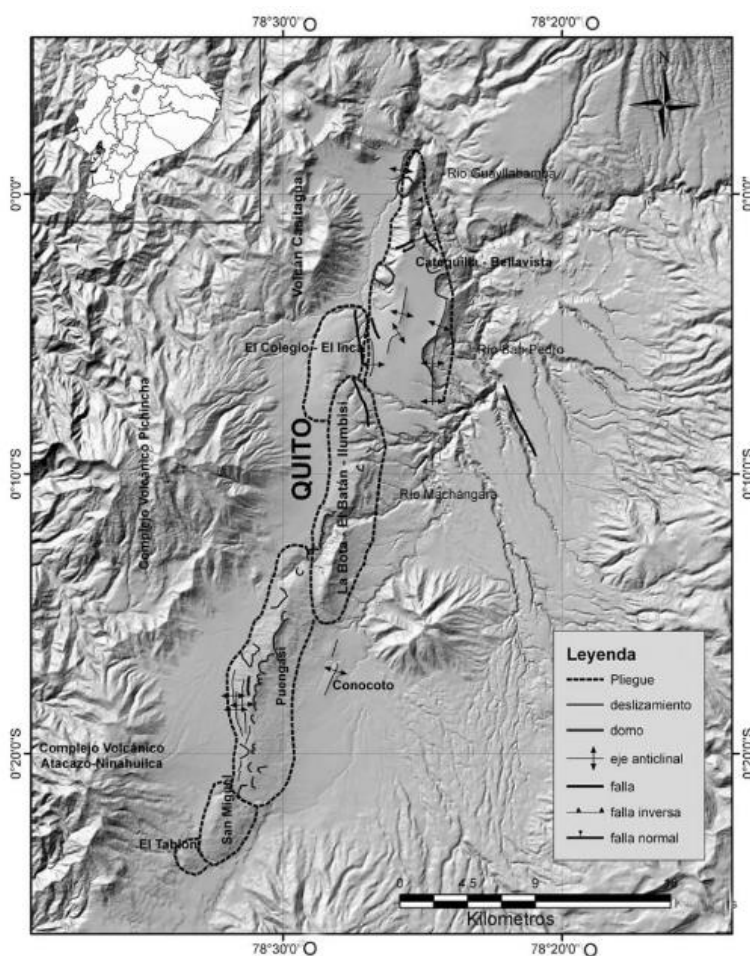


Figura 1: Fallas ciegas de Quito. PGM (2009)

Desde 1541, momento en que se tienen registros históricos, se sintieron en la capital siete terremotos con intensidad VII o mayor: 1587, 1627, 1698, 1755, 1797, 1859 y 1868. (Chatelain, et al., 1999) Este valor de intensidad de la escala MSK de intensidades, corresponde a un sismo en el que las personas se asustan y salen de su casa, y los edificios viejos, de barro,

adobe o muros de mampostería se dañan severamente, y se producen pequeños deslaves. (Rivadeneira, et al., 2007)

Los dos terremotos que afectaron a Quito con mayor intensidad fueron el de Guayllabamba, 1587 y el de Quito, 1859. Éstos son los dos eventos más cercanos a Quito. Ambos con una intensidad de VIII de la escala MSK, lo que corresponde a reportes de dificultades para mantenerse parado y al colapso de edificios viejos. (Naya, 2010)

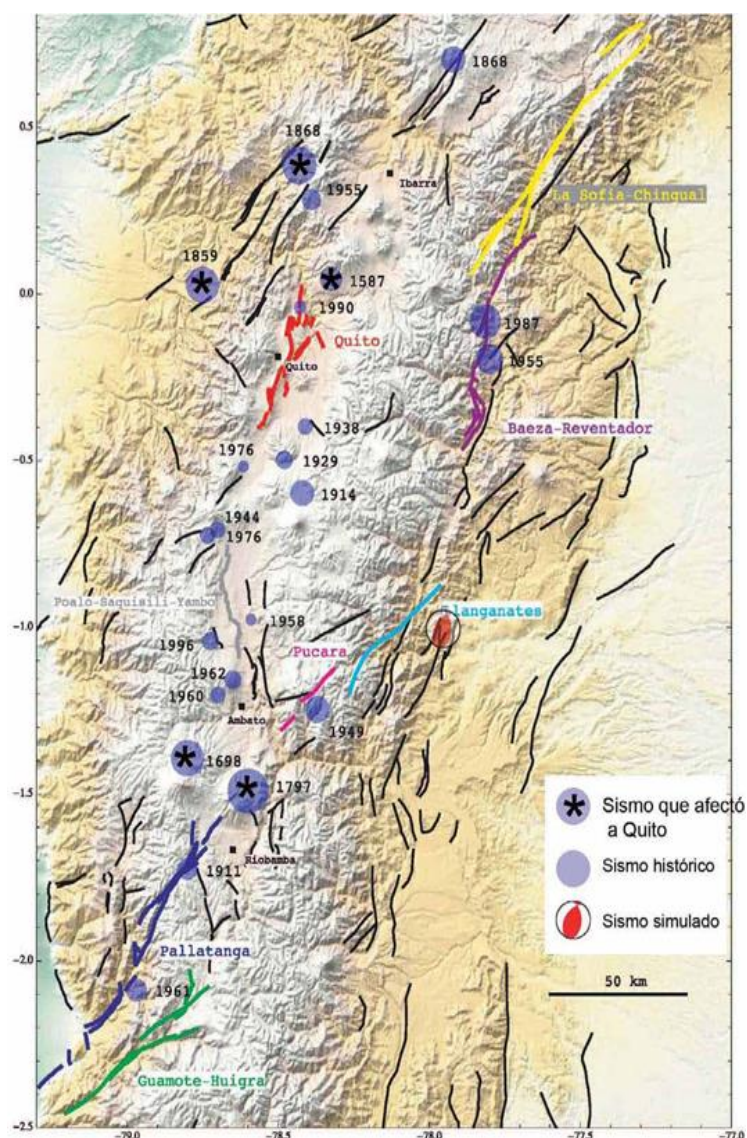


Figura 2: Sismos históricos en la Sierra. (Beauval et al. 2010).

Tabla 1: Sismos Corticales que han Afectado a Quito

Fecha	Lugar	Latitud	Longitud	Mw	Profundidad [km]
1587/08/31	Guayllabamba	0.05	-78.33	6.4	33
1859/03/31	Quito	0.02	-78.75	7.2	33
1868/08/16	Ibarra (Otavalo)	0.38	-78.43	7.7	33
1868/08/15	El Ángel	0.7	-77.92	6.6	33
1914/05/31	Antisana	-0.6	-78.42	6.44	33
1929/07/25	Murco	-0.5	-78.48	5.88	33
1938/08/10	Sangolquí	-0.4	-78.41	5.8	33
1944/09/15	Toacazo (Pastocalle)	-0.71	-78.7	5.92	33
1955/07/20	Atahualpa	0.28	-78.39	6.14	33
1958/01/24	Latacunga	-0.98	-78.59	5	33
1960/07/30	Pasa	-1.2	-78.7	5.97	21
1962/11/16	Cusubamba	-1.16	-78.65	5.8-6	33
1976/11/29	Aloasi	-0.52	-78.61	5	33
1976/10/06	Pastocalle	-0.75	-78.78	5.92	7.4
1987/03/05	Baeza	-0.08	-77.8	7	10

Tabla 2: Sismos de Subducción que han afectado a Quito

Fecha	Lugar	Latitud	Longitud	Mw	Profundidad [km]
1906/0/31	Esmeraldas	1.00	-80.00	8.8	33.0
1942/05/13	Manabí	-0.01	-80.12	7.9	20.0
1958/01/19	Esmeraldas	1.22	-79.37	7.8	40.0

Sismos importantes que han ocurrido en la ciudad han tenido efectos catastróficos sobre la población y las construcciones en Quito. A

continuación se describen en orden cronológico incluyendo los principales efectos ocasionados.

2.2.1. Sismos Históricos registrados antes de 1900

Se describen algunos sismos históricos que afectaron a Quito. La información proviene de textos escritos, a consecuencia de los efectos y daños ocasionados, por cada uno de estos eventos.

2.2.1.1 Sismo de 1541 (Quijos)

La intensidad máxima que se estima para este evento es de 8K, es el primer evento que aparece en los registros sísmicos del país, acaeció en esta provincia en las cercanías del volcán Antisana (Wolf, 1892).

Se presume que este hecho pudo haberse generado en las ramificaciones de la falla Chingual o en cualquiera de sus ramales que se prolongan hacia la zona de Papallacta. Se presentaron derrumbes de gran parte de las casas indígenas.

2.2.1.2 Sismo de 1587 (Guayllabamba)

Se estima que su magnitud fue de $M_w=6.4$. Evento ocasionado el 3 de septiembre, las iglesias con las que contaba la ciudad de Quito sufrieron daños significativos. Hubo pocos muertos, pero gran cantidad de heridos.

En San Antonio de Pichincha y pueblos vecinos se presentó mucha destrucción, grandes y profundas grietas por las que brotó agua negra y de mal olor. En Guayllabamba: enormes grietas.

En Cayambe se desplomaron muchas casas. Desbordamiento e inundaciones en el lago San Pablo. Las crónicas dicen que el sismo "duró

como media hora": se deduce que se produjeron gran número de réplicas inmediatas.

2.2.1.3 Sismo de 1627

Con una magnitud de $M_w=7.0$, ocasionado el 26 de junio de 1627, este sismo fue suficientemente fuerte como para afectar al Palacio de la Audiencia y otras casas en Quito, sin embargo, no se reportan daños al norte de la ciudad ni en otros lugares, por lo que es difícil atribuirle una fuente generadora, a no ser que sea la misma falla de Quito (Eguez y Yepes, 1993). Este sismo debió tener una intensidad en Quito de VII. (Del Pino y Yepes, 1990).

2.2.1.4 Sismo de 1645

Ocurrió el 15 de marzo de 1645, su magnitud registrada fue de $M_w=7.0$. Muchos temblores al comienzo de este año, sentidos en Quito y Riobamba, hasta febrero en que ocurre un terremoto que causó graves estragos en toda la comarca. Muchas casas, conventos e iglesias se vinieron al suelo.

2.2.1.5 Sismo de 1661

En 1660, posterior a la importante erupción del Pichincha, o tal vez a inicios del 1661, se produjo un fuerte sismo que ocasionó grandes derrumbes en el volcán Sincholagua y algunos estragos en Quito.

Los derrumbes, calificados por algunos historiadores como catastróficos por el desplome de la cumbre del volcán (Cevallos, 1851), generaron flujos de escombros y de lodo que arrasaron los valles de Los Chillos y Tumbaco. Su intensidad en Quito fue de VI-VII (Del Pino y Yepes, 1990).

2.2.1.6 Sismo de 1736

Ocurrido el 12 de junio, produjo graves daños en casas e iglesias de Pujilí, Toacaso, Saquisilí y el resto de pueblos de la comarca, en la provincia de Latacunga se registraron estragos menores; en tanto que en Quito se presentó daños moderados en la iglesia de Sto. Domingo.

2.2.1.7 Sismo de 1755

El terremoto de 1755 ha sido catalogado como el evento más destructivo que ha sufrido Quito a través de su historia. Los daños se presentaron en las iglesias y conventos quiteños, destacándose el colapso total de la iglesia de Santa Catalina y daños generalizados en torres, cúpulas y muros de la Catedral, San Agustín, Santo Domingo, San Francisco, La Merced y El Sagrario.

La intensidad en Quito fue la máxima registrada para este terremoto en cualquier punto, implicando que su epicentro se podría haber localizado bajo la ciudad. No se reportan daños en otras localidades. Se lo estimó en el grado IX MSK (Del Pino y Yepes, 1990).

2.2.1.8 Sismo de 1797 (Guayllabamba)

Ocurrido el 31 de agosto, cuya magnitud registrada fue de $M_w=6.4$, su epicentro se localizó en las coordenadas $0.05^\circ N$ y $78.33^\circ W$. Provocó destrucción en las áreas al norte de la provincia de Pichincha, especialmente en las localidades de San Antonio, Pomasqui, Guayllabamba, todo el sector Norte de Quito, Cayambe y el Lago San Pablo.

Sus efectos se evidenciaron con enormes y profundas grietas de las cuales emanaban agua negra y malos olores, viviendas desplomadas, monumentos y estructuras afectadas, desbordamientos e inundaciones, que ocasionaron la pérdida de 160 vidas humanas. Las crónicas registradas en el Catálogo de Terremotos del Ecuador (1999), dicen que el sismo duró alrededor de media hora con varias réplicas inmediatas que sucedieron por varios días. (Instituto Geofísico EPN; José Egred, 1999)

2.2.1.9 Sismo de 1797 (Riobamba)

Ocurrido el 4 de febrero de 1797, por sus efectos es el terremoto que mayores daños ha causado. En este sismo, incluso ocurrieron cambios en la topografía del terreno de lo que actualmente es la provincia de Chimborazo.

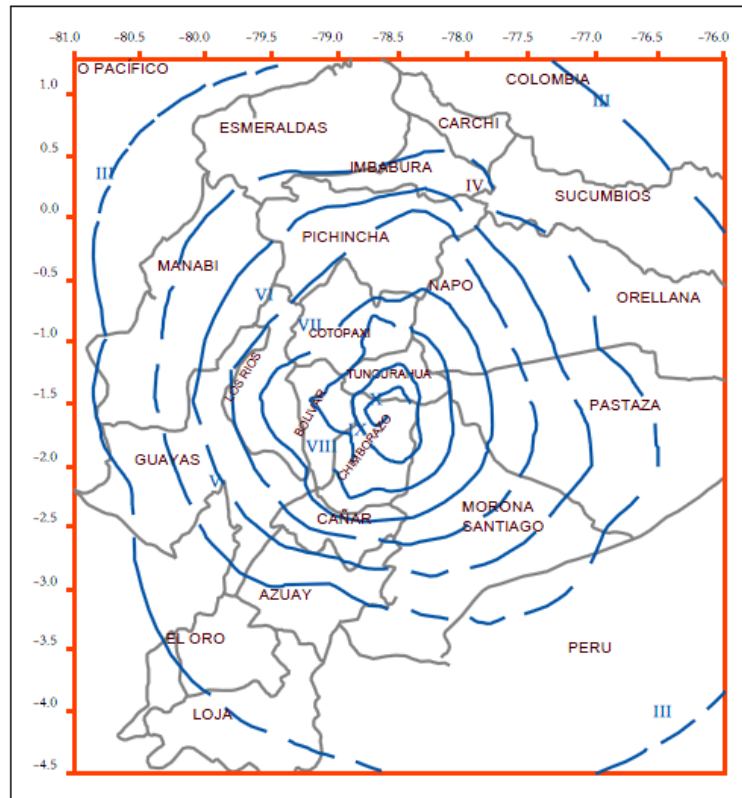


Figura 3: Isosistas del sismo del 1797 (Barahona, 2002)

Debido al alto grado de destrucción que sufrió la ciudad de Riobamba, esta fue reubicada. También sufrieron daños considerables las actuales provincias de Tungurahua, Cotopaxi, Bolívar, e incluso Pichincha.

En Quito fueron afectados todos sus templos. Este evento tiene como posible origen una ruptura de la falla de Pallatanga cuyo trazo pasa cerca de la zona de Colta. (Rivadeneira, et al., 2007)

2.2.1.10 Sismo de 1859 (Quito)

Con una magnitud M_w de 7.2 y un epicentro instrumental localizado en las coordenadas 0.02°N y 78.75°W , este sismo se sintió con más intensidad en la ciudad de Quito. Más adelante se analizarán con mayor detalle sus características.

2.2.1.11 Sismo de 1868 (El Ángel)

Evento ocasionado el 15 de agosto, con una intensidad de $M_w=6.6$ y cuyo epicentro se ubicó en las coordenadas 0.7°N ; 77.92°W , produjo grandes averías en casas e iglesias.

Los mayores estragos se localizaron en la zona de: El Ángel, Huaca, Tusa, El Chota y en menor proporción en la villa de Cotacachi, y los pueblos de Imantag, Urcuquí, San Antonio, San Pablo, Salinas, Tumbaviro, Mira y en la ciudad de Quito.

Los estragos de este evento se incrementaron con el terremoto de Imbabura, que tuvo lugar unas horas más tarde. (Instituto Geofísico EPN; José Egred, 1999)

2.2.1.12 Sismo de 1868 (Otavalo)

Éste sismo acaecido el 16 de agosto de 1868, fue el evento más potente en afectar los Andes del norte del Ecuador en el período histórico. Provocó la ruina casi total de varias ciudades y pueblos, especialmente en Cotacachi, Ibarra, Otavalo y pueblos intermedios. ($M_w=7.7$; epicentro: $0.38^\circ N$; $78.43^\circ W$).

Se presentaron muchos deslizamientos de tierra voluminosos, innumerables derrumbes de mediana y pequeña magnitud, además de grietas profundas y extensas en toda la región. (Sangurima, 2013)

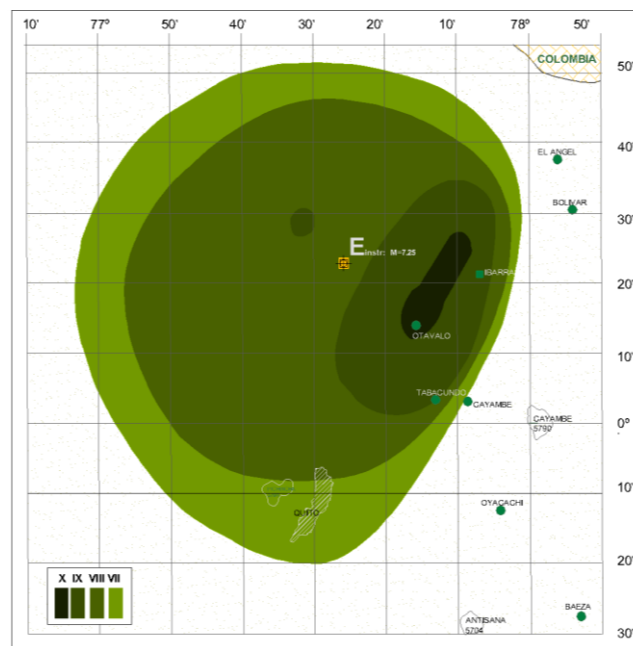


Figura 4: Isosistas del Sismo de Otavalo

Destrucción de muchas vías de comunicación, en especial los caminos vecinales. Los estragos en Ibarra fueron de tal magnitud que se decidió mudar la ciudad a otro sitio, por lo que se fundó la población de La Esperanza, donde la población pretendió radicarse definitivamente, pero

tiempo más tarde desistieron del proyecto y retornaron para reconstruir la ciudad en el mismo lugar.

En Quito sufrieron graves averías muchos edificios y, sobre todo, las iglesias y conventos. Durante un buen tiempo se sintieron réplicas de variada intensidad, algunas muy fuertes. Las consecuencias sociales y económicas fueron cuantiosas, en una época que el país afrontaba serias dificultades fiscales.

2.2.2. Sismos Históricos registrados después de 1900

2.2.2.1 Sismo de 1906

A las 10:36 (tiempo local) del 31 de enero de 1906 se produjo un sismo de magnitud (M_w) 8.8 con epicentro en el océano Pacífico y frente a la frontera Ecuador - Colombia. (IG - EPN, 2012).

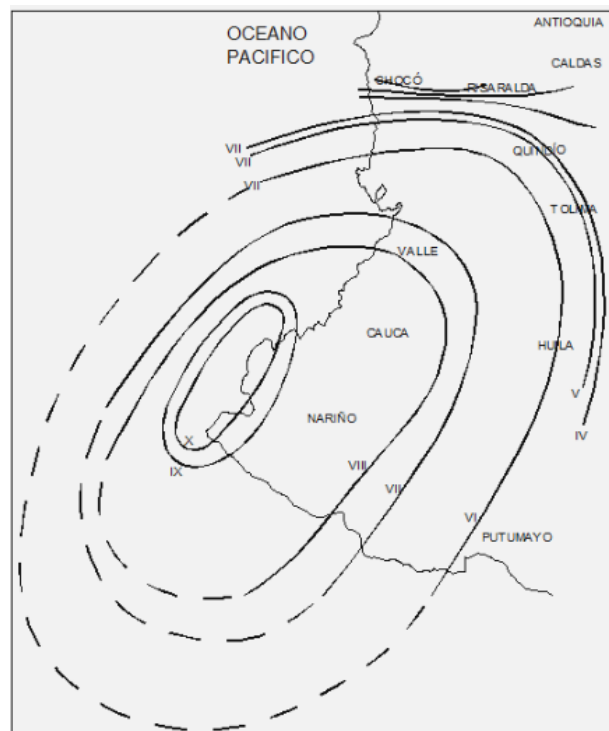


Figura 5: Isosistas del sismo de Esmeraldas de 1906. (García E. P., 2010)

De acuerdo a la documentación de la época el sismo produjo los mayores daños en la provincia de Esmeraldas, en poblaciones como Esmeraldas, Río Verde, Limones, La Tola y en la zona de Tumaco - Colombia. De acuerdo a las investigaciones llevadas a cabo por Egred (sin publicar), el sismo no generó consecuencias catastróficas en las zonas mencionadas debido a que no existían en la época grandes centros urbanos; sin embargo los estragos se extendieron hasta las provincias norteñas de la Sierra del Ecuador.

El NEIC-USGS señala que la altura de las olas del tsunami producido por el sismo fue sobre los 5 metros en la zona de Tumaco y al parecer afectó las costas cercanas al epicentro a menos de treinta minutos de ocurrido el sismo. (IG - EPN, 2012).



Figura 6: Destrucción total de viviendas

Este sismo es uno de los tantos que han ocurrido en la zona de subducción frente a Ecuador, y que resulta del choque de la placa Oceánica de Nazca con la placa continental Sudamericana. El Ecuador forma parte del Anillo de Fuego del Pacífico, que es una de las zonas con mayor actividad

sísmica en el planeta, y que en los últimos años ha experimentado por lo menos 3 sismos de magnitud grande (superior a magnitud 8), como son el terremoto de Sumatra de 2004 de magnitud 9.1 (Mw), el terremoto de Chile de 2010 de magnitud 8.8 (Mw) y el terremoto de Japón de 2011 de magnitud 9.0 (Mw), los cuales se caracterizaron no sólo por generar tsunamis que afectaron importantes zonas del mundo, sino que lastimosamente generaron un importante número de víctimas, pérdidas materiales y secuelas que serán superadas al mediano o largo plazo, como es el caso de Fukushima. (IG - EPN, 2012).

2.2.2.2 Sismo de 1914 (Antisana)

Violento movimiento sísmico que tuvo lugar en Pintag, provincia de Pichincha, cuyos efectos se sintieron en Cuenca e Ibarra. ($M_w=6.44$; epicentro: 0.6°S ; 78.42°W).

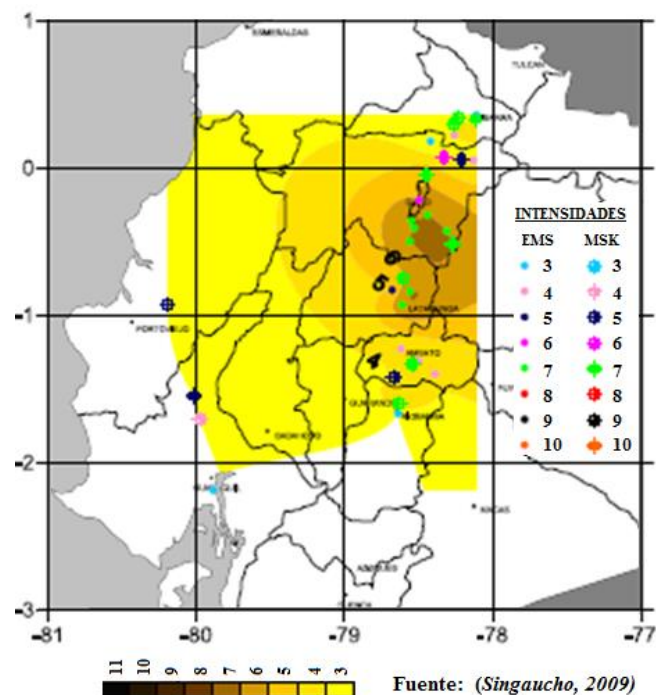


Figura 7: Isosistas del Sismo de Antisana

Acompañado de ruidos subterráneos, varias réplicas de intensidad III, el mismo día (14h:58m, 18h:26m y 20h:29m), y continuas réplicas hasta el mes de Junio, este fenómeno provocó sendos daños en las cercanías del monte Pullurima y en los alrededores del volcán Antisana, hubo eyecciones de lodo, arena y agua (licuefacciones) provenientes de cratercitos o grietas formadas a causa del sismo, deslizamiento en laderas del Pullurima y otros cerros aledaños, aluviones de greda negra que alcanzaron los 2m de alto y destrucción de varias viviendas en un poblado a 33km del Pullurima. (IG-EPN, 2010-2012)

2.2.2.3 Sismo de 1923

A este sismo se le ha asignado una intensidad de VII en Quito (del Pino y Yepes, 1990), aunque no se ha reportado destrucción en las poblaciones hacia el norte. (Almeida et al, 1998).



Fuente: Archivo Fotográfico del Banco Central del Ecuador

Figura 8: Viviendas destruidas después del evento telúrico

Su localización epicentral es en la zona de Machachi, especialmente al oeste de la población donde se produjeron los mayores efectos. Este evento puede atribuirse a la prolongación hacia el sur del sistema de fallas inversas de Quito o la prolongación de la falla Atacazo. (Eguez y Yepes, 1994).

2.2.2.4 Sismo de 1929 (Murco)

El Sismo de Murco, de magnitud $M_w=5.88$, con su epicentro en las coordenadas $0.05^\circ N$ y $78.48^\circ W$, afectó principalmente a las edificaciones de los sectores rurales de la provincia de Pichincha.

Casas total o parcialmente destruidas, especialmente aquellas de cal y ladrillo, torres de las iglesias afectadas seriamente, derrumbes y deterioro de los puentes y carreteras hasta Tambillo, pérdida de vidas humanas (8 muertos) y la completa destrucción de 46 casas en la población de Murco. (IG-EPN, 2010-2012)

2.2.2.5 Sismo de 1938 (Sangolquí)

Pese a ser un sismo superficial, ocurrido el 10 de agosto, con una magnitud de $M_w=5.8$; y epicentro: $0.40^\circ S$; $78.41^\circ W$ se localizó en las cercanía de El Tingo y Alangasí, poblaciones que resultaron completamente destruidas, cuyos efectos se sintieron, en menor escala en Quito, Sangolquí, Tumbaco y Conocoto.

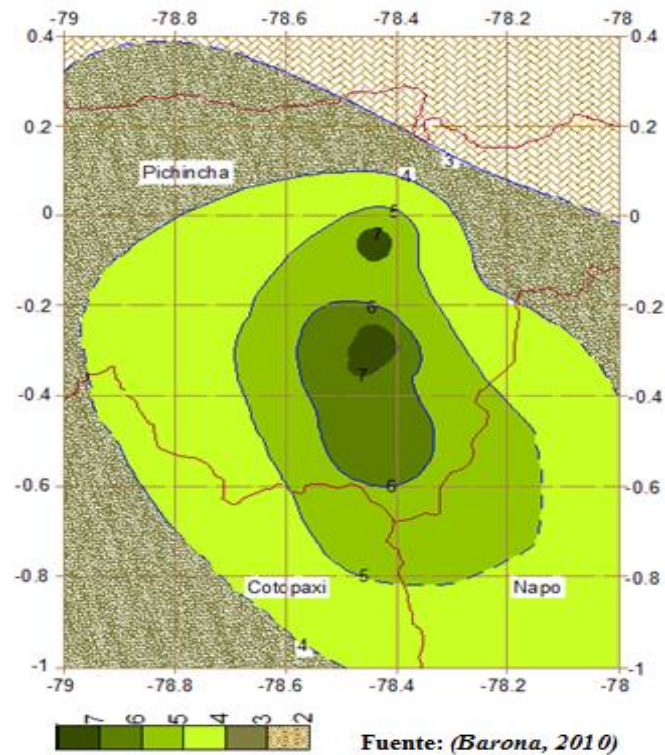


Figura 9: Isosistas del Sismo de Sangolquí.

Este evento provocó la aparición de grandes y abundantes grietas en el terreno, deslizamientos en cerros y taludes, ruidos subterráneos, levantamiento vertical del terreno seguido por un asentamiento, casas de ladrillo con daños severos y casas de adobe completamente destruidas. (Instituto Geofísico EPN; José Egred, 1999)



Figura 10: Consecuencias del Sismo de 1938. (Quishpe, 2012)

2.2.2.6 Sismo de 1942 (Bahía de Caráquez)

Uno de los terremotos más poderosos generados en la zona de subducción durante el pasado siglo, ocurrió el 14 de mayo, en la zona de subducción frente a las costas de Bahía de Caráquez. Con una magnitud de $M_s=7,9$; y coordenadas epicentrales: 0.40°S ; 78.41°W generó intensidades de VI en Quito. (Del Pino y Yepes, 1990).

Aunque este sismo no ocasionó daños de relevancia en Quito, produjo grandes daños en Guayaquil; en estructuras de 4 y 5 pisos denominadas “rasca nubes” por su altura.

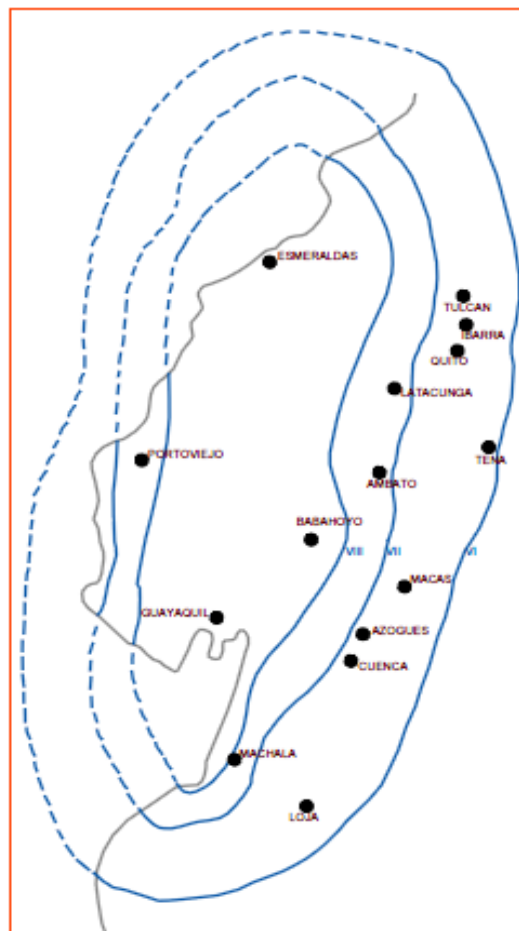


Figura 11: Isosistas Sismo de Manabí 1942. (Quishpe, 2012)

2.2.2.7 Sismo de 1944 (Pastocalle – Toacazo)

Evento acaecido el 15 de septiembre, cuya magnitud registrada es de $M_w=5.92$ y epicentro: 0.71°S ; 78.7°W causó destrozos en varios pueblos de Cotopaxi. Pastocalle quedó totalmente destruido, ignorándose todavía si hubo víctimas. (Sangurima, 2013)

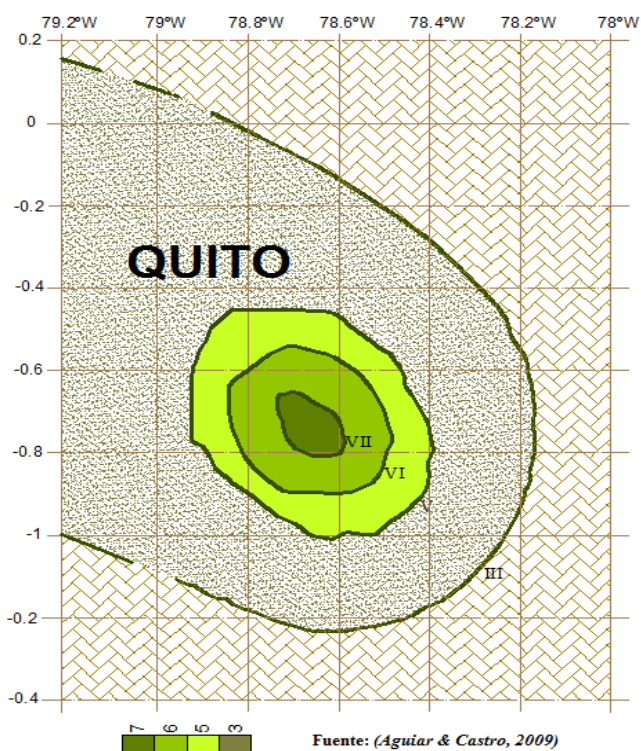


Figura 12: Isosistas del Sismo de Pasto Calle

2.2.2.8 Sismo de 1955 (Atahualpa)

Terremoto en la provincia de Imbabura y Norte de Pichincha, el 20 de mayo de 1955. De magnitud $M_w=6.14$ y epicentro: 0.28°N ; 78.39°W ocasionó daños en poblaciones de la provincia del Carchi, muchas viviendas (especialmente rurales) resultaron destruidas por completo y gran cantidad de las que quedaron en pie, eran inhabitables. Serios cuarteamientos en

muchas otras, de diversa calidad de construcción. En Quito los daños fueron menores.

Se presentó gran cantidad de deslizamientos de cerros y taludes, especialmente en las carreteras Atuntaqui - Cotacachi, Cotacachi - Intag y Otavalo - Cotacachi. Iguales efectos en todo el recorrido del río Ambuquí y sus quebradas afluentes y en el río Blanco, que quedó represado y cuyo desfogue causó daños en la planta eléctrica de Otavalo.

En el contorno de la laguna de Cuicocha, se produjeron 65 deslizamientos, siendo los de mayor magnitud, los que se localizaron en el flanco occidental. A causa de los deslizamientos subió el nivel del agua en más de 10 m. y se reportaron 6 desaparecidos. Muchas réplicas sentidas, hasta una semana después del evento principal. Fueron especialmente frecuentes en el sector de La Aguada, Apuela y sectores aledaños.

2.2.2.9 Sismo de 1958 (Latacunga)

Se produjo el 24 de enero a las 8h45min, en la provincia de Cotopaxi, su magnitud registrada es de $M_w=5.0$ y de epicentro: 0.98°S ; 78.59°W . En el sector de Lacoa hacia Belisario, se produjeron grietas y se cubrió la carretera totalmente por deslizamientos de tierra. Las pérdidas económicas fueron difíciles de establecer, ya que se produjo dos movimientos telúricos adicionales en los días posteriores al primer evento.

2.2.2.10 Sismo de 1960 (Pasa)

El Sismo de Pasa, de magnitud $M_w=5.97$, con su epicentro localizado en las coordenadas 1.20°S y 78.70°W , afectó principalmente a las ciudades de Latacunga y Riobamba, con efectos menores en las edificaciones de los sectores rurales de la provincia de Pichincha.

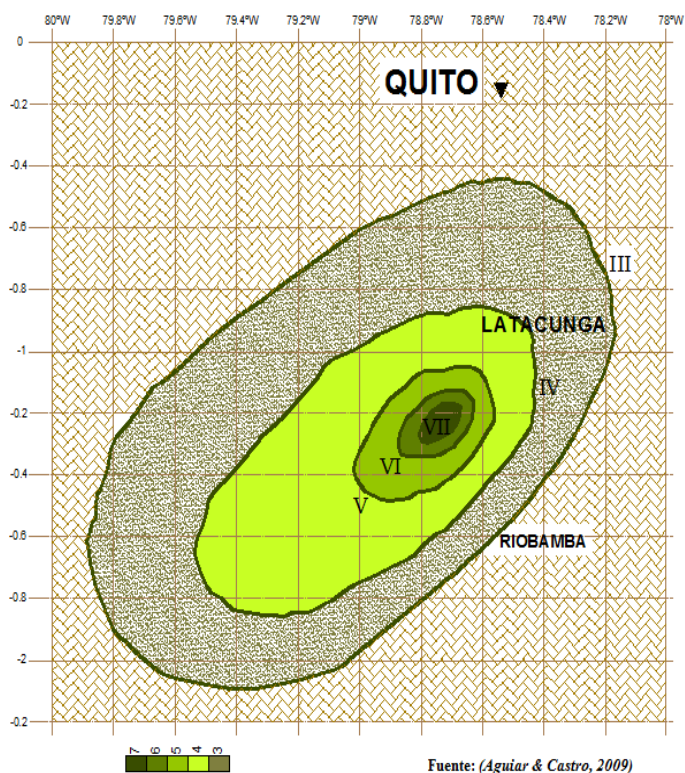


Figura 13: Isosistas del Sismo de Pasa

2.2.2.11 Sismo de 1962 (Cusubamba)

Sismo con caracteres de terremoto sacudió zona central del país. Las informaciones llegadas de distintos lugares de Cotopaxi determinan que siendo la 1h39m se produjo un terremoto, la gente alarmada abandonó apresuradamente sus hogares lanzándose a las calles y plazas donde pasaron el resto de la noche.

Las mismas informaciones relatan sobre asentamientos de tierra ocurridos en la region y la apertura de grandes grietas en las faldas de cerro Casahuala en conexión con el Cuturivies y el cerro Conchacapac.

2.2.2.12 Sismo de 1976 (Pastocalle)

Se produjo en la madrugada del 6 de Octubre en la provincia de Cotopaxi y causó pánico en Quito. Se localizó en las coordenadas epicentrales: 0.727°S ; 78.734°W y su magnitud fue de $M_w=7.4$. Dejó como saldo trágico ocho muertos entre los moradores de los sectores mayormente afectados. (Sangurima, 2013)

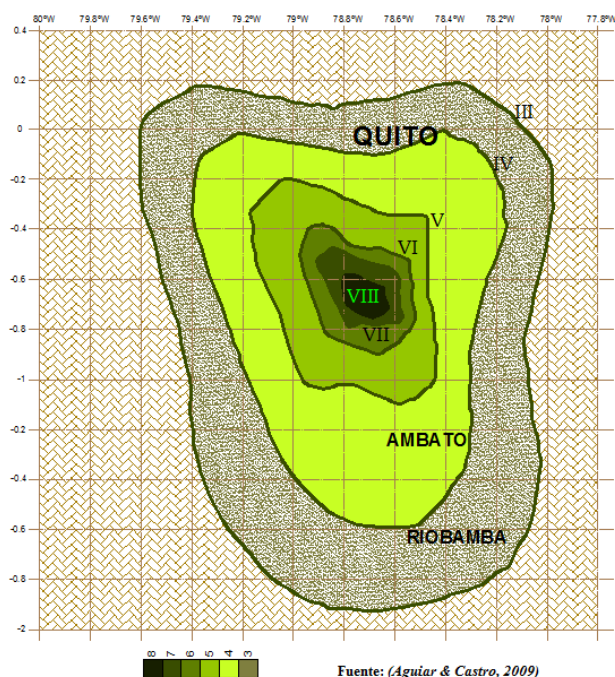


Figura 14: Isosistas del Sismo de Pastocalle

2.2.2.13 Sismo de 1987 (Baeza)

El 5 de marzo de 1987 durante la noche, con una magnitud de $M_w=7.0$, coordenadas epicentrales: 0.08°S ; 77.80°W y profundidad focal de 16Km,

ocurrieron dos sismos de 80 Km al oriente de la ciudad de Quito, afectando un área importante, principalmente las provincias de Napo, Imbabura, Pichincha y Carchi.

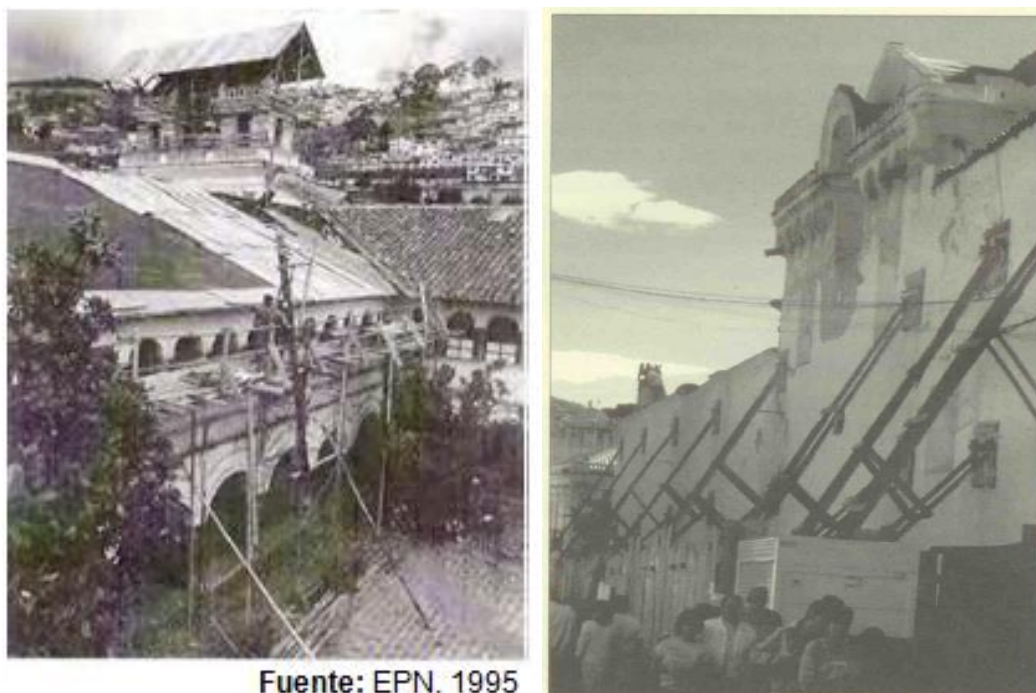


Figura 15: Edificaciones de adobe afectadas en el terremoto de 1987

Destrucción de varios tramos del oleoducto Trans-Ecuatoriano, que obligó a la suspensión del bombeo de petróleo por varios meses, con serios efectos en la economía nacional.



Figura 16: Destrucción de varios tramos del oleoducto Trans-Ecuatoriano

Destrucción de carreteras y puentes. Muchos pueblos quedaron aislados. Colapso total de muchas casas, especialmente en el sector rural. Gran cantidad de casas sufrió destrucción parcial.

Daños de consideración en templos coloniales, en Quito y otras ciudades de la provincia de Imbabura. Grandes deslizamientos de tierra en taludes de carreteras y laderas de montes en la Región Oriental, destruyendo casas, sembríos, etc. La cifra total de muertos ascendió a 25.000, sin contar con los más de 4.000 desaparecidos. (Pérez)

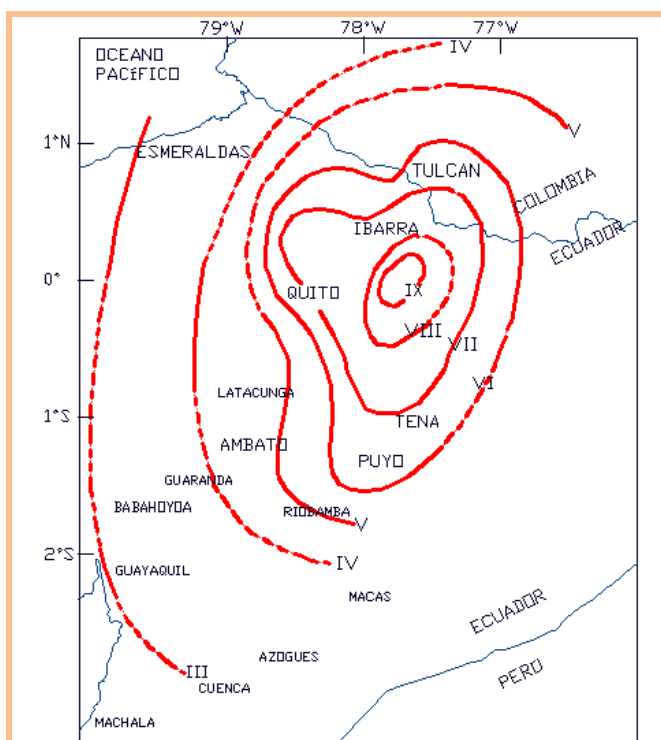


Figura 17: Isosistas del sismo de Baeza 1987

2.2.2.14 Sismos de 1990

El 10 de agosto de 1990 a las 22h00 (tiempo local), se produjo un sismo de profundidad somera y magnitud 5.0 en la escala de Richter, localizado a 4

kilómetros al Noreste de Pomasqui, 4.8 kilómetros al Sureste de San Antonio de Pichincha, 10 km al Noroeste de Guayllabamba y 15 kilómetros al Noreste del aeropuerto de Quito.

A pesar de ser un sismo de magnitud moderada, sus efectos fueron notorios: 3 personas muertas y 417 familias damnificadas (5000 personas afectadas aproximadamente), 900 viviendas afectadas.



Fuente: Diario Hoy 13/08/1990

Figura 18: Vivienda de hormigón armado afectada por el sismo. Pomasqui

Daños a monumentos e iglesias coloniales en las zonas de Pomasqui, San Antonio de Pichincha y Calderón; 118 deslizamientos de tierra producidos a lo largo de la Panamericana Norte - entre Guayllabamba y el río Pisque - por lo que dicha vía fue cerrada por tres días en una longitud de 12 kilómetros. Las canteras ubicadas en la zona de Pomasqui fueron cerradas indefinidamente por temor a posibles deslizamientos y colapsos por

efecto de las réplicas, lluvias e inestabilidad natural del material. (IG-EPN, 2011)

Los daños causados por este sismo son muy grandes para la magnitud relativamente baja del mismo. Esto se debe a varios factores: la mala calidad del material de construcción (adobe y bahareque), falta de control y vigilancia en el diseño y construcción de las obras; y, efectos de amplificación de la señal sísmica por geología local (suelo arenoso y poco consolidado, lo que produjo una intensidad VII MSK en la zona epicentral).

2.2.2.15 Sismos de 1998

El 4 de Agosto de 1998 se produce un fuerte sismo en las inmediaciones de la ciudad de Bahía, con una magnitud $M_s=7,1$, sentido en todo el país, tiene efectos destructivos en una buena parte de la zona costera.

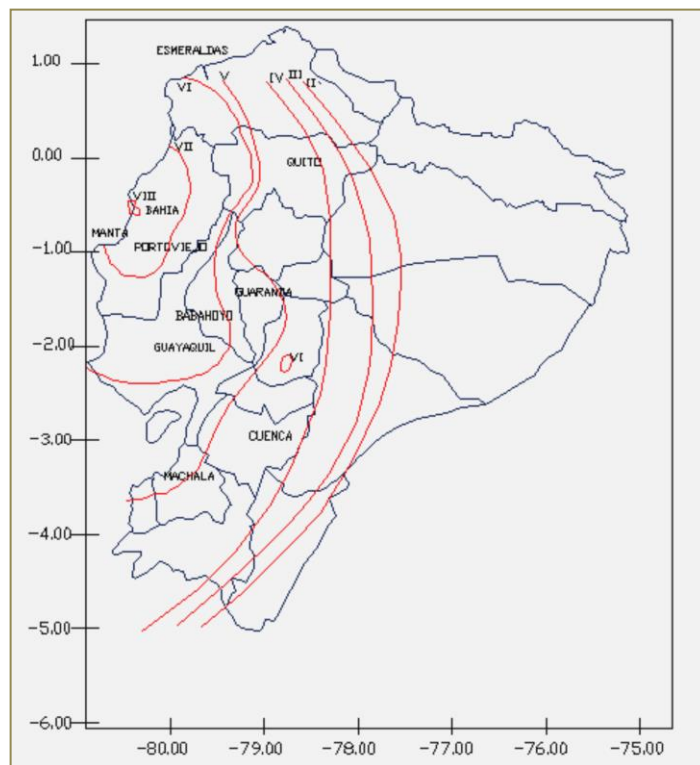


Figura 19: Isosistas del Sismo de Bahía 1998.

La intensidad en Bahía se estimó en grado IX, con el colapso de algunos edificios modernos, Manta, Portoviejo y Pedernales, se encuentran dentro de la isosista de VIII, Guayaquil, Babahoyo y Cojimíes con intensidades entre VII y VI (Ceresis et al, 1999). Este sismo produce intensidades de IV a V en Quito.

2.3. SISMO DE QUITO, 1859

El martes 22 de marzo, a las 0h30 se sintió un espantoso terremoto que dejó a Quito arruinada (hoy.com.ec, 1995). Con una magnitud M_w de 7.2 y un epicentro instrumental localizado en las coordenadas 0.02°N y 78.75°W , este sismo se sintió con más intensidades en la ciudad de Quito.

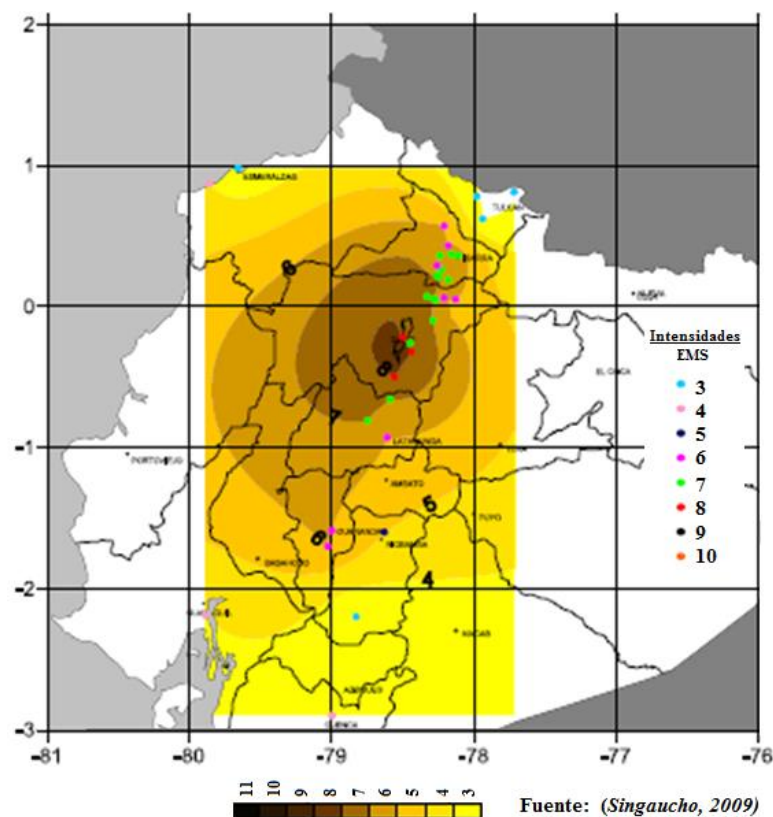


Figura 20: Isosista del Sismo de Quito (22-Marzo-1859)

Provocó grandes daños en edificios, averió muchas iglesias en Quito, además del Palacio Presidencial, colegios y casas particulares. Según registros, la destrucción provocada por este movimiento telúrico se sintió con igual intensidad en las provincias de Cotopaxi, Pichincha e Imbabura, por lo que se sospecha que sea un sismo de subducción, sin embargo, sus valores de intensidad y magnitud se encontraron considerándolo de naturaleza superficial. (Beauval, et al., 2010)



Figura 21: Daños registrados en la Iglesia de San Francisco

Se estima que fue de larga duración (entre 1 y 2 minutos). Sentido prácticamente en todo el país. Se sintieron serios estragos en poblaciones y haciendas del valle de Los Chillos, la iglesia de La Merced de Quito fue seriamente afectada, además grandes grietas en el valle de Los Chillos, muchos muertos en Machachi, Chillogallo y otras poblaciones del valle.

Aunque son muy vagas las cifras dadas por los historiadores, el número de víctimas en Quito pudo haber ascendido a 10, mientras que reportes de sitios cercanos como Chillo y Chillogallo, hablan de por lo menos 20 muertos más en una sola hacienda. Por otro lado, en la provincia de Imbabura también se produjeron estragos de mucha consideración.

Por la información que se ha podido obtener del estudio de Del Pino y Yepes (1990), el terremoto que parece haber producido los mayores estragos en los monumentos religiosos de la capital es precisamente éste de 1859, al que se le ha asignado una intensidad de nueve grados MSK en Quito.

Adicionalmente se puede pensar que se trata de un sismo relativamente profundo y fuerte en la zona de Benioff, tal vez ubicado entre Quito e Ibarra, a decenas de kilómetros de profundidad. (Eguez y Yepes, 1993).

Este es uno de los sismos que más ha afectado a la ciudad de Quito por este motivo ha sido estudiado por Celine Beauval et, al. 2011 aplicando el método de Blake- Shebalín. (García H. , 2013)

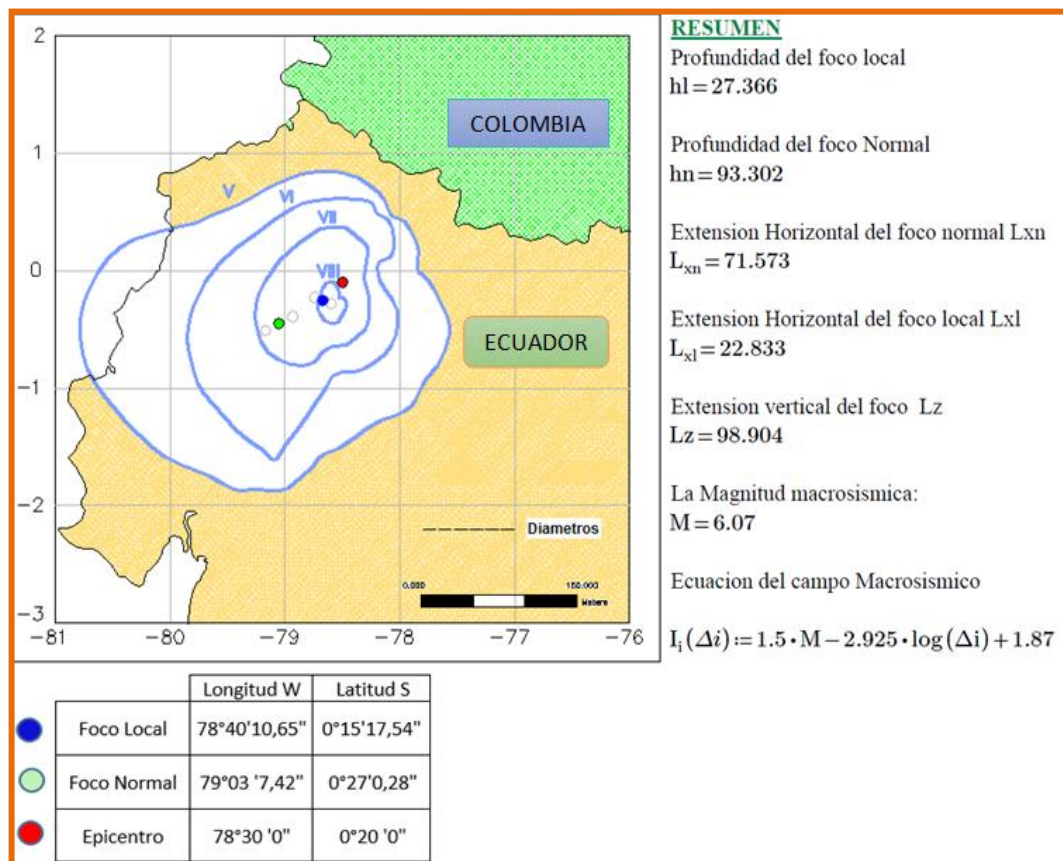


Figura 22: Resultados de la aplicación de la metodología de Blake-Shebalín. (García H. , 2013)

CAPÍTULO 3 PROPAGACIÓN DE ONDAS EN UNA DIMENSIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre un deslizamiento en una falla geológica, se generan ondas de cuerpo (ondas P y S) que se propagan por el terreno en todas las direcciones. Estas ondas se reflejan y refractan en muchas direcciones al pasar por los diferentes materiales geológicos y al llegar cerca de la superficie de la Tierra, donde encontramos estratificación horizontal del terreno, éstas se refractan casi verticalmente (*Figura 23*).

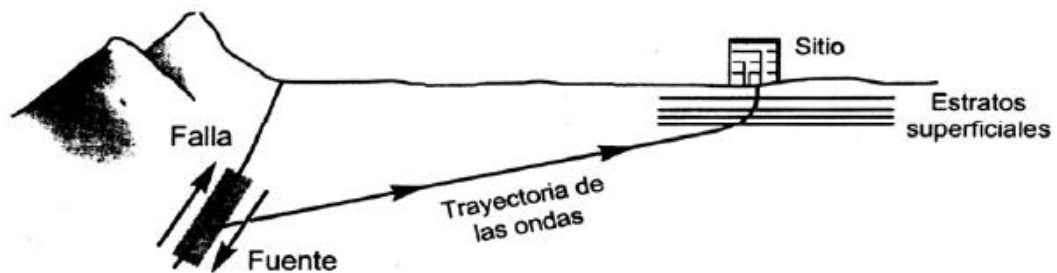


Figura 23: Trayectoria de las ondas

El análisis de la respuesta unidimensional del terreno se basa en las siguientes hipótesis:

- Todos los estratos, al llegar cerca de la superficie de la Tierra, son horizontales.
- La superficie del depósito es una frontera libre y no existe ninguna estructura o excavación cercana.

- La respuesta del depósito es predominantemente causada por la propagación vertical de ondas SH desde la roca subyacente.
- El depósito de suelo y la superficie de la roca son infinitos en la dirección horizontal.

Una de las técnicas utilizadas para realizar el análisis de respuesta del terreno es el uso de funciones de transferencia, FT.

Estas funciones se pueden usar para expresar varios parámetros de respuesta (desplazamiento, velocidad, aceleración, esfuerzo cortante y deformación de corte o angular) en función de un parámetro de excitación del movimiento (desplazamiento o aceleración en roca). (Shelley, Contreras, Giralt, & Blanch, 2000)

3.2. PROPAGACION DE ONDAS

La propagación de ondas de esfuerzos en un medio se comprende fácilmente si se asume que el medio es ilimitado en la dirección que se propaga la onda. La idealización más sencilla es la onda que viaja a lo largo de una barra de longitud infinita (propagación unidimensional) y homogénea.

En una barra se pueden propagar en dirección paralela al eje 3 tipos de ondas: las ondas longitudinales que dilatan y contraen la barra a lo largo del eje originando cambios volumétricos sin desplazamiento lateral; las ondas torsionales que rotan la barra alrededor del eje sin cambios volumétricos ni desplazamiento lateral ni longitudinal; y las ondas transversales que

desplazan la barra perpendicularmente al eje sin desplazamiento longitudinal ni cambio volumétrico. (Shelley, Contreras, Giralt, & Blanch, 2000)

Si se toma una barra que en su estado no perturbado está representada por la línea punteada (*Figura 24*) y se hace vibrar golpeándola transversalmente, adopta la forma de las líneas continuas en un instante particular.

Suponiendo que cada elemento de la barra se mueve hacia arriba y hacia abajo, sin que tenga movimiento longitudinal z , entonces, el desplazamiento transversal de un elemento en un instante particular será x .

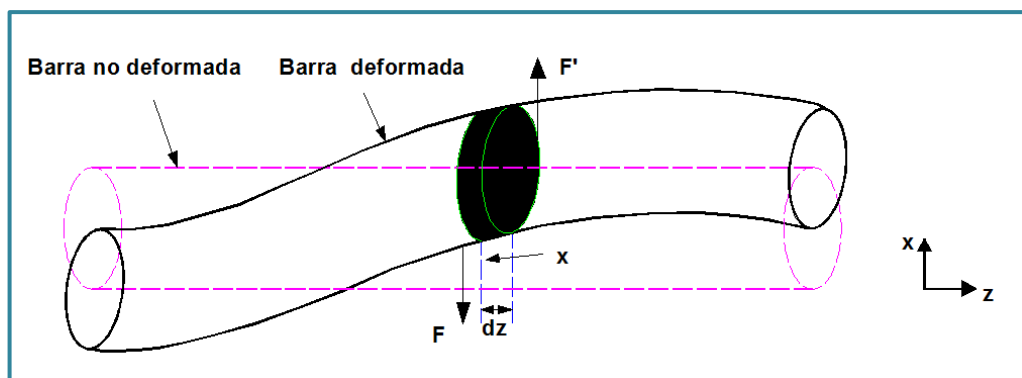


Figura 24: Barra sometida a vibraciones

Este desplazamiento x , también es función de la posición z , puesto que, si fuera constante, correspondería a un desplazamiento paralelo a la barra. Como resultado de su deformación, cada sección de longitud dz está sometida a las fuerzas opuestas F y F' que son transversales a la barra (*Figura 25*). Estas fuerzas son producidas por aquellas porciones de la barra que están a cada lado del elemento. (Shelley, Contreras, Giralt, & Blanch, 2000)

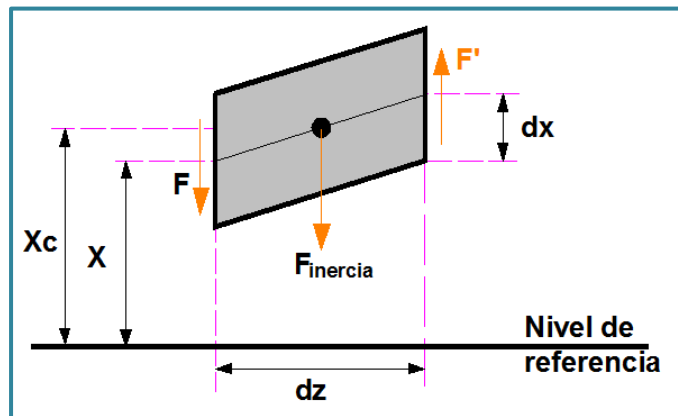


Figura 25: Elemento diferencial

La magnitud dx/dz , que es el cambio de desplazamiento transversal por unidad de longitud a lo largo de la barra.

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \rightarrow \text{Deformación transversal o angular} \quad (3-1)$$

La fuerza tangencial o transversal por unidad de área,

$$\tau = \frac{F}{A} \rightarrow \text{Esfuerzo tangencial o cortante.} \quad (3-2)$$

La fuerza neta ejercida en el elemento diferencial es:

$$F' - F = dF \quad (3-3)$$

La cual origina un movimiento acelerado en el elemento diferencial. Si ρ es la densidad del material de la barra, la masa del elemento diferencial es:

$$dm = \rho Adz \quad (3-4)$$

Donde,

Adz = Volumen del elemento diferencial.

La aceleración de esta masa genera una fuerza inercial aplicada en el centro de la masa, en x_c , del elemento diferencial.

$$X_c = x + \frac{dx}{2} \quad (3-5)$$

Por tanto,

$$F_{inercia} = dm \cdot a_c = dm \frac{d^2 x_c}{dt^2} \quad (3-6)$$

Reemplazando la ecuación (3-5) en la ecuación (3-6), y operando tenemos:

$$F_{inercia} = dm \frac{d^2}{dt^2} \left[x + \frac{dx}{2} \right] = dm \left[\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{2} \right] \quad (3-7)$$

Si se desprecia la derivada de orden superior y se reemplaza a dm por la ecuación (3.4), la fuerza inercial que experimenta el elemento diferencial queda definida como:

$$F_{inercia} = \rho A dz \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3-8)$$

Aplicando el concepto básico de equilibrio de fuerzas al elemento diferencial,

$$dF = F_{inercia} \quad (3-9)$$

Se obtiene:

$$dF = \rho A dz \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3-10)$$

La relación entre fuerza y desplazamiento depende directamente del modelo de comportamiento que se asocia a la barra. Si se asocia en modelo visco elástico tipo Kelvin-Voigt que relaciona el esfuerzo cortante (τ) y la deformación angular (γ) $\tau = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt}$ y se aplica el concepto de

deformación angular (Ecuación 3.1) y esfuerzo cortante (Ecuación 3.2), se obtiene la relación fuerza-desplazamiento siguiente:

$$F = A \left[G \frac{dx}{dz} + \eta \frac{d^2 x}{dz dt} \right] \quad (3-11)$$

Por lo tanto:

$$dF = A \left[G \frac{d^2 x}{dz} + \eta \frac{d^3 x}{dz dt} \right] \quad (3-12)$$

Al igualar las Ecuaciones (3.10) y (3.12) se obtiene la ecuación de onda transversal o ecuación del movimiento ondulatorio transversal:

$$G \frac{d^2 x}{dz^2} + \eta \frac{d^3 x}{dz^2 dt} = \rho \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3-13)$$

Donde,

G es el módulo de rigidez al corte (Pa),

η es el coeficiente de viscosidad (Pa*s) del modelo de Kelvin Voigt.

ρ es la densidad del material de la barra (kg/m³) y

$x(z,t)$ es el desplazamiento transversal de un elemento diferencial de la barra en un instante particular.

Si suponemos un estrato de suelo homogéneo y con un comportamiento visco-elástico como el de una barra infinita (Kelvin-Voigt) podemos tomar esta misma Ecuación (3-13) para utilizarla como la que rige la propagación

de ondas de corte a través de éste estrato de suelo. (Shelley, Contreras, Giralt, & Blanch, 2000)

3.2.2. ANALISIS DE LA ECUACIÓN SIN AMORTIGUAMIENTO

Es interesante analizar la situación de vibración libre del depósito de suelos sin amortiguamiento ($\eta=0$). Reemplazando esta condición en la ecuación (3-13) se tiene:

$$G \frac{d^2 x}{dz^2} = \rho \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3-14)$$

$$G \frac{d^2 x}{dz^2} - \rho \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \quad (3-15)$$

La solución de esta ecuación es del tipo:

$$x = f(z + vt) + g(z - vt) \quad (3-16)$$

Donde,

v = Constante que se determina reemplazando esta solución en la ecuación (3-15):

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = f'' + g'' \text{ y } \frac{d^2 x}{dt^2} = (f'' + g'')v^2 \quad (3-17)$$

Con lo cual resulta que esta constante equivale:

$$G - \rho v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3-18)$$

Al analizar la parte:

$$x = f(z + vt) \quad (3-19)$$

Y estudiar el tiempo y lugar donde se produce un determinado movimiento u_0 , es posible deducir que:

$$x_0 = f(z + vt) \Rightarrow z - vt = cte = b$$

Gráficamente esta condición se presenta en la Figura 26, donde se puede concluir que el mismo corrimiento u_0 se va produciendo en el tiempo en la medida que z disminuye.

Esta situación se interpreta como una onda que va viajando hacia abajo a una velocidad v . Como se está analizando una onda de corte puro, la velocidad de v corresponde a la velocidad de propagación de la onda de corte, V_s . (Verdugo)

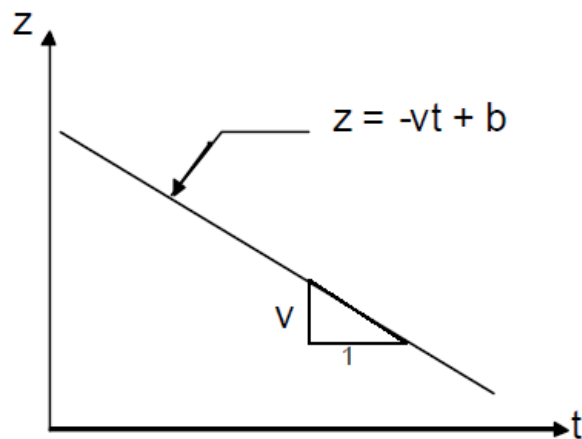


Figura 26: Condición espacio-tiempo asociada a un desplazamiento x_0 .

La velocidad de onda de corte está relacionada con las propiedades del suelo a través de la siguiente expresión:

$$V_s = v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3-20)$$

Análogamente, al analizar la segunda componente de la solución de la ecuación de onda se obtiene que ésta representa una onda de corte viajando en sentido vertical ascendente.

3.3. USO DEL PROGRAMA DEGTRA

DEGTRA A4 es un programa elaborado en la Universidad Autónoma de México por el Doctor Mario Ordáz, permite visualizar señales y manipularlas, se pueden usar filtros básicos y avanzados, evaluar la coherencia, correlación cruzada, integrar, derivar, calcular espectros de amplitudes de Fourier, mostrar en forma de odograma los registros sísmicos de componentes diferentes, rotar, sumar, restar, corregir línea base de diversas formas y también permite calcular espectros de respuesta lineales o no lineales, así como la respuesta de osciladores de un grado de libertad o Intensidad de Arias. (Verdugo)

3.3.1. Descripción del Programa

DEGTRA A4 permite realizar múltiples operaciones con un registro acelerográfico, sin embargo a continuación se menciona únicamente el procedimiento llevado a cabo en el desarrollo de este proyecto.

Para poder procesar una señal lo primero que se hace es abrir una ventana de trabajo con el icono respectivo, como se muestra en la Figura 27. (Ordáz, Castellanos, & Zapata, 2005)

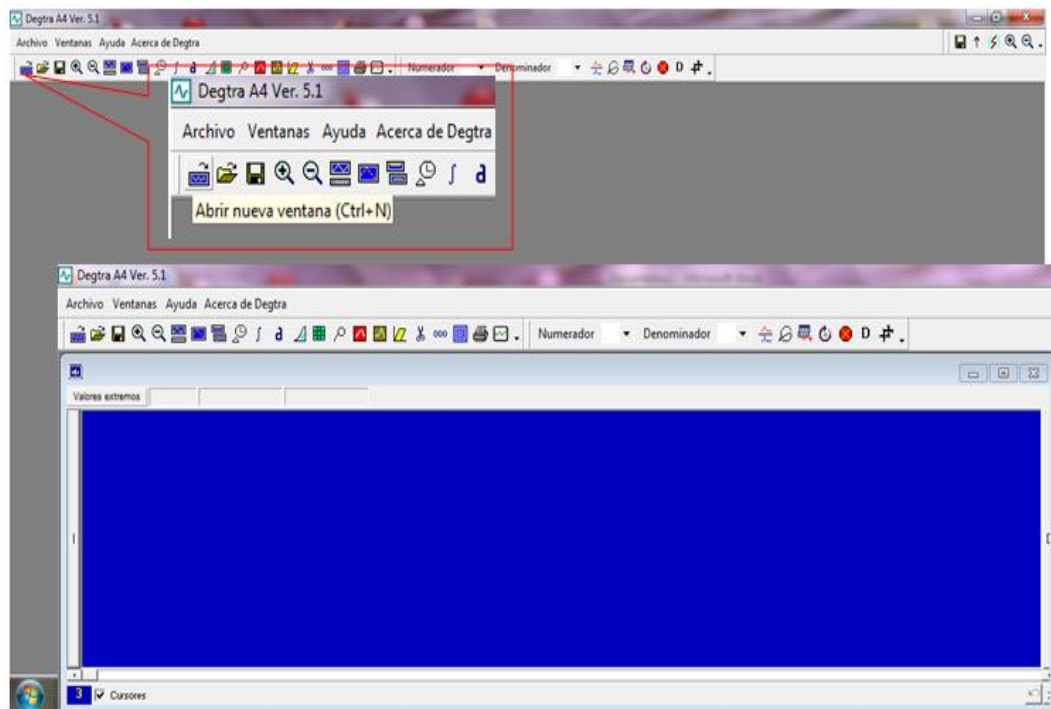


Figura 27: Nueva ventana en DEGTRA A4.

Se escoge a continuación el registro acelerográfico mediante el menú “*Archivo*” y se elige la opción “*Leer acelerograma*”, se abre el registro con el que se desea trabajar y una ventana como la que se muestra en la Figura 28 aparecerá, es importante conocer que el máximo número de datos permitido en cada registro es $NP_{MAX} = 16386 = 214 + 2$, si un registro posee más datos, el programa los ignorará y solamente trabajará con los 16386 datos iniciales. (Ordáz, Castellanos, & Zapata, 2005)

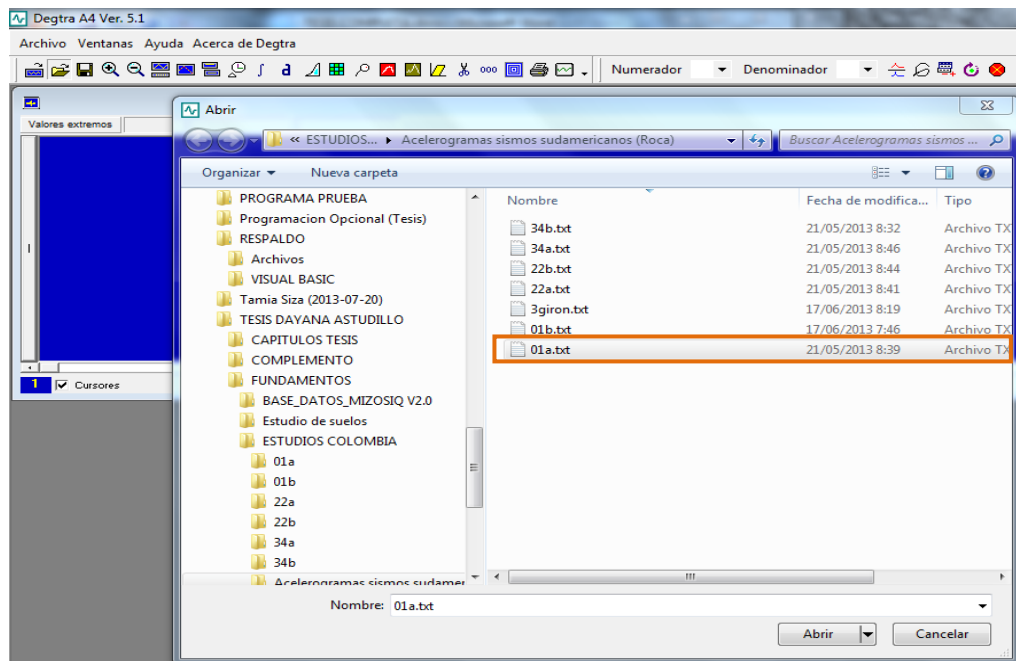


Figura 28: Ventana para escoger el registro acelerográfico.

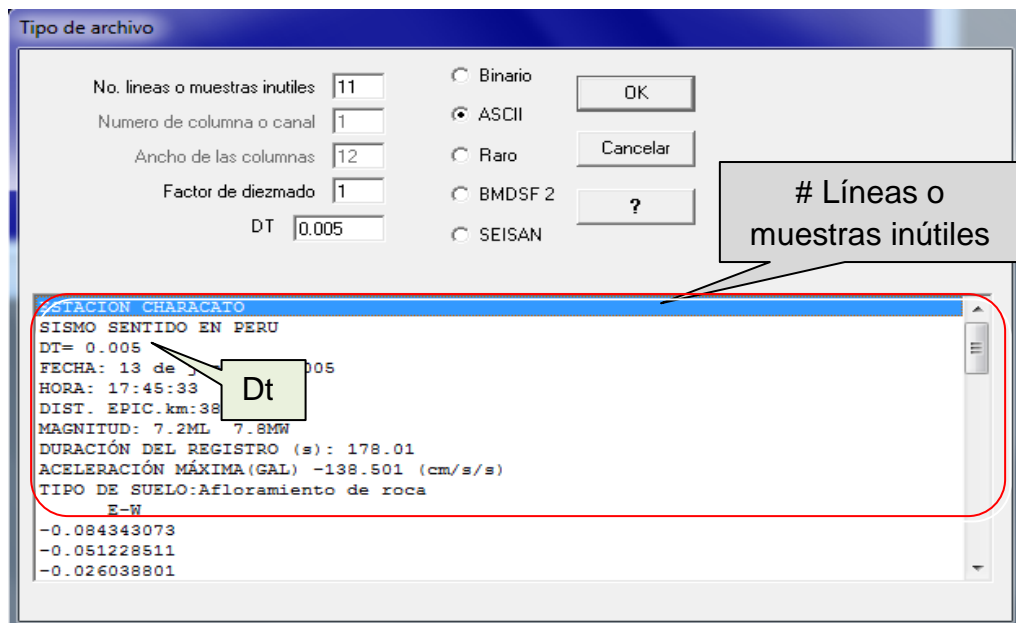


Figura 29: Pantalla para lectura del acelerograma

En la pantalla mostrada en la figura 29 se elige el tipo de archivo ASCII, ya que la base de registros de este estudio está en este formato, se escribe el número de líneas inútiles del registro, se coloca el intervalo de tiempo con

el que los datos fueron tomados y se escribe el factor de diezmado N, para este proyecto $N = 1$. Con el valor de N se leerá sólo una de cada N muestras. El programa entonces grafica el acelerograma.

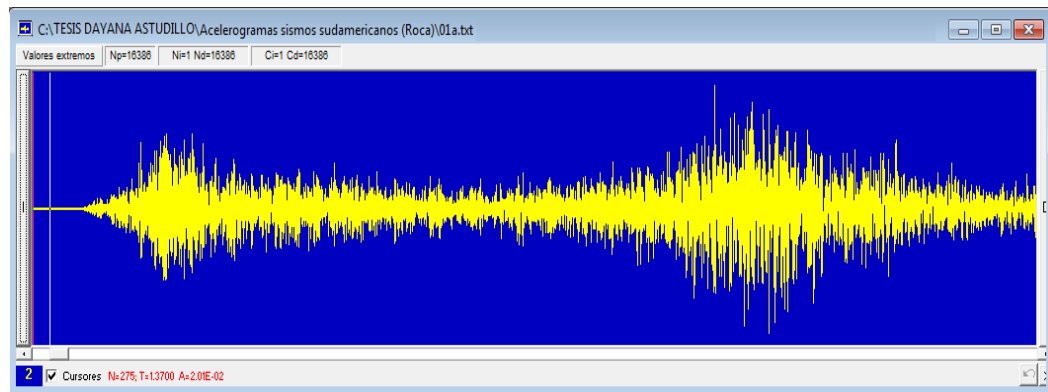


Figura 30: Acelerograma

El resultado se presenta en forma gráfica y sus unidades corresponden a las unidades del acelerograma, por ejemplo para el estudio se utilizaron registros con aceleraciones en $\text{gals} = \text{cm/s}^2$.

Una vez que se tiene la ventana del acelerograma, tal como se aprecia en la Figura 30 se pueden realizar varias operaciones, en este caso nos centraremos en el cálculo del espectro Fourier y del espectro de respuesta elástico, para lo cual se debe seleccionar el icono correspondiente.

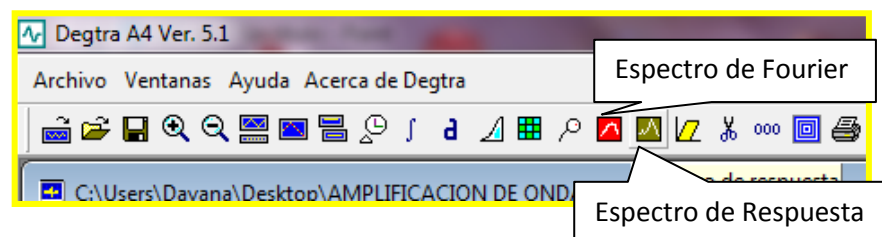


Figura 31: Opción “Espectro de Respuesta” y “Espectro de Fourier”

Se asignan los parámetros mostrados a continuación:

- NT: Número de períodos o puntos para los que se calcula el espectro.
- Tmin: Período inicial más bajo del espectro.

- Tmax: Período final más alto del espectro.
- Csi: Amortiguamiento, expresado como porcentaje del amortiguamiento crítico.

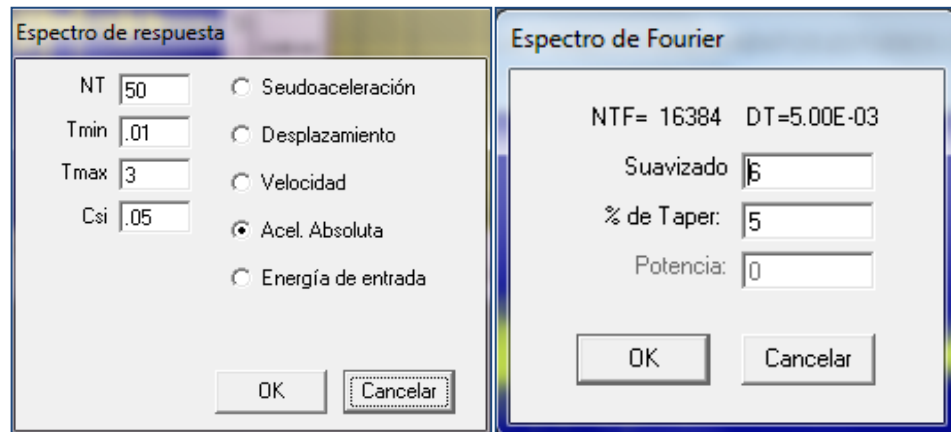


Figura 32: Ventana para la determinación del Espectro de Respuesta y el Espectro de Fourier

En la Figura 32 se muestran los parámetros utilizados para este proyecto, $NT=300$, $T_{min} = 0.01$, $T_{max} = 3$, $Csi = 0.05$, $Suavizado= 6$, $\% \text{ de Taper}= 5$ y se selecciona además el tipo de espectro (para el caso del espectro de respuesta).

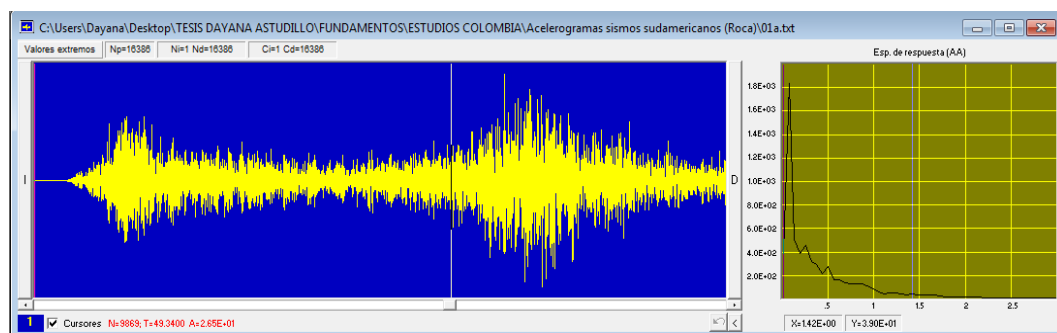


Figura 33: Espectro de respuesta de aceleración

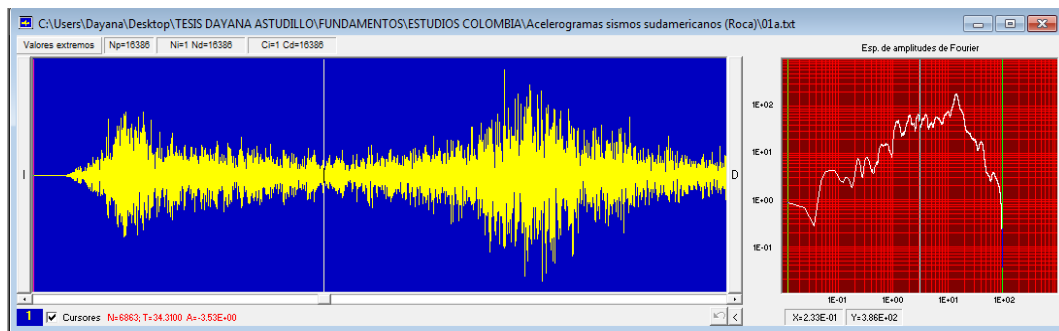


Figura 34: Espectro de Fourier

Para obtener los datos del espectro basta hacer clic en el encabezado y seleccionar “copiar” como se muestra en la Figura 35. Los datos del espectro se pueden pegar en un documento de Texto cualquiera e incluso en Microsoft Excel.

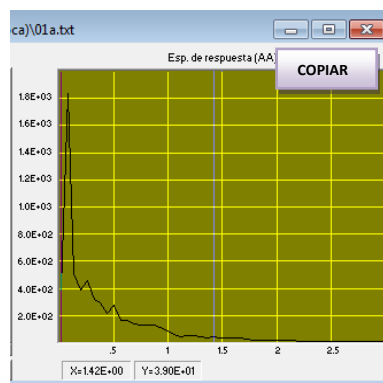



Figura 35: Opción copiar datos del espectro.

Para ingresar la información referente al perfil del suelo, seleccionamos el icono  (Propagación 1D), se nos muestra una pantalla como la indicada en la figura 37.

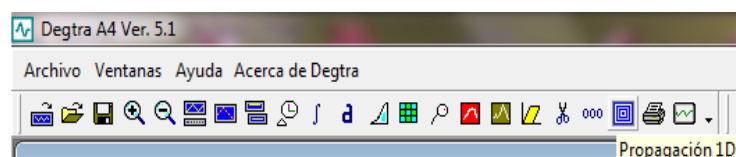


Figura 36: Barra de herramientas. Opción “Propagación 1D”

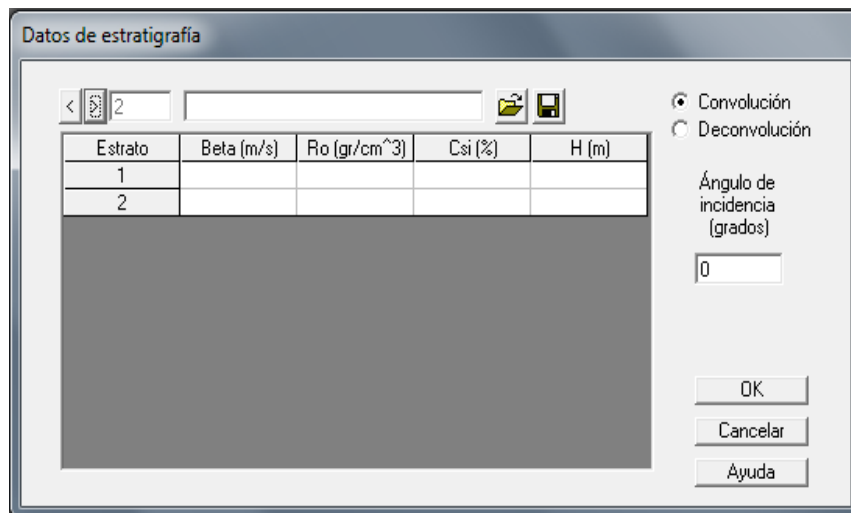


Figura 37: Datos de estratigrafía

Ingresada la información de la estratigrafía determinamos nuevamente el espectro de Fourier y el espectro de respuesta.

3.3.2. Ejemplo de Aplicación

Una vez ejecutado el programa, se abre una ventana en la cual se ingresa el registro sísmico. Es necesario definir el número de líneas o muestras inútiles y DT.

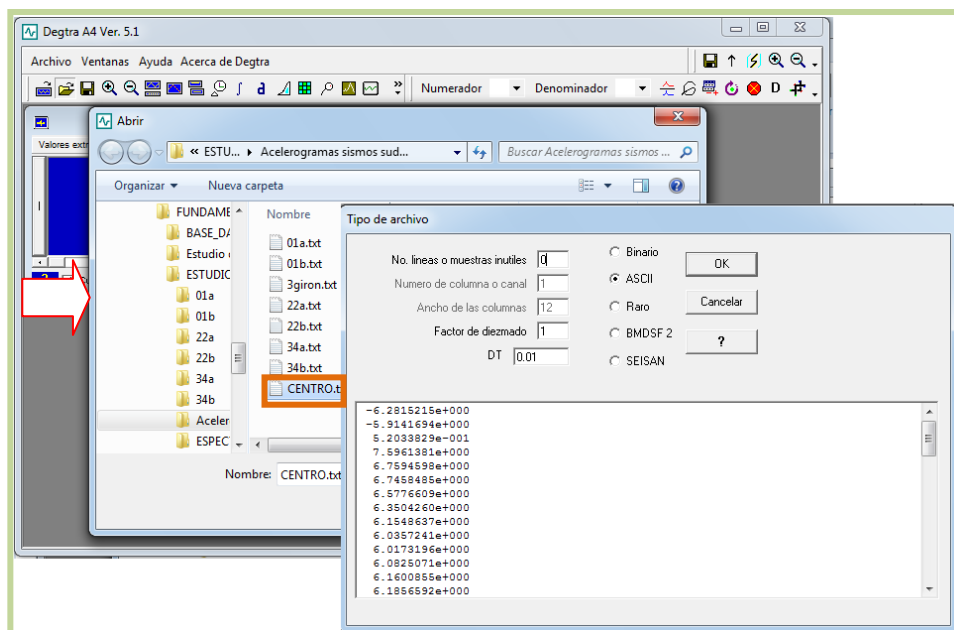


Figura 38: Definición del tipo de archivo de datos.

El archivo de datos que se aprecia en la figura 38 corresponde al registro del sismo “EL CENTRO”, registrado en Estados Unidos en el año de 1840.

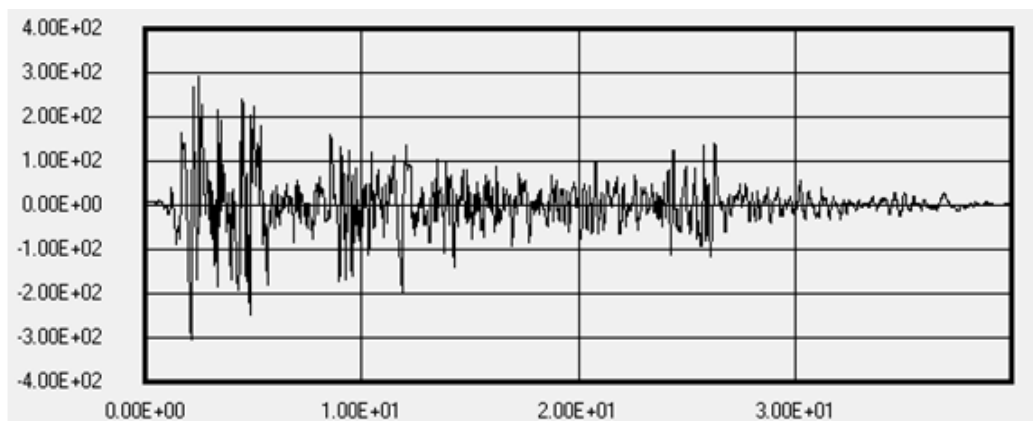


Figura 39: Acelerograma correspondiente al sismo “El Centro”

A continuación ingresamos la información referente a la estratigrafía de zona, para este ejemplo consideramos la siguiente información:

Tabla 3.1: Estratigrafía para el ejemplo de aplicación

Barrio:	La Gasca
Zona de Suelo:	MSQ6
Profundidad Promedio:	59.00m

Velocidad Vs [m/s]	Espesor de la Capa [m]	Peso específico [γ]
260.00	4.0	1.8
284.00	6.0	1.8
290.00	9.0	1.8
400.00	5.0	2.0
460.00	5.0	2.0
520.00	6.0	2.0
570.00	24.0	2.0

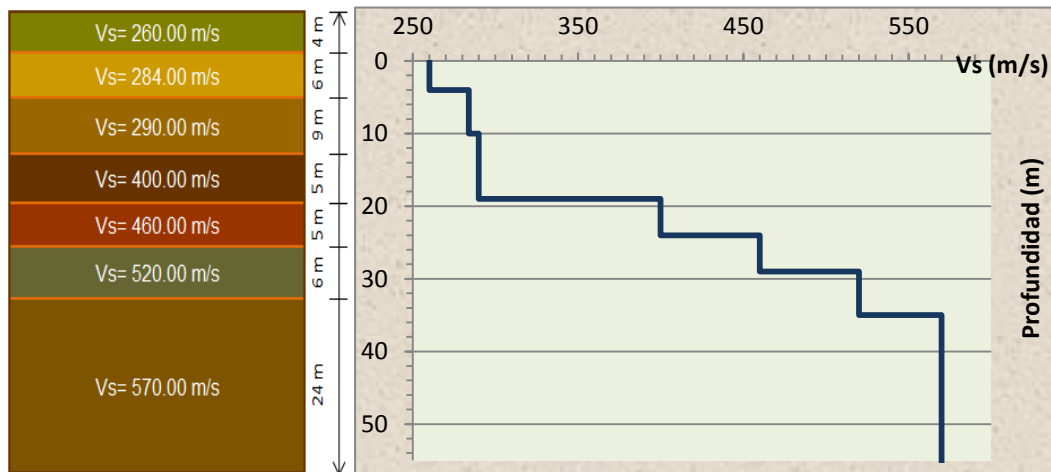


Figura 40: Gráfica Vs & Profundidad, La Gasca (MSQ 6)

Una vez procesada la información suministrada por el usuario, el programa reporta el espectro de respuesta, tanto de aceleración como de velocidad y desplazamiento, y el espectro de Fourier, en roca.



Figura 41: Espectro de Respuesta de aceleración en roca



Figura 42: Espectro de Respuesta de velocidad en roca



Figura 43: Espectro de Respuesta de desplazamientos en roca

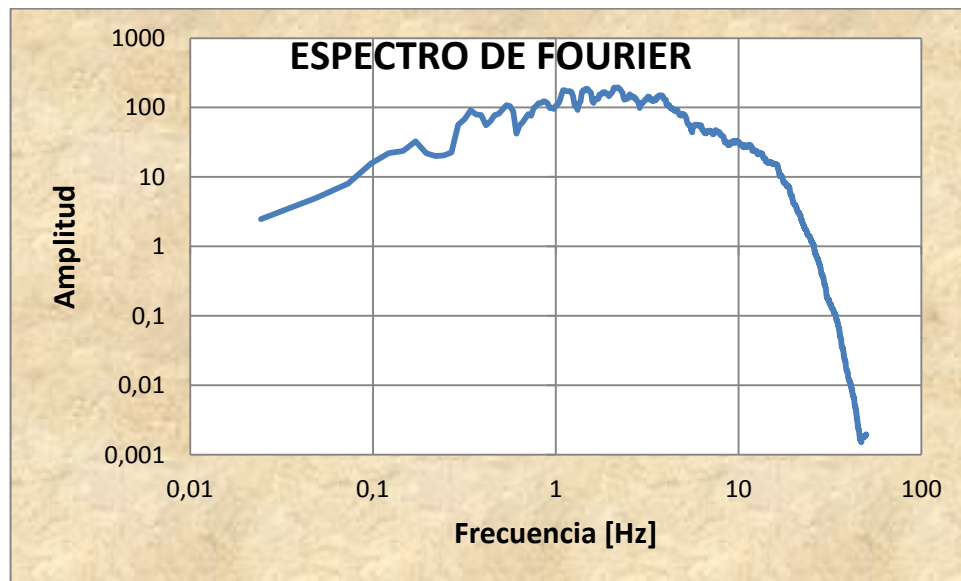


Figura 44: Espectro de Fourier en roca


Para obtener los espectros a cielo libre, se debe seleccionar el icono  (Propagación 1D), se muestra una pantalla como la que se indica en la Figura 37, presionamos "OK" y repetimos el procedimiento anterior para determinar nuevamente los espectros.



Figura 45: Espectro de Respuesta de aceleración a cielo libre

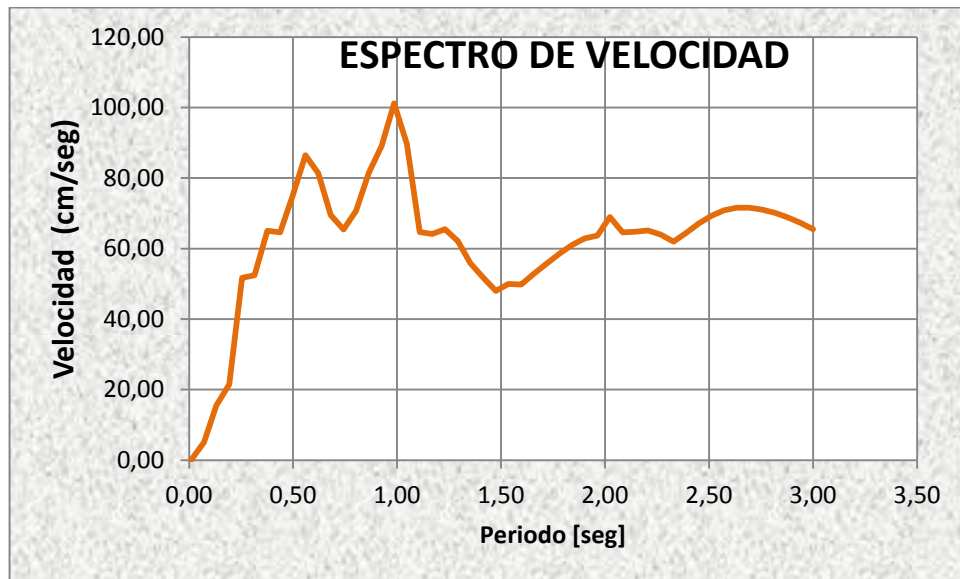


Figura 46: Espectro de Respuesta de velocidad a cielo libre

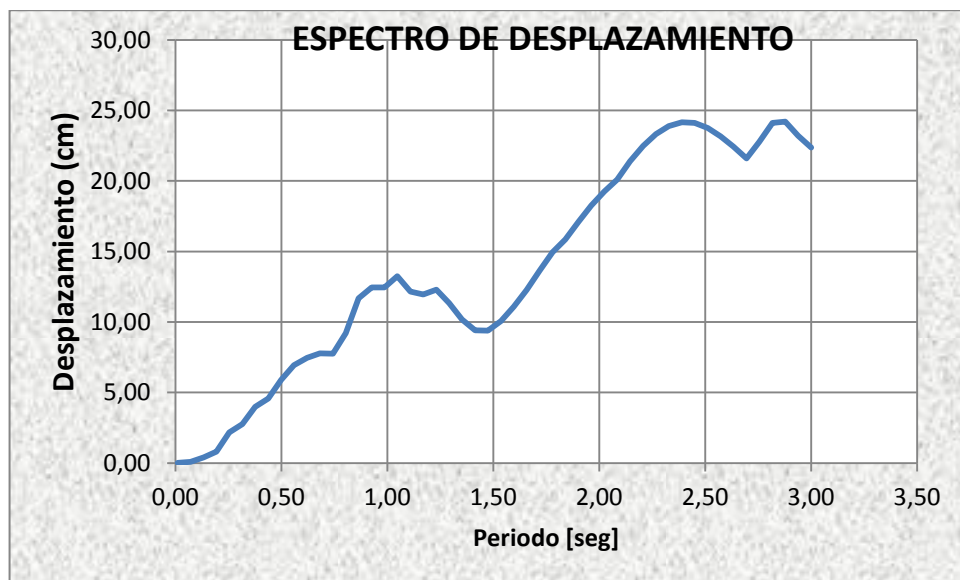


Figura 47: Espectro de Respuesta de desplazamientos a cielo libre

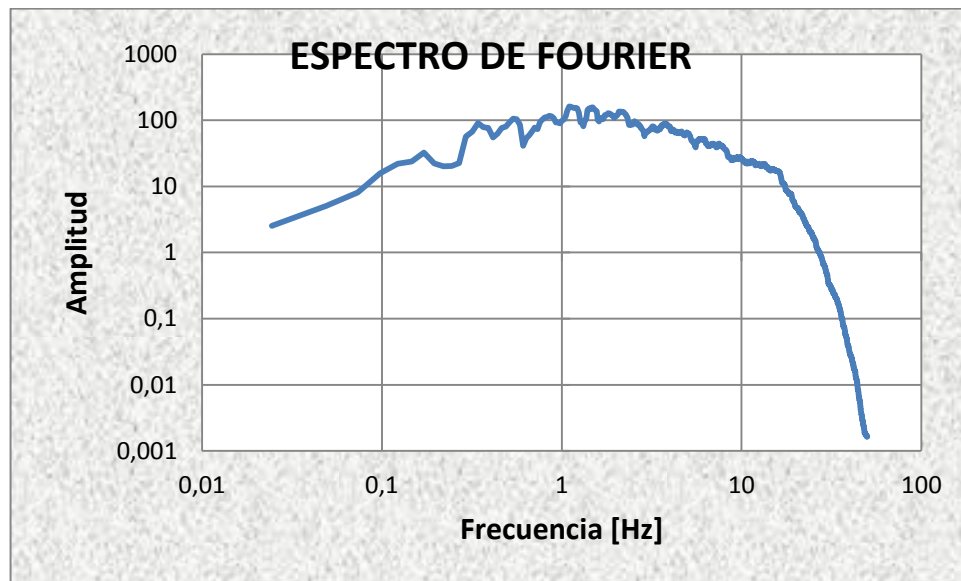


Figura 48: Espectro de Fourier a cielo libre

Se dividen las ordenadas de cada uno de los espectros, y de esta manera se determinan los factores de amplificación.

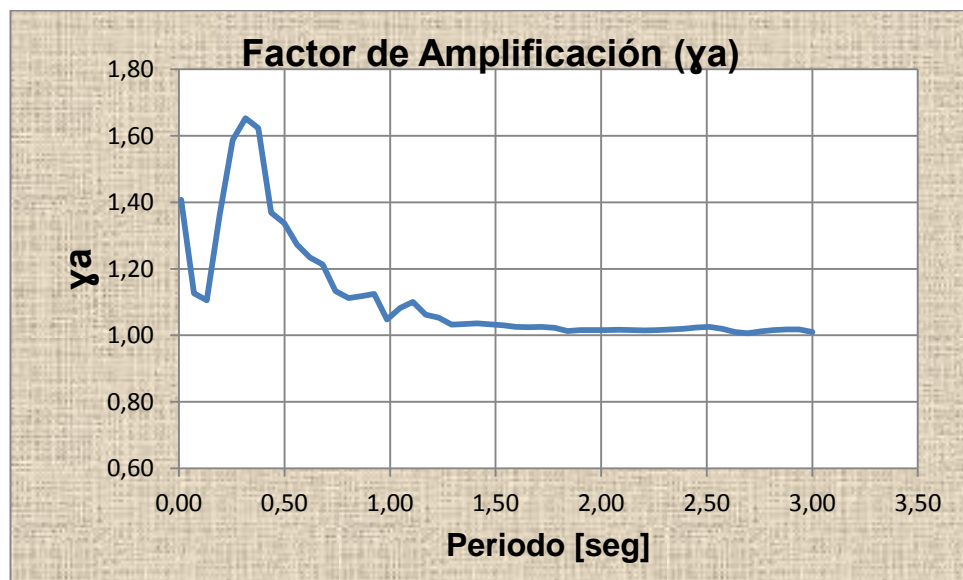


Figura 49: Factor de Amplificación de Aceleración

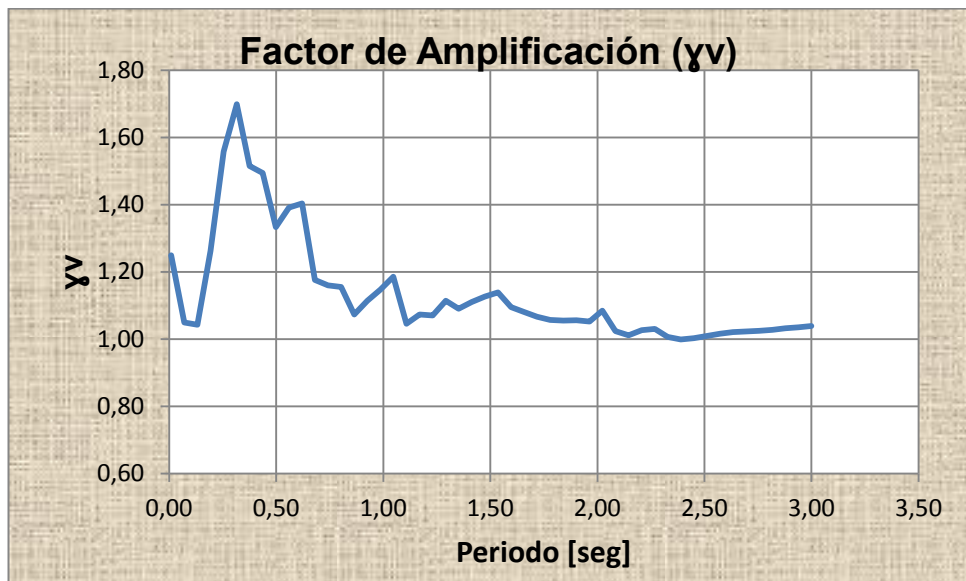


Figura 50: Factor de Amplificación de Velocidad

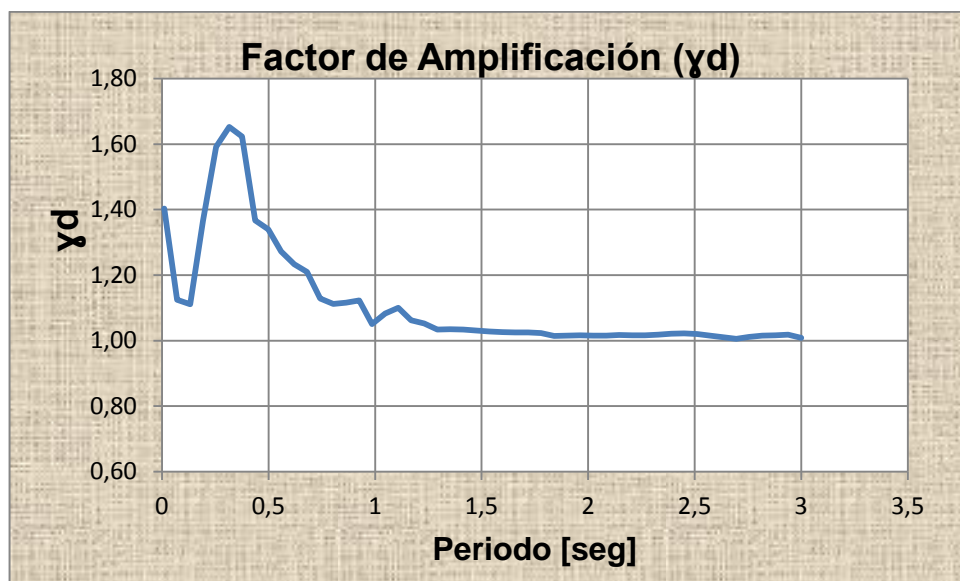


Figura 51: Factor de Amplificación de Desplazamientos

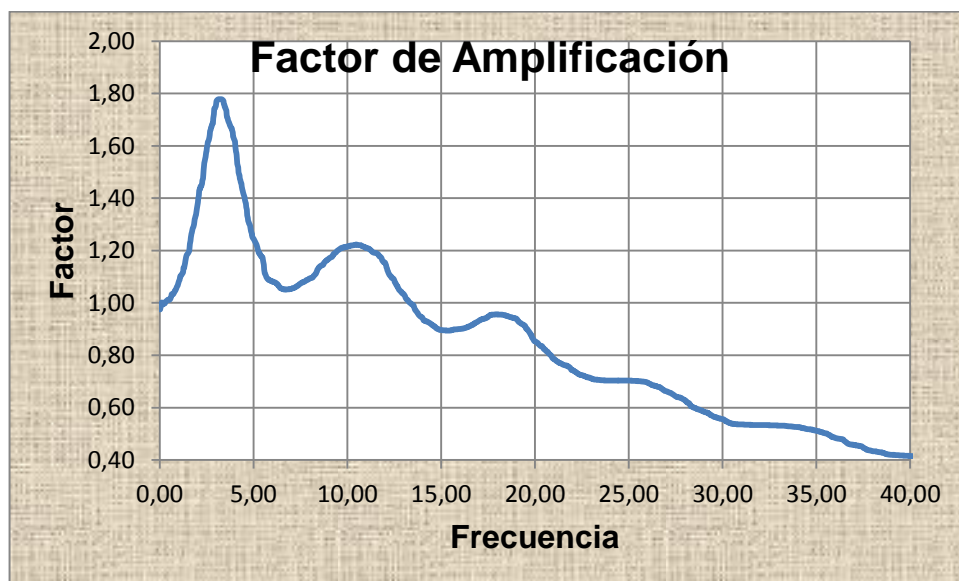


Figura 52: Factor de Amplificación (Fourier)

El procedimiento mencionado anteriormente se repite para los distintos sectores de la ciudad de Quito, de los cuales se dispone de la información correspondiente a la estratigrafía. Esta información será empleada posteriormente para complementarla en el programa MISOZIQ.

CAPÍTULO 4 USO DEL SOFTWARE EDU SHAKE

4.1 INTRODUCCION

EduShake es un programa informático de fácil empleo para el análisis lineal de respuesta unidimensional del suelo. Dispone de una función de reducción de módulo y modelos de amortiguamiento, visualización gráfica del perfil del suelo, animación de respuesta del terreno, entre otros.

Permite el cálculo y fácil trazado de ***Espectros de Fourier*** y ***Espectros de respuesta*** de aceleración, velocidad, desplazamiento, tensión de corte y deformación por esfuerzo cortante, las mismas que se presentan en escala aritmética o escala logarítmica. (EduPro Civil Systems)

Los valores máximos de la aceleración, velocidad, desplazamiento, esfuerzo cortante, deformación de corte, la relación de esfuerzo cíclico, así como la deformación por esfuerzo cortante efectivo, módulo de corte, y la relación de amortiguamiento, se pueden trazar como funciones de la profundidad.

Los parámetros escalares como la aceleración RMS, la intensidad Arias¹, la intensidad del espectro de respuesta, período predominante, entre otros, se pueden determinar también a través de este programa.

¹Intensidad denominada por el autor ARIAS en 1970, se define como $I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt$, tiene unidades de velocidad y es usualmente expresada en metros por segundo

Los datos primarios de todos los diagramas pueden ser guardados ya que EduShake tiene una característica útil que registra automáticamente la información en un informe. EduShake produce resultados prácticamente idénticos a los producidos por SHAKE91.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

4.2.1 CARACTERÍSTICAS

El programa ofrece muchas características que hacen que sea fácil y eficiente de usar. Algunas de las más importantes se enumeran a continuación:

- Pueden ser empleadas unidades inglesas o métricas, las mismas que se introducen en el formato más conveniente durante el ingreso de los datos.
- Contienen una serie de modelos de suelo integrados, que se pueden seleccionar desde los menús desplegables. EduShake interpolará según sea necesario para las condiciones de su análisis, y permitirá que usted agregue sus propios modelos de suelo y los almacena para su posterior empleo.
- Se pueden ver gráficamente registros sísmicos, espectros, perfil del suelo, etc.
- Está diseñado para proporcionar una interfaz intuitiva que simplifica y acelera el proceso de la realización e interpretación de los resultados de los análisis respuesta del suelo.

- El programa está organizado en tres "directores" - un gestor de entrada, un Solution Manager y Gerente de salida - y un informe. En la secuencia normal de las operaciones, el usuario se moverá desde el Administrador de entrada a la Solution Manager y luego en el Administrador de salida, como se indica gráficamente a continuación.

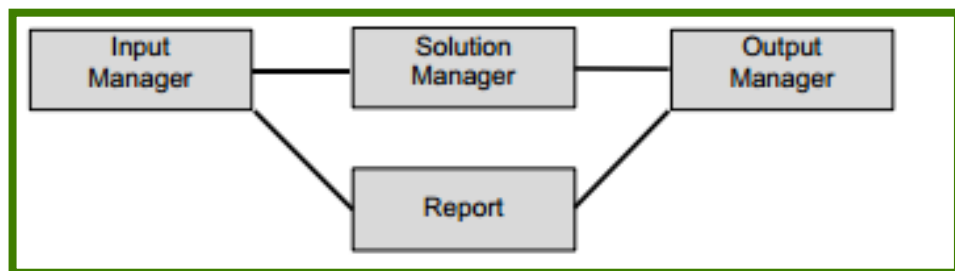


Figura 53: Secuencia de operaciones de EduShake

La configuración de un análisis EduShake implica definir las propiedades de todas las capas del suelo dentro del perfil para ser analizado, especificando las características que se aplicarán a dicho perfil y la definición de las cantidades que se calculan. (EduPro Civil Systems I.)

4.2.2 TEORÍA

EduShake utiliza un enfoque de dominio de la frecuencia para resolver el problema de respuesta del terreno. En términos simples, el movimiento de entrada se representa como la suma de una serie de ondas sinusoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y ángulos de fase.

Una solución relativamente simple para la respuesta del perfil del suelo a las ondas senoidales de diferentes frecuencias (en la forma de una función de transferencia) se utiliza para obtener la respuesta del depósito de suelo.

La respuesta global se obtiene mediante la suma de las respuestas individuales a cada una de las ondas sinusoidales de entrada. A continuación se describe las matemáticas básicas del proceso para un problema relacionado con una sola capa del suelo, se indica además cómo ese problema se puede resolver utilizando un lenguaje matemático de programación, y se extiende este enfoque para resolver sistemas de varias capas.

4.2.2.1. Una sola capa de suelo

Para ilustrar el enfoque básico empleado en EduShake, considere una capa de suelo uniforme tendido en una capa elástica de roca que se extiende a una profundidad infinita, como se ilustra en la Figura 54.

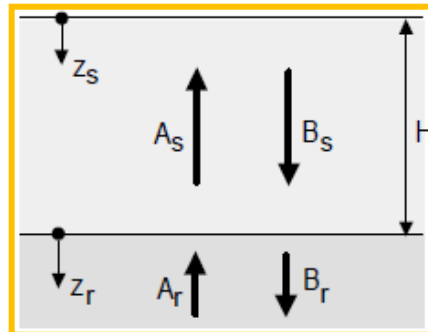


Figura 54: Perfil de suelo

Si los subíndices “s” y “r” se refieren al suelo y roca, respectivamente, los desplazamientos horizontales debidos a la propagación de ondas armónicas verticales “S” en cada material se pueden escribir como:

$$u_s(z_s, t) = A_s e^{i(\omega t + k_s^* z_s)} + B_s e^{i(\omega t - k_s^* z_s)} \quad (4-1)$$

$$u_r(z_r, t) = A_r e^{i(\omega t + k_r^* z_r)} + B_r e^{i(\omega t - k_r^* z_r)} \quad (4-2)$$

Dónde:

ω : Es la frecuencia circular de la onda armónica.

k^* : Es el número de onda.

Sin esfuerzo cortante, en la superficie del suelo; $Z_s = 0$, de modo que:

$$\tau(0,t) = G_s^* \gamma(0,t) = G_s^* \frac{\partial u_s(0,t)}{\partial z_s} = 0 \quad (4-3)$$

Dónde:

$G_s^* = G(1 + 2i\xi)$ Es el módulo de corte del suelo.

Sustituyendo la ecuación 4.1 en la ecuación 4.3, se tiene:

$$G_s^* i k_s (A_s e^{i k_s(0)} - B_s e^{-i k_s(0)}) * e^{i \omega t} = G_s^* i k_s (A_s - B_s) * e^{i \omega t} = 0 \quad (4-4)$$

Que se cumple cuando $A_s = B_s$. La compatibilidad de los desplazamientos y la continuidad de las tensiones en el límite del suelo/roca requieren que:

$$u_s(z_s = H) = u_r(z_r = 0) \quad (4-5)$$

$$\tau_s(Z_s = H) = \tau_r(Z_r = 0) \quad (4-6)$$

Sustituyendo la ecuación 4.1 y la ecuación 4.2 en la ecuación 4.5, tenemos:

$$A_s (e^{i k_s^* H} + e^{-i k_s^* H}) = A_r + B_r \quad (4-7)$$

De la ecuación 4.6 y de la definición de esfuerzo de corte: $\tau = G_s^* \frac{\partial u}{\partial z} = 0$

$$A_s i G_s^* k_s^* (e^{i k_s^* H} - e^{-i k_s^* H}) = i G_r^* k_r^* (A_r - B_r), \text{ o}$$

$$\frac{G_s^* k_s^*}{G_r^* k_r^*} A_s (e^{ik_s^* H} - e^{-ik_s^* H}) = A_r - B_r \quad (4-8)$$

En la relación $\frac{G_s^* k_s^*}{G_r^* k_r^*} = \alpha_z^*$, α_z^* es conocido como la relación de impedancia. Resolviendo las ecuaciones 4.7 y 4.8 simultáneamente, se tiene:

$$A_r = \frac{1}{2} A_s [(1 + \alpha_z^*) e^{ik_s^* H} - (1 - \alpha_z^*) e^{-ik_s^* H}] \quad (4-9)$$

$$B_r = \frac{1}{2} A_s [(1 - \alpha_z^*) e^{ik_s^* H} + (1 + \alpha_z^*) e^{-ik_s^* H}] \quad (4-10)$$

Si una onda de corte se propaga verticalmente con una amplitud, A, a través de la roca y el suelo no estaba presente, el efecto de la superficie libre en el afloramiento rocoso produciría un movimiento con una amplitud de 2A.

Si el suelo estaba presente, en la superficie libre la amplitud del movimiento de sería:

$$2A_s = \frac{4A}{(1 + \alpha_z^*) e^{ik_s^* H} + (1 - \alpha_z^*) e^{-ik_s^* H}} \quad (4-11)$$

La función de transferencia $F(\omega)$, definida como la relación de la amplitud de la superficie del suelo para la amplitud del afloramiento rocoso, está dado por:

$$F(\omega) = \frac{1}{\cos k_s^* H + i \alpha_z^* \sin k_s^* H} \quad (4-12)$$

4.2.2.2. Solución de problemas de una sola capa

Debido a que la función de transferencia se define como la relación entre la amplitud de la superficie del suelo y la amplitud del afloramiento rocoso, la amplitud de la superficie del suelo puede ser obtenido como el producto de la amplitud del afloramiento rocoso y de la función de transferencia. (EduPro Civil Systems I.)

Por lo tanto, la respuesta de la capa de suelo a un movimiento de entrada periódico se puede obtener de los siguientes pasos:

- Expresar el movimiento de entrada (afloramiento de roca) en el dominio de la frecuencia como una serie de Fourier (como la suma de una serie de ondas sinusoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y ángulos de fase). Para un movimiento sísmico, esta serie de Fourier tendrá ambas partes: real e imaginaria.
- Definir la función de transferencia (Ecuación 4.12). De igual forma la función de transferencia tendrá ambas partes: real e imaginaria.
- Calcular la serie de Fourier de la salida (superficie de la tierra) como el producto de la serie de Fourier de entrada (lecho de roca) y la función de transferencia. Esta serie de Fourier también tendrá dos partes real e imaginaria.
- Expresar el movimiento de salida en el dominio del tiempo por medio de una transformada inversa de Fourier.

Estos pasos están codificados mediante un procesamiento matemático en el programa MATLAB.

4.2.2.3. Varias capas de suelo

El enfoque básico descrito en la sección anterior también se utiliza para analizar los depósitos de suelo en varias capas, la única diferencia es que la función de transferencia se modifica, ya que esta, para un depósito de suelo en capas debe tener en cuenta la transmisión y la reflexión de las ondas en los límites entre las capas adyacentes.

Consideremos un depósito de suelo, Figura 55. Dentro de una capa determinada, por ejemplo la capa “j”, los desplazamientos horizontales estarán dados por la ecuación 4.13.

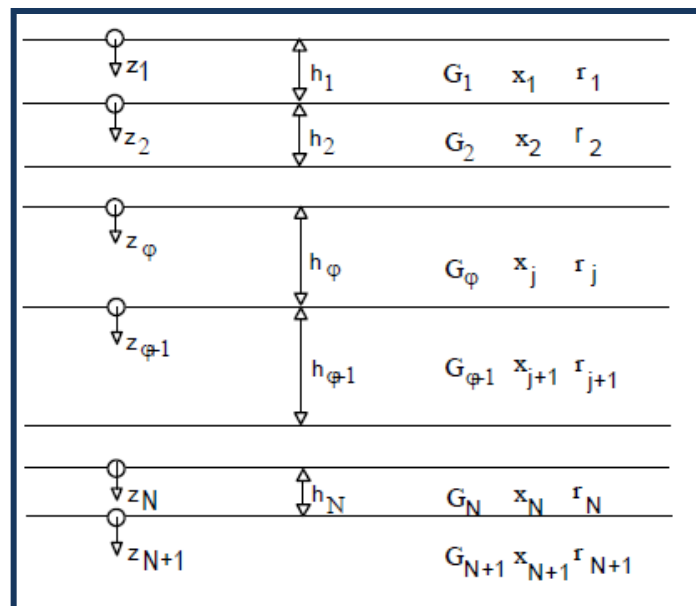


Figura 55: Depósito de suelo con varias capas

$$u_j(z_j, t) = (A_j e^{ik_j^* z_j} + B_j e^{-ik_j^* z_j}) e^{i\omega t} \quad (4-13)$$

En el límite entre la capa “j” y la capa “j+1”, la compatibilidad de desplazamientos que se requiere es:

$$A_{j+1} - B_{j+1} = A_j e^{ik_j^* h_j} + B_j e^{-ik_j^* h_j} \quad (4-14)$$

Y la continuidad de los esfuerzos cortantes que se requiere es:

$$A_{j+1} - B_{j+1} = \frac{G_j^* k_j^*}{G_{j+1}^* k_{j+1}^*} (A_j e^{ik_j^* h_j} - B_j e^{-ik_j^* h_j}) \quad (4-15)$$

Hay que considerar que las ecuaciones 4.14 y 4.15 son análogas a las ecuaciones 4.7 y 4.8, respectivamente.

Definiendo α_z^* como la relación de impedancia entre el límite de las capas “j” y “j+1”, la amplitud de las ondas para la capa “j+1” puede obtenerse de la amplitud de la capa “j” resolviendo las ecuaciones 4.14 y 4.15.

$$A_{j+1} = \frac{1}{2} A_j (1 + \alpha_j^*) e^{ik_j^* h_j} + \frac{1}{2} B_j (1 - \alpha_j^*) e^{-ik_j^* h_j} \quad (4-16)$$

$$B_{j+1} = \frac{1}{2} A_j (1 - \alpha_j^*) e^{ik_j^* h_j} + \frac{1}{2} B_j (1 + \alpha_j^*) e^{-ik_j^* h_j} \quad (4-17)$$

En la superficie del suelo ($z_1=0$), el requisito para que el esfuerzo de corte sea cero es que: $A_1=B_1$. Aplicando las ecuaciones 4.16 y 4.17 en forma recurrente para $j=1, 2, 3, \dots, N$, los coeficientes A_{j+1} y B_{j+1} pueden estar relacionados con “ A_j ” y “ B_j ” por:

$$A_{j+1} = a_j + 1(\omega) A_1 \quad (4-18)$$

$$B_{j+1} = b_j + 1(\omega)B_1 \quad (4-19)$$

Donde las funciones $a_j + 1(\omega)$ y $b_j + 1(\omega)$ representan los efectos de las interacciones de las ondas que se producen en todas las interfaces de las capas por encima de la capa "j+1". Entonces, la función de transferencia relaciona los movimientos en las cimas de las dos capas, por ejemplo las capas "i" y "j", se pueden expresar como:

$$F_{ij}(\omega) = \frac{a_j(\omega) + b_j(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \quad (4-20)$$

4.2.2.4. Análisis lineal equivalente

El comportamiento no lineal y elástico del suelo está bien establecido en la ingeniería geotécnica. La no linealidad del comportamiento de tensión-deformación del suelo significa que el módulo de corte del mismo, está cambiando constantemente. La inelasticidad significa que se descarga el suelo a lo largo de un camino diferente al de su trayectoria de carga y disipa la energía en los puntos de contacto entre las partículas.

Un análisis riguroso de la respuesta mecánica de los suelos a cualquier tipo de carga, dinámica o de otro tipo, exigiría que el comportamiento tensión-deformación de cada elemento de la tierra, pueda seguir directamente en el dominio del tiempo.

El método de análisis utilizado en SHAKE (EduShake y ProShake) no puede permitir el comportamiento de tensión-deformación no lineal, ya que su representación del movimiento de entrada por una serie de Fourier y el

uso de funciones de transferencia para la solución de la ecuación de onda se basan en el principio de superposición que es sólo es válida para sistemas lineales.

Para aproximarse a la respuesta no lineal real (inelástica de suelo), puede ser utilizado un modelo lineal equivalente, donde se llevan a cabo análisis lineales con las propiedades del suelo por medio de un proceso iterativo que simulará un nivel eficaz de deformación por esfuerzo cortante.

En el modelo lineal equivalente, el módulo de corte se toma como el módulo de corte secante que, como se muestra en la figura 56, se aproxima a un módulo "promedio" de corte sobre todo un ciclo de carga. Como aumenta el nivel de deformación de corte, el módulo de corte secante disminuye.

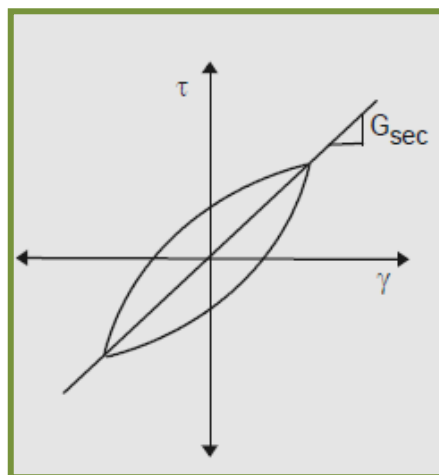


Figura 56: Modelo Lineal equivalente

La relación entre el módulo de corte secante y la amplitud de deformación de corte puede caracterizarse por medio de una curva de reducción de módulo. La naturaleza de esta curva, que tiene como ordenada

la relación de módulos $= G/G_{\max}$ y como abscisa los valores del registro (deformación por corte), ha sido bien establecida para muchos suelos.

EduShake cuenta con una biblioteca que muestra las relaciones de reducción de módulo que se pueden seleccionar en el administrador de entrada. El algoritmo de solución utilizada en SHAKE (EduShake y ProShake) asume un amortiguamiento del suelo viscoso que representa el uso de un módulo de corte.

La amortiguación viscosa implica el comportamiento que se caracteriza por los bucles de tensión-deformación elíptico. Debido a que los bucles reales de tensión-deformación son rara vez elípticos, se utiliza un coeficiente de amortiguamiento equivalente el coeficiente de amortiguamiento equivalente es igual a la razón de amortiguamiento que se calcula basándose en el área dentro del bucle de histéresis, el módulo de corte secantes, y la deformación máxima de corte.

En un análisis lineal equivalente, la primera iteración se realiza mediante el módulo de corte y relaciones de amortiguamiento que corresponden a un nivel estimado de esfuerzo cortante. En el programa la primera iteración se basa en una deformación por esfuerzo cortante asumido de 0,001%. Después de la primera iteración, la deformación efectiva por esfuerzo cortante, se define como:


$$\gamma_{eff} = R_{\gamma} \gamma_{max} \quad (4-21)$$

Donde; R_{γ} es un factor de reducción de la tensión. A menudo se calcula como:

$$R_{\gamma} = \frac{M - 1}{10} \quad (4-22)$$

El módulo de corte y el coeficiente de amortiguamiento γ_{eff} se utilizan para la siguiente iteración. Este proceso se repite hasta que la tensión efectiva calculada no cambia mucho de una iteración a la siguiente. En este punto, se dice que el proceso lineal equivalente es el adecuado.

4.2.2.5. INGRESO AL SOFTWARE EDU SHAKE

El primer paso para el uso del programa es su instalación. Este proceso inicia al dar clic en . Se muestra una pantalla como la siguiente.

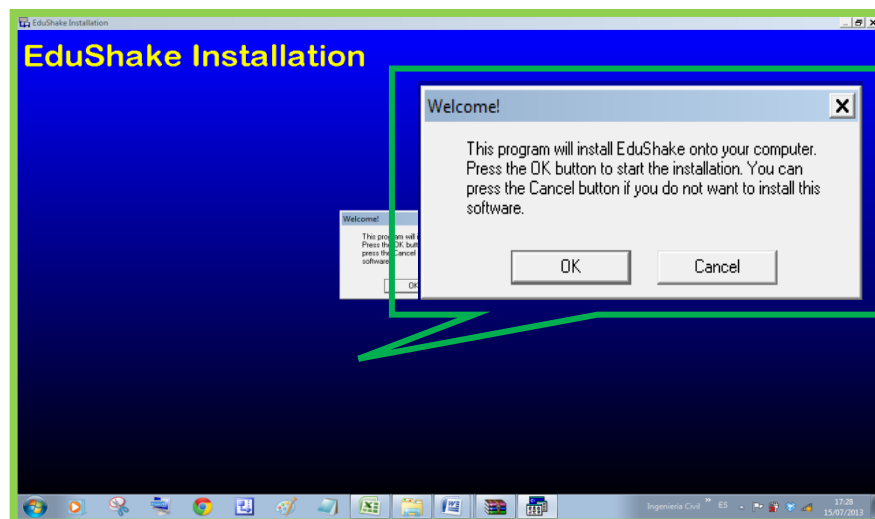


Figura 57: Pantalla de instalación del software

Al dar clic en el botón “OK”, se nos mostraran varias pantallas en las que se presentan las características del programa, el directorio donde se instalara, entre otras.

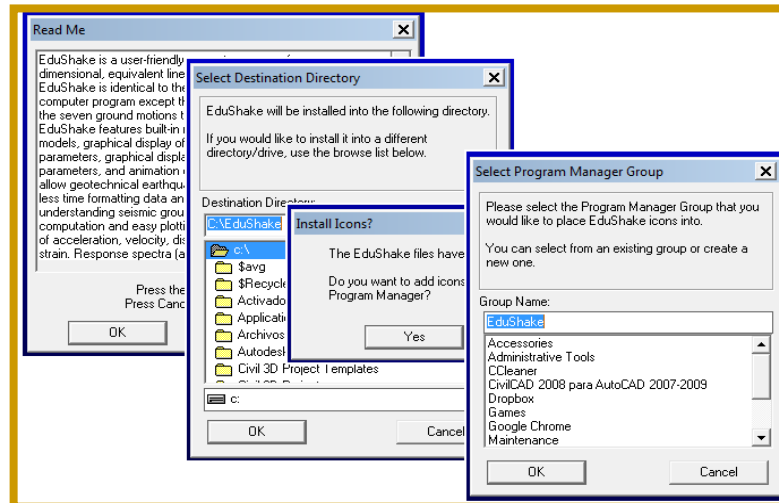


Figura 58: Proceso de instalación del programa

Finalmente inicializar el programa.

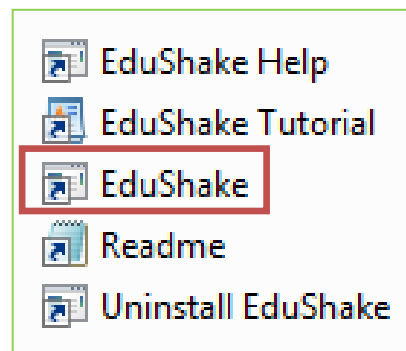


Figura 59: Icono del programa

4.2.2.6. Interface del programa

Al ejecutar el programa EduShake, su primera pantalla muestra el símbolo “EduShake” y seis menús (de izquierda a derecha) Input Manager, Solution Manager, Gerente de Producto, Utilidades, Ayuda y Salir.

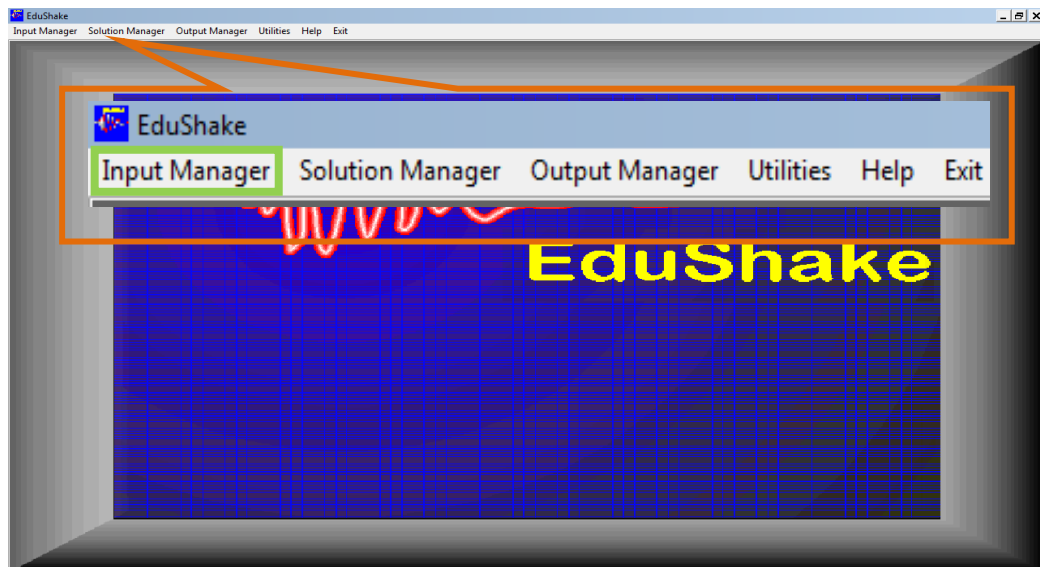


Figura 60: Menús del programa

4.3 INGRESO DE DATOS

INPUT MANAGER: Al seleccionar esta opción se abre un formulario en el cual se ingresa el nombre del perfil de suelo, el número de capas y el nivel freático.

Figura 61: Información general del perfil de suelo

Las capas del perfil de suelo son creadas automáticamente, para ingresar la información de cada una de ellas es necesario asegurarse de que la pestaña de la primera capa esté activa. Una vez ingresado el nombre de la capa el siguiente paso es la selección de una curva de reducción de módulo.

EduShake tiene una serie de curvas de reducción de módulo extraídos de la literatura de ingeniería geotécnica y sísmica. Para ver la lista de las curvas integradas, es necesario dar clic en el botón del lado derecho del campo de “*curva de reducción de módulo*”, y de esta manera seleccionar una de ellas.

The screenshot shows a software interface with the following fields and options:

- Material Name:** Arena
- Modulus Reduction Curve:** Sand (Seed & Idriss) - Lower Bound
- Damping Curve:** Sand (Seed & Idriss) - Lower Bound

The list of available curves includes: Linear, Rock, Rock (Idriss), Sand (Seed & Idriss) - Lower Bound (highlighted), Sand (Seed & Idriss) - Average, Sand (Seed & Idriss) - Upper Bound, Sand (Seed and Idriss 1970), and Yucetic - Dobry.

Figura 62: Selección de la “Curva de reducción de módulo”

Se definen además los siguientes parámetros:

The screenshot shows the input parameters for the first layer with the following values and units:

Thickness:	26.2	ft	8.0	Espesor de la capa
Unit Weight:	12.1	pcf	1.9	Peso por unidad de volumen
Max. Shear Modulus:	301.6	ksf	14.4	Módulo de corte
Shear Wave Velocity:	895.7	ft/sec	273	Velocidad de onda de corte

Figura 63: Datos de entrada de la primera capa

Es necesario destacar que EduShake calcula automáticamente el modulo corte una vez que se ha ingresado la velocidad de la onda de corte, o viceversa. Como la capa 1 ya se ha definido se puede pasar a las otras capas.

Aunque las propiedades de las otras capas pueden ser definidas de la misma manera, estas pueden ser introducidas más rápido utilizando la pestaña “Resumen de Datos”, que está localizada a la izquierda de la pestaña de la Capa 1. A continuación, se presentn los datos de entrada de la Capa 1 mostrados en forma de tabla.

Layer No	Material Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m ³)	Gmax (MPa)	Vs (m/s)	Mod. Reduction Curve	Mod. Parameter	Damping Curve	Damping Parameter
1	Arcilla	8.0	1.9	14.4	273.0	Clay - PI=40-80 (Sun et al.)		Clay (diss 1500)	
2	Arcilla	10.0	2.0	18.8	304.0	Clay - PI=40-80 (Sun et al.)		Clay (diss 1500)	
3	Arcilla	Infinite	2.2	56.1	500.0	Clay - PI=40-80 (Sun et al.)		Clay (diss 1500)	

Units: U.S. S.I.

Figura 64: Formulario de resumen

Una vez terminado el ingreso de datos se debe especificar qué información se va a calcular en el análisis de la respuesta del suelo. Para

ello en la pestaña de la Capa 1 dar clic en la opción “Select Output”.



En el formulario que aparece, seleccionar las casillas de los parámetros que se requieran ver una vez terminado el proceso de cálculo, sean estos Espectros de Respuesta, Espectros de Fourier, Historias de Tiempo, etc., es necesario escribir las relaciones de amortiguamiento de 5, 10 y 20%. Este proceso se debe repetir para el número de capas ingresadas.

Seleccione la opción “OUTCROP” solo si la superficie de la capa es el afloramiento. No seleccione para la roca.

Layer No: Depth (ft): Depth (m):

Outcrop Apply to all Layers

Time History

- Acceleration
- Velocity
- Displacement
- Husid
- Shear Strain
- Shear Stress

Response Spectrum

No.	Damping (%)
1	
2	
3	

- Acceleration
- Velocity
- Displacement

Fourier Amplitude

- Acceleration
- Velocity
- Displacement

Fourier Phase

- Acceleration
- Velocity
- Displacement

Power Spectrum

- Acceleration
- Velocity
- Displacement

Destination

- Data File
- Report

Figura 65: Selección de las opciones de salida

Ahora que todas las capas ya están definidas, se debe comprobar si hay errores obvios (como un punto decimal mal colocado) haciendo clic en el botón Ver Perfil.



Esta opción permite ver el perfil de suelo ingresado. Este perfil muestra la variación de peso por unidad de volumen y la velocidad de onda de corte con la profundidad.

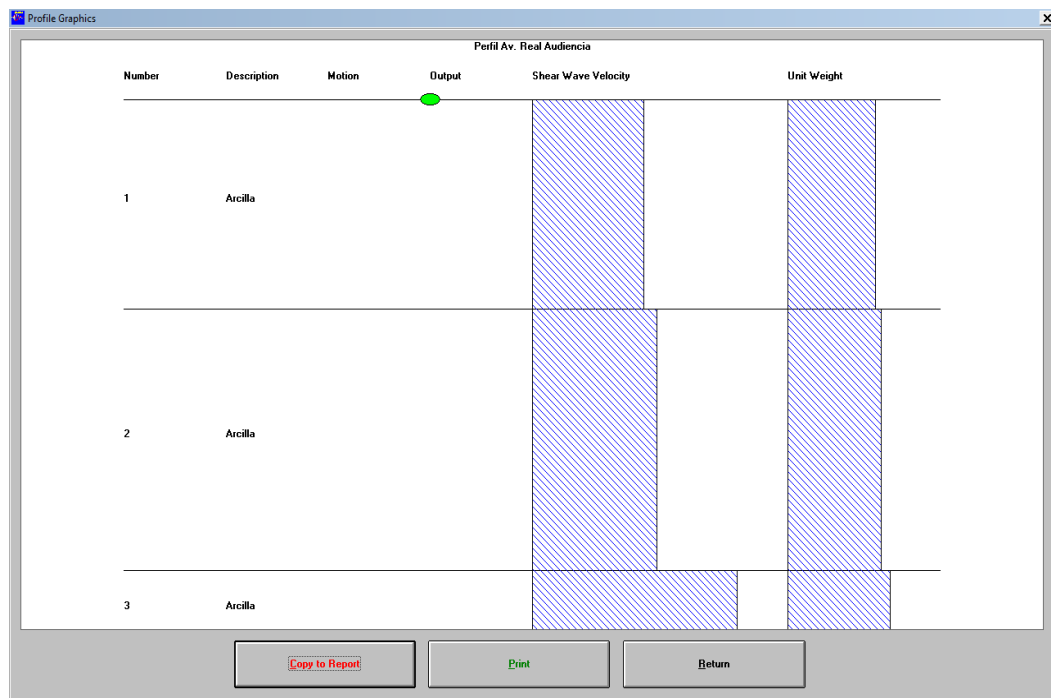


Figura 66: Perfil de suelo ingresado

Ahora se debe especificar el movimiento de entrada para lo cual seleccionar la opción “Input Motion” del menú principal.

INPUT MOTION: La especificación correcta de un movimiento de entrada (registro sísmico) es una parte importante de cualquier análisis de la respuesta del suelo.

EduShake le permite ver una gran variedad de posibles movimientos de entrada y seleccionar los que son más adecuados para el análisis.

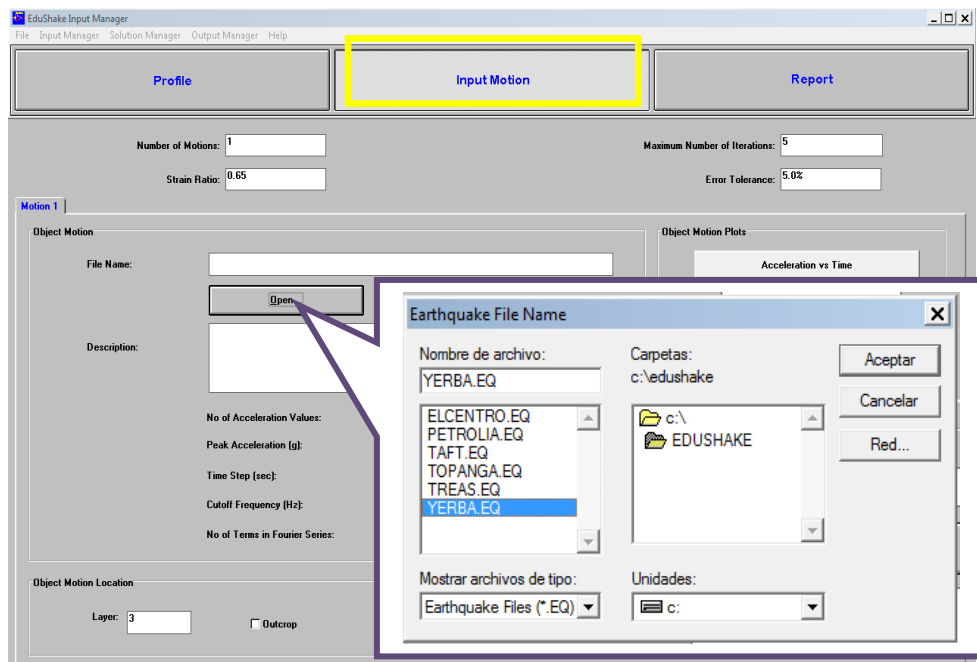
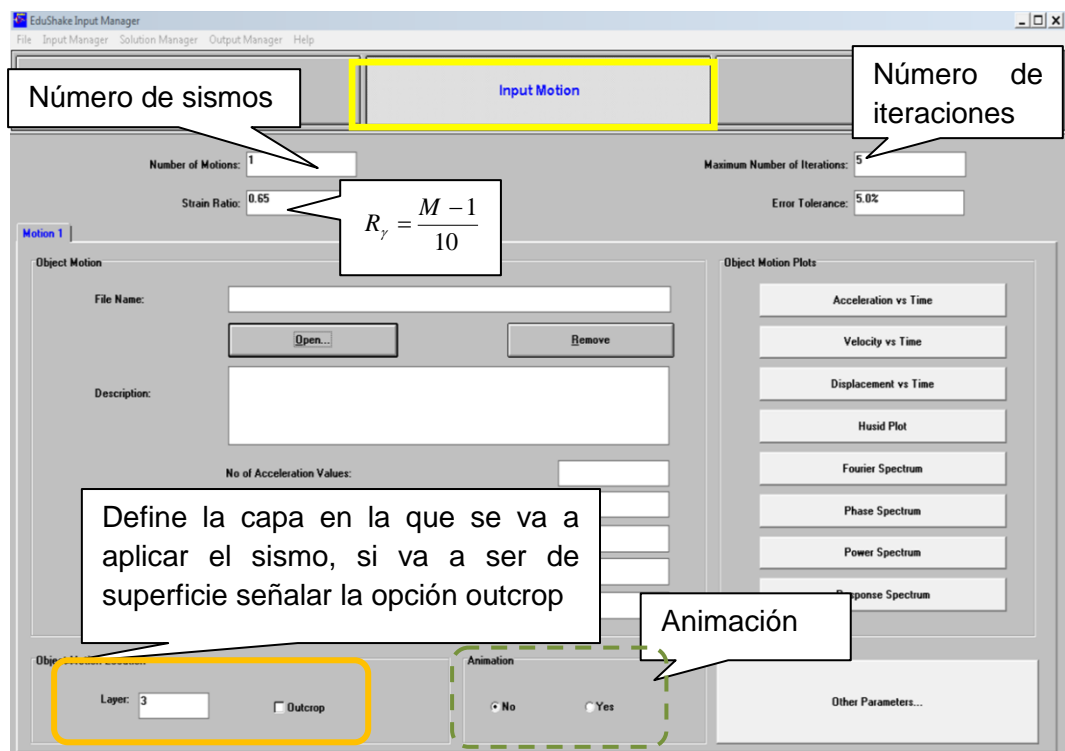


Figura 67: Movimientos de Entrada (Registro sísmico)

Una vez seleccionado el registro automáticamente se presentan las características del mismo en la parte inferior izquierda de la pantalla.

No of Acceleration Values:	2000
Peak Acceleration (g):	0.07
Time Step (sec):	0.020
Cutoff Frequency (Hz):	20.00
No of Terms in Fourier Series:	2048

Figura 68: Datos del registro sísmico

Para visualizar la gráficas de los espectros hay que dirigirse a la parte derecha de la ventana, allí se presentan varias opciones que pueden ser seleccionadas.

Object Motion Plots

Acceleration vs Time
Velocity vs Time
Displacement vs Time
Husid Plot
Fourier Spectrum
Phase Spectrum
Power Spectrum
Response Spectrum

Figura 69: Opciones para visualizar los espectros

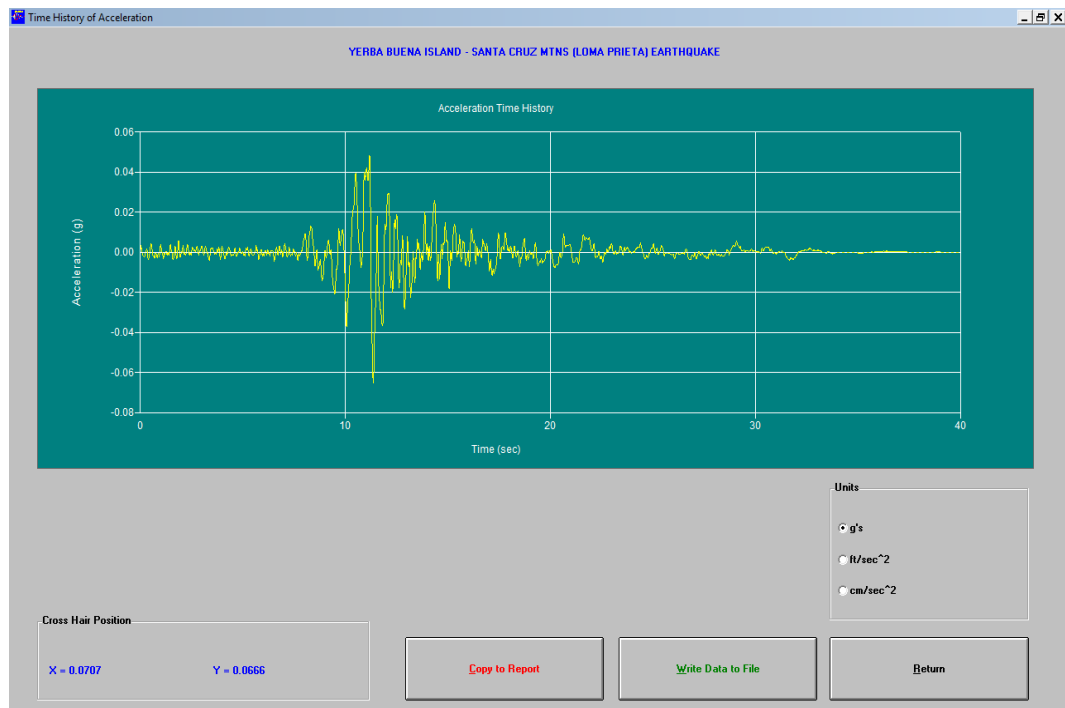


Figura 70: Aceleración & Tiempo



Figura 71: Velocidad & Tiempo

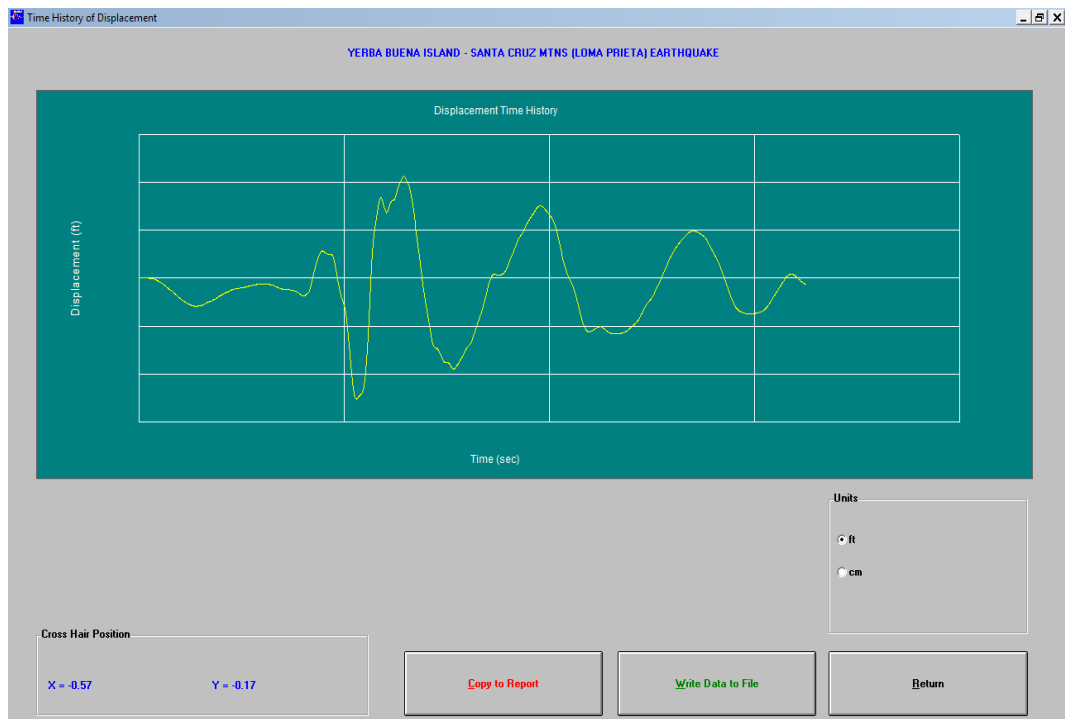


Figura 72: Desplazamiento & Tiempo

Adicionalmente para la animación del perfil del suelo se debe seleccionar la opción “Animación” que está ubicada en la parte inferior de la ventana mostrada en la figura 67. Ya que se ha terminado con el ingreso de toda la información para el cálculo de respuesta del perfil del suelo, se debe guardar el archivo para posteriormente ver los resultados, el archivo debe ser guardado con la extensión “.dat”

4.4 EJECUCION DEL ANÁLISIS

Para ejecutar el análisis EduShake, se debe seleccionar el botón “*Solution Manager*”, este analizará cualquier archivo de datos de entrada que desee. La extensión por defecto para los archivos de entrada EduShake es “.dat”. Para ejecutar el análisis del documento creado, se debe seleccionar el archivo de datos, guardado anteriormente.

Una vez seleccionado el archivo se mostrará una ventana en la que se presenta el análisis del perfil de suelo. La palabra "Running" aparecerá en la esquina inferior izquierda de la pantalla, y será sustituida por la palabra "Terminado" al finalizar el análisis y aparecerá un cuadro de dialogo en el cual se da clic en "OK", para salir del "Solution Manager" (*Administrador de solución*). Los resultados de los análisis realizados serán automáticamente guardados en la carpeta donde se guardó el archivo anterior, con el mismo nombre del archivo de datos pero con la extensión ".lyr".

4.5 REPORTE DE RESULTADOS

Para ver los resultados del análisis, se debe seleccionar el botón "Output Manager", y abrir el archivo guardado con la extensión ".lyr".

Hay muchas opciones para ver los resultados del análisis en el "Output Manager". Los tipos de gráficos principales están organizados en una serie de siete fichas –Gráficos de movimiento del suelo, Gráficos de Esfuerzo y Deformación, Gráficos de Espectros de Respuesta, Gráficos de Profundidad, Otros Parámetros, Animación y Espectros de Fourier.

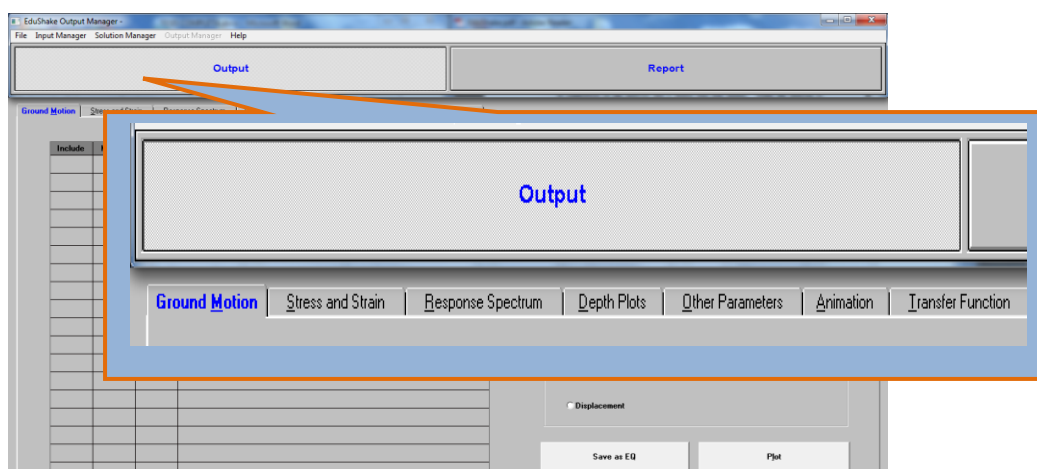


Figura 73: Opciones para ver los resultados del análisis.

La opción “Ground Motion Plot” (Gráfico de movimiento del suelo) le permite dibujar historias temporales y espectros de Fourier en la parte superior de las capas que ha seleccionado previamente. Se puede trazar una o más propuestas de resolución sobre la misma gráfica, marcando las casillas deseadas.

La opción “Stress and Strain” (gráficas de esfuerzo y deformación) permiten trazar historias de tiempo y espectros de esfuerzo de corte y deformación de corte.

La opción “Response Spectrum” (gráfica de espectro de respuesta le permite dibujar uno o todos los espectros de respuesta con los diferentes porcentajes de amortiguamiento (5%, 10% y 20%).

La opción “Depth Plots” (Gráfica de Profundidad) se puede utilizar para trazar la variación de algunas cantidades con la profundidad para uno o más movimientos de entrada.

La opción “Other Parametres” (Otros Parámetros) ofrece la oportunidad para calcular una variedad de parámetros de movimiento de tierra útiles en la parte superior de cualquiera de las capas seleccionadas. Al seleccionar una de las capas y dar clic en el botón “Calcular” se pueden observar los valores numéricos de los parámetros. Esta información puede ser copiada en el formato tabular del informe.

La opción “Animation” (Animación) le permite ver la variación de los desplazamientos horizontales con la profundidad y el tiempo.

Para visualizar el reporte final se dirige a la opción “Report”,



allí se puede ver un informe con los resultados del análisis, este se puede imprimir o guardar para su posterior consulta.

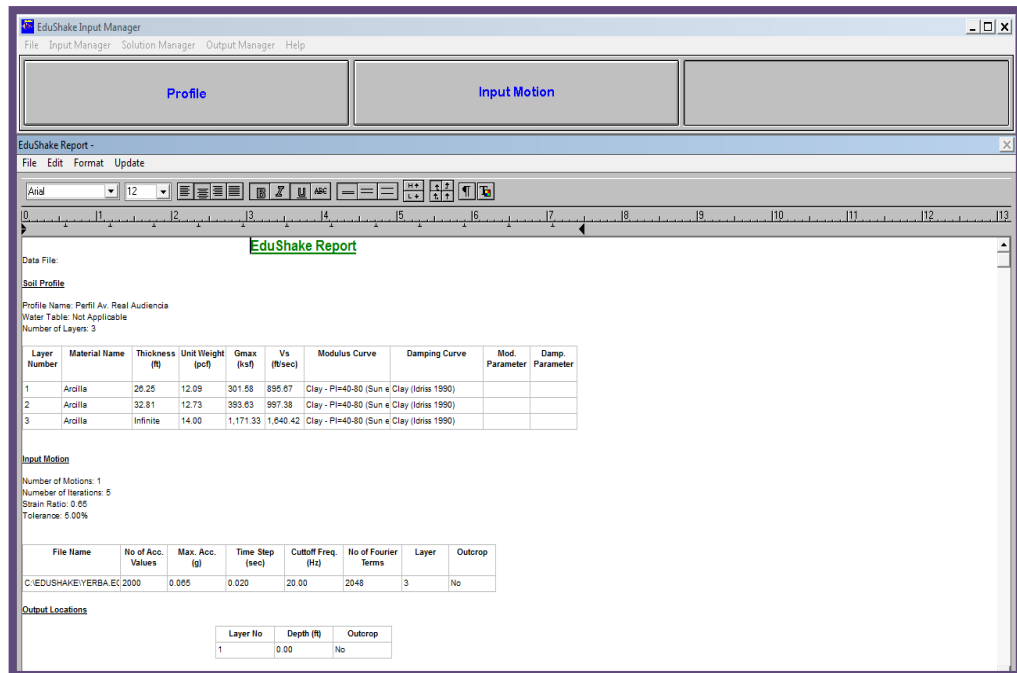


Figura 74: Reporte mostrado por EduShake

4.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se consideran los datos y la información de la estratigrafía especificada en el capítulo 3, tabla 3

Ingresar la información referente al perfil estratigráfico.

Profile Title: LA GASCA

No. of Layers: 7

Depth to Water Table: 0.0 ft 0.0 m

Summary Data 1 2 3 4 5 6 7

Layer No	Material Name	Thickness (ft)	Unit Weight (pcf)	Gmax (ksf)	Vs (fps)	Mod. Reduction Curve	Mod. Parameter	Damping Curve	Damping Parameter
1	Capa 1	13.1	112.3	2539.6	851.0	Sand (Seed & Idries) - Average		Sand (Seed & Idries) - Average	
2	Capa 2	19.7	112.3	3030.1	931.8	Sand (Seed & Idries) - Average		Sand (Seed & Idries) - Average	
3	Capa 3	29.5	112.3	3159.4	951.4	Sand (Seed & Idries) - Average		Sand (Seed & Idries) - Average	
4	Capa 4	16.4	124.8	6678.7	1312.3	Sand (Seed & Idries) - Average		Sand (Seed & Idries) - Average	
5	Capa 5	16.4	124.8	8832.6	1509.2	Sand (Seed & Idries) - Average		Sand (Seed & Idries) - Average	
6	Capa 6	19.7	124.8	11287.0	1706.0	Sand (Seed & Idries) - Average		Sand (Seed & Idries) - Average	
7	Capa 7	Infinite	124.8	13562.0	1870.1	Sand (Seed & Idries) - Average		Sand (Seed & Idries) - Average	

Units: U.S. S.I.

Select Output View Profile

Figura 75: Ingreso de datos de la estratigrafía

Seleccionar las casillas de las opciones que se requieren ver una vez terminado el análisis, este paso se debe hacer para cada una de las capas.

Output Location

Layer No: 1 Depth (ft): 0 Depth (m): 0

Outcrop Apply to all Layers

Time History

Acceleration
 Velocity
 Displacement
 Husid
 Shear Strain
 Shear Stress

Response Spectrum

No	Damping [%]
1	5.00
2	10.00
3	20.00

Acceleration
 Velocity
 Displacement

Fourier Amplitude

Acceleration
 Velocity
 Displacement

Fourier Phase

Acceleration
 Velocity
 Displacement

Power Spectrum

Acceleration
 Velocity
 Displacement

Destination

Data File
 Report

Ok Cancel

Figura 76: Opciones para visualizar las gráficas una vez terminado el análisis.

Ya que se terminó de ingresar la información necesaria, seleccionar la opción "View Profile", aparecerá una ventana como la indicada en la figura 77.

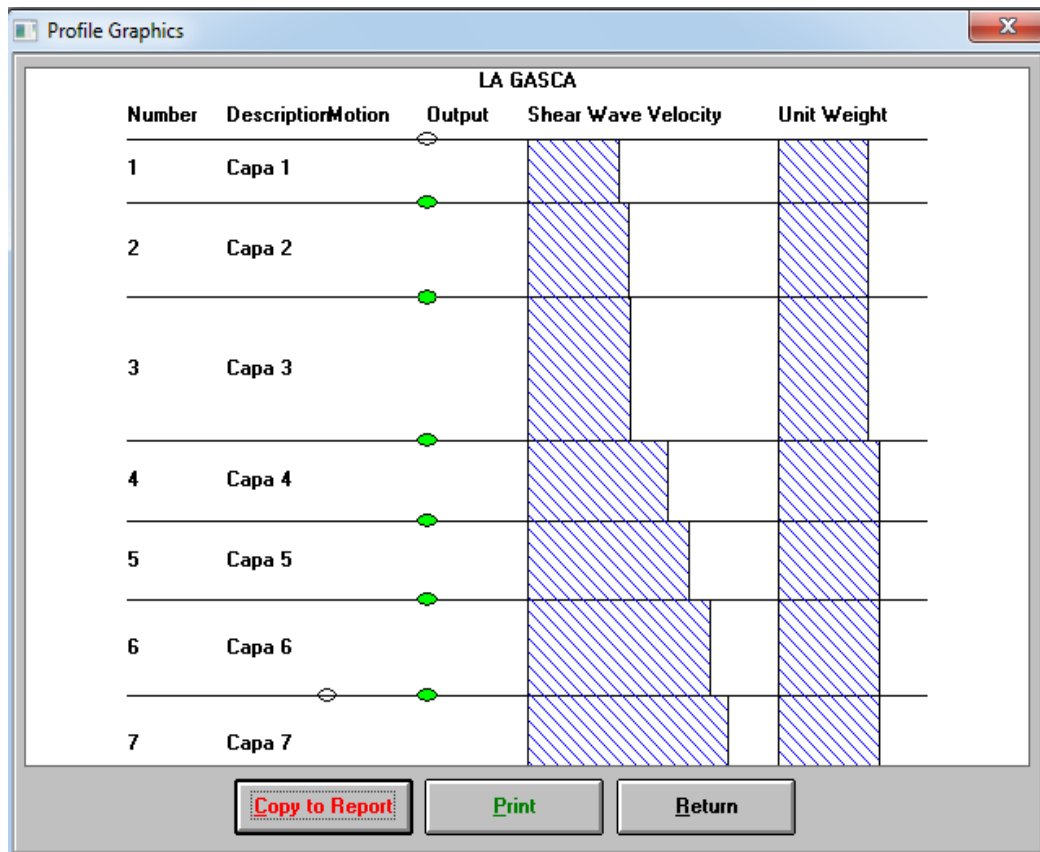


Figura 77: Gráfico del perfil estratigráfico ingresado.

En a la opción "Input Motion" y seleccionar el registro sísmico con el cual se desea realizar el análisis. En este ejemplo se selecciona el archivo con el nombre "Centro.eq". Las características de los registros de este movimiento se mostrarán en un cuadro localizado en la parte inferior de la pantalla. Adicionalmente en la parte derecha se presentan varias opciones para mostrar la gráficas del registro sísmico seleccionado.

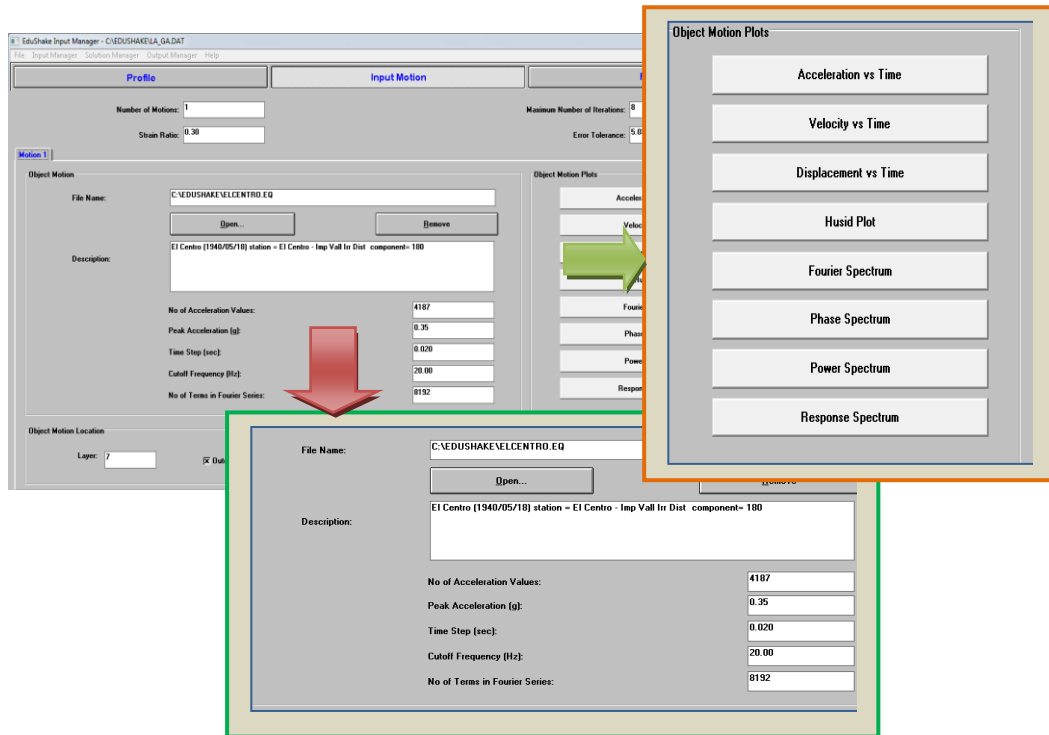


Figura 78: Selección del registro sísmico.

Al seleccionar las opciones mostradas a la derecha de la pantalla de la figura 78, se mostrarán gráficas como las siguientes:

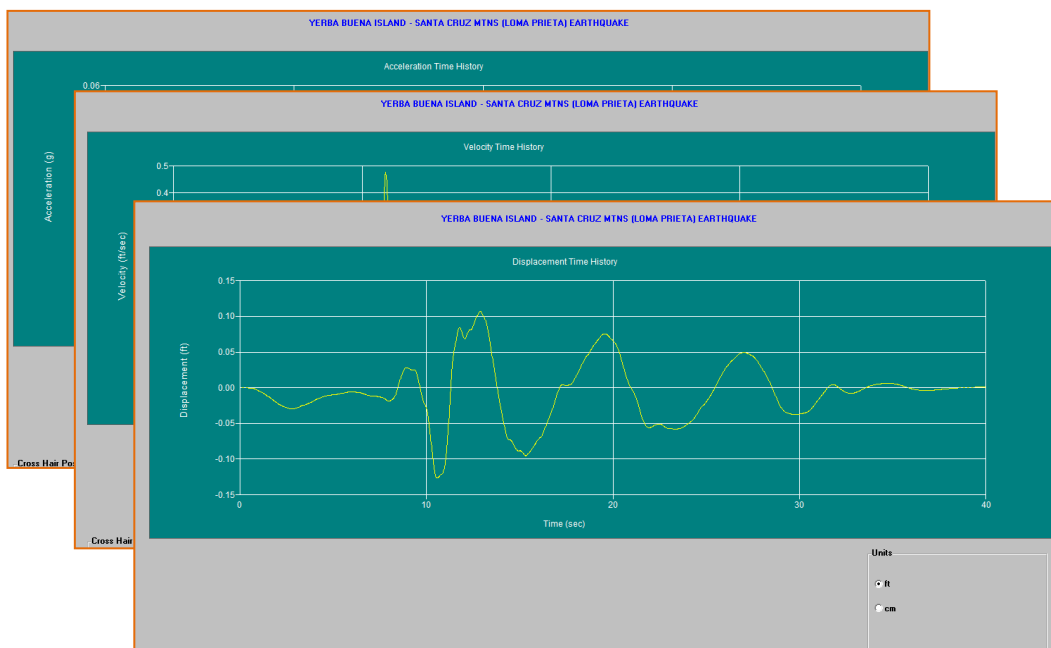


Figura 79: Gráficas de aceleración, velocidad y desplazamiento

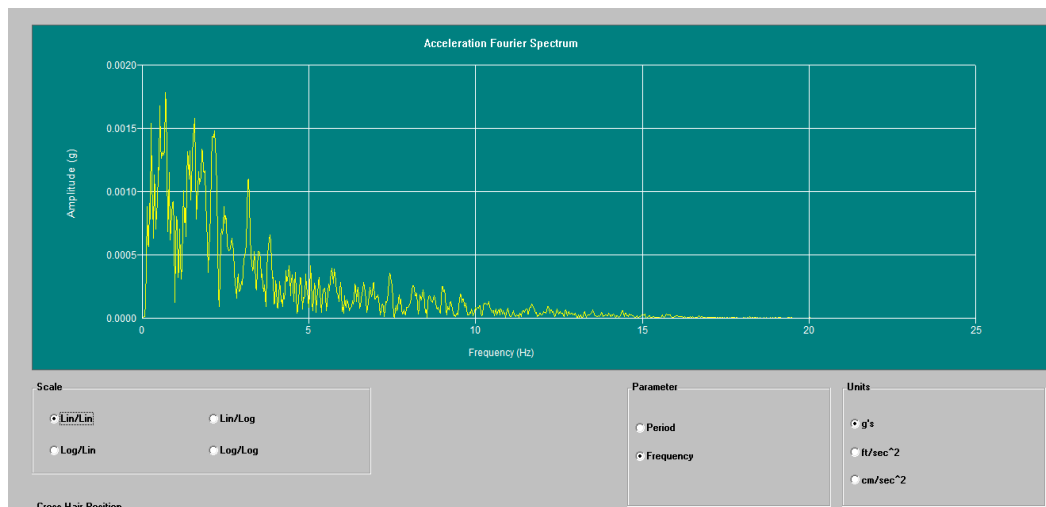


Figura 80: Espectro de Fourier

Posteriormente, se guarda el archivo con el nombre “LA_GASCA.dat”

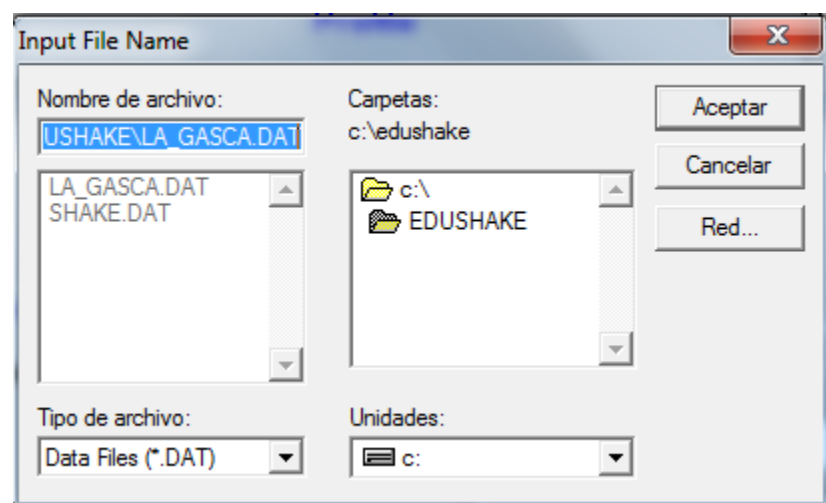


Figura 81: Ventana para guardar el archivo creado

Al dirigirse a la opción “Solution Manager” y seleccionar el archivo guardado anteriormente, se mostrará una pantalla como la indicada en la figura 82, en la parte inferior de la misma se visualiza “Running”, poco después aparecerá un cuadro en el cual se indica que el análisis ha

terminado, es necesario dar clic en “OK”, para poder observar posteriormente los resultados del análisis.

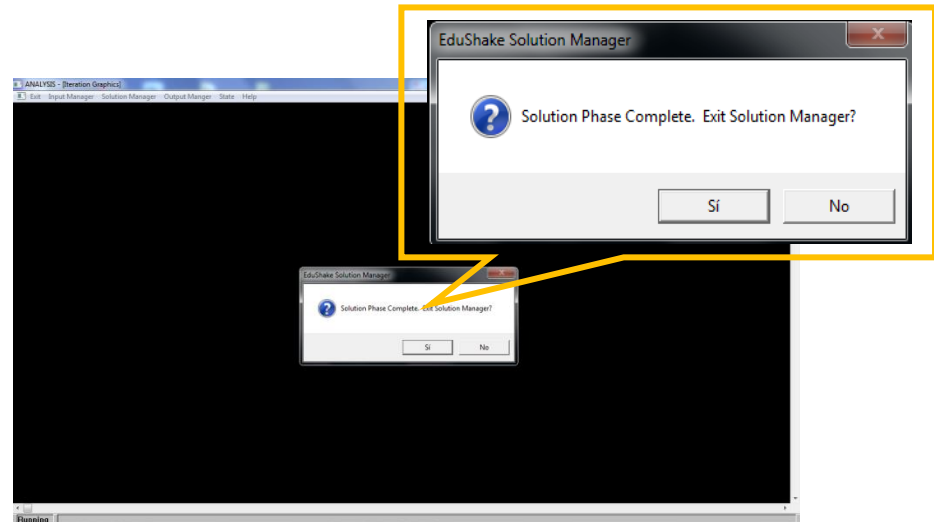


Figura 82: Ventana de análisis de EduShake

El siguiente paso es dirigirse a la opción “Output Manager”, aquí se pedirá que se abra el archivo que tenga la extensión “.LYR”

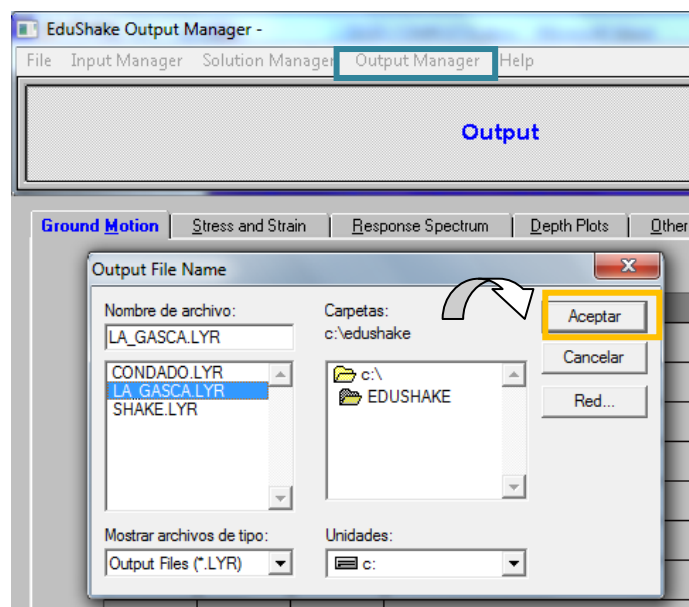


Figura 83: Selección del archivo con la extensión “.LYR”

La ventana que aparece una vez seleccionado el archivo, muestra diferentes opciones para ver los resultados del análisis, a continuación se indicarán solamente las gráficas del espectro de Fourier de aceleración y del espectro de respuesta de aceleración para un amortiguamiento del 5%.

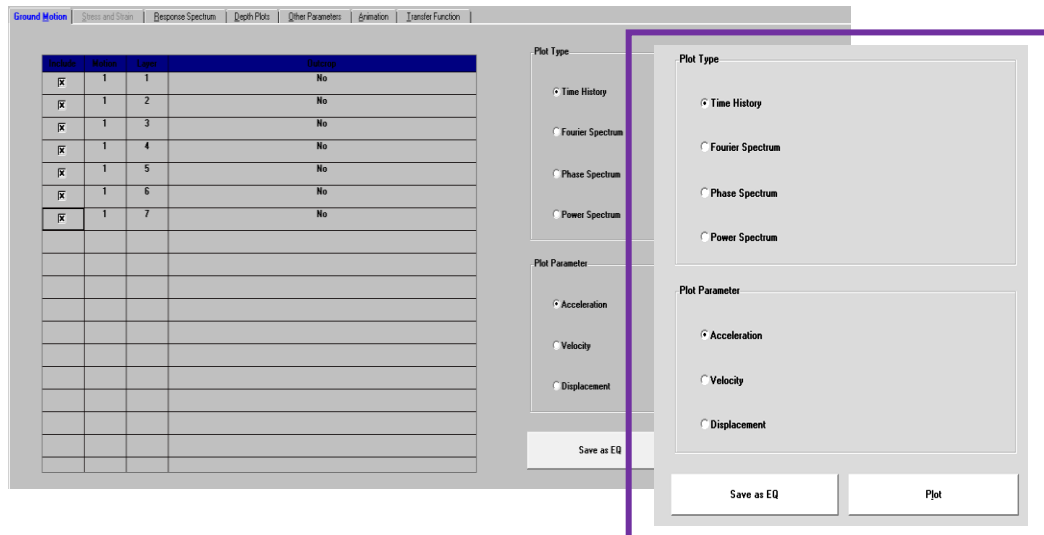


Figura 84: Opción de gráficas a plotear

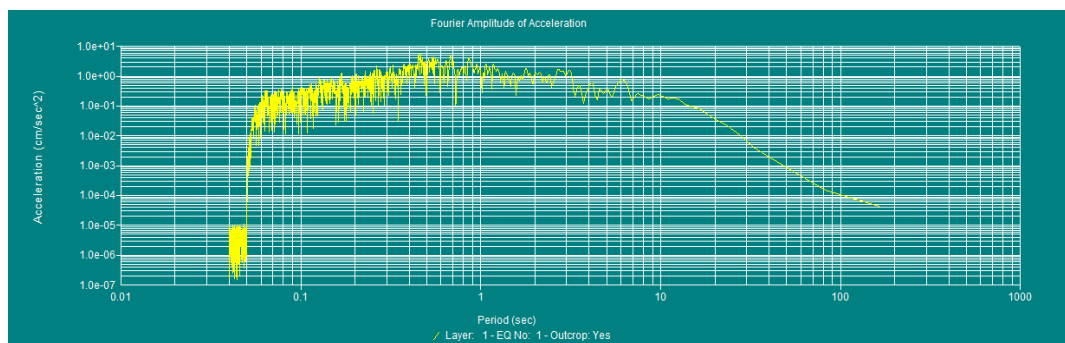


Figura 85: Espectro de Fourier

En la ventana mostrada en la figura 86, se puede seleccionar la capa de suelo y el valor del amortiguamiento para poder visualizar la gráfica, en este caso solo se seleccionan las capas que tengan un amortiguamiento del 5%.

Include	Motion	Layer	Outcrop	Damping
<input type="checkbox"/>	1	2	No	10.00%
<input type="checkbox"/>	1	2	No	20.00%
<input checked="" type="checkbox"/>	1	3	No	5.00%
<input type="checkbox"/>	1	3	No	10.00%
<input type="checkbox"/>	1	3	No	20.00%
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4	No	5.00%
<input type="checkbox"/>	1	4	No	10.00%
<input type="checkbox"/>	1	4	No	20.00%
<input checked="" type="checkbox"/>	1	5	No	5.00%
<input type="checkbox"/>	1	5	No	10.00%
<input type="checkbox"/>	1	5	No	20.00%
<input checked="" type="checkbox"/>	1	6	No	5.00%
<input type="checkbox"/>	1	6	No	10.00%
<input type="checkbox"/>	1	6	No	20.00%
<input checked="" type="checkbox"/>	1	7	No	5.00%
<input type="checkbox"/>	1	7	No	10.00%
<input type="checkbox"/>	1	7	No	20.00%

Figura 86: Obtención del espectro de respuesta

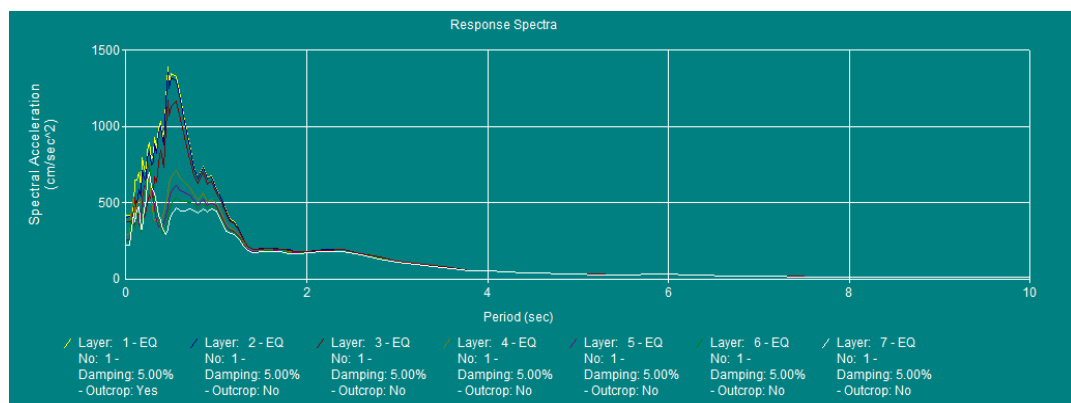


Figura 87: Espectro de Respuesta

La opción "Depth Plot", muestra los picos máximos tanto de aceleración, velocidad, desplazamiento, esfuerzo de corte entre otros. Las opciones para mostrar estas gráficas se encuentran en la parte derecha de la ventana.

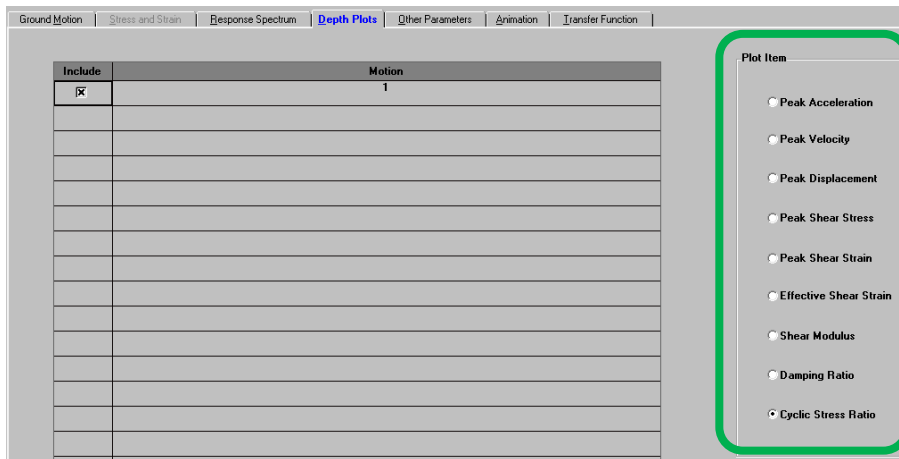


Figura 88: Opciones: Picos máximos de aceleración, velocidad, desplazamiento.

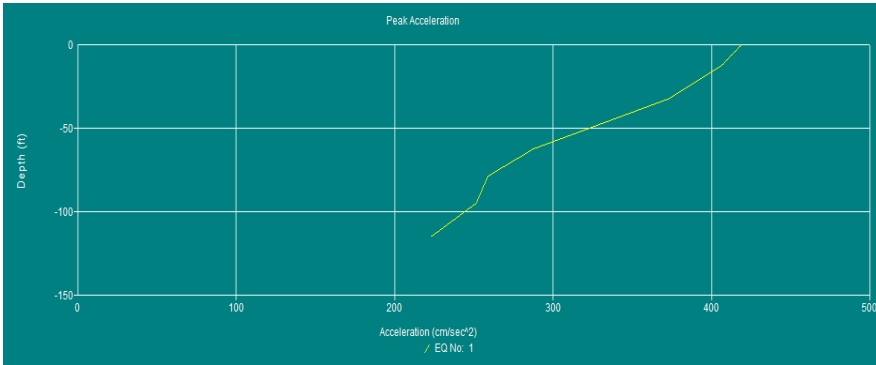


Figura 89: Pico máximo de aceleración.

Peak Acceleration (g):	0.427
Peak Velocity (m/sec):	0.495
Peak Displacement (m):	0.115
RMS Acceleration (g):	0.085
Arias Intensity (m/sec):	3.045
Response Spectrum Intensity (g ²):	4.174
Predominant Period (sec):	0.463
Mean Period (sec):	0.585
Bracketed Duration (sec):	29.580
Trifunac Duration (sec):	24.580
Spectral Acceleration at 0.3 sec (g):	0.872
Spectral Acceleration at 1.0 sec (g):	0.611
Characteristic Intensity (g ^{1.5} *sec ^{0.5}):	0.123

Figura 90: Parámetros adicionales presentados por el programa.

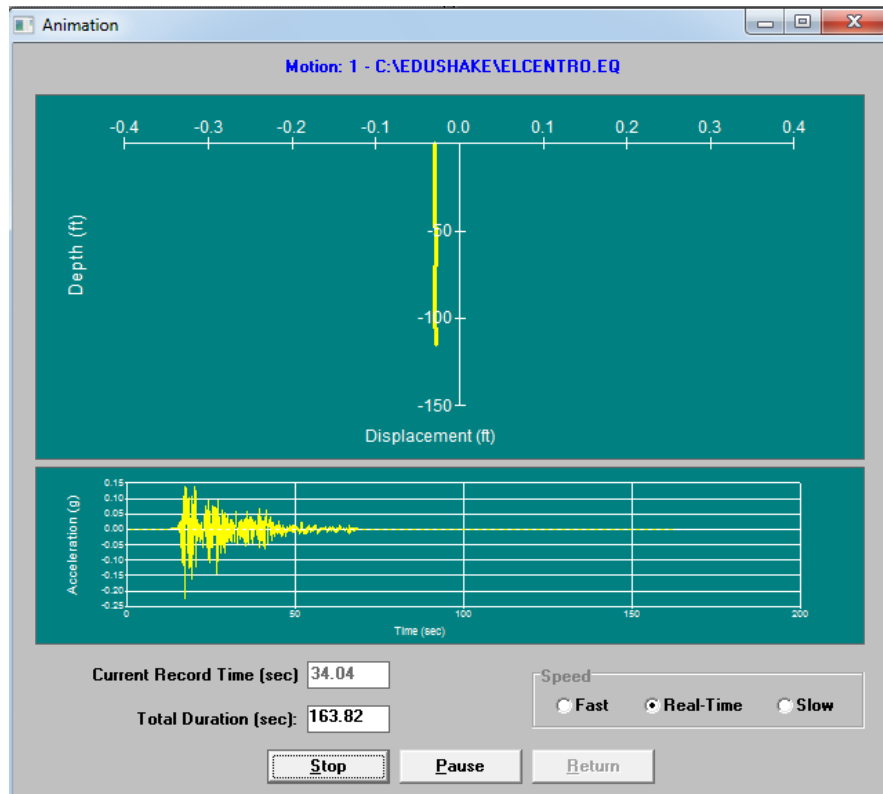


Figura 91: Animación del estrato de suelo ingresado.

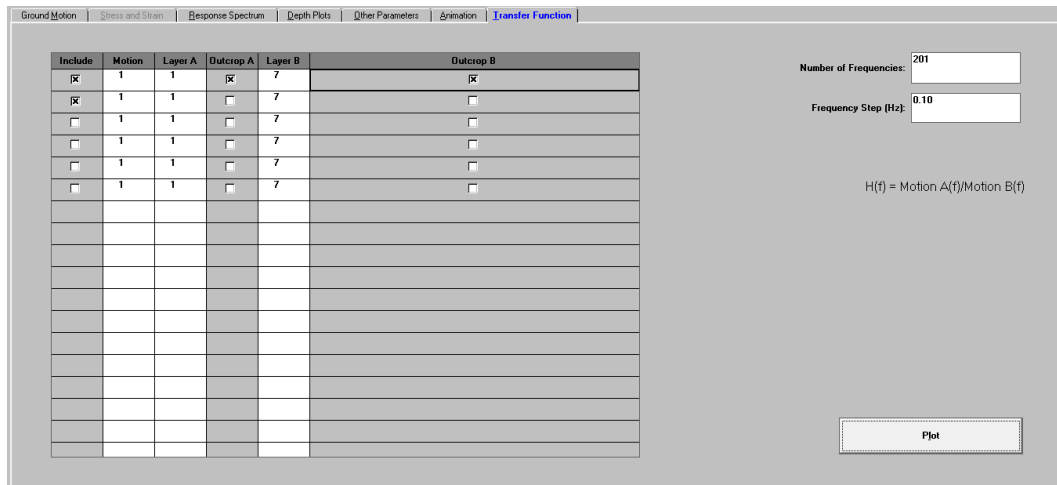


Figura 92: Función de transferencia. Selección de capas.

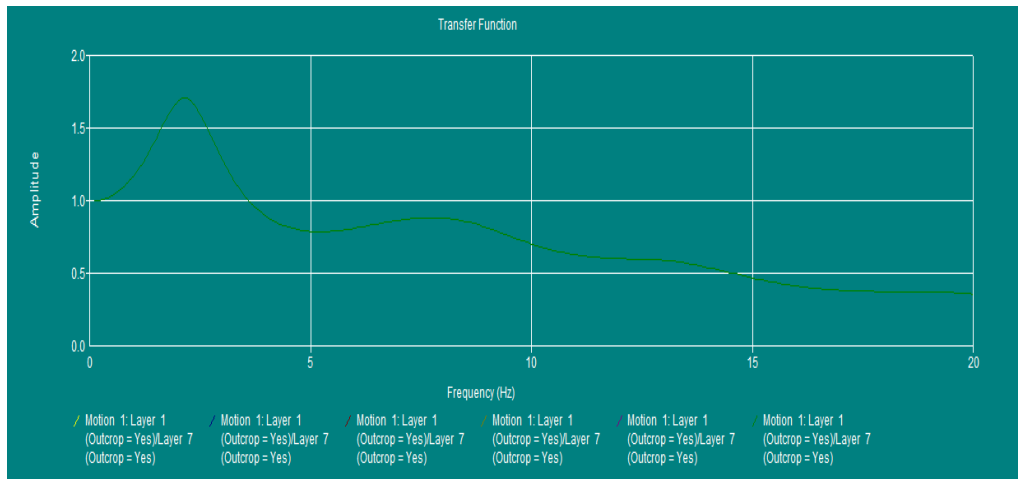


Figura 93: Función de transferencia

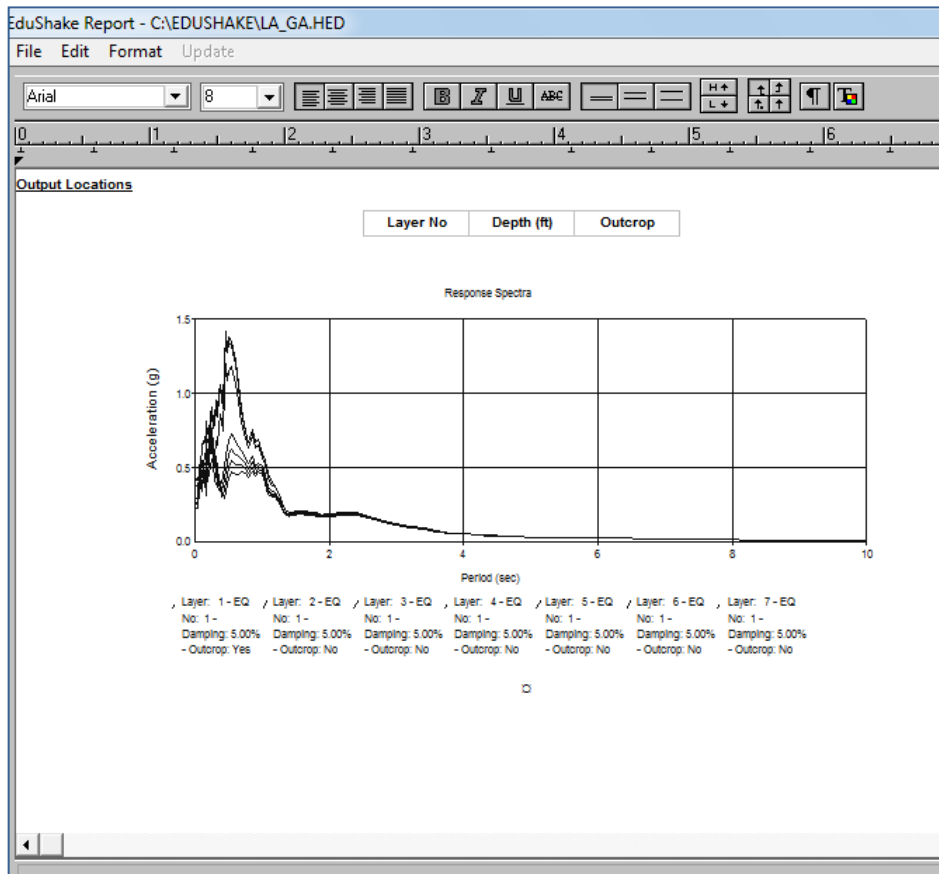


Figura 94: Reporte proporcionado por EduShake

4.7 COMPARACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS

Se realiza una comparación de los resultados mostrados por el software EduShake y Degtra.

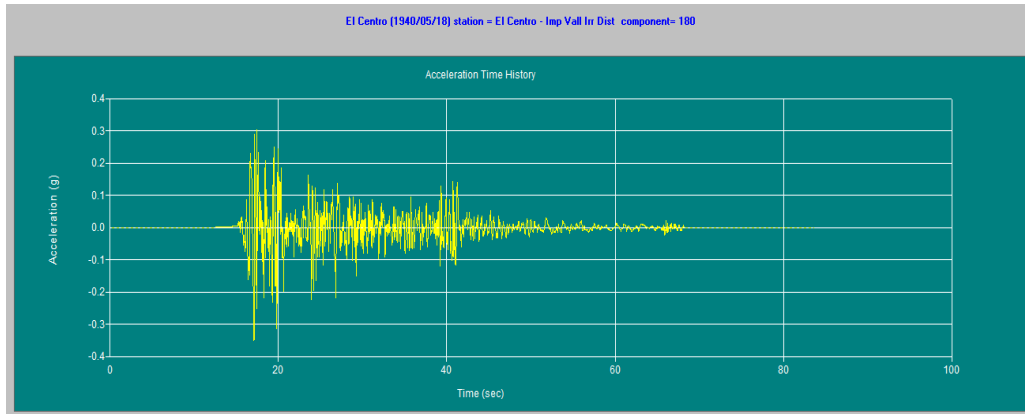


Figura 95: Acerogramma mostrado - EduShake

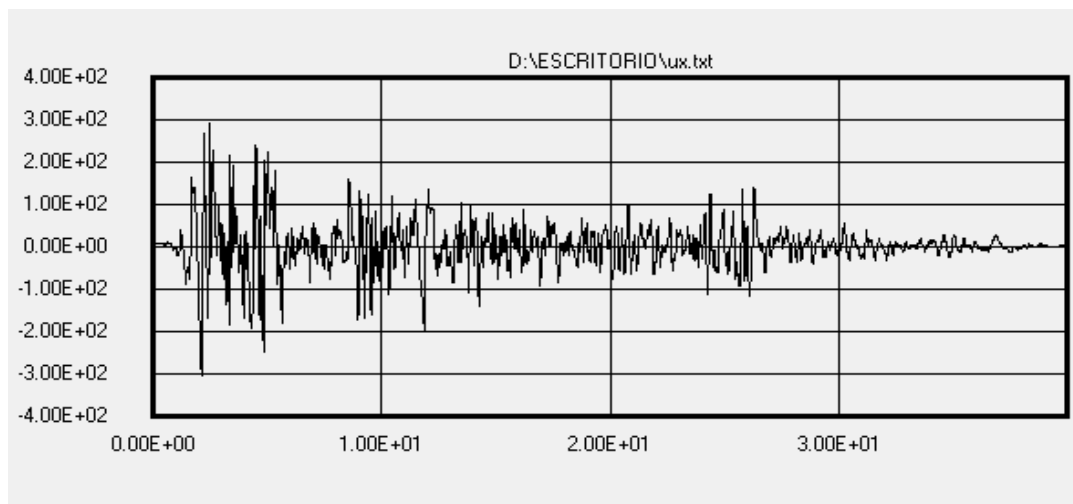


Figura 96: Acerogramma mostrado - Degtra

En el programa DEGTRA, se puede observar que en el espectro de aceleración a cielo libre el valor máximo está aproximadamente en 1333.31 cm/seg².

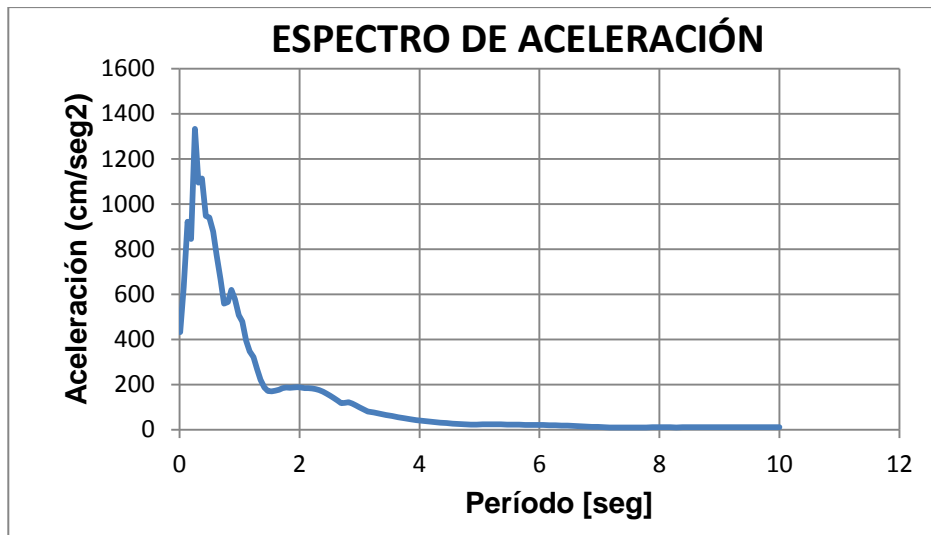
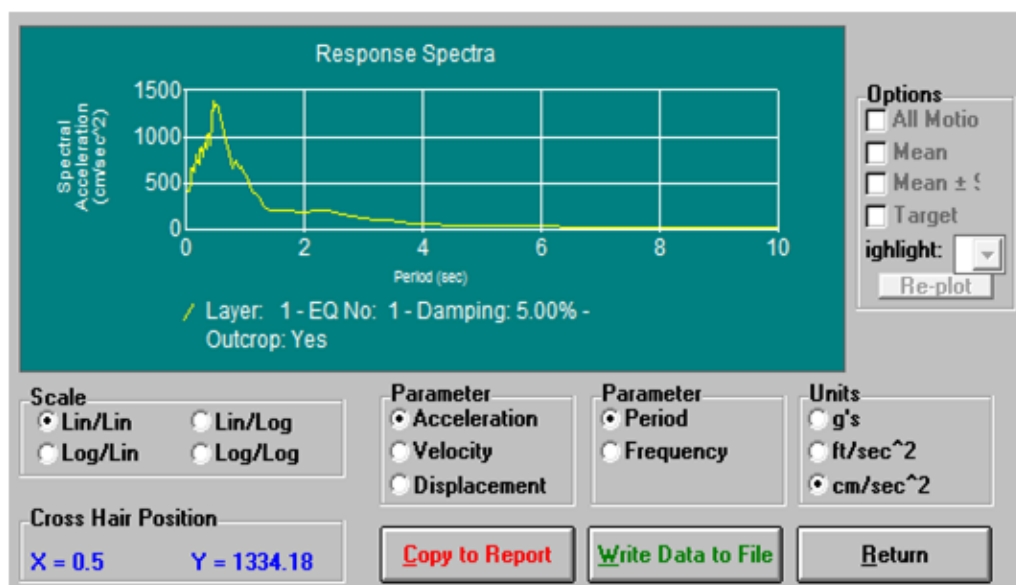


Figura 97: Espectro de aceleración a cielo libre- Degtra

En tanto que en el Software EduShake este valor está en 1334,18 cm/seg²



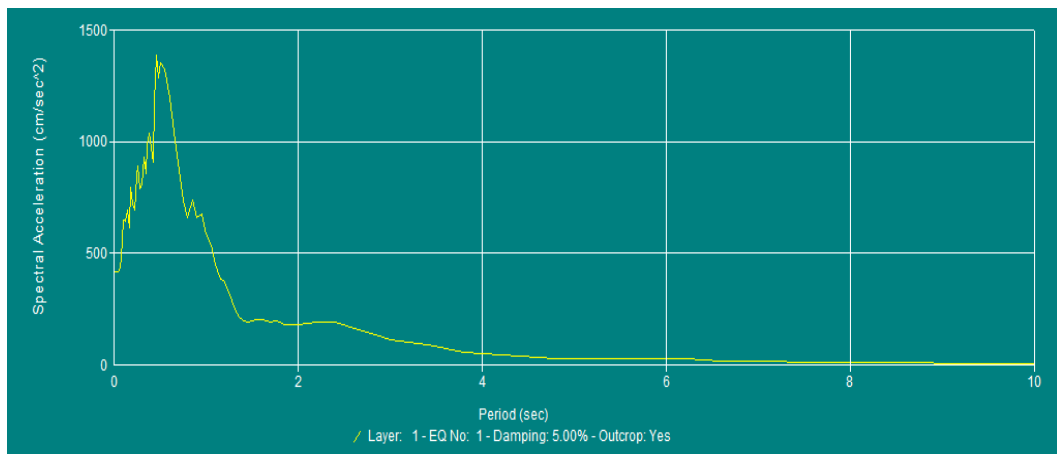


Figura 98: Espectro de aceleración a cielo libre- EduShake

Adicionalmente DEGTRA, muestra el valor de aceleración en roca en 733.6579 cm/seg².

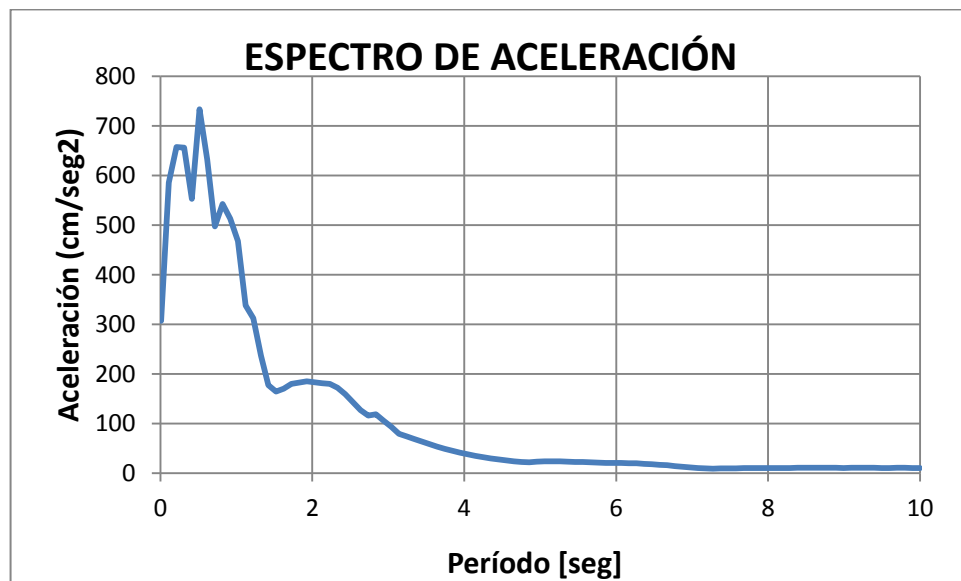


Figura 99: Espectro de aceleración roca – Degtra

EduShake presenta el valor de la aceleración en 729,67 cm/seg²

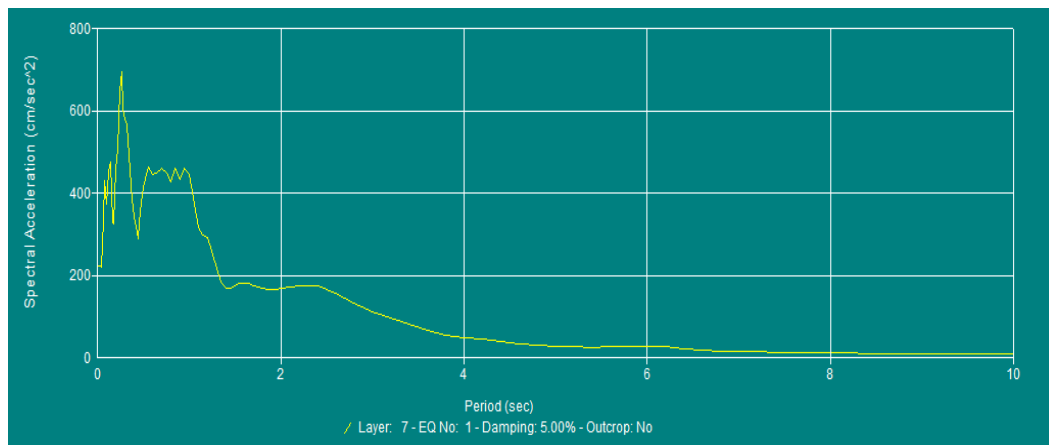
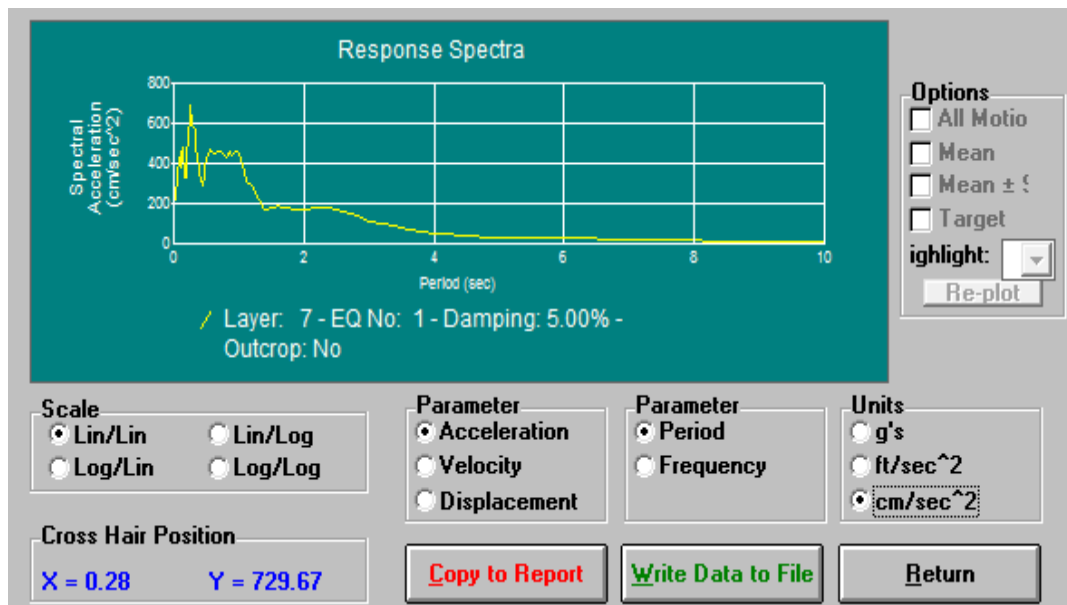


Figura 100: Espectro de aceleración roca - EduShake

Las figuras que se muestran a continuación presentan los espectros en roca y a cielo libre dados por los dos programas.

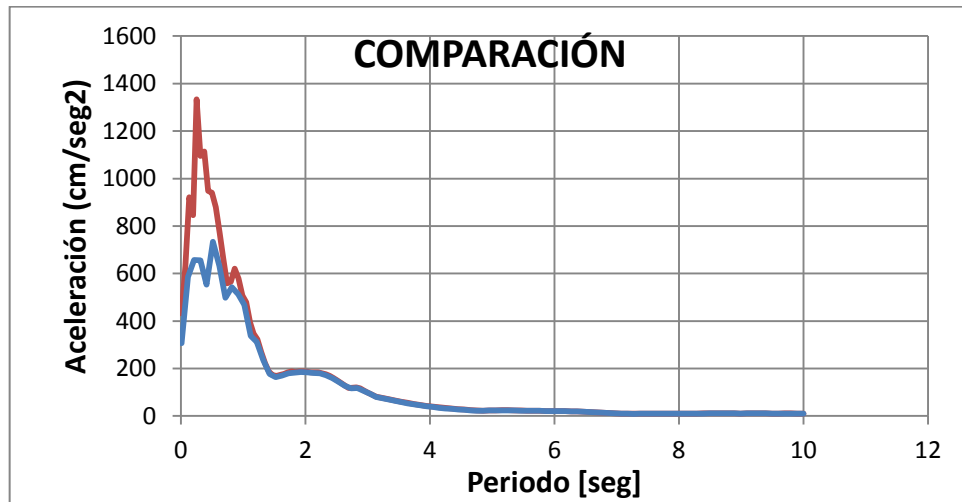


Figura 101: Espectro de aceleración roca & cielo libre - DEGTRA

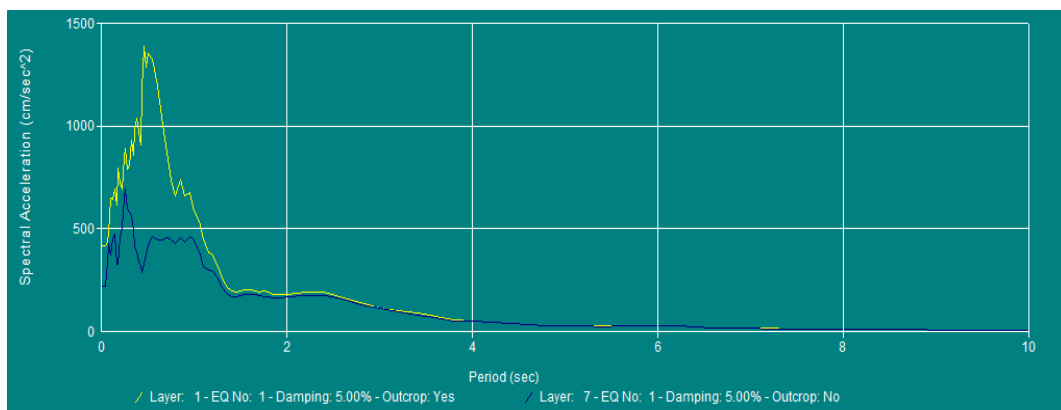
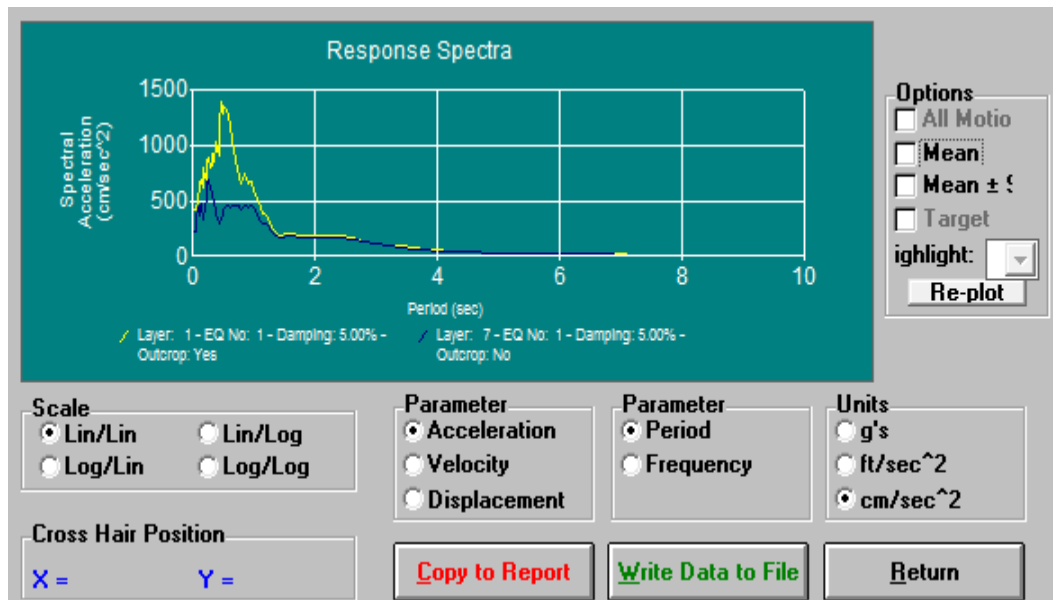


Figura 102: Espectro de aceleración roca & cielo libre - EduShake

CAPÍTULO 5 ESPECTROS DE DISEÑO DEL NEC – 11 Y MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE QUITO

5.1 ZONIFICACIÓN SÍSMICA

En la figura 103, se presenta la zonificación sísmica del NEC-11, encontrada para un período de retorno de 475 años, cantidad que está asociada a una vida de la estructura de 50 años con una probabilidad de excedencia del 10%.

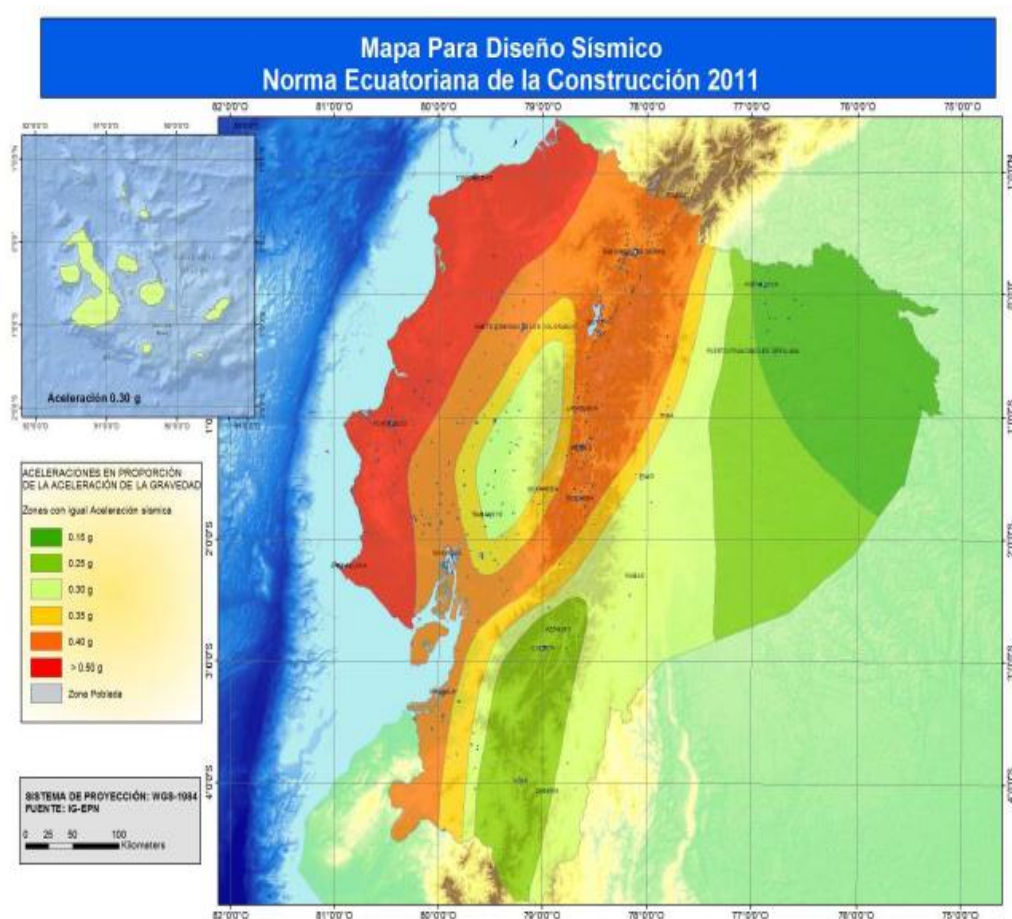


Figura 103: Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona “Z”. NEC-11.

5.1.1 Factor de Zona “Z”

El factor de zona Z representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la gravedad. El valor correspondiente a la ciudad de Quito es de 0.40g de acuerdo al mapa de zonificación sísmica establecido en la sección 2.5.2 de la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC-11).

El mapa de la figura 103 proviene de un estudio completo, en el que se considera fundamentalmente los resultados de los estudios de peligro sísmico del Ecuador actualizados a 2011, así como ciertos criterios adicionales (NEC, 2011) y los valores correspondientes a las zonas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Factor de zona “Z”. NEC-11

Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.50
Caracterización de la amenaza sísmica	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

5.2 TIPOS DE SUELO

Los perfiles de suelo que se presentan, hacen referencia a depósitos estables de suelo. En caso de que el depósito no se sea estable (laderas, suelos licuables, rellenos), no deben utilizarse las presentes definiciones, y en su lugar debe realizarse una investigación geotécnica que identifique la estabilidad del depósito, los coeficientes de sitio y las medidas correctivas que se deben tomar para ejecutar una construcción en el lugar. (Sangurima, 2013)

En la sección 2.5.4 de la norma (NEC-11) se definen seis tipos de suelos de acuerdo a tres parámetros con base en los 30 metros superiores del mismo: la velocidad media de la onda cortante, el número de golpes del ensayo de penetración estándar para el 60% de la energía teórica a lo largo de todo el perfil y finalmente dependiendo si el suelo es cohesivo o no cohesivo se tomará en cuenta la resistencia media al corte, o el número de golpes promedio del ensayo de penetración estándar respectivamente. Además se utiliza el contenido de agua y el índice de plasticidad.

Tabla 5: Clasificación de los perfiles de suelo. NEC-11

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100 \text{ KPa}$ ($\approx 1 \text{ Kgf/cm}^2$)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ 100 KPa ($\approx 1 \text{ Kgf/cm}^2$) $> S_u \geq 50 \text{ KPa}$ ($\approx 0.5 \text{ Kgf/cm}^2$)

Tabla 6: Clasificación de los perfiles de suelo. NEC-11

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s \leq 180 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $W \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ KPa}$ ($\approx 0.50 \text{ Kg/cm}^2$)
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista (Ver 2.5.4.9- NEC-11). Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H >3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3 —Arcillas de muy alta plasticidad (H >7.5 m con índice de Plasticidad IP >75)	
	F4 —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H >30m)	
	F5 —Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
F6 —Rellenos colocados sin control ingenieril.		

5.3 FACTORES DE SITIO DEL NEC-11

Clasificar el perfil de suelo permite determinar los valores de los coeficientes de amplificación o reducción dinámica, a continuación se menciona cada uno de estos factores:

- **Factor de Aceleración (Fa):** Amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleración para diseño en roca. En la tabla 7 se muestran los valores posibles para los distintos tipos de perfil de suelo.

Tabla 7: Tipo de suelo y factores de sitio Fa. NEC-11

Tipo de perfil de subsuelo	Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Valor Z (Aceleración esperada en roca, g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.5
A		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C		1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D		1.6	1.4	1.30	1.25	1.2	1.15
E		1.8	1.5	1.40	1.28	1.15	1.05

- **Factor de Desplazamiento (Fd):** Amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de desplazamiento para diseño en roca. En la tabla 8 se muestran los valores posibles para los distintos tipos de perfil de suelo.

Tabla 8: Tipo de suelo y factores de sitio Fd. NEC-11

Tipo de perfil de subsuelo	Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Valor Z (Aceleración esperada en roca, g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.5
A		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C		1.6	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25
D		1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
E		2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5

- **Factor Fs:** Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos. En la tabla 9 se muestran los valores posibles para los distintos tipos de perfil de suelo.

Tabla 9: Tipo de suelo y factor del comportamiento inelástico del subsuelo Fs. (NEC-11)

Tipo de perfil de subsuelo	Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Valor Z (aceleración esperada en roca, g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.5
A		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C		1.0	1.1	1.2	1.25	1.3	1.45
D		1.2	1.25	1.3	1.4	1.5	1.65
E		1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.00

Para los suelos tipo F no se proporcionan valores de dichos coeficientes, debido a que requieren un estudio especial, con investigaciones geotécnicas

específicas de suelo, que permitan conocer y modelar su comportamiento dinámico, según lo estipula la norma NEC-11 en su sección 2.5.4.9.

5.4 ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES

El espectro elástico de diseño en aceleraciones muestra la reacción de una estructura ante la vibración del suelo, expresada como fracción de la gravedad S_a , considera el factor Z , y el tipo de suelo en donde está emplazada la estructura, se define en la sección 2.5.5.1 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11) y se obtiene a partir de las ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$S_a = \eta Z F_a \quad \text{para } 0 \leq T \leq T_c \quad (5-1)$$

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r \quad \text{para } T > T_c \quad (5-2)$$

Dónde:

$r = 1.0$ para suelos A, B o C, y $r=1.5$ para suelos D o E;

Z = Es el factor de zona sísmica;

η = Es relación de amplificación espectral, que varía, dependiendo de la región del Ecuador.

$$\eta = \frac{S_a}{Z} \quad (5-3)$$

- $\eta = 1.80$, para provincias de la Costa, excepto Esmeraldas
- $\eta = 2.48$, para provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos
- $\eta = 2.60$, para provincias del Oriente

T_c se determina con la siguiente expresión:

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (5-4)$$

Dentro del análisis dinámico, para evaluar la respuesta de los modos de vibración diferentes al fundamental se deben utilizar las ecuaciones que se muestran en la parte punteada de la gráfica a fin de obtener un espectro sísmico elástico como el que se muestra en la Figura 104.

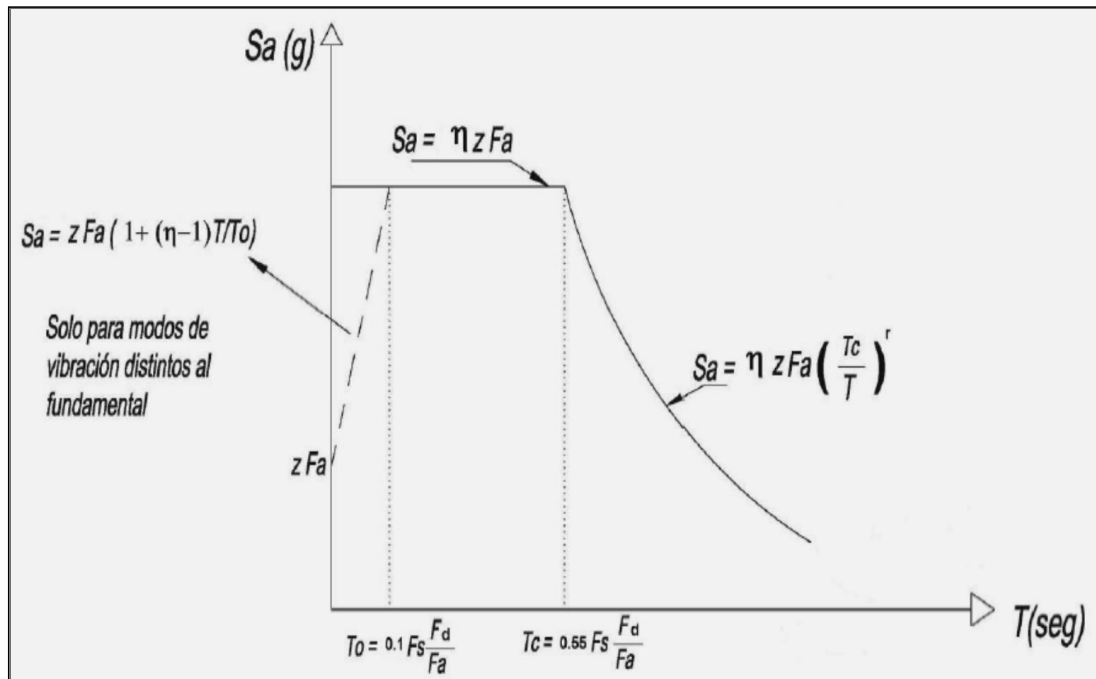


Figura 104: Espectro Sísmico Elástico de Aceleraciones que representa el sismo de diseño. NEC-11

5.5 ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN DESPLAZAMIENTOS

Cuando se requiera la definición de los desplazamientos espectrales elásticos para diseño, correspondiente al nivel del sismo de diseño, se utilizará el siguiente espectro elástico de diseño de desplazamientos S_d (en metros) definido para una fracción del amortiguamiento respecto al crítico

igual a 0.05 (Figura 105). (Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-11, 2011)

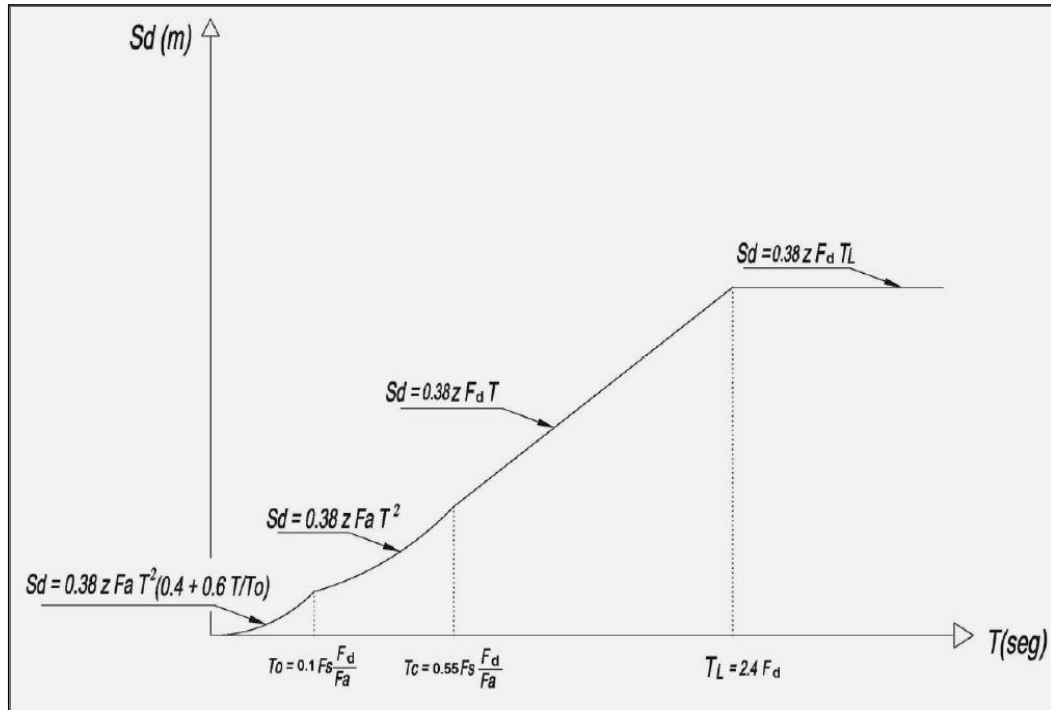


Figura 105: Espectro sísmico elástico de desplazamientos para diseño. NEC-11

Las ecuaciones que se emplean para el diseño de espectros de desplazamientos son las siguientes:

$$S_d = 0.38ZF_a T^2 \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \quad \text{para } 0 < T \leq T_0 \quad (5-5)$$

$$S_d = 0.38ZF_a T^2 \quad \text{para } T_0 < T \leq T_c \quad (5-6)$$

$$S_d = 0.38ZF_d T \quad \text{para } T_c < T \leq T_L \quad (5-7)$$

$$S_d = 0.38ZF_d T_L \quad \text{para } T > T_L \quad (5-8)$$

Donde los valores de los periodos límite T_0 , T_c y T_L , son:

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (5-9)$$

$$T_0 = 0.10 F_s \left(\frac{F_d}{F_a} \right) \quad (5-10)$$

$$T_L = 2.4 F_d \quad (5-11)$$

No obstante, para los perfiles de suelo tipo D y E, los valores de T_L se limitarán a un valor máximo de 4 segundos en los espectros de desplazamientos. La forma espectral y ecuaciones que definen el espectro de diseño elástico de desplazamientos consideran la respuesta dinámica y efectos de sitio.

5.6 ESPECTROS REDUCIDOS

Se presentan los espectros reducidos tomando en cuenta que se consideren estructuras con sistemas de aislación. Para el cálculo de los espectros reducidos tanto de aceleración como de desplazamiento se requiere la siguiente información:

β_{ef} = Coeficiente de amortiguamiento efectivo del sistema de aislación.

T = Período a partir del cual se desea tener la reducción del espectro.

Con estos valores se obtiene el factor de reducción por amortiguamiento

B.

$$B = \left(\frac{\beta_{ef}}{0.05} \right)^{0.30} \quad (5-12)$$

Finalmente las ordenadas espectrales del espectro reducido se obtienen con la siguiente ecuación:

$$S_a(T, \beta) = \frac{S_a(T, 5\%)}{B} \quad (5-13)$$

MIZOSIQ V2.0 determina los espectros reducidos para el sismo de diseño, DE, que tiene un período de retorno de 475 años y para el sismo máximo considerado MCE, que tiene un período de retorno de 2475 años.

El sismo MCE se obtiene multiplicando por 1.5 las ordenadas espectrales del sismo DE.

Aplicando la formulación descrita en el literal 5.4, 5.5y 5.6 de este capítulo, se determinan los espectros de diseño de aceleración, desplazamiento y espectros reducidos.

Se consideran los factores de sitio planteados por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11) para cada tipo de suelo y los planeados por los estudios de ERN.

Se muestran los espectros de reducidos para períodos de retorno de 475 Años y 2475 Años, con un beta efectivo del 15% y un período $T=1.5$ seg.

5.7 Análisis de los puntos ubicados en la Zona Norte

Toma en consideración los siguientes sectores:

5.7.1 Colegio Benalcázar (Sector 30)

La información empleada para la determinación de los espectros se indica a continuación:

Tabla 10: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 30

Factores de sitio	ERN	NEC-11
Fa=	1.255	1.20
Fd=	1.105	1.30
Fs=	1.225	1.30

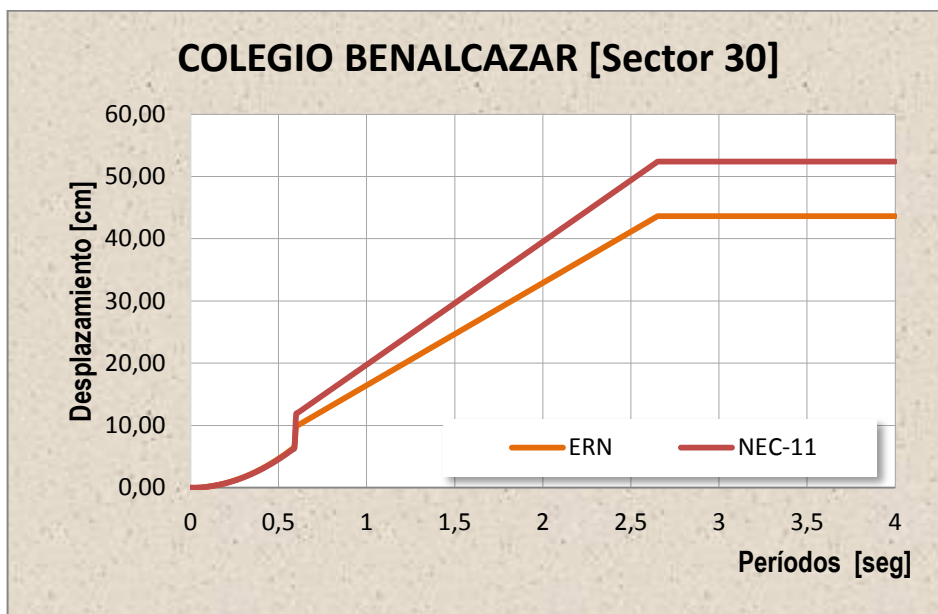


Figura 106: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN

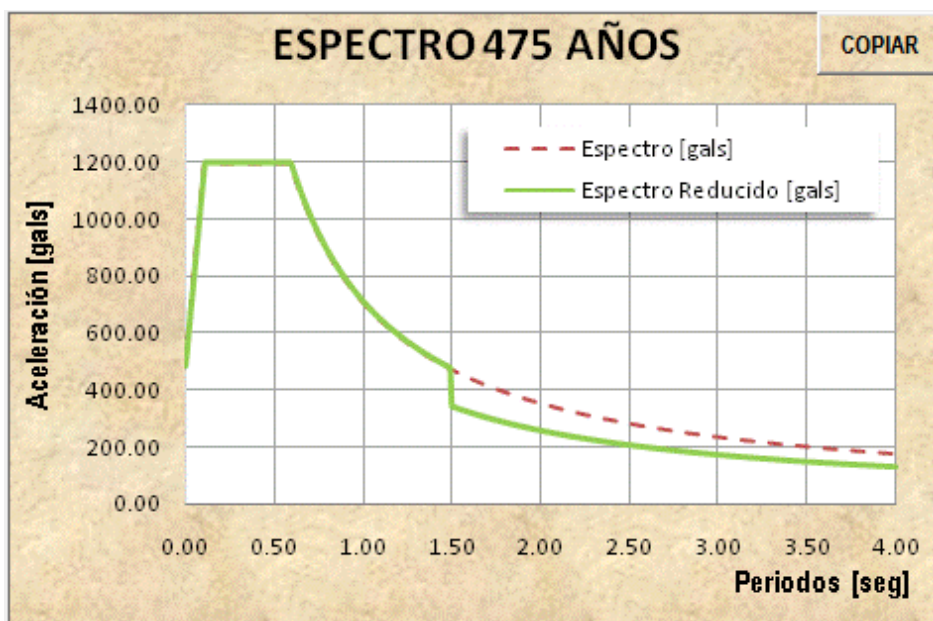


Figura 107: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años

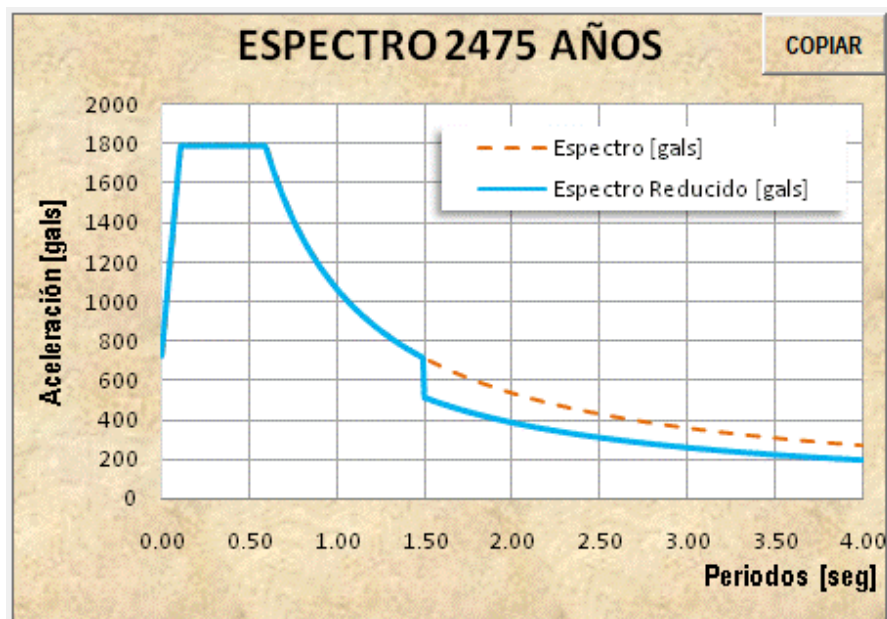


Figura 108: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=2475 Años

5.7.2 El Condado (Sector 60)

De igual manera con la siguiente información y la formulación detallada anteriormente, se obtienen las gráficas respectivas.

Tabla 11: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 60

Factores de sitio	ERN	NEC-11
Fa=	1.155	1.20
Fd=	1.305	1.40
Fs=	0.74	1.50

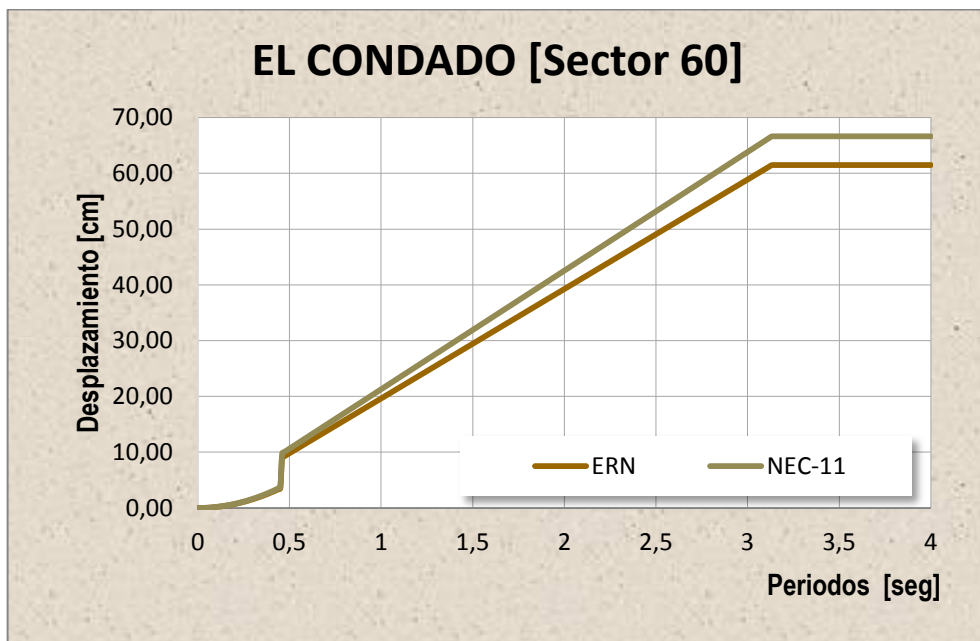


Figura 109: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN

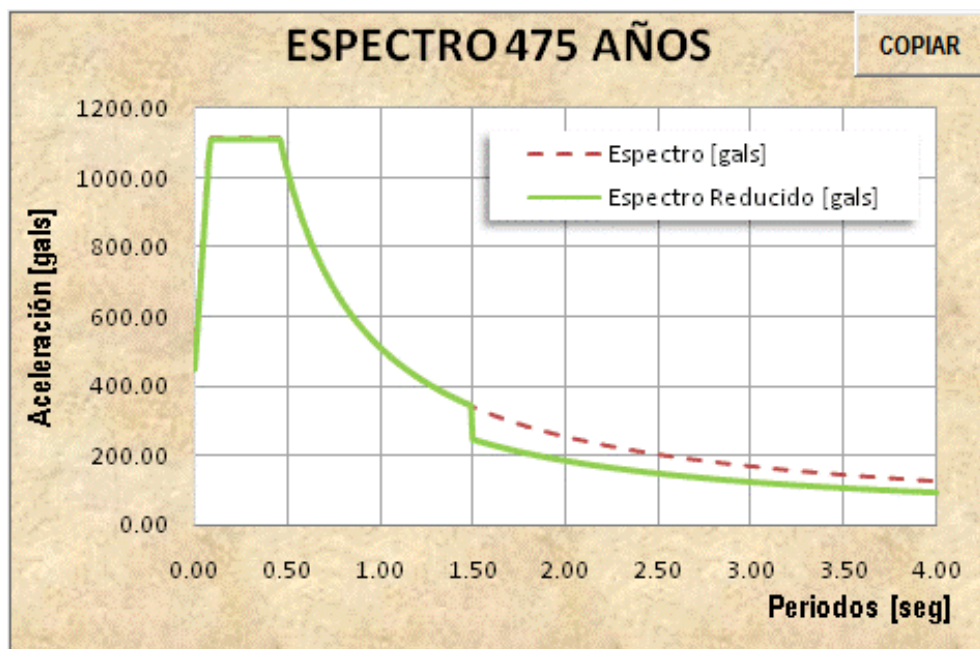


Figura 110: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años

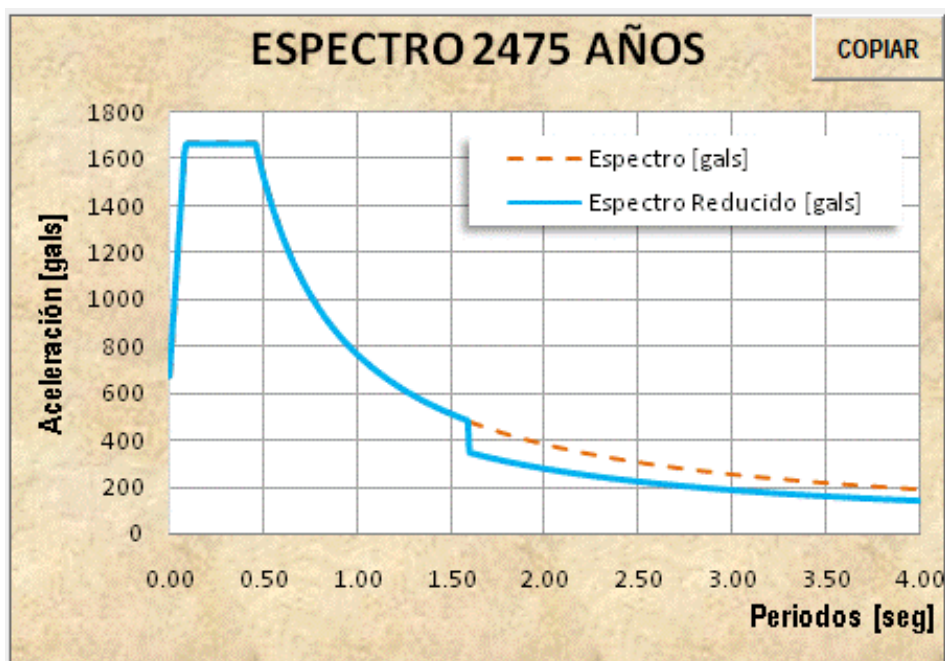


Figura 111: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=2475 Años

5.7.3 La Gasca (Sector 12)

De igual manera con la siguiente información y la formulación detallada anteriormente, se obtienen las gráficas respectivas.

Tabla 12: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 12

Factores de sitio	ERN	NEC-11
Fa=	1.055	1.20
Fd=	1.505	1.40
Fs=	0.74	1.50

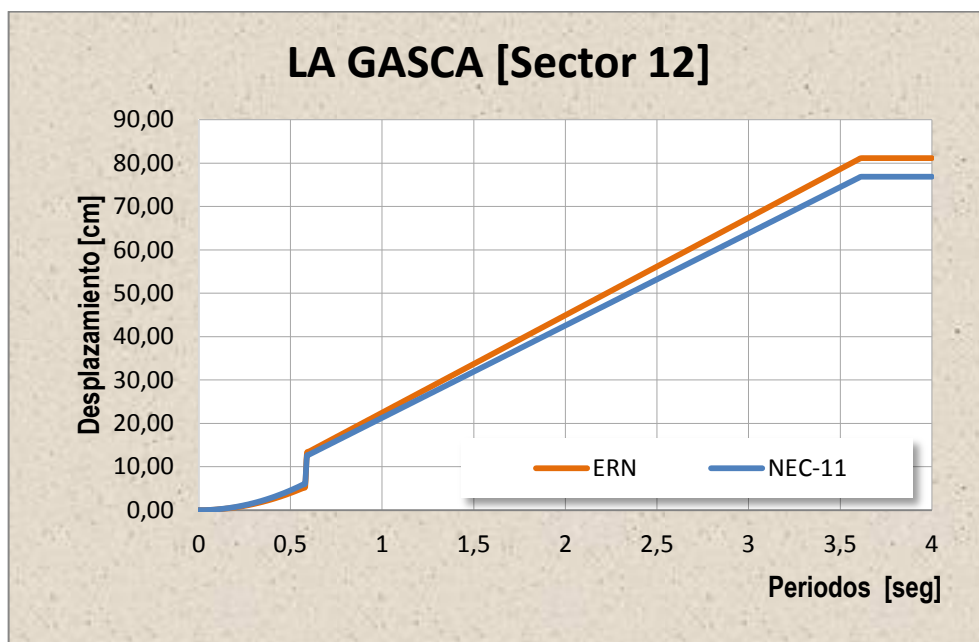


Figura 112: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN

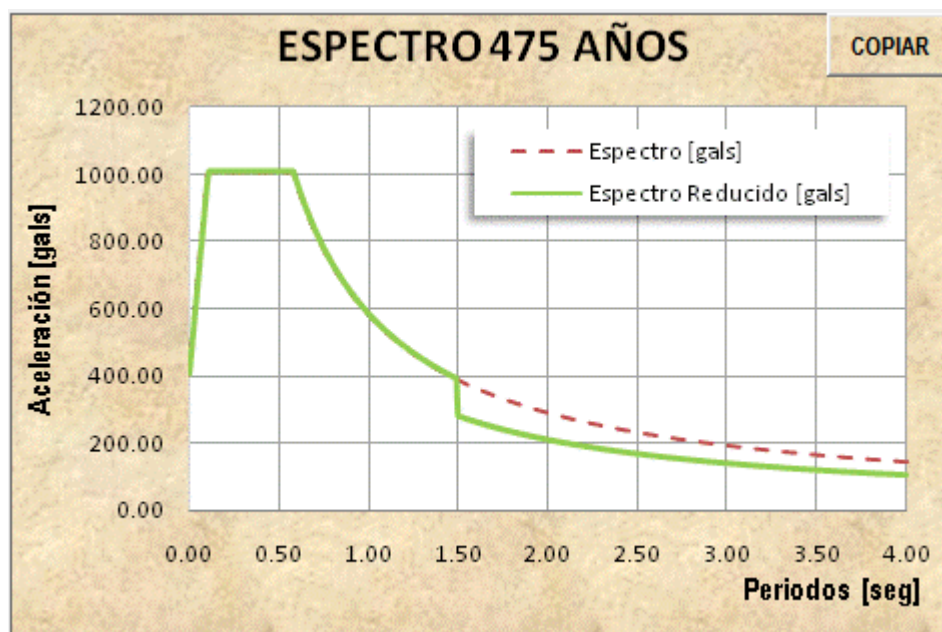


Figura 113: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años

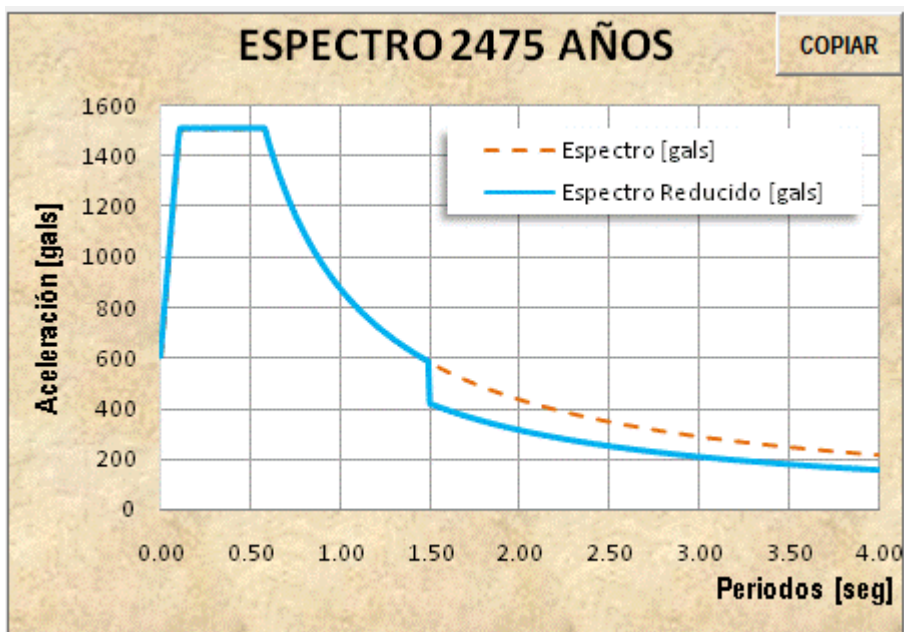


Figura 114: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=2475 Años

5.8 Análisis de los puntos ubicados en la Zona Sur

Se presenta el análisis para dos sectores de esta zona

5.8.1 Chimbacalle (Sector 31)

De igual manera con la siguiente información y la formulación detallada anteriormente, se obtienen las gráficas respectivas.

Tabla 13: Factores de sitio ERN – NEC-11. Sector 31

Factores de sitio	ERN	NEC-11
Fa=	1.255	1.20
Fd=	0.975	1.40
Fs=	1.225	1.50

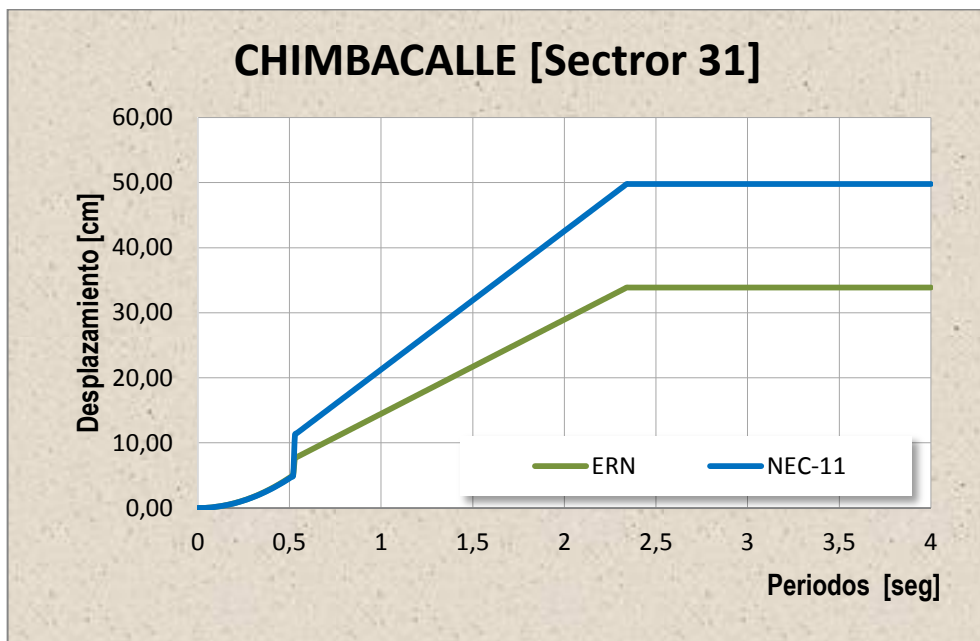


Figura 115: Espectro de desplazamiento NEC-11 & ERN

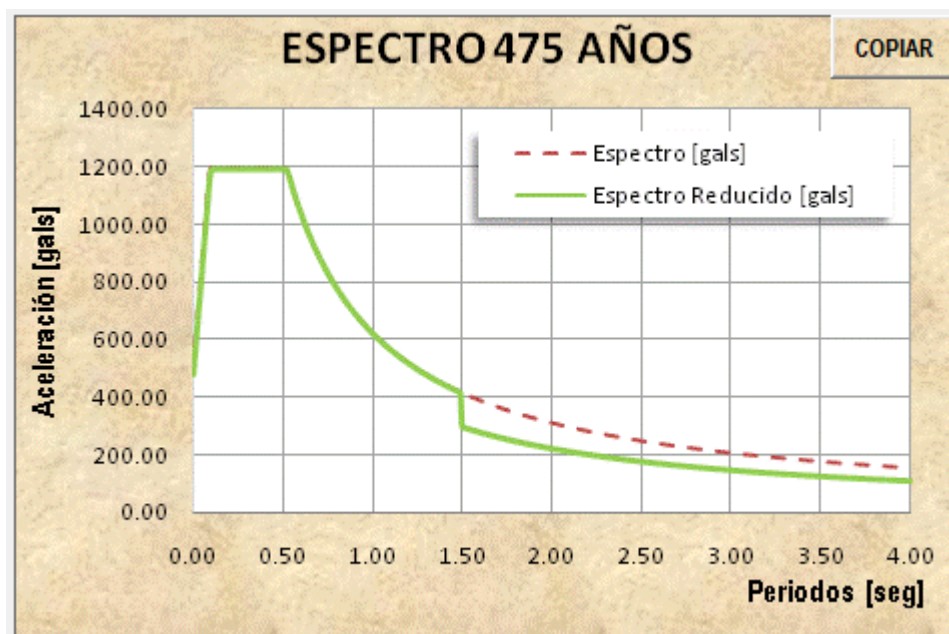


Figura 116: Espectro de diseño & Espectro Reducido T=475 Años

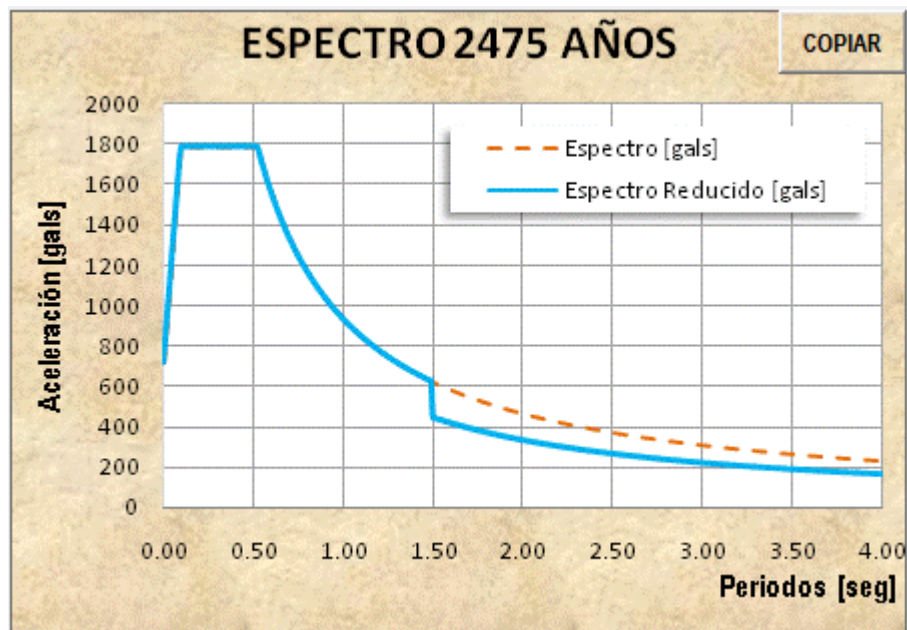


Figura 117: Espectro de diseño & Espectro Reducido. T=2475 Años

5.9 FACTORES DE SITIO DE LA MICROZONIFICACION SISMICA DE QUITO.

5.9.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han presentado sismos importantes, siendo unos de especial atención para la ingeniería, debido a los daños y destrozos causados a centros urbanos. Muchos de estos sismos causaron daños en elementos estructurales e incluso colapso de edificaciones. A continuación se hace referencia al evento sísmico ocurrido en Chile (Valparaíso). (Noticreto, 1995)

En el sismo de Valparaíso del 3 de marzo de 1985, la tierra comenzó a moverse compulsivamente, anunciando un terremoto de gran magnitud, que alcanzaría con el correr de los minutos una intensidad de 7,8 en la escala de Richter. Con epicentro entre Valparaíso y Algarrobo a unos 2

kilómetros de la costa unos 15 kilómetros de profundidad, el terremoto se había producido como consecuencia de una falla inversa entre placas. La placa de Nazca, que avanzaba hacia el este, había hecho un violento contacto con la placa de Sudamérica, que avanzaba a su vez hacia el oeste. (Fuentes, 2013)

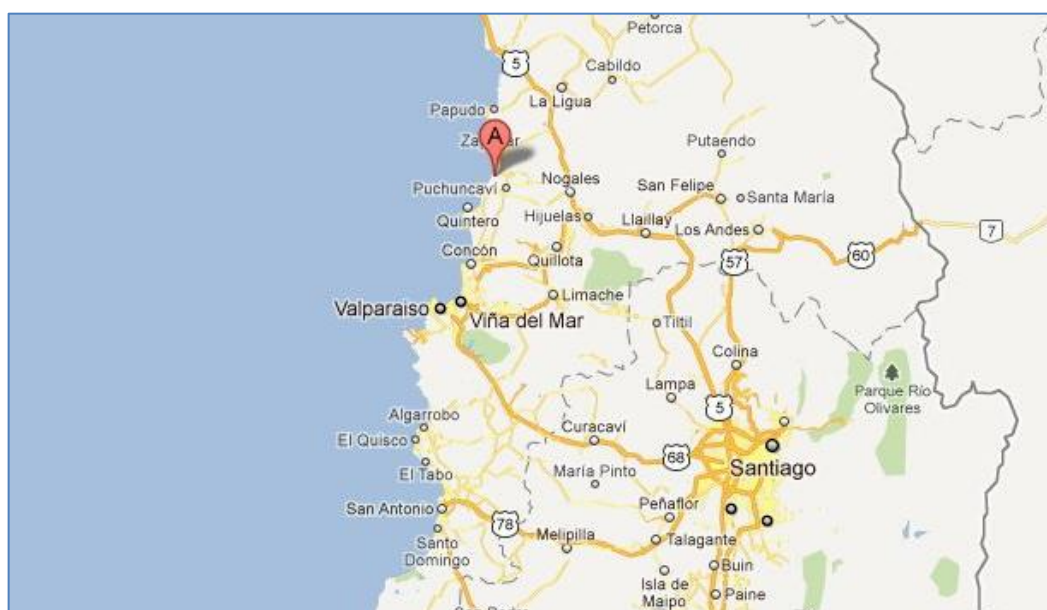


Figura 118: Localización geográfica Valparaíso

Los daños fueron catastróficos, especialmente en zonas puntuales como Santiago, San Antonio y Valparaíso. En localidades rurales y semi-rurales de las regiones Metropolitana, de O'Higgins y del Maule (como Melipilla, Alhué y Rengo) el terremoto fue especialmente destructivo, lo que se constató con el derrumbe de numerosas construcciones y edificaciones hechas de adobe. El perjuicio no fue solamente económico sino que también psicológico. Muchos chilenos quedaron verdaderamente traumatizados con la intensa experiencia.

Estudios realizados con posterioridad al sismo revelan que las comunas de Santiago Centro, Las Condes, Providencia, San Miguel y parte de Ñuñoa, fueron menos vulnerables por estar levantadas sobre un suelo compuesto predominantemente por ripio o grava, en cambio en comunas como Quinta Normal Renca y Estación Central, que están erigidas sobre suelo fino o mezcla de arcilla, arena fina, limosa y ceniza volcánica fueron más dañados.

A esto hay que agregarle que en el primer grupo, el tipo de construcción predominante es la albañilería reforzada, en cambio en el segundo, zona más antigua de la capital predominaba la albañilería simple y el adobe. (Maggio, 2010)

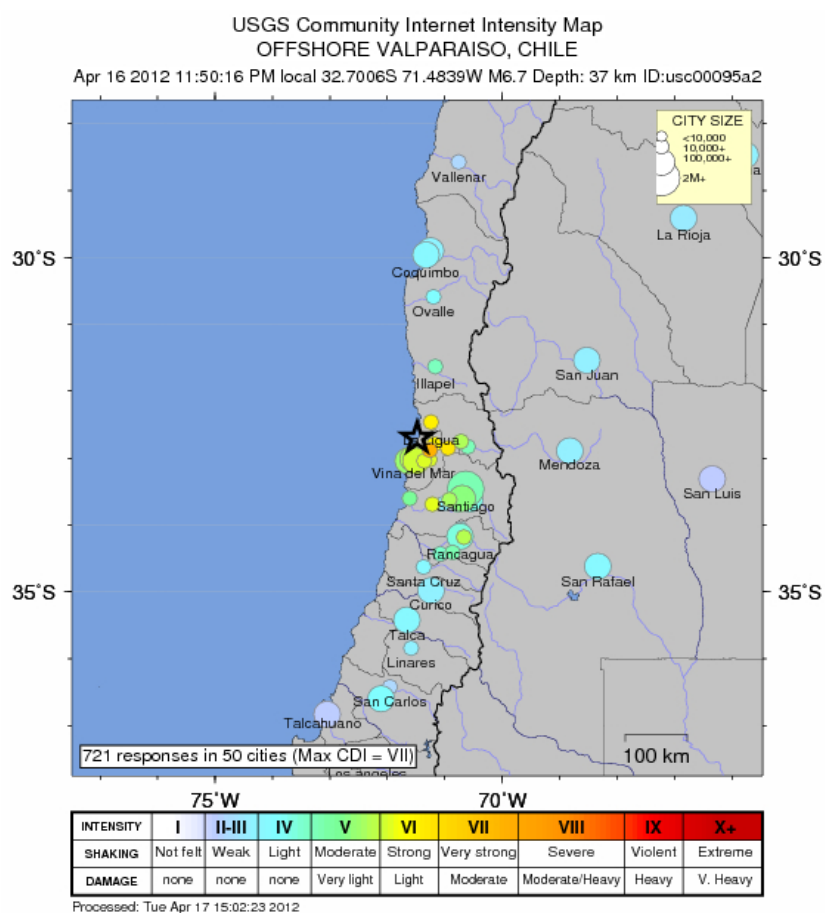


Figura 119: Mapa de Intensidades

5.9.1.1 Efectos sísmicos locales

El movimiento del suelo durante un terremoto puede ser amplificado por las condiciones geológicas, geotécnicas y topográficas del terreno por el que se propagan las ondas sísmicas que provienen del sustrato rocoso.

La modificación del movimiento del suelo en su amplitud, duración y contenido frecuencial se conoce con el nombre de efecto sísmico local y juega un papel muy importante en el grado de distribución de daños durante un terremoto. (Bard, P.Y., 1995; Aki, K., 1993).

En la figura 120 se muestran registros sísmicos en emplazamientos próximos pero con características del subsuelo distintas. En el punto B, sobre el suelo, se registran amplitudes mucho más altas que en A.

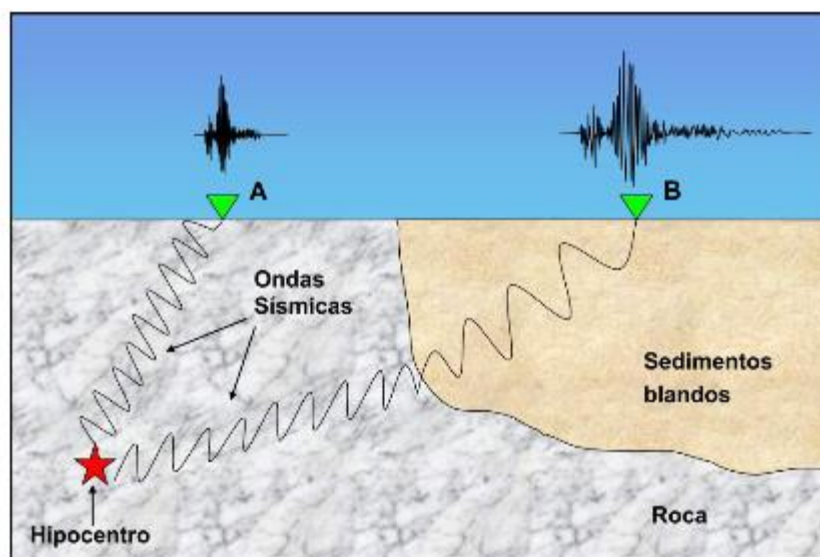


Figura 120: Amplificación de ondas sísmicas

No todas las estructuras y edificios reaccionan de la misma forma ante un mismo terremoto. Además, esta respuesta puede variar

significativamente de un sitio a otro debido a cambios puntuales en las condiciones del suelo. Por esta razón, después de la ocurrencia de un sismo fuerte se pueden observar estructuras seriamente dañadas, junto a otras que no sufrieron daños significativos. Esto se debe a que sus características dinámicas son distintas y a que su respuesta va a depender de la magnitud de las fuerzas sísmicas inducidas. (Schmidt, 2011)

A manera de ejemplo, estructuras bajas o rígidas de uno y dos pisos van a resonar (verán amplificada su respuesta) si son sometidas a movimientos de alta frecuencia, y estructuras de varios pisos y flexibles, entrarán en resonancia con eventos sísmicos de períodos predominantes largos. El tipo de ondas a que serán sometidas las estructuras depende en gran medida de las condiciones del suelo debajo de estas obras. (Schmidt, 2011)

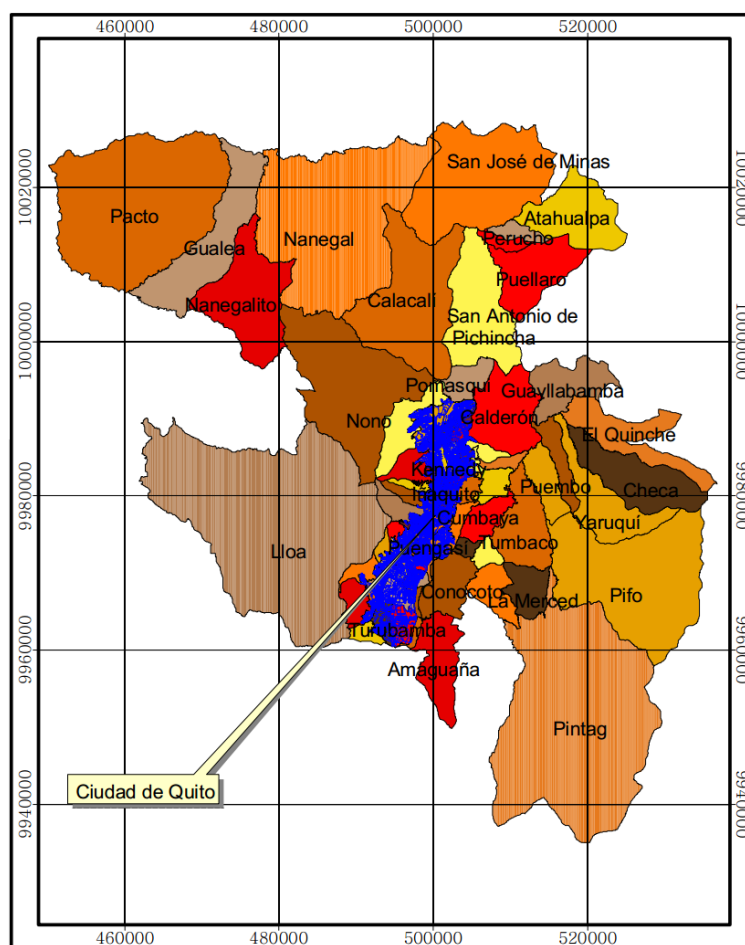
En general, las enseñanzas que han dejado los sismos en el mundo indican que en los sitios donde se diseña con una buena normativa sismo resistente, donde la construcción es sometida a una supervisión estricta y donde el sismo de diseño es representativo de la amenaza sísmica real de la zona, el daño es marginal en comparación con el observado en sitios donde no se han dado estas circunstancias.

No obstante, es importante resaltar que diseñar acorde con un código no siempre salvaguarda contra el enorme perjuicio producido por terremotos severos.

Desde una perspectiva histórica, las normativas por sí solas no puede garantizar la seguridad contra el daño excesivo, puesto que estos son reglamentos que experimentan actualizaciones continuas según los avances tecnológicos y las enseñanzas que dejan las investigaciones y estudios de los efectos causados por terremotos, que no son más que pruebas de laboratorio a escala completa.

Todo ello evidencia que las condiciones locales del suelo o efectos de sitio juegan un rol importante en la evaluación de la amenaza sísmica.

5.9.2 ESTUDIOS REALIZADOS



Fuente: Coello Washington

Figura 121: Ubicación de la ciudad de Quito con respecto al DMQ

5.9.2.1 Microzonificación sísmica ERN 2012

En el 2011, un grupo de consultores de: Colombia (Omar Darío Cardona); México (Mario Ordaz); España (Alex Barbat); Ecuador (Roberto Aguiar) se asocian y pasan a formar parte de ERN (Evaluación del Riesgos Naturales) de Colombia, liderados por Luis Yamin; para la realización de la Microzonificación Sísmica de Quito. (Aguiar, 2013). En el trabajo realizado por ERN, se trabajó con los siguientes datos de suelos:

1. Estudios de suelos realizados por Proyectistas Estructurales para el diseño de edificios del Centro Norte de Quito, fundamentalmente.
2. Estudios de suelos realizados por la Empresa Municipal de Agua Potable de Quito.
3. Estudios geofísicos a detalle realizados para el Metro de Quito, que en promedio llegan hasta los 60 m., de profundidad.

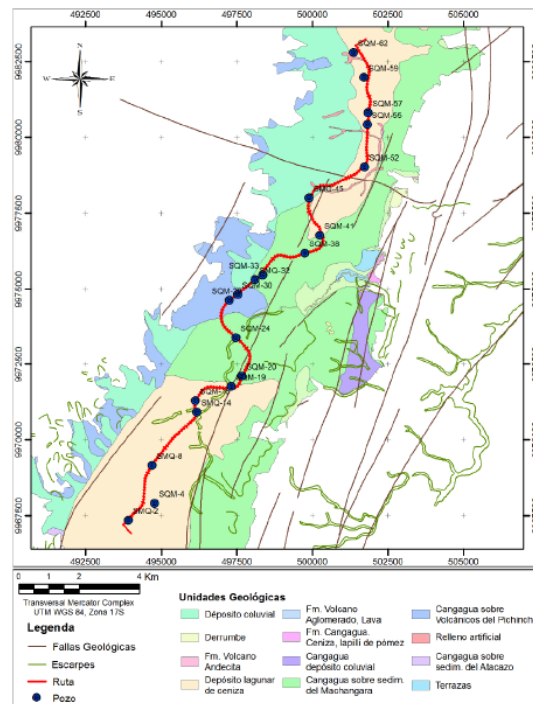


Figura 122: Ubicación de sondeos realizados para el Metro de Quito.

4. Nuevos estudios de suelos realizados por ERN en lugares donde se dispone información o que son muy importantes para la ciudad de Quito.(ERN, 2012)

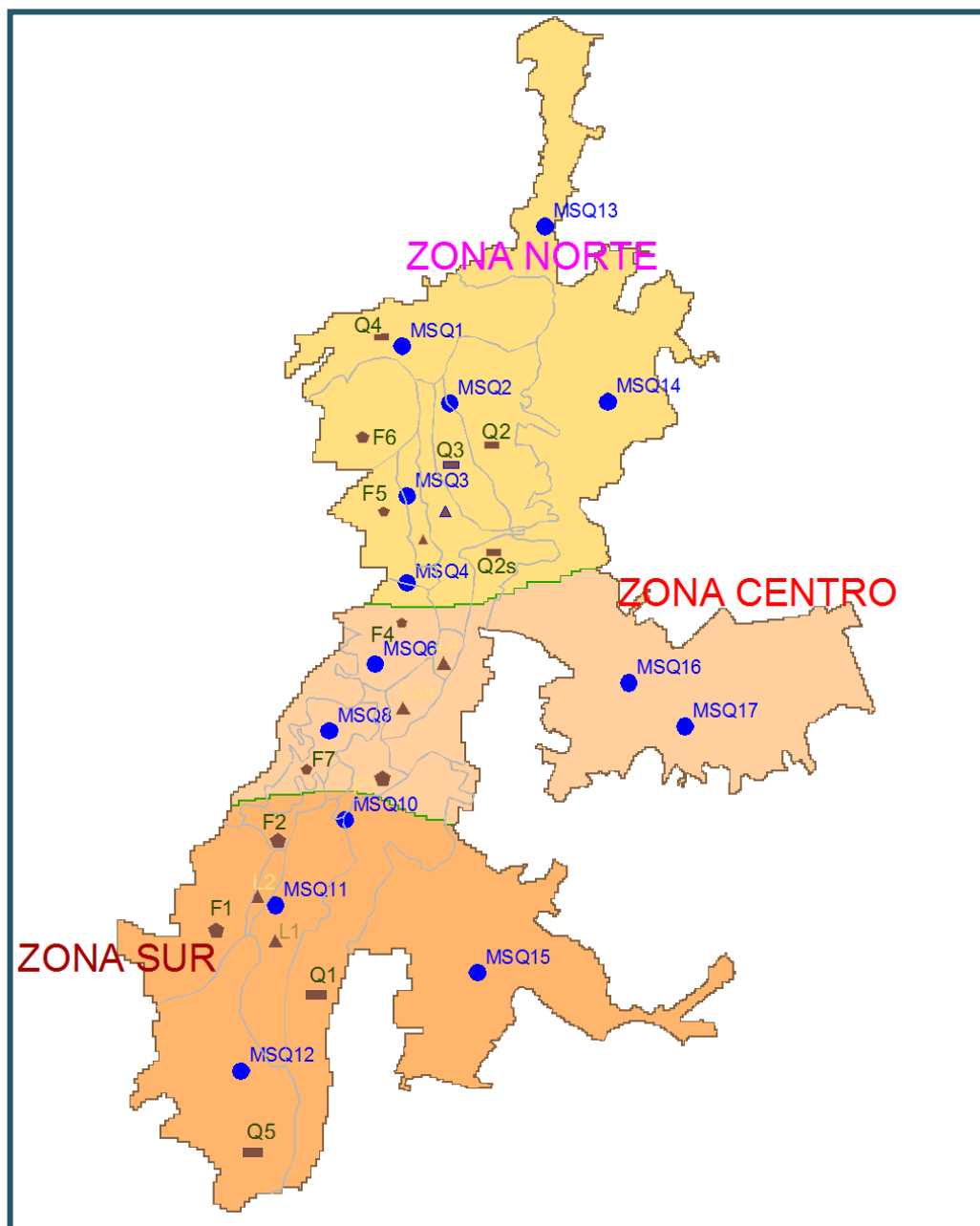


Figura 123: Ubicación de los puntos de estudio de suelos.

Tabla 14: Puntos de estudio de suelos ERN

Ubicación	Sector
MSQ12	Guamaní Alto
MSQ11	Solanda
MSQ10	Chimbacalle
MSQ8	Museo del Agua
MSQ6	La Gasca
MSQ4	Quito Tenis
MSQ3	Andalucía
MSQ2	Real Audiencia
MSQ1	Condado
MSQ13	Pomasqui
MSQ14	Calderón
MSQ15	Conocoto
MSQ16	Cumbayá
MSQ17	Tumbaco

Antes de indicar los resultados obtenidos de estudio es necesario indicar la manera como los factores se sitio fueron hallados.

Primero realizaron un acopio de los estudios de suelos realizados para el Metro de Quito, los mismos que llegan a una profundidad media que está entre 40 y 50 m. De igual manera recopilaron los estudios que hace el Municipio para encontrar pozos de agua en diferentes sitios de la ciudad.

La Politécnica Nacional en 1994 y 2002 realizó una clasificación de los suelos de Quito (EPN, 1994; Valverde *et al.* 2002) la misma que también fue utilizada por ERN (2012) al igual que una gran cantidad de estudios de suelos realizados por Proyectistas Estructurales para el diseño de sus edificios.

En base a esta gran cantidad de información, ERN (2012) selecciono 14 sitios de la ciudad, donde se consideraba que era necesario estudiarlos para tener una idea más clara de los suelos de Quito. En estos sitios se hicieron estudios geofísicos (Down Hole y Sísmica de Refracción) a una profundidad media de 30 m., y se hicieron estudios de Penetración Estándar.

Como resultado del estudio realizado se encontraron zonas de Quito, en los cuales el suelo es homogéneo, se determinaron las zonas de transición. Con los resultados de los estudios estáticos y dinámicos de los 14 sitios se procedió a encontrar la respuesta en dichos sitios ante 12 sismos asociados a fallamiento cortical y 10 sismos de subducción, registrados en Estados Unidos, México, Colombia, Italia y Taiwan, los mismos que fueron normalizados a diferentes aceleraciones máximas del suelo.(Aguiar & Sangurima, 2013)

5.9.2.1.1 Factores de sitio encontrados por ERN

En forma general se puede indicar que el suelo de la ciudad de Quito es una *cangagua* que es un material resistente ante cargas verticales pero no tiene un buen comportamiento ante la acción del viento y ante el agua.

Un aporte de este estudio son las curvas de degradación del módulo de corte G y del factor de amortiguamiento de la *cangagua* que sirven para encontrar la respuesta dinámica lineal o no lineal de suelos, dada una excitación sísmica en roca y se desea ver las respuestas en desplazamiento, velocidad y aceleración, en el campo libre.

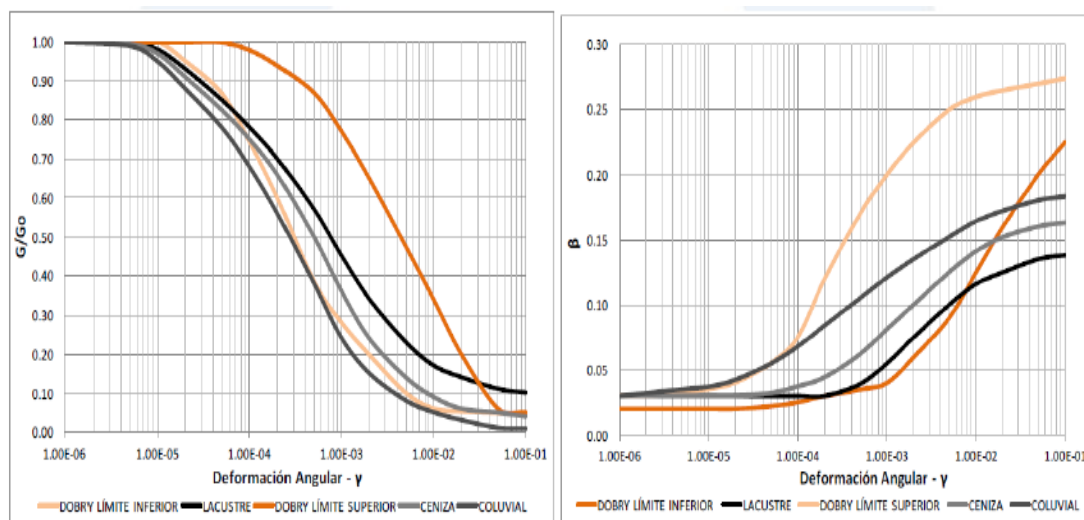


Figura 124: Curvas de degradación del módulo de corte y del factor de amortiguamiento

En la figura 124 se presentan estas curvas de degradación para tres tipos de suelo denominados: lacustre, ceniza y coluvial: En el gráfico de la izquierda se muestra la relación entre el módulo de corte G y el módulo de corte máximo G_0 versus la deformación angular γ . Mientras que en el gráfico de la derecha la relación entre el factor de amortiguamiento y la deformación angular. (Aguar, 2013). Estas curvas corresponden al estudio realizado por ERN en el Distrito Metropolitano de Quito.

Se encontraron los factores de sitio, en concordancia con la forma del espectro de diseño elástico del NEC-11; los factores de sitio F_a , F_d , F_s , hallados por ERN (2012) para que se utilicen con las ecuaciones del NEC-11; con un valor de $r=1$ y con $\eta = 2.48$ se indican en las figuras 125 a 127.

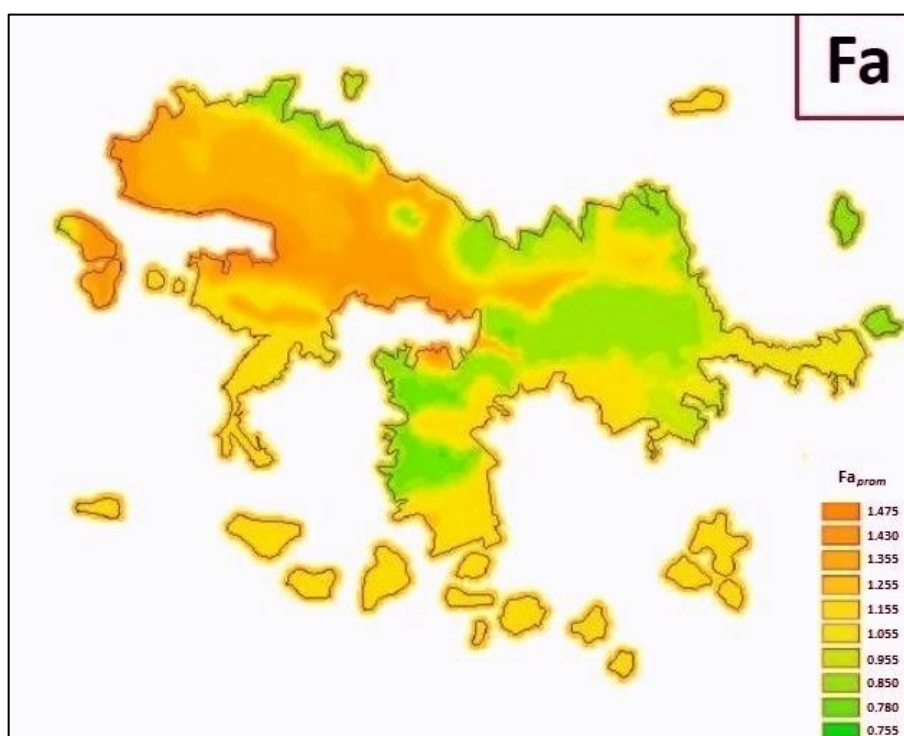


Figura 125: Factor de sitio que define la plataforma de aceleración máxima del espectro

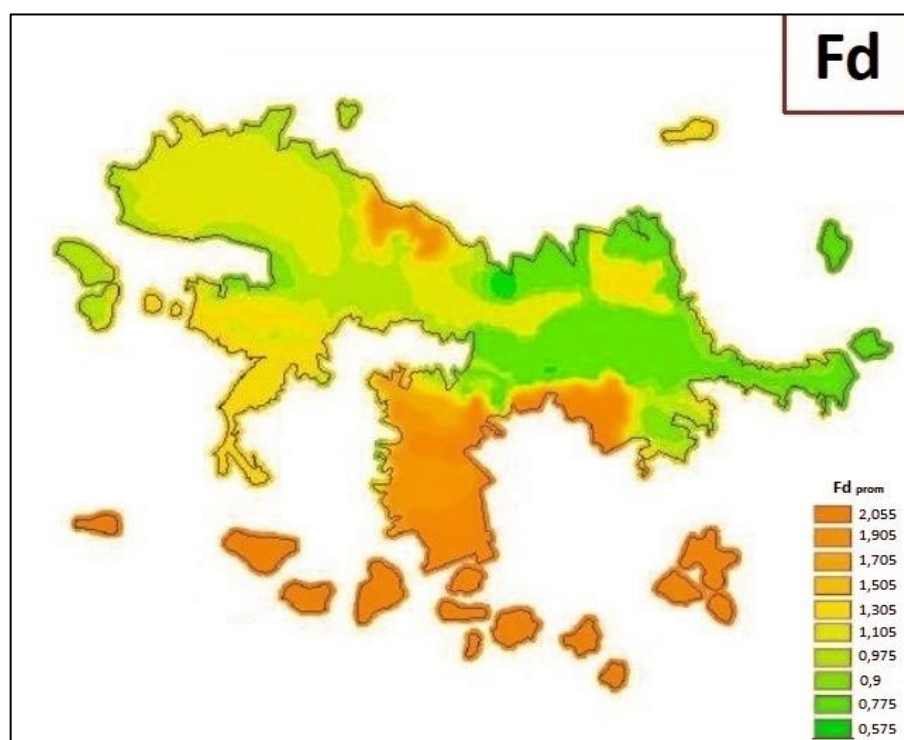


Figura 126: Factor de sitio que depende del tipo de suelo

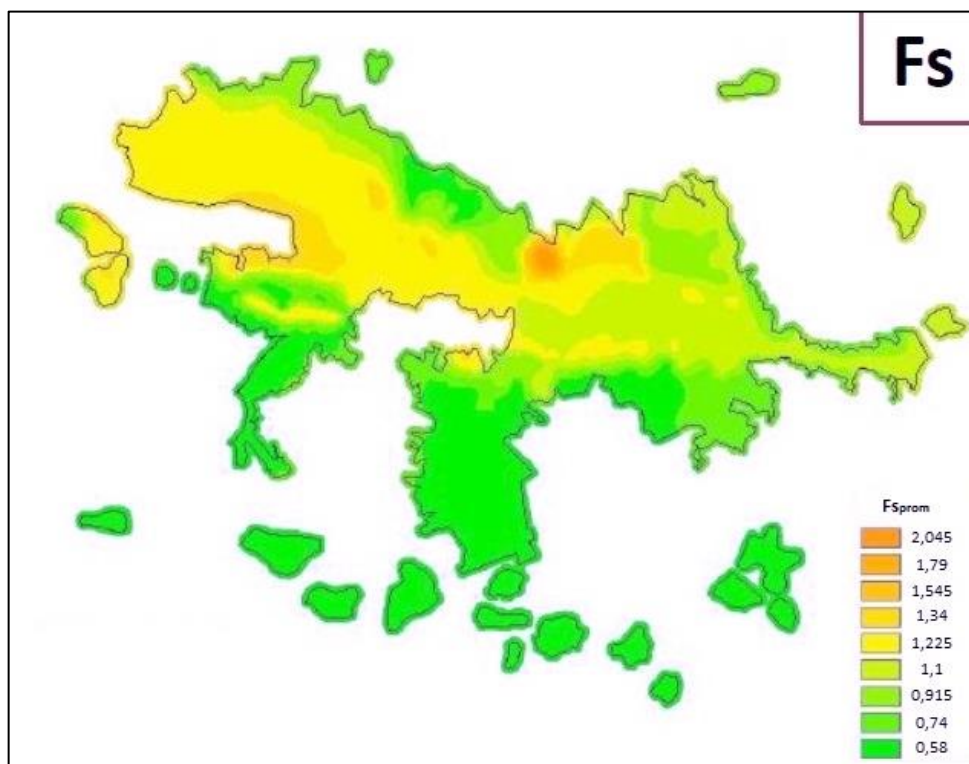


Figura 127: Factor de sitio que considera el comportamiento no lineal del suelo

5.9.2.2 Microzonificación sísmica ORSTOM

En total, se establecieron 673 puntos de registro del ruido de fondo, de modo que se cubrieran de la mejor manera todas las zonas geológicas de Quito. Tales puntos eran identificados utilizando la intersección de las calles. Por ello, tres sectores (2 al Sur y 1 al Norte) no pudieron ser cubiertos, pues los planos disponibles entonces no presentaban una precisión suficiente. (ORSTOM, 1997)

En cada punto, se realizaron 2 minutos de registro en 50 Hz, de modo que se seleccionaran un máximo de ventanas de 10 segundos. En estas últimas, se calcularon los espectros de las tres componentes, y luego, una vez alisados, se calcularon las relaciones espectrales H/V y la media

logarítmica del sitio. Como las componentes EW y NS son similares, se definió previamente una componente horizontal promedio. Con el fin de estudiar el sector de La Carolina, se procedió a aumentar la densidad de los puntos de registro para precisar de la mejor manera posible el comportamiento del suelo en esa zona. (ORSTOM, 1997)

5.9.2.2.1 Factores de sitio encontrados por ORSTOM

En el estudio realizado por ORSTOM, se utilizaron tres métodos distintos que emplean movimientos fuertes y ruido: el método tradicional de las relaciones espectrales entre una estación en suelo blando y una estación de referencia, y el método de las relaciones horizontales sobre las verticales por una parte con movimientos fuertes y, por otra, con ruido.

Así, fue posible comparar los resultados obtenidos mediante los tres métodos a fin de validar el método principal del estudio. Este, método llamado de Nakamura (1989), permitió cubrir toda la ciudad con el objetivo de definir la frecuencia de resonancia de los diferentes suelos de Quito y precisar la amplificación del movimiento de suelo en caso de sismo. (ORSTOM, 1997)

Las principales formaciones presentes en la ciudad provienen de materiales de origen volcánico o inducidos por movimientos de tierra provocados por la escarpada configuración de Quito (EPN, 1994). Se observan así hacia el Norte rellenos sedimentarios de aproximadamente 200 m de espesor, constituidos esencialmente de productos de origen volcánico y de materiales provenientes de los flancos del Pichincha.

A nivel de La Carolina, aparece una formación superficial compuesta de sedimentos lacustres. El Sur de la ciudad, caracterizado por sedimentos de 100-150 m de espesor. (ORSTOM, 1997)

La geología superficial fue definida mediante observaciones de superficie y geomorfológicas, así como por medio de excavaciones y perforaciones realizadas en la ciudad (EPN, 1994). Se la puede descomponer en tres zonas distintas: los flancos del Pichincha (F), la depresión central (L) y los flancos orientales (Q) -figura 128-.

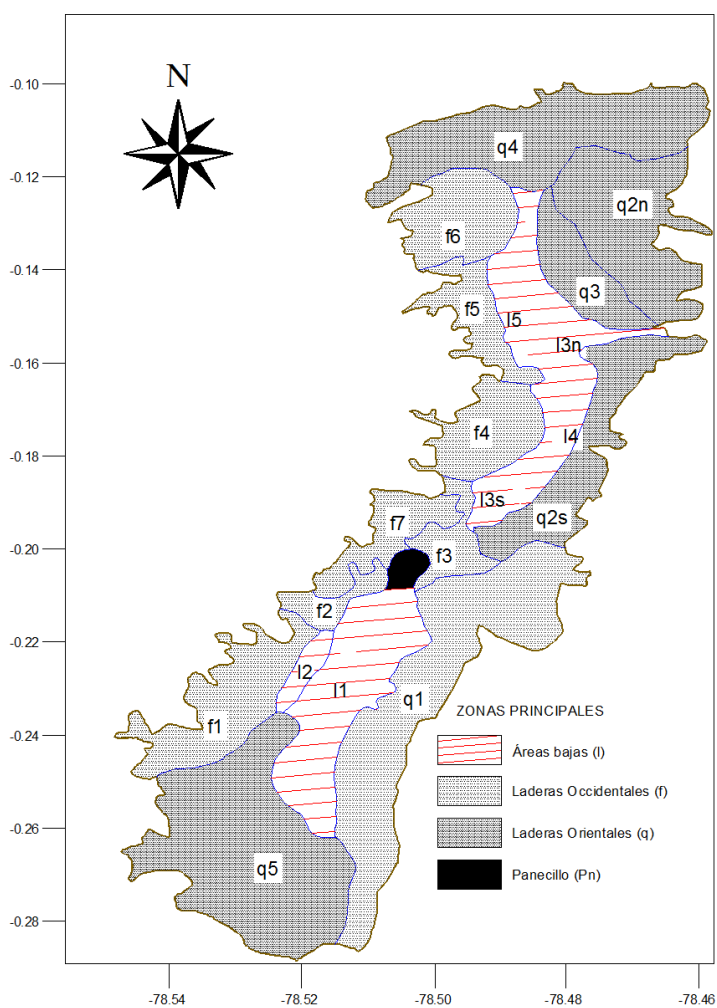


Figura 128: Zonas geológicas en Quito

Cada zona está dividida en sub-zonas en función de su composición y su modo de formación. Principalmente, la depresión central está constituida de depósitos lacustres que cubren en parte formaciones de cangahua, en espesores que pueden alcanzar algunos centenares de metros.

Un estudio reciente (Alvarado, 1996) revela a nivel del sector de La Carolina (formaciones 14 y 13n) depósitos fluvio-lacustres, muy marcados por el drenaje de las aguas de escurrimiento provenientes de las laderas del Pichincha y por un nivel turboso hacia los 45 m, confirmando así la existencia de una antigua laguna. Es interesante anotar que la mayor parte de aguas de escurrimiento de las pendientes occidentales de la ciudad llegan al fondo del valle y fluyen luego hacia los derivativos principales de Quito, hacia el Norte y hacia el Sur. Los flancos del Pichincha están constituidos esencialmente de depósitos volcánicos (cangahua, cenizas) y en algunos lugares de depósitos provenientes de conos de deyección. Finalmente, los flancos orientales de la ciudad se caracterizan por grandes espesores de cangahua, cubierta o no por depósitos de materiales blandos (loess volcánicos, cenizas).

5.9.2.3 Métodos utilizados para el estudio

Como se indicó anteriormente se emplearon tres métodos para determinar los efectos de sitio en la capital.

- **Método de las relaciones espectrales tradicionales H/V**

Este método consiste en utilizar registros de sismos obtenidos simultáneamente en vario sitios, y requiere la elección de una estación de

referencia, caracterizada por efectos de sitio nulos. Los primeros resultados obtenidos por Borchardt y Gibbs (1976) permitían poner en evidencia la frecuencia fundamental y la amplificación del movimiento del suelo durante un sismo. (ORSTOM, 1997)

Así, se instalaron dos estaciones sismológicas, la una en un sitio de referencia R (es decir en una roca) y la otra en un sitio sedimentario S (figura 129). El movimiento registrado simultáneamente en dos sitios puede ser considerado como la deconvolución de los efectos debidos a la fuente del sismo $S(t)$, a la propagación de las ondas $P(t)$, a los efectos producidos por el sitio $T(t)$ y a la respuesta instrumental del sensor $I(t)$.

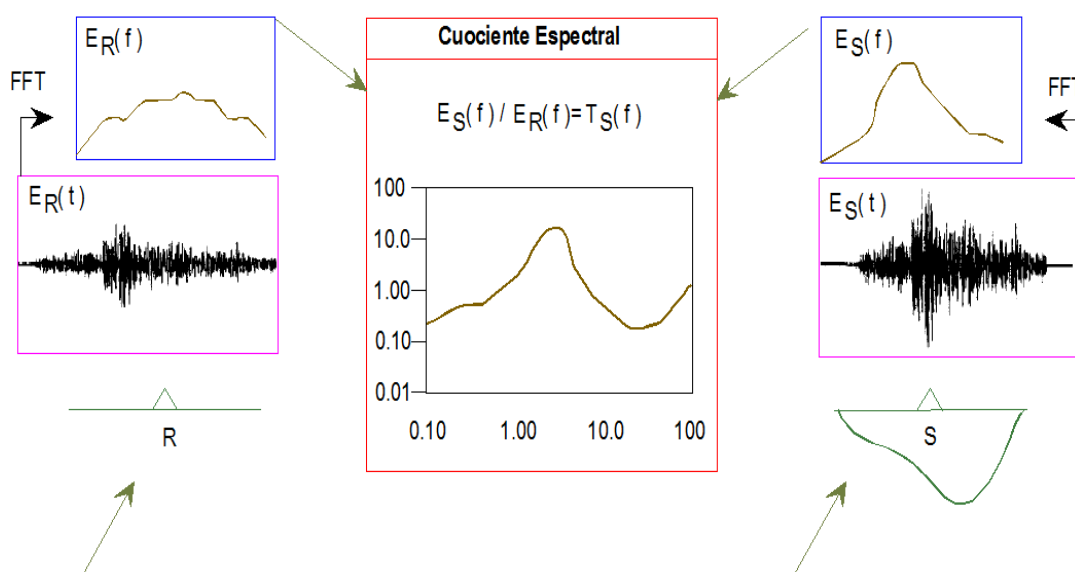


Figura 129: Método de las relaciones espectrales tradicionales.

En la figura 129 se muestra la técnica para determinar los efectos de sitio por la función de transferencia. R corresponde a un sitio de referencia. S al sitio donde los efectos de las condiciones locales serán determinados. $E_R(t)$ y $E_S(t)$ son los registros en los sitios R y S del mismo evento sísmico y

de la misma componente horizontal. FFT corresponde a la Transformada de Fourier.

- **Método de las Relaciones espectrales HN ruido de fondo**

Incluso si este método ya fue utilizado en estudios japoneses (Nogoshi, 1970,1971), su difusión y explicación corresponde a Nakamura (1989), al igual que la explicación de sus principios fundamentales. Está basado en la utilización del ruido de fondo (figura 130) y en algunas hipótesis planteadas por ese autor.

Ante todo, Nakamura (1989) considera que la energía del ruido de fondo consiste en una onda de volumen y en una de Rayleigh, lo que explica la necesidad de eliminar los efectos de las ondas de superficie.

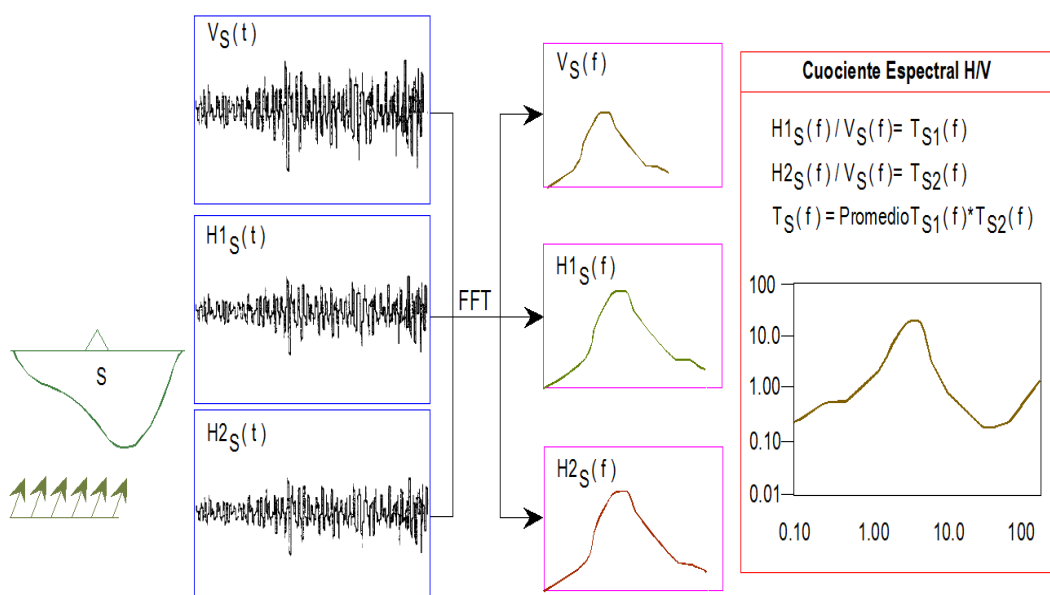


Figura 130: Método de las Relaciones espectrales HN ruido de fondo

En la figura 130 se indica la técnica que utiliza el ruido ambiental para determinar los efectos de sitio por la función de transferencia. S corresponde al sitio donde los efectos de las condiciones locales serán determinados. VS (t), H1S (t) y H2S (t) corresponden a la componente vertical y a las dos horizontales del ruido ambiental registrado en la estación S. FFT corresponde a la Transformada de Fourier.

- **Método de Relaciones espectrales H/V-sismos (o funciones receptores)**

Este método, propuesto originalmente por Langston (1977, 1979), era utilizado para determinar la estructura de las velocidades en la corteza terrestre a partir de registros telesísmicos de onda P con incidencia casi vertical. El principio del método es análogo al de las relaciones espectrales H/V-ruido de fondo, pero utiliza registros de sismos.

Yamanaka et al. (1994) compararon relaciones H/V-ruido de fondo y H/V sismos, estas últimas calculadas en la onda P de la señal, y pudieron observar una buena correlación en cuanto a la frecuencia de resonancia, con amplitudes ligeramente superiores en el caso de las relaciones espectrales H/V- sismos. Por otro lado, Theodulidis et al. (1996), muestran que los mecanismos focales de los sismos utilizados por este método influyen en el nivel de amplificación de la relación espectral pero no en la forma de la señal, que presenta la misma frecuencia fundamental que la obtenida mediante otras técnicas.

Contrariamente a Langston, Field y Jacob (1995) calcularon las relaciones espectrales H/V-sismos en las ondas sísmicas S de la señal y

obtuvieron frecuencias fundamentales idénticas a las obtenidas mediante el método llamado de Nakamura H/V-ruido de fondo.

Finalmente, un estudio reciente de Lachet et al (1996) permitió comparar los tres métodos citados anteriormente en Tesalónica (Grecia). Pudieron así observar, en cada sitio estudiado, que el método H/V-ruido de fondo subestimaba la amplificación obtenida mediante el método H/V-sismos, que a su vez subestimaba la obtenida por el método de las relaciones espectrales tradicionales. Por otra parte, esos tres métodos definen la misma frecuencia fundamental del suelo y las relaciones H/V-ruido de fondo presentan la mayor estabilidad. (ORSTOM, 1997)

Por otro lado, este estudio permitió poner en evidencia buenas correlaciones entre las formaciones geológicas y las amplitudes de las relaciones espectrales tradicionales, así como con los niveles de intensidad medidos en la ciudad después del sismo de magnitud 6.5 de 1978 (Lachet et al., 1996).

5.9.2.4 Resultados de la estimación de los efectos de sitio

Los registros de ruido de fondo y de sismos fueron muestreados a 100 Hz. Se observan buenas similitudes entre las diferentes técnicas utilizadas que revelan una frecuencia del orden de 1 Hz para la estación BERT (figura 131a), de 3 Hz para la estación COND (figura 131c), del orden de 1 Hz para la estación TENI (figura 131d) y del orden de 2 Hz para la estación CARO (figura 131b, sin la comparación con la relación espectral tradicional respecto a GUAP1).

Es interesante anotar que la amplitud obtenida mediante el método H/V-ruido de fondo subestima la deducida del método H/V-sismos que a su vez subestima las relaciones espectrales tradicionales respecto a GUAP1. Lachet et al. (1996) ya habían observado esta particularidad, lo que permite confirmar que el método H/V-ruido de fondo define correctamente la frecuencia de resonancia del suelo.

Sin embargo, queda por definir la significación de la amplitud pues parece ser casi sistemáticamente subestimada con relación a la obtenida mediante el método tradicional. Por otro lado, es interesante también observar en la estación TEN1 (figura 131d) que los tres métodos utilizados revelan dos amplificaciones distintas, la primera hacia 1Hz y la segunda hacia 3-4 Hz.

El método H/V-ruido de fondo permite así definir simplemente la respuesta del suelo, o en todo caso conocer la frecuencia a la cual el movimiento del suelo será amplificado. Proporciona información en cuanto a la amplificación, sabiéndose que esta parece ser sistemáticamente inferior a la que se puede observar durante un sismo. (ORSTOM, 1997)

Por otra parte, la elección de la estación de referencia y el nivel de ruido del ambiente, elevado en el medio urbano, plantean ciertos problemas en cuanto a la utilización del método de las relaciones espectrales tradicionales, confirmados por la elección de la estación GUAP2. Esta última parece no ser una estación de referencia, es decir con una amplificación propia.

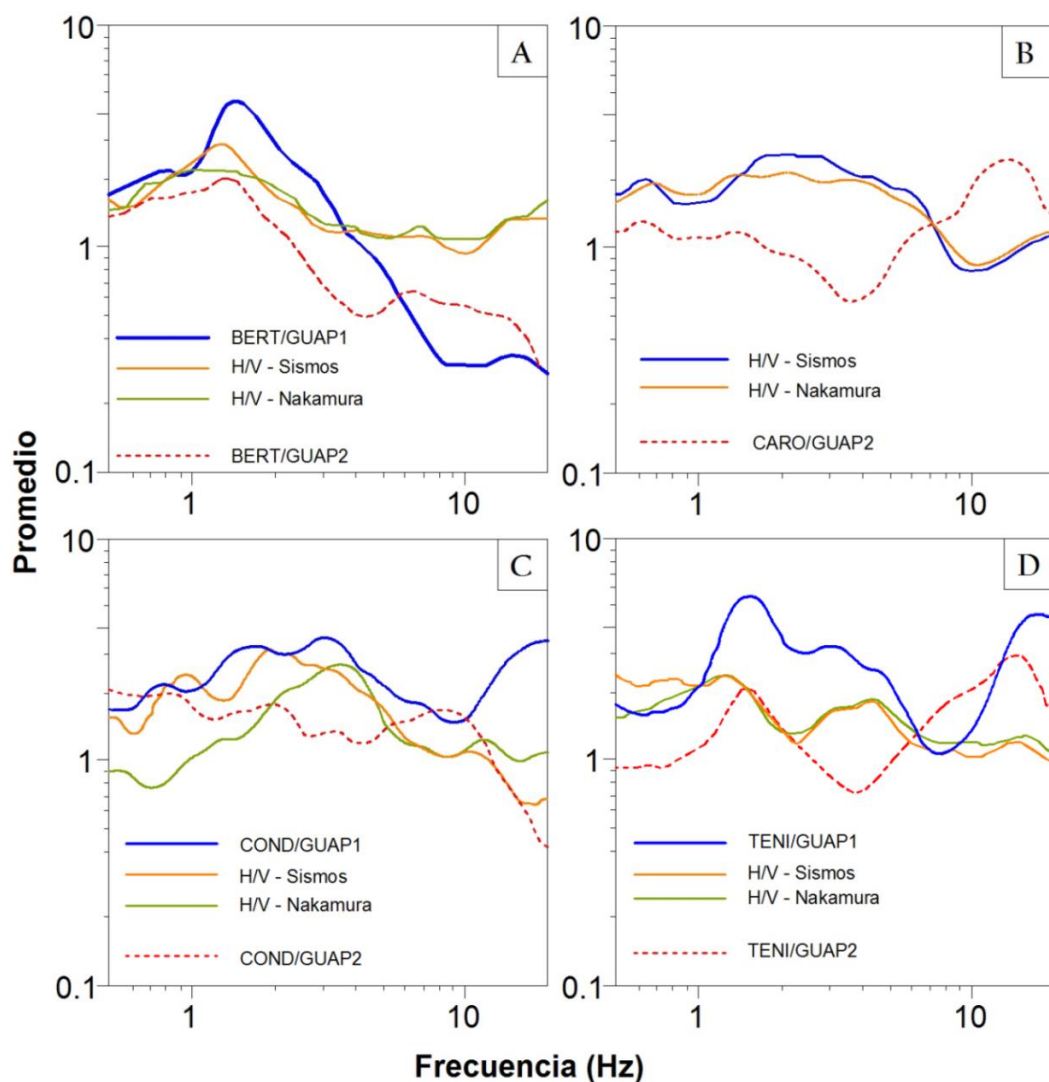


Figura 131: Síntesis de las diversas técnicas utilizadas.

La figura 131 indica un resumen de las técnicas empleadas para estimar la respuesta de suelo en la estación BERT (A). CARO (B), COND (C) y TEN1 (D). Línea gruesa: promedio de los cocientes espectrales en relación con GUAP1; línea medianamente gruesa: promedio de los cocientes H/V que utilizan registros de sismos; línea delgada: promedio de los cocientes H/V que utilizan registros de micro tremores (técnica de Nakamura); línea discontinua: promedio de los cocientes espectrales en relación con GUAP2.

5.9.2.5 Resultados de la microzonificación

El conjunto de relaciones H/V-ruido de fondo permitió representar las iso-frecuencias y las iso-amplitudes de la respuesta de los suelos en las figuras 132 y 133.

El aspecto de las iso-frecuencias obtenidas con el pico de amplificación máxima comprendido entre 1 y 20 Hz concuerda con las formaciones geológicas deducidas de las observaciones de superficie. Se encuentran las tierras bajas al Norte y al Sur de la ciudad, caracterizadas por las mayores frecuencias (entre 2,5 y 8,5 Hz). En cuanto a las laderas orientales y occidentales, presentan frecuencias del orden de 1,5 Hz.

Así, parecería que una formación superficial poco espesa induce tal comportamiento. Se encuentra igualmente esta particularidad a nivel de la formación Panecillo (Pn). Es interesante anotar que esas iso-frecuencias revelan límites geológicos diferentes a los ya establecidos, como por ejemplo al Sur de la ciudad donde la formación q5 se comporta en parte como la formación I1.

Las iso-amplitudes no revelan particularidad alguna. Se observan amplificaciones elevadas en las pendientes occidentales, pudiendo algunas alcanzar al Norte valores del orden de 5. Se observa también que la parte surde las tierras bajas se caracteriza por amplitudes elevadas.

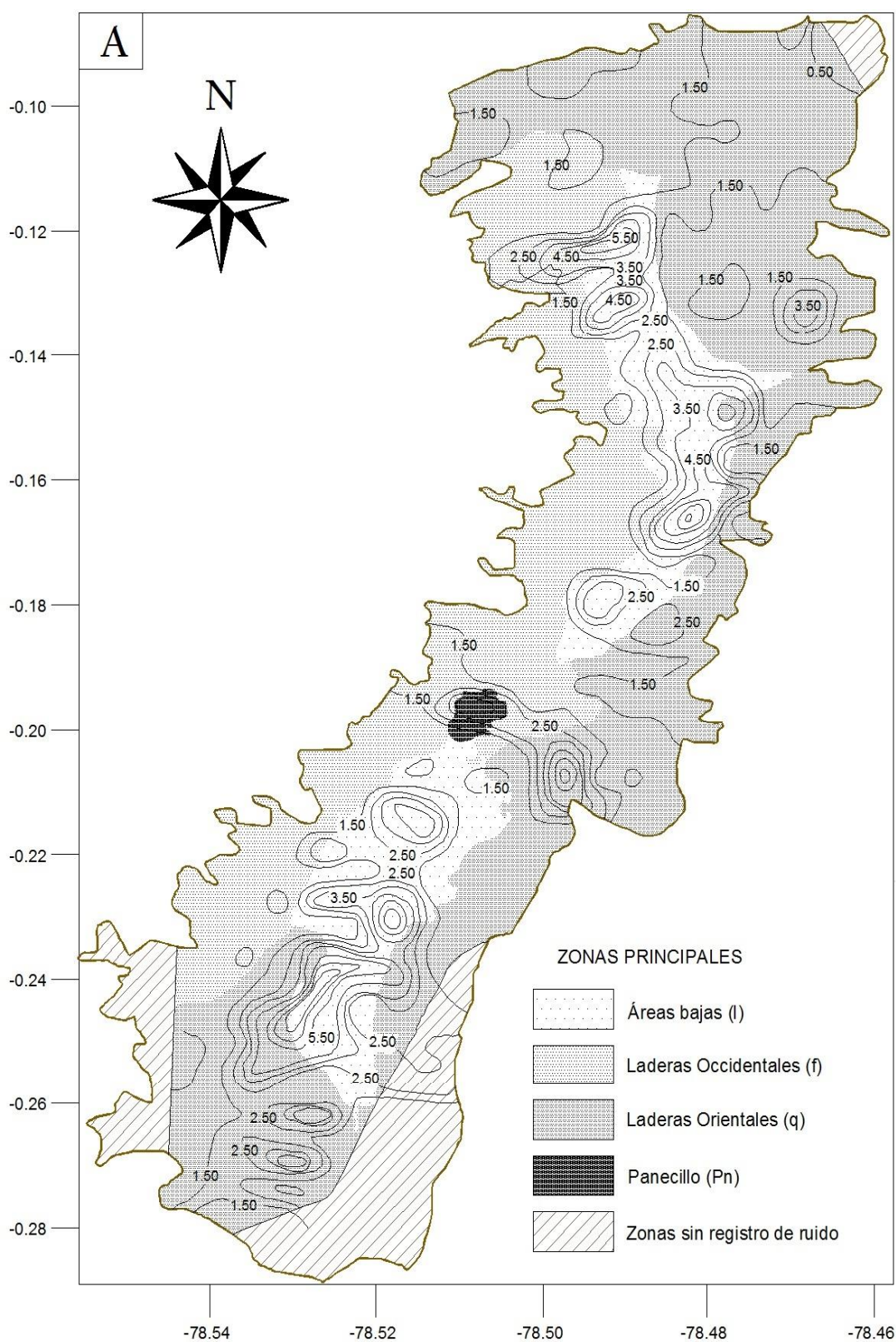


Figura 132: Mapas de las iso-curvas obtenidas considerando la amplificación máxima entre 1 y 20Hz. (A): Frecuencias en Hz, cada curva corresponde a un intervalo de 1Hz.

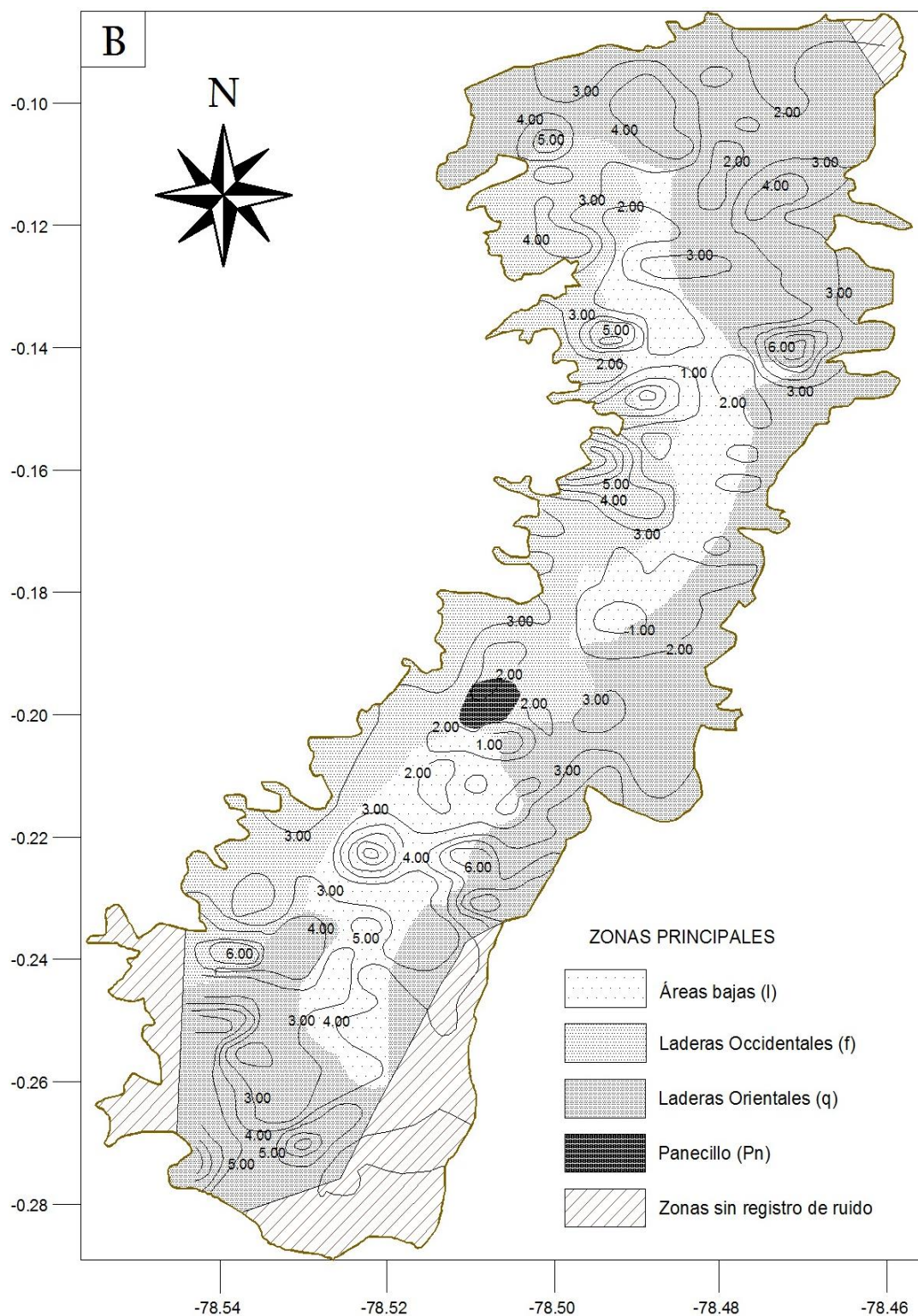


Figura 133: Mapas de las iso-curvas obtenidas considerando la amplificación máxima entre 1 y 20Hz. (B): Amplificaciones, cada curva corresponde a un intervalo de 1 grado.

CAPÍTULO 6 FACTORES DE SITIO ENCONTRADOS EN ESTE ESTUDIO

6.1 INTRODUCCIÓN

Se presentan los factores de sitio hallados con la ayuda del programa DEGTRA, con la información descrita en el capítulo 5, literal 5.9.2.1., y con seis registros sísmicos.

6.2 SISMOS DE ANÁLISIS

Para el presente estudio se consideran seis registros sísmicos en roca, cuya información se indica en las tablas 15 a 17. Los dos primeros eventos fueron registrados en el Perú (1a, 1b); el tercero y cuarto en Chile; el quinto y sexto en Colombia pero es de un sismo cuyo epicentro se encuentra en Costa Rica. Para encontrar los factores de amplificación todos estos acelerogramas fueron normalizados a 0.4g., que es la aceleración máxima del suelo en roca para Quito, de acuerdo al NEC-11, para un período de retorno de 475 años.

Tabla 15: Información de Eventos Sísmicos empleados en el estudio

	SISMOS	
	1^a	1^b
ESTACION	CHARACATO-PERÚ	CHARACATO-PERÚ
DT	0.005 seg	0.005 seg
FECHA	13 de Junio de 2005	13 de Junio de 2005
HORA	17:45:33	17:45:33
DIST. EPICENTRAL	87.79 Km	387.79 Km
MAGNITUD	7.2ML 7.8MW	7.2ML 7.8MW
DUR. REGISTRO	178.01 seg	178.01 seg
ACEL. MAXIMA	-138.501 (cm/s/s)	125.43 (cm/s/s)
TIPO DE SUELO	Afloramiento de roca	Afloramiento de roca
SENTIDO	E-W	N-S

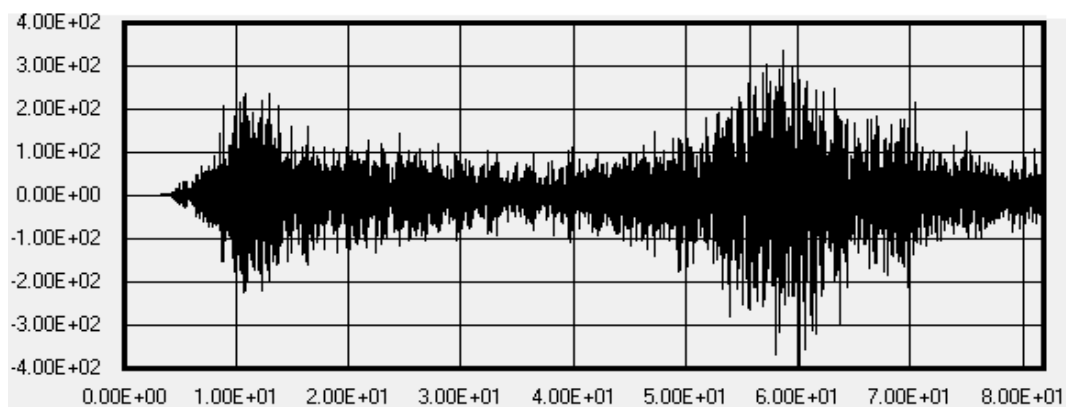


Figura 134: Acelerograma Sismo 1a

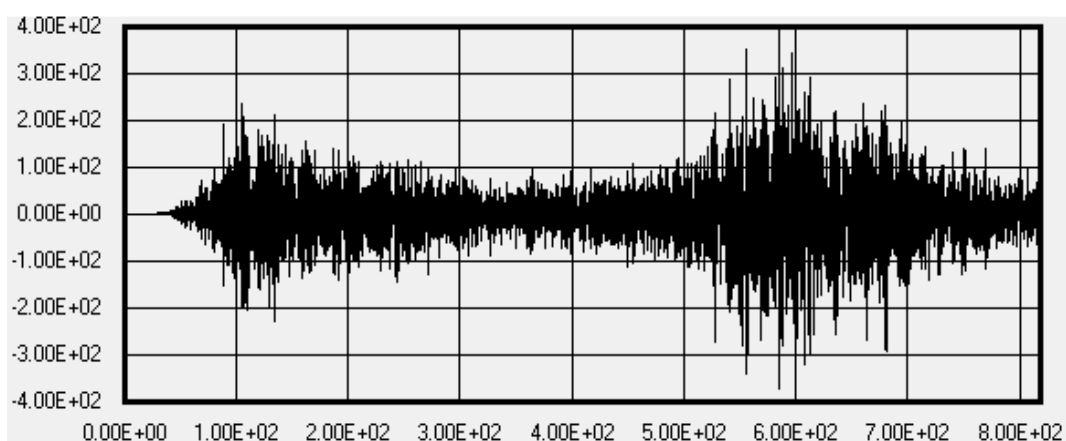


Figura 135: Acelerograma Sismo 1b

Tabla 16: Información de Eventos Sísmicos empleados en el estudio
(Continuación)

SISMOS		
	22a	22b
ESTACION	CENTRAL CHILE EQ	CENTRAL CHILE EQ
DT	0.005 seg	0.005 seg
FECHA	03 de Marzo de 1985	03 de Marzo de 1985
HORA	22:47:07	
DIST.EPICENTRAL	-----	-----
MAGNITUD	7.8	7.8
DUR. REGISTRO	54.57 seg	54.595 seg
ACEL. MAXIMA	254.00 (cm/seg ²)	-175.00 (cm/s ²)
TIPO DE SUELO	Rocoso Tipo S1 (Aguiar-García)	Rocoso Tipo S1 (Aguiar-García)
SENTIDO	N-S	E-W

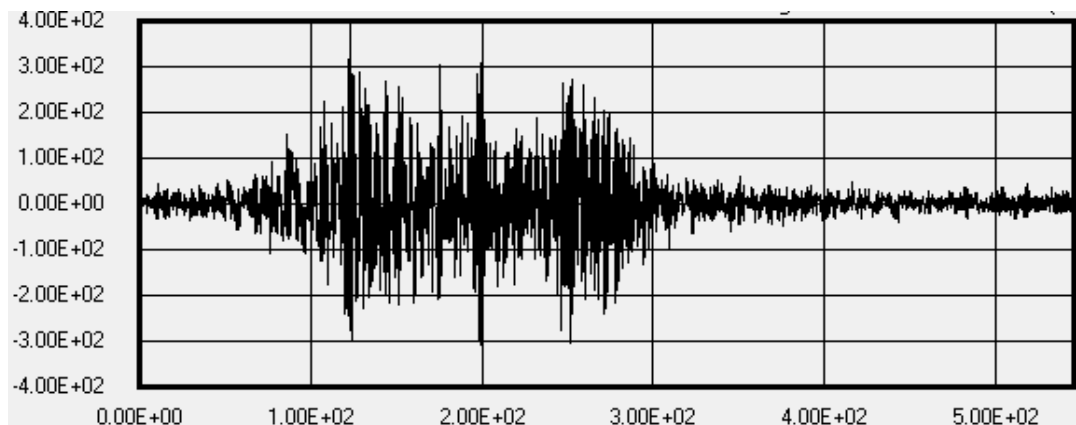


Figura 136: Acelerograma Sismo 22a

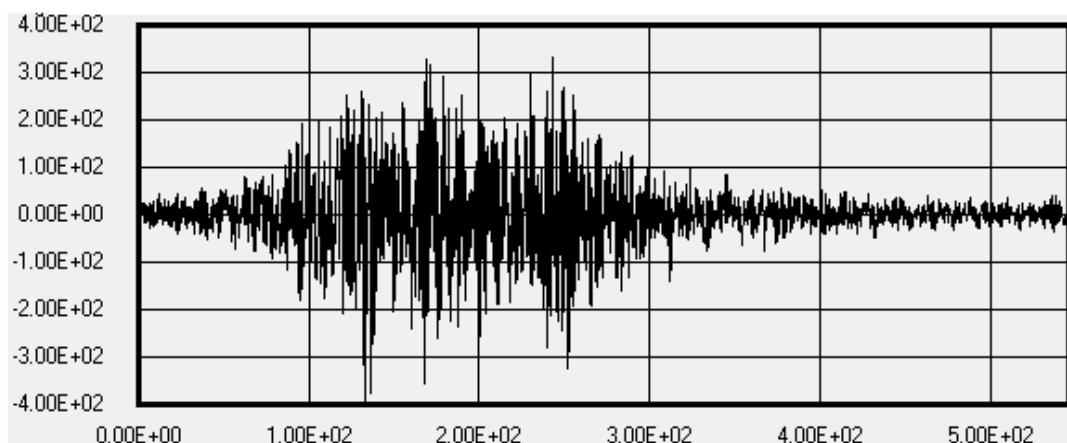


Figura 137: Acelerograma Sismo 22b

Tabla 17: Información de Eventos Sísmicos empleados en el estudio
(Continuación)

SISMOS		
	34^a	34^b
ESTACION	EST. DE RICAURTE (C.RICA)	EST. DE RICAURTE (C.RICA)
DT	0.005 seg	0.005 seg
FECHA	17 de Julio de 1998	17 de Julio de 1998
HORA	-----	-----
DIST.EPICENTRAL	637.00Km	637.00Km
MAGNITUD	3.07 ML	3.07 ML
DUR. REGISTRO	-----	-----
ACEL. MAXIMA	132.40 (cm/seg ²)	-124.80 (cm/s ²)
TIPO DE SUELO	Roca	Roca
SENTIDO	E-W	N-S

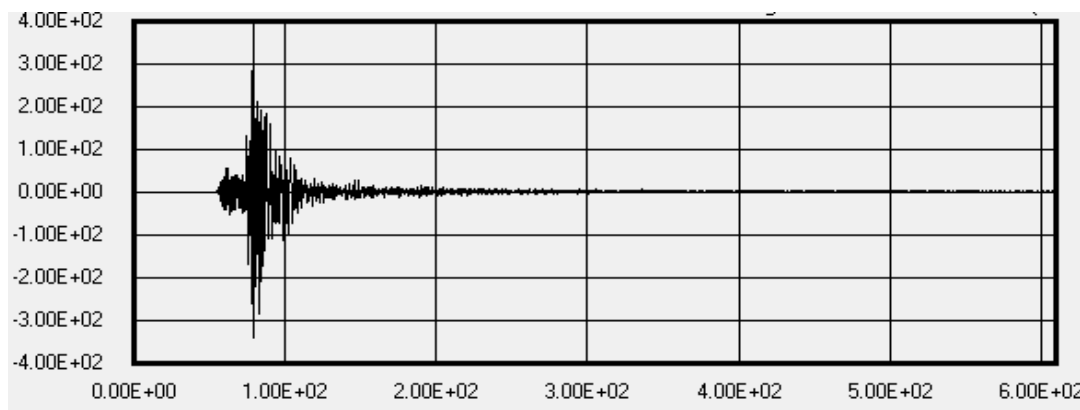


Figura 138: Acelerograma Sismo 34a

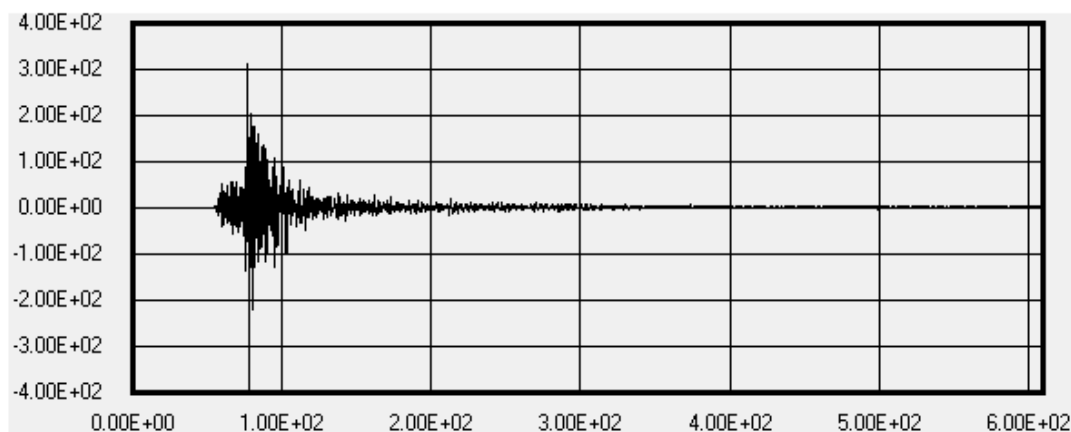


Figura 139: Acelerograma Sismo 34b

6.3 TIPOS DE SUELO CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO

Forma parte del presente apartado, los Estudios Geotécnicos presentados por la consultora PLANMANN Cía. Ltda., para distintas unidades educativas de la capital, los ensayos de sísmica de refracción realizados en los colegios: “Benalcázar”, “Sucre”, “Fernández Madrid”, “Espejo”, “Travesari” y los estudios realizados por la Escuela Politécnica Nacional para la **Microzonificación sísmica de los Suelos del Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito.**

A continuación se indica parte de la información con la que se trabajó para determinar los factores de sitio de algunos barrios del Distrito Metropolitano de Quito

6.3.1 Análisis de los puntos ubicados en la Zona Norte

Toma en consideración los siguientes sectores:

6.3.1.1 El Condado (Sector 30 - MSQ1)

Zona de Suelo:	MSQ1
Profundidad Promedio:	55.00m

Velocidad V_s [m/s]	Espesor. de la Capa [m]	Peso específico [γ]
120.00	5.0	1.8
200.00	5.0	1.9
209.00	3.0	1.9
338.00	4.0	1.8
342.00	3.0	1.8
430.00	10.0	2.0
500.00	25.0	2.0

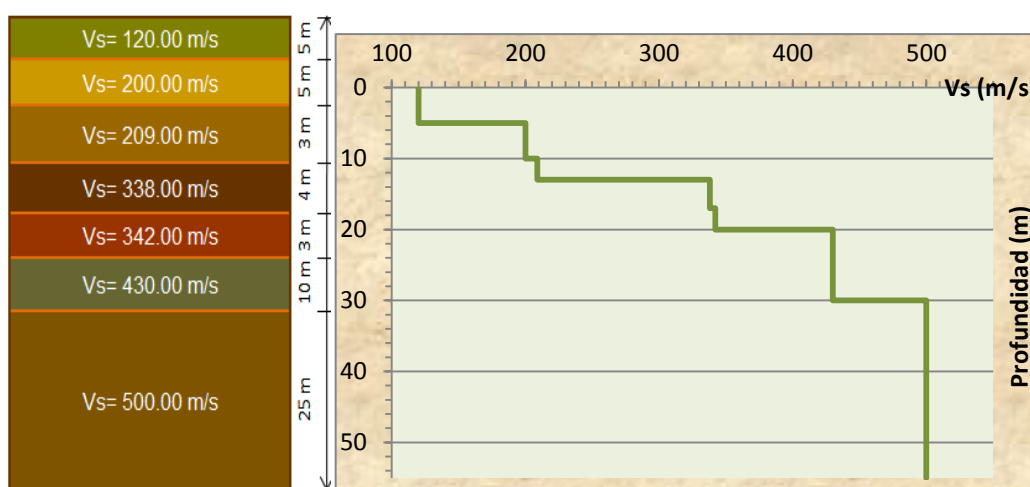


Figura 140: Gráfica Vs & Profundidad, El Condado (MSQ 1)

6.3.2 Análisis de los puntos ubicados en la Zona Centro

Toma en consideración los siguientes sectores:

6.3.2.1 La Gasca (Sector 12 – MSQ6)

Zona de Suelo:	MSQ6
Profundidad Promedio:	59.00m

Velocidad Vs [m/s]	Espesor de la Capa [m]	Peso específico [γ]
260.00	4.0	1.8
284.00	6.0	1.8
290.00	9.0	1.8
400.00	5.0	2.0
460.00	5.0	2.0
520.00	6.0	2.0
570.00	24.0	2.0

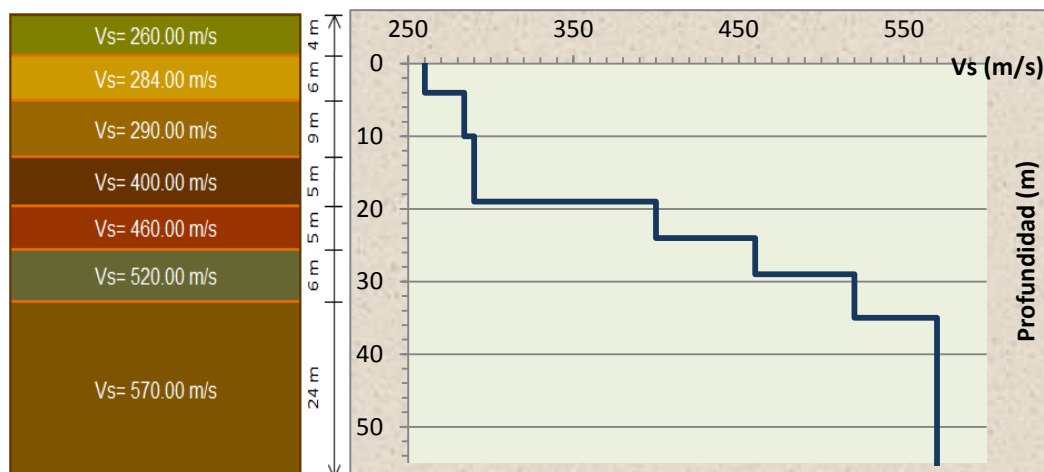


Figura 141: Gráfica Vs & Profundidad, La Gasca (MSQ 6)

6.3.3 Análisis de los puntos ubicados en la Zona Sur

Toma en consideración los siguientes sectores:

6.3.3.1 Chimbacalle (Sector 31 – MSQ10)

Zona de Suelo:	MSQ10
Profundidad Promedio:	55.00m

Velocidad Vs [m/s]	Espesor de la Capa [m]	Peso específico [γ]
100	5	1.5
293	8	1.7
310	8	1.8
380	5	2.1
440	29	2.3

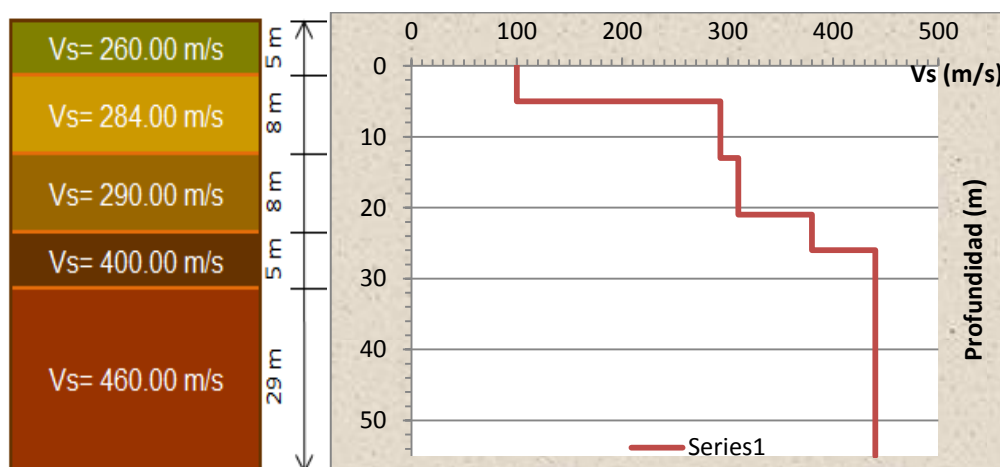


Figura 142: Gráfica Vs & Profundidad, Chimbacalle (MSQ 10)

6.4 FACTORES AMPLIFICACIÓN DE DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN

Se presenta a continuación los factores de sitio hallados con los datos de los registros sísmicos presentados en el numeral 6.1 y con la ayuda del programa Degtra (Cap. 3), ya que este brinda los resultados en función del perfil de suelo y de los períodos de vibración. Como no se cuenta con una base de datos completa de estudios de suelos de cada uno de los barrios de la capital se pondrá a consideración los factores de sitio hallados para aquellos sectores que si lo tienen.

En las gráficas 143 a 151 se muestran los factores de aceleración, velocidad y desplazamiento, para algunos sectores de Quito.

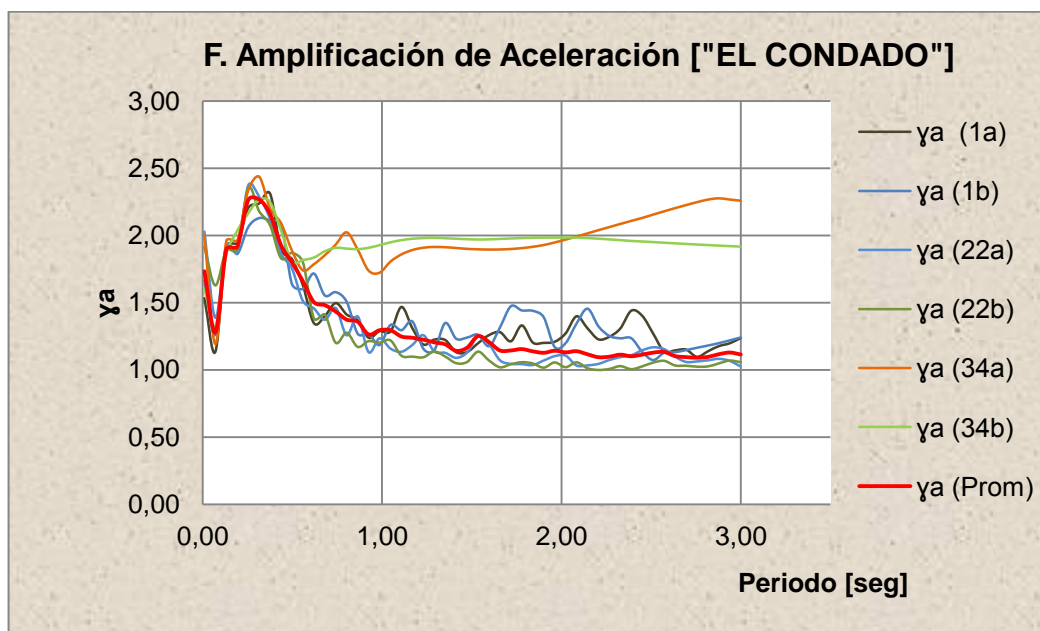


Figura 143: Período & Factor de Amplificación de aceleración, El Condado

(MSQ 1-Sector 60)

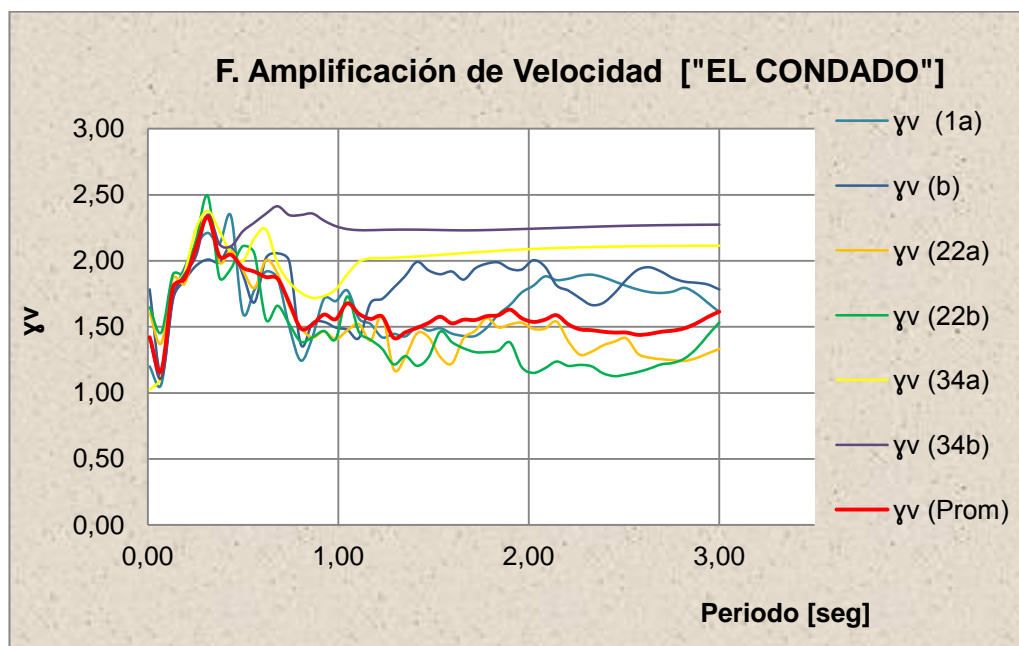


Figura 144: Período & Factor de Amplificación de velocidad, El Condado
(MSQ 1-Sector 60)

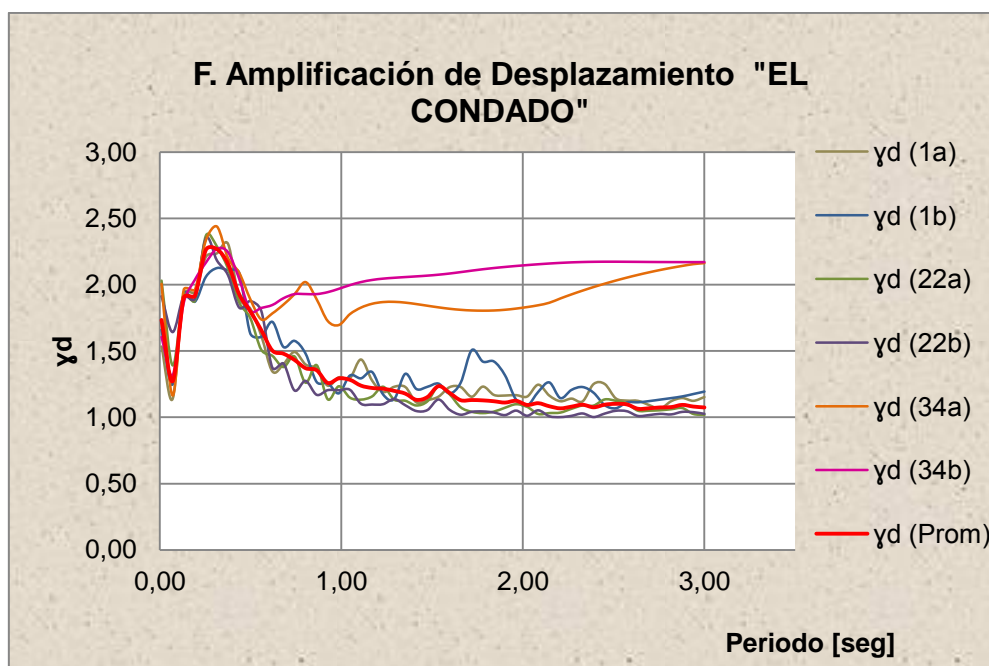


Figura 145: Período & Factor de Amplificación de desplazamiento, El Condado (MSQ 1- Sector 60)

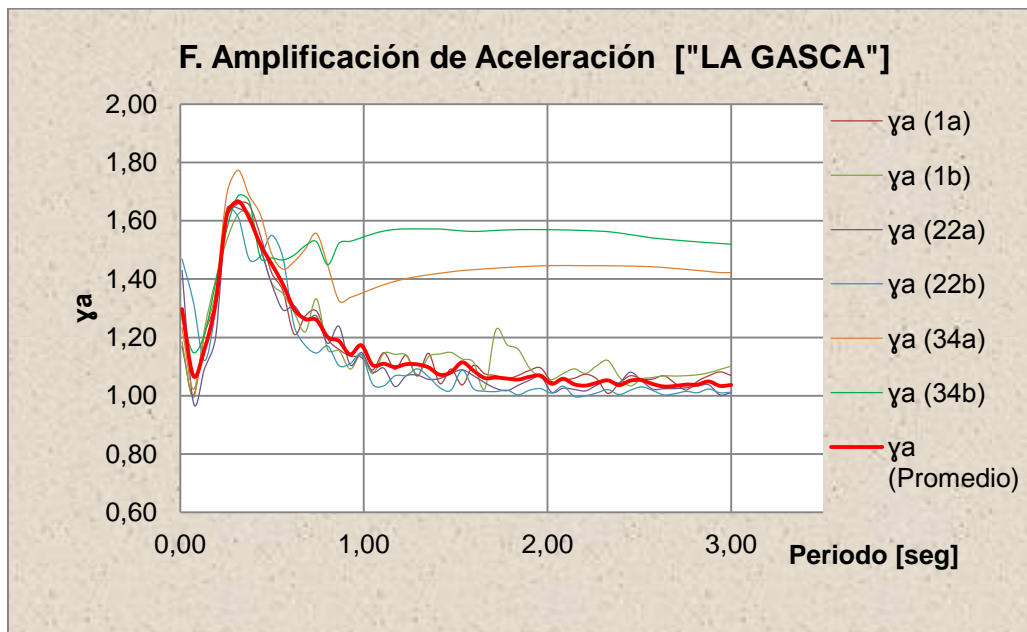


Figura 146: Período & Factor de Amplificación de aceleración, El Condado
(MSQ 1-Sector 12)

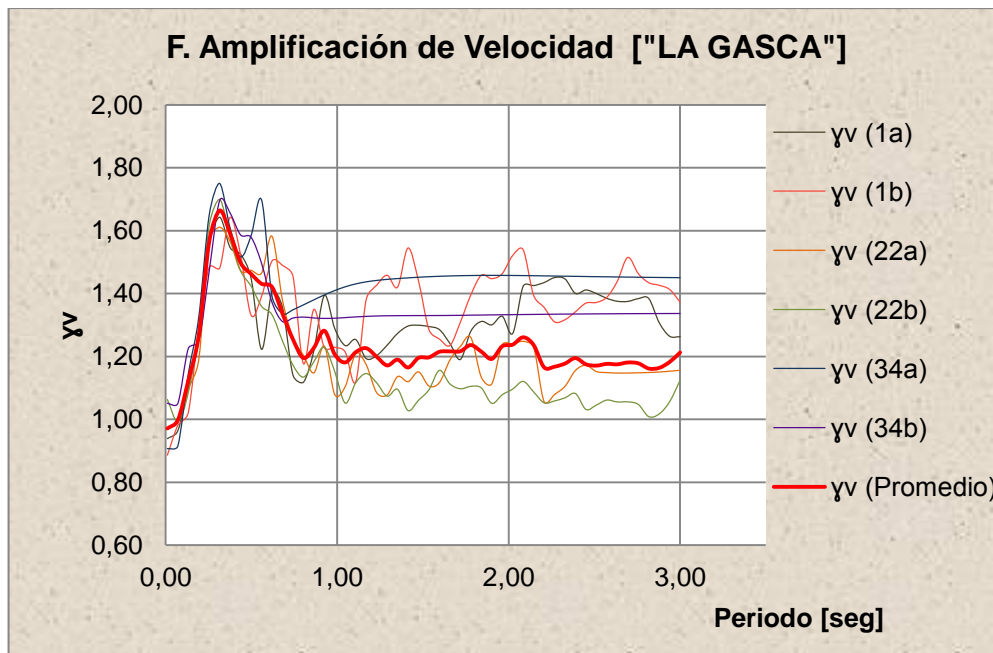


Figura 147: Período & Factor de Amplificación de velocidad, La Gasca
(MSQ 6- Sector 12)

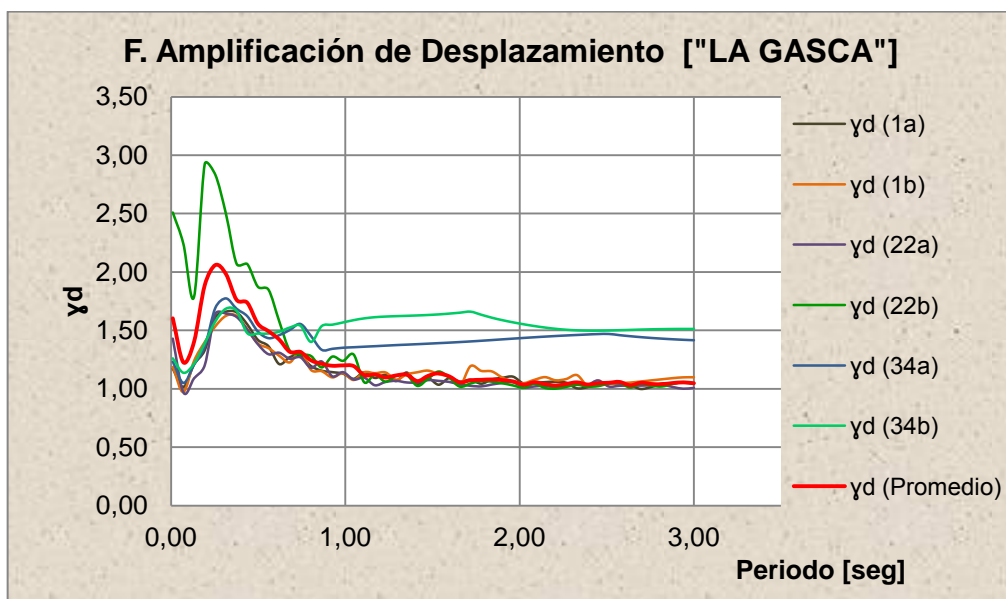


Figura 148: Período & Factor de Amplificación de desplazamiento, La Gasca
(MSQ 6 – Sector 12)

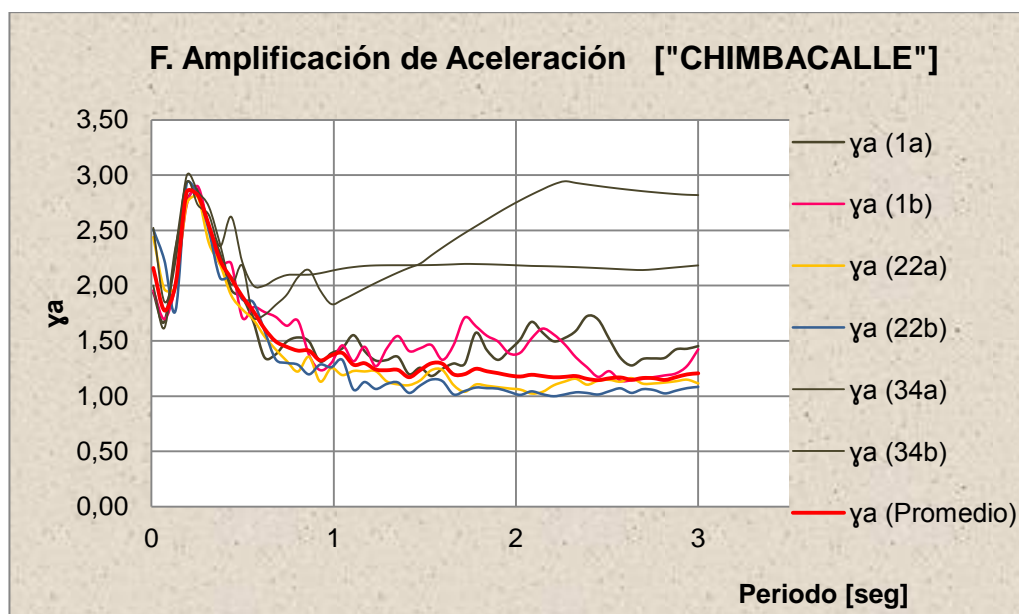


Figura 149: Período & Factor de Amplificación de aceleración, Chimbacalle
(MSQ 10 – Sector 31)

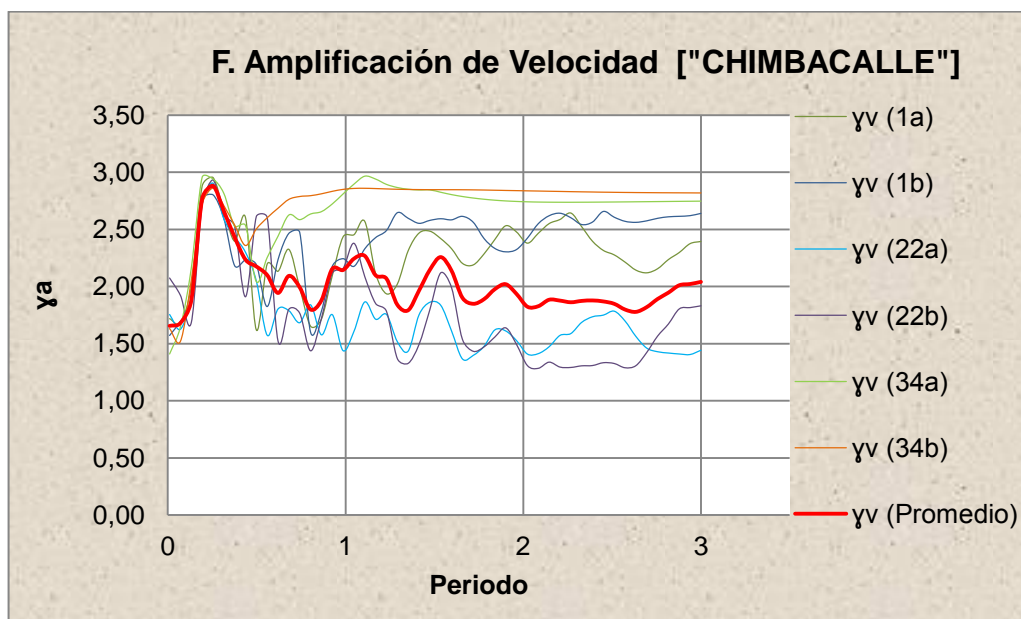


Figura 150: Período & Factor de Amplificación de velocidad, Chimbacalle (MSQ 10 – Sector 31)

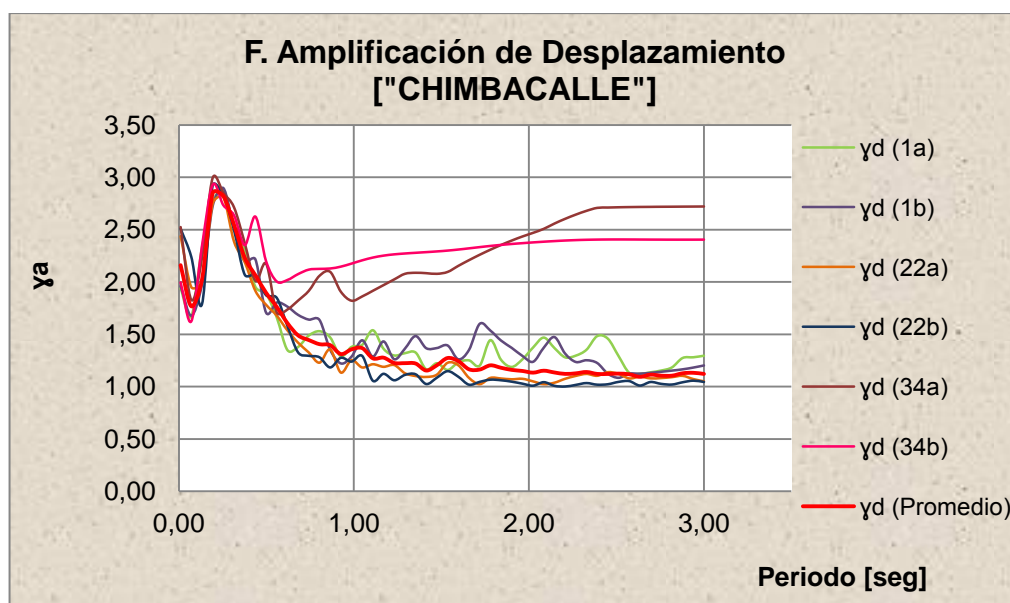


Figura 151: Período & Factor de Amplificación de desplazamiento, Chimbacalle (MSQ 10 – Sector 31)

6.5 IMPLEMENTACION DE ESTOS FACTORES AL PROGRAMA MIZOSIQ

MIZOSIQ V2.0, mantiene el formato de programación con opciones de Visual Basic, la característica adicional que presenta esta versión es la implementación de los siguientes parámetros, los mismos que fueron explicados en capítulos anteriores:

- Espectros Elásticos de Desplazamiento,
- Factores de sitio, y
- Espectros reducidos.

La ventana que se muestra una vez inicializado del programa permite al usuario la selección de:

- La zona en que desee trabajar, siendo estas: Sur, Centro Sur, Centro, Centro Norte y Norte del Distrito Metropolitano de Quito.
- El sector a ser analizado.
- El barrio correspondiente a cada sector. Para la selección de este parámetro se cuenta con un botón en el cual se desplegaran todos los barrios contenidos en el mismo.

En base a estos datos, se elaboran las gráficas, para los períodos de retorno estimados de 475 y 970 años. Primero se visualiza el espectro elástico de aceleración en función de las ecuaciones establecidas en el NEC-11, a continuación se muestra el espectro elástico de desplazamientos, que de igual manera es establecido de acuerdo al NEC-11, seguidamente se

indican los factores de sitio con los que se calcularon los espectros antes mencionados y las gráficas encontradas en este estudio, finalmente se muestra las gráficas de los espectros reducidos para un período de retorno de 475 años y 2470 años.

6.5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se mencionó anteriormente, el programa permite obtener tanto las gráficas como la tabla de valores del Espectro de diseño, para lo cual se requiere simplemente pulsar el botón “COPIAR” que se muestra en cada una de las gráficas.

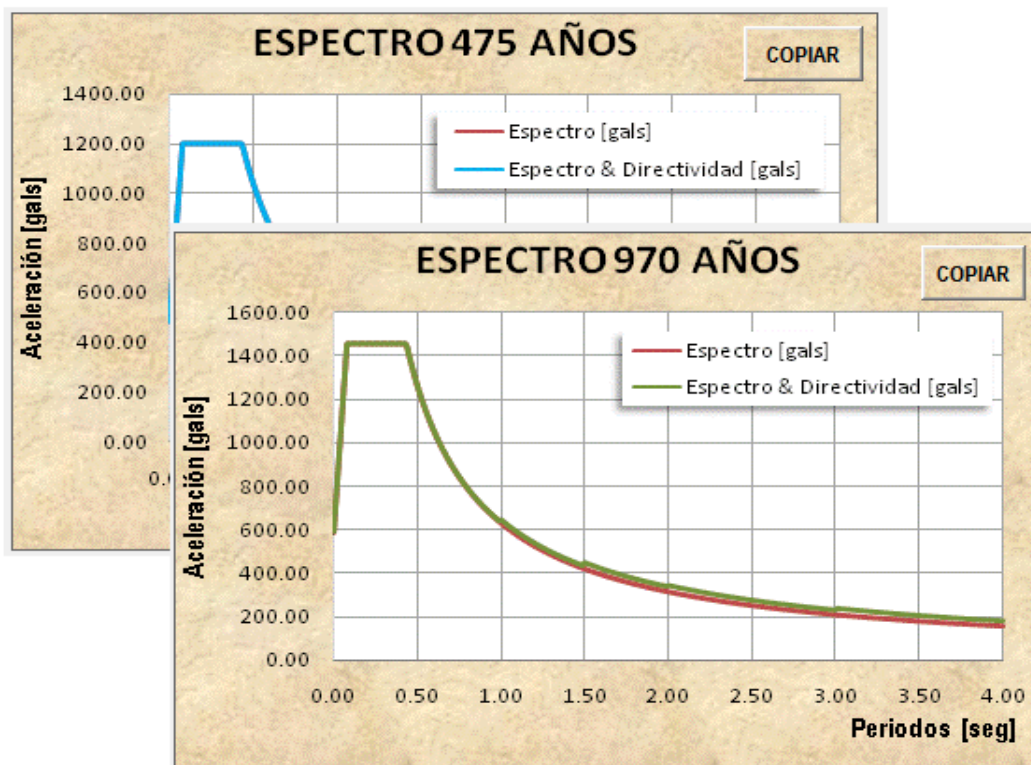


Figura 152: Resultados generales dentro de la ventana principal

En la parte superior de cada ventana se muestra la información con la cual se realizó el análisis.

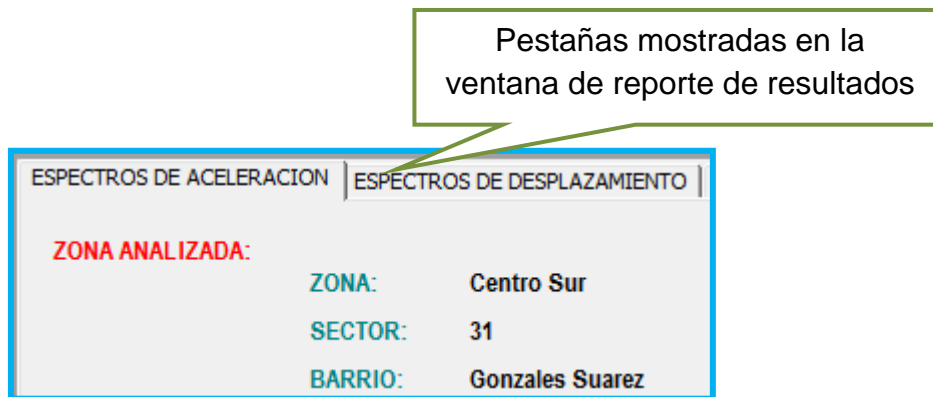


Figura 153: Información de la zona de análisis

Adicionalmente en la parte inferior izquierda de cada ventana se muestran los valores de la velocidad, período de retorno, aceleración para 475 años y para 970 años.

Aceleraciones & Valores complementarios				
Ao (475 Años)=	385	[gals]	Vs 30 [m/seg]=	_____
Ao (970 Años)=	468	[gals]	Período Fundamental=	_____

Figura 154: Valores relevantes de la zona analizada

En tanto que en la parte derecha se tiene la opción de ingresar un valor de período para determinar el valor exacto de la aceleración en ese punto. Al pulsar “ANALIZAR”, se muestra en las gráficas el valor del período seleccionado con su respectivo valor de aceleración.

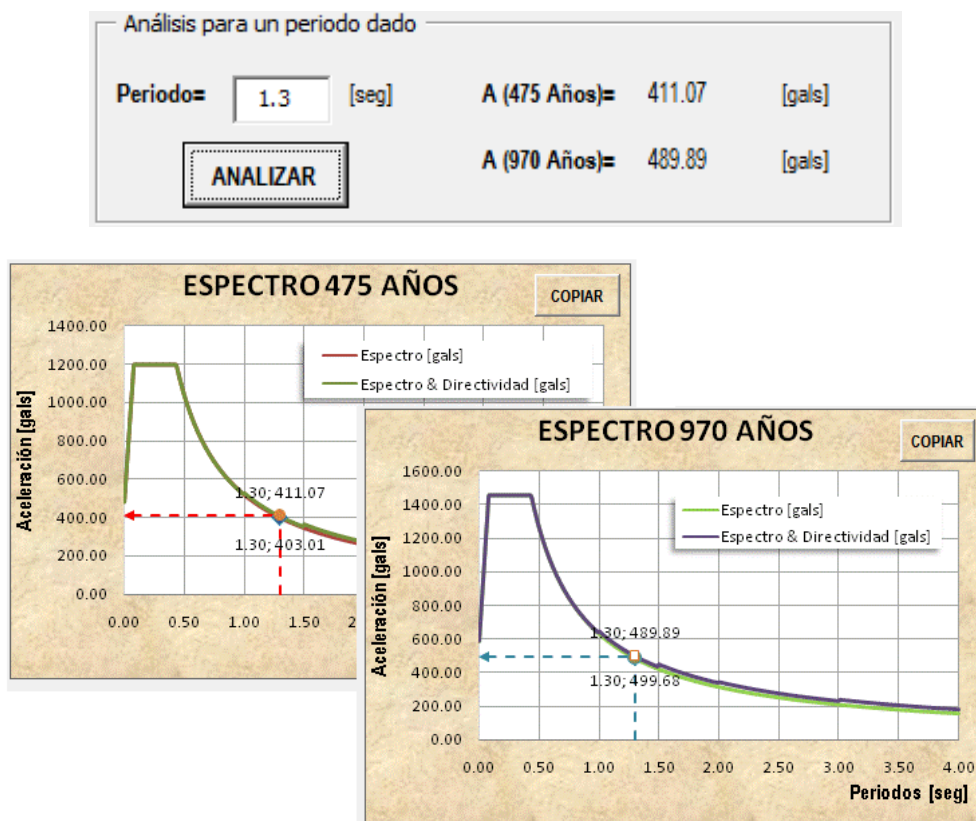


Figura 155: Espectros presentados a la derecha del programa

En muchos de los casos, los valores para el período fundamental y la velocidad de onda V_{s30} , no se encontrarán disponibles (debido a la falta de datos para dichas zonas, hasta el momento), pero se espera que futuros estudios puedan complementar esta información.

6.5.2 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para visualizar el funcionamiento del programa MIZOSIQ V2.0, se realizará el análisis del barrio “El Condado”, sector 60, zona NORTE.

En la figura 156 se muestra la pantalla inicial del programa MIZOSIQ V2.0, donde se presiona el botón INICIO para dar comienzo al análisis.



Figura 156: Pantalla inicial de programa MIZOSIQ V2.0

Una vez inicializado el programa, aparece una segunda pantalla en la que se muestra el mapa del Distrito Metropolitano de Quito (parroquias urbanas), con las divisiones zonales y sectores propuestos. Para este caso damos clic en ZONA NORTE.



Figura 157: Ventana con el Mapa del Distrito Metropolitano de Quito

Al hacer **click** en la zona correspondiente (Texto en blanco del Mapa del Distrito Metropolitano de Quito), se muestra en la parte inferior izquierda una vista más amplia de la zona con los sectores que lo conforman.

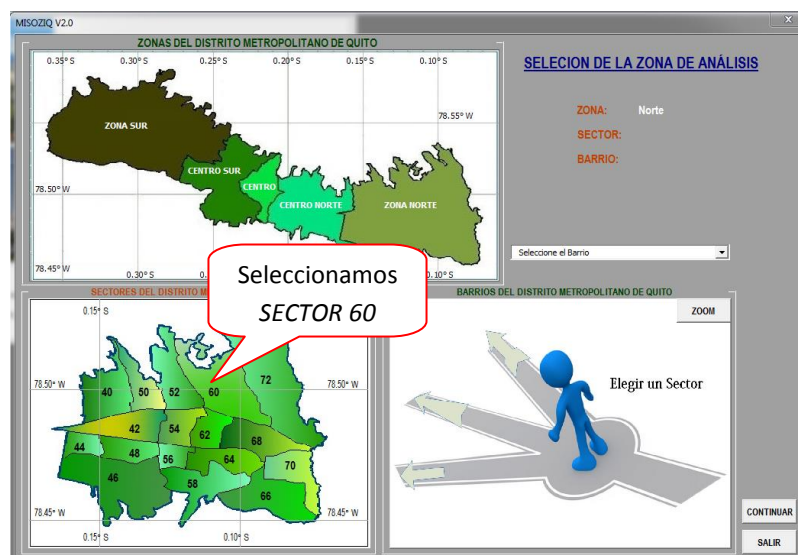


Figura 158: Selección del sector a analizar

Para poder seleccionar el sector que deseamos analizar damos **click** en uno de ellos, y se muestra un mapa en la parte inferior derecha de la pantalla con los barrios de la zona adoptada.

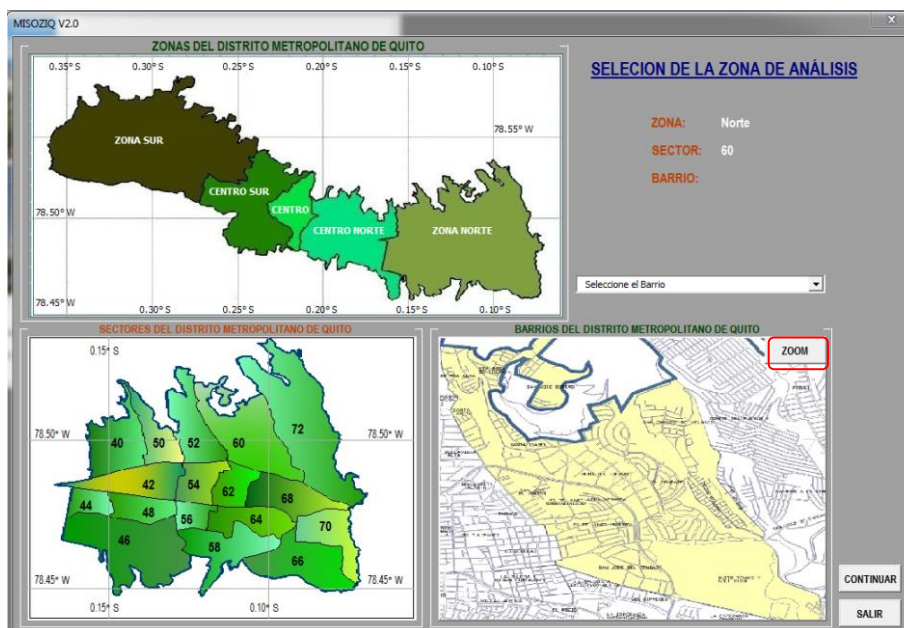


Figura 159: Selección del barrio a analizar

En caso de que no se visualice claramente el mapa de los barrios, accionamos el botón **ZOOM** (mostrado en la parte superior derecha del mapa de barrios), a continuación se muestra una ventana con una vista más clara de los barrios.

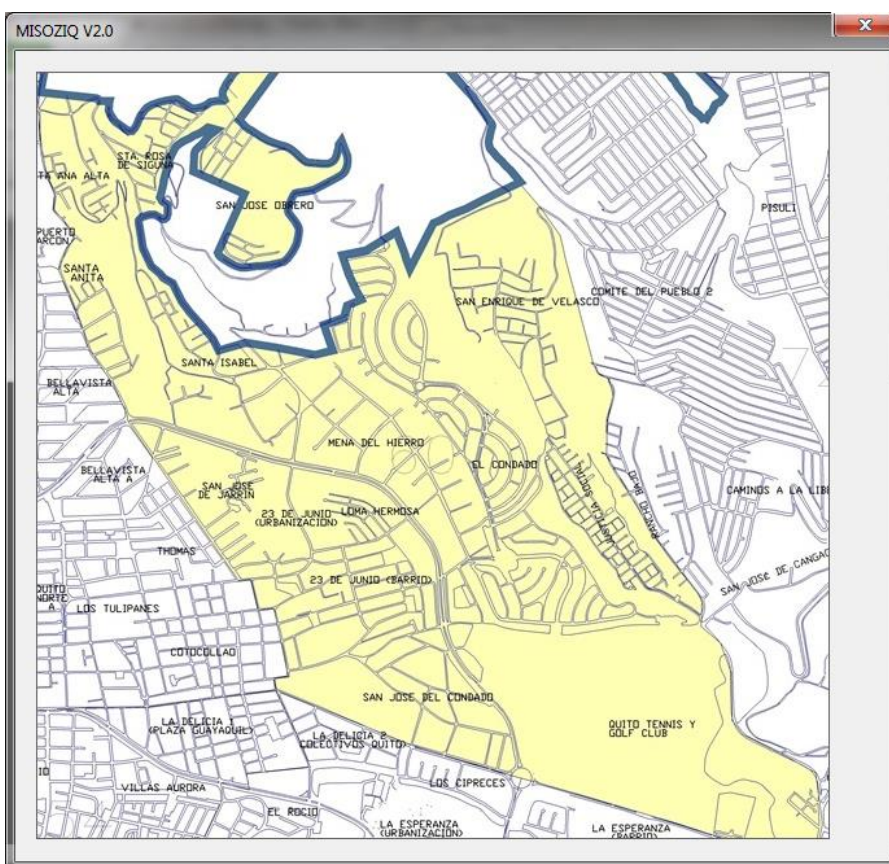


Figura 160: Ampliación de los barrios del sector 60

Se cierra esta ventana y se selecciona el Barrio que se desea analizar de la lista desplegable que se muestra en la parte superior del mapa de Barrios.

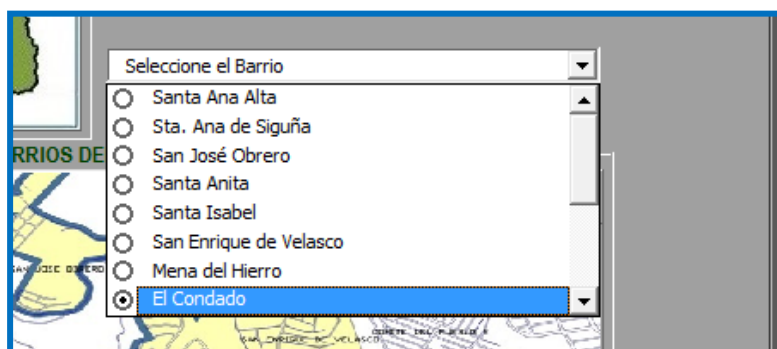


Figura 161: Selección del Barrio

Nótese que la parte superior derecha de la pantalla se va llenando con la información de la zona una vez que se hayan seleccionado todos los parámetros para el análisis, si está de acuerdo con los datos escogidos se dar ***clíc*** en el botón “CONTINUAR”

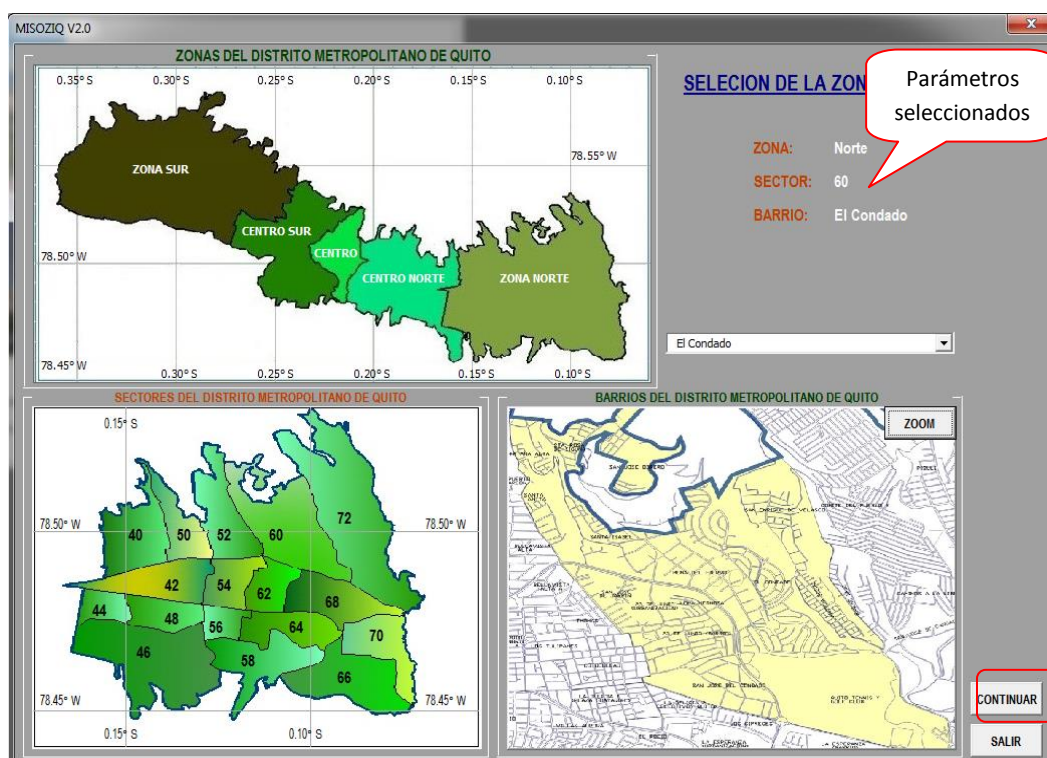


Figura 162: Ventana principal con los datos seleccionados

La pantalla mostrada a continuación presenta las opciones de análisis del programa: “ESPECTROS DE ACELERACION”, “ESPECTROS DE DESPLAZAMIENTO”, “FACTORES DE SITIO”, “ESPECTROS REDUCIDOS DE ACELERACIÓN”, “ESPECTROS REDUCIDOS DE DESPLAZAMIENTO”.

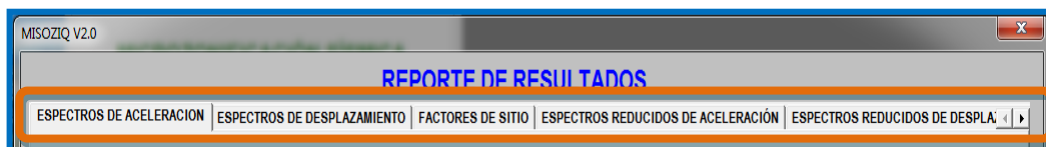


Figura 163: Opciones presentadas por el programa

El reporte de resultados lo obtenemos seleccionando una de las opciones antes mencionadas, iniciamos con el “Espectro de Aceleración”. Los resultados mostrados corresponden a las gráficas de los espectros de diseño para un período de retorno de 475 años y de 970 años.



Figura 164: Espectros de aceleración para un período de retorno de 475 años & 970 años.

De manera simultánea, en la parte superior derecha de la misma ventana, se indican los datos de análisis.

DATOS DE ANALISIS	
ZONA:	Norte
SECTOR:	60
BARRIO:	El Condado

Figura 165: Datos de análisis

De igual manera, en la parte inferior izquierda, se despliegan las características principales del barrio seleccionado obtenidas a lo largo de este estudio.

Aceleraciones & Valores complementarios	Periodo Fundamental
Ao (475 Años)= 388 [gals]	ERN= -----
Ao (970 Años)= 471 [gals]	ORSTOM= 0,67
Vs 30 [m/seg]= -----	

Figura 166: Características principales del Barrio

Adicionalmente en la parte inferior derecha se presenta la opción de ingresar un período para determinar el valor exacto de la aceleración, tanto para 475 años como para 970 años, al pulsar “ANALIZAR”, en las gráficas se presenta el valor de la abscisa (Período ingresado) y de la ordenada (Aceleración).

Análisis para un periodo dado

Periodo= [seg] A (475 Años)= 429,47 [gals]

 A (970 Años)= 521,35 [gals]

Figura 167: Análisis para un período dado

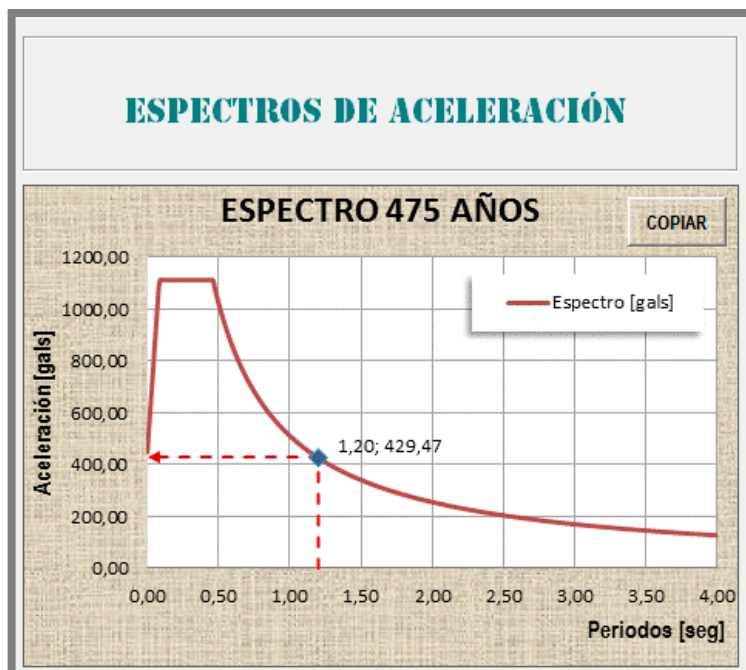


Figura 168: Espectro de aceleración. (475 Años)

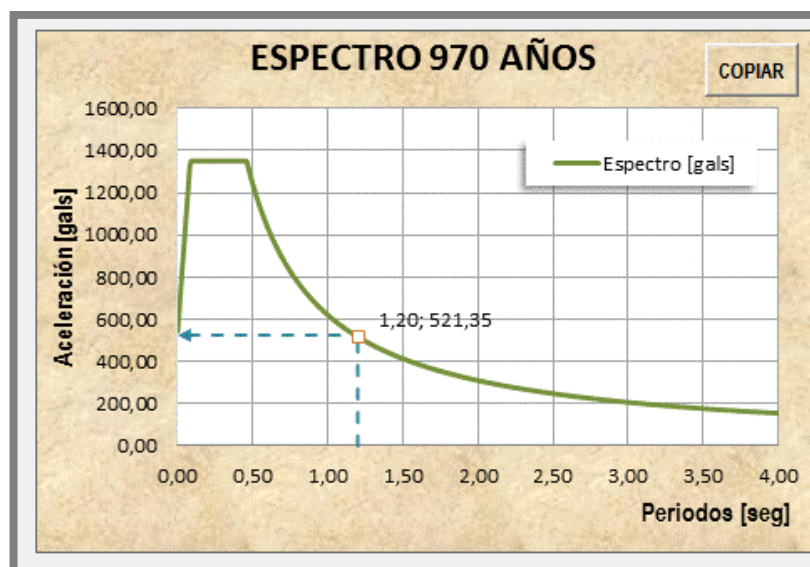


Figura 169: Espectro de aceleración. (970 Años)

Para el caso de los “ESPECTROS DE DESPLAZAMIENTO”, su funcionamiento es similar al del “ESPECTRO DE ACELERACION”

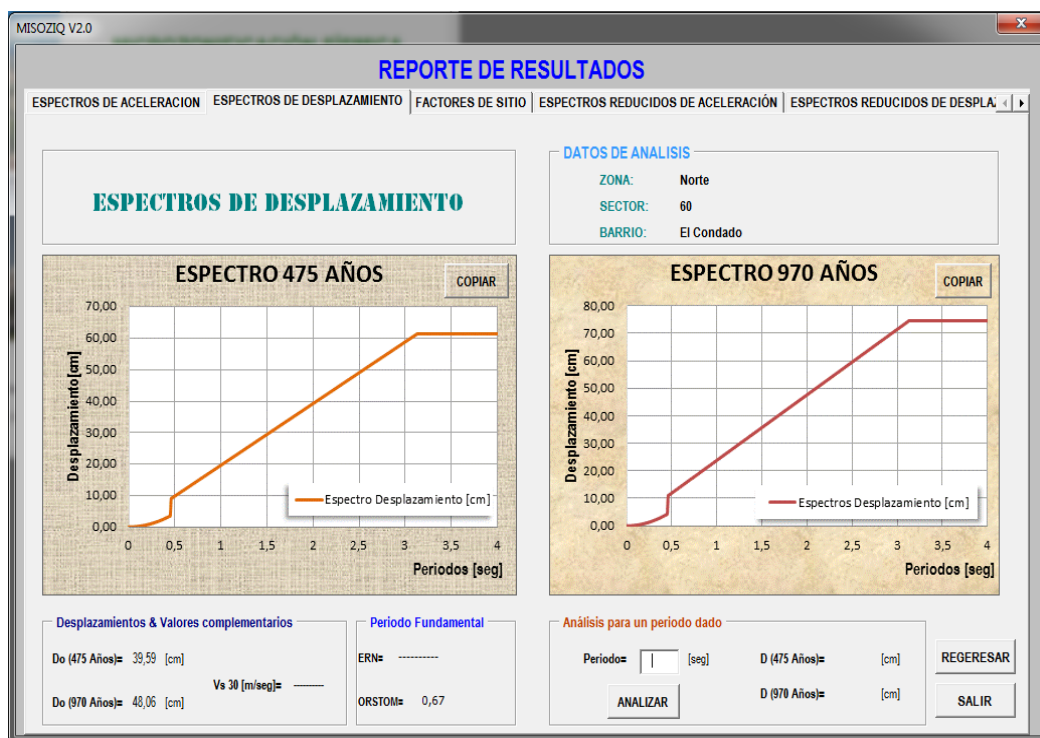


Figura 170: Espectros de desplazamiento para un período de retorno de 475 años & 970 años

En la parte inferior izquierda de la misma ventana, se despliegan las características principales del barrio seleccionado obtenidas a lo largo de este estudio.

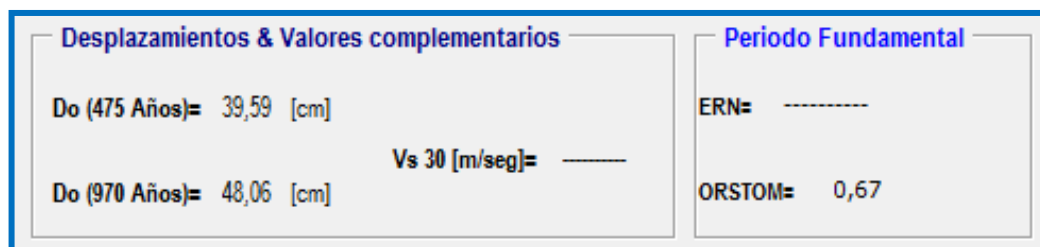


Figura 171: Características principales del Barrio

De igual forma en la parte inferior derecha se presenta la opción de ingresar un período para determinar el valor exacto del desplazamiento, tanto para 475 años como para 970 años, al pulsar “ANALIZAR”, en las gráficas se indica el valor de la abscisa (Período ingresado) y de la ordenada (Desplazamiento).

Análisis para un periodo dado

Periodo= [seg] D (475 Años)= 39,07 [cm]
D (970 Años)= 47,42 [cm]

ANALIZAR

Figura 172: Análisis para un período dado

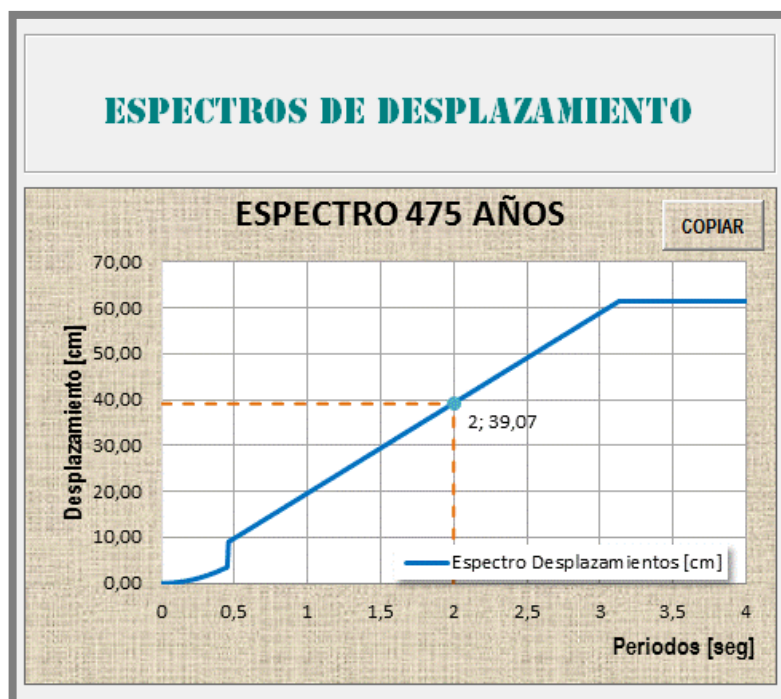


Figura 173: Espectro de desplazamiento (475 Años).



Figura 174: Espectro de desplazamiento (970 Años).

El programa también da la opción de copiar los datos con los que fue realizado el espectro tanto de aceleración como de desplazamiento, para ello es necesario pulsar el botón “COPIAR”, que se encuentra en la parte superior de cada gráfica.



Figura 175: Opción que permite copiar la tabla con los valores de espectro

La tabla puede ser pegada en cualquier documento, sea este de Word o Excel. A continuación se muestra la tabla con los valores de aceleraciones y periodos. (La tabla completa muestra valores hasta $T=4$ seg con un intervalo de 0,1seg).

Tabla 18: Datos con los que el programa realizó las gráficas de los Espectros

Período [seg]	Aceleración (475 Años) [gals]
0	448,14
0,2	1111,38
0,4	1111,38
0,6	851,79
0,8	638,84
1	511,07
1,5	340,71
2	255,53
2,5	204,43
3	170,35
3,5	146,02
4	127,76

Para visualizar los factores de sitio empleados en este estudio seleccionar la opción “FACTORES DE SITIO” de la ventana de **“Reporte de Resultados”**.

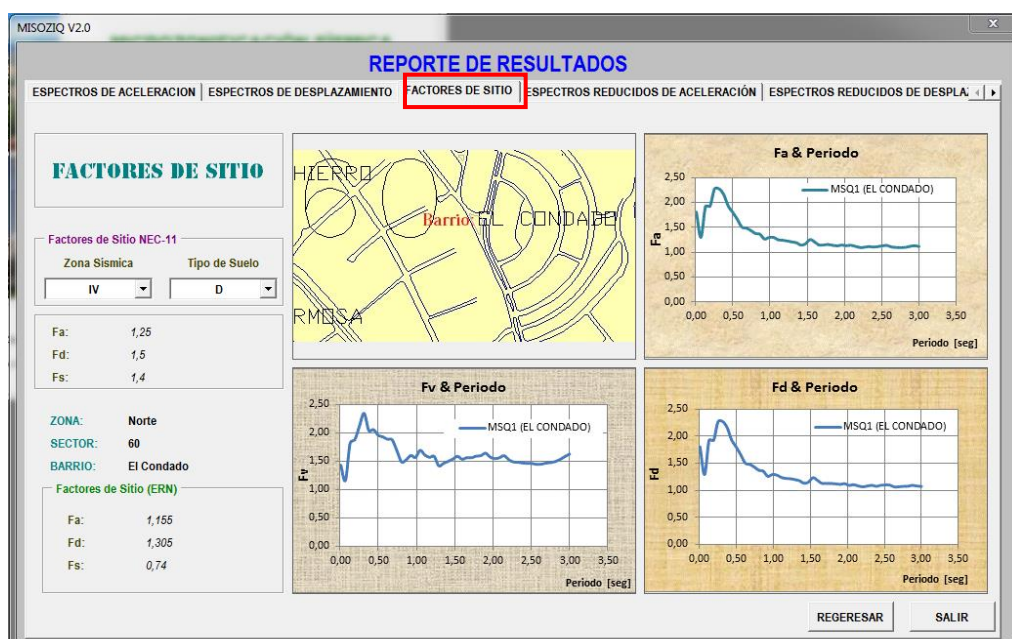


Figura 176: Factores de sitio

En esta ventana contamos se presentan dos botones en cada uno de los cuales se pide seleccionar el tipo de suelo y la zona, una vez que se llenen estos parámetros se muestran los factores de sitio establecidos en el NEC-11.

FACTORES DE SITIO	
Factores de Sitio NEC-11	
Zona Sísmica	Tipo de Suelo
IV	D
Fa:	1,25
Fd:	1,5
Fs:	1,4

Figura 177: Factores de Sitio del NEC-11

En la parte inferior de la pantalla se indican los valores de los factores de sitio con los que se calcularon los espectros tanto de aceleración como de desplazamiento. Estos factores corresponden al estudio realizado por ERN (2012).

ZONA:	Norte
SECTOR:	60
BARRIO:	El Condado
Factores de Sitio (ERN)	
Fa:	1,155
Fd:	1,305
Fs:	0,74

Figura 178: Factores de Sitio empleados en el programa

Adicionalmente en la parte derecha se muestran las gráficas de los factores de sitio tanto de aceleración, como de velocidad y desplazamiento; hallados para este barrio.

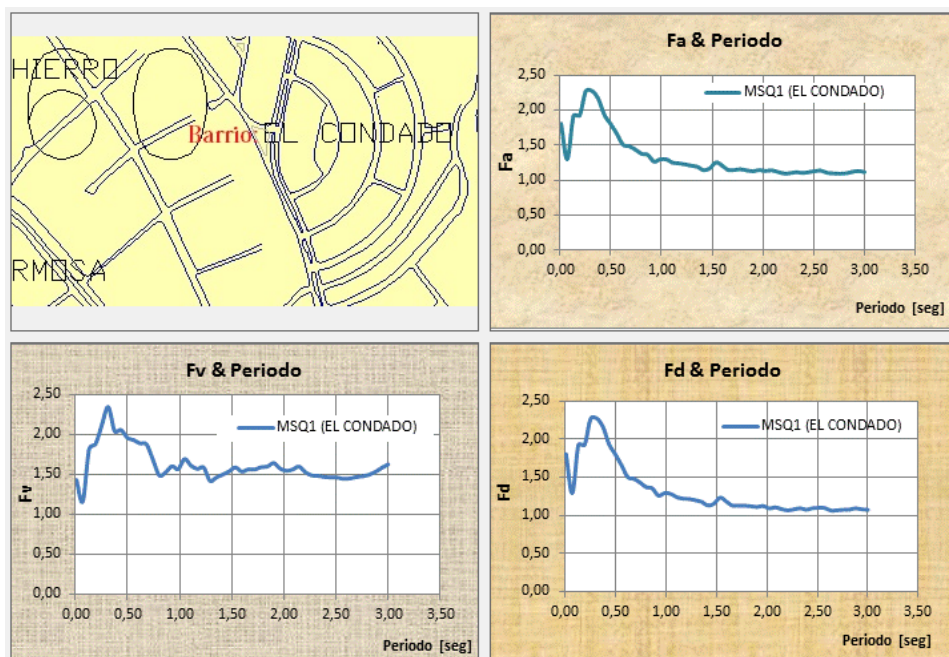


Figura 179: Factores de Sitio Barrio "El Condado"

Para la opción de "ESPECTROS REDUCIDOS DE ACELERACIÓN" es necesario ingresar el valor de β_{ef} y T_r (Período reducido) tanto para un período de retorno de 475 años como para 2475 años, una vez ingresados estos valores se da clic en la opción graficar, ya que si pulsamos este botón sin ingresar los datos requeridos se muestra un pequeña ventana que indica que estos valores aún no han sido ingresados.

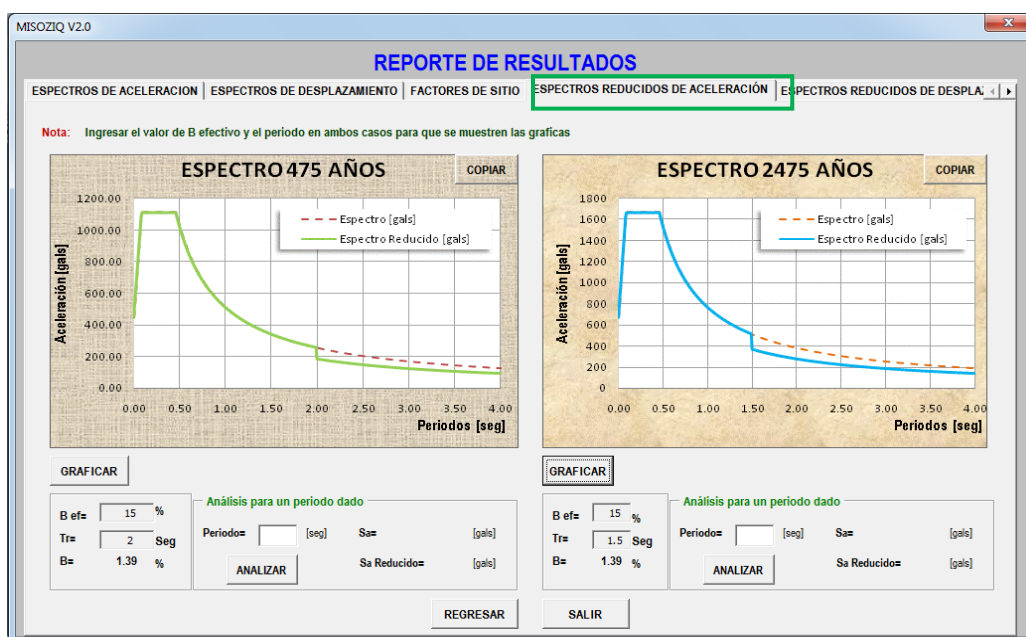


Figura 180: Espectros Reducidos de Aceleración. Ingreso de datos

Una vez ingresados todos los datos se nos mostraran unas gráficas como las indicadas en la figura 181, en las cuales se visualiza el espectro de diseño y el espectro reducido.

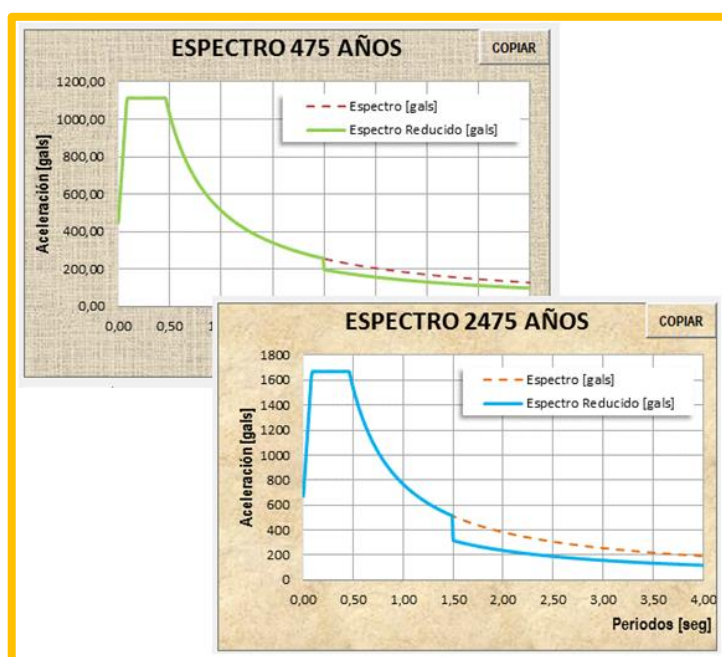


Figura 181: Espectros de Diseño & Espectros reducidos de aceleración

Si se desea conocer el valor exacto de la aceleración para un período determinado se lo puede hacer ingresando este valor en la parte inferior de la gráfica y dando “**click**” en el botón “ANALIZAR”

Análisis para un periodo dado

Periodo= [seg] Sa= 468,88 [gals]

 Sa Reducido= 468,88 [gals]

Figura 182: Análisis para un período dado

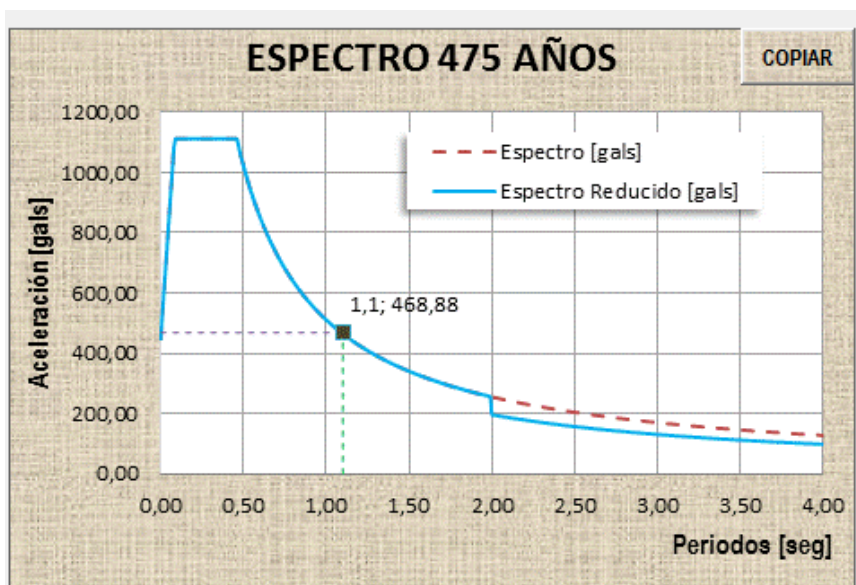


Figura 183: Espectros de Diseño & Espectros reducidos de aceleración. Período dado

De igual forma para la opción “ESPECTROS DE REDUCIDOS DE DESPLAZAMIENTO”, su funcionamiento es similar al del “ESPECTROS REDUCIDOS DE ACELERACIÓN”

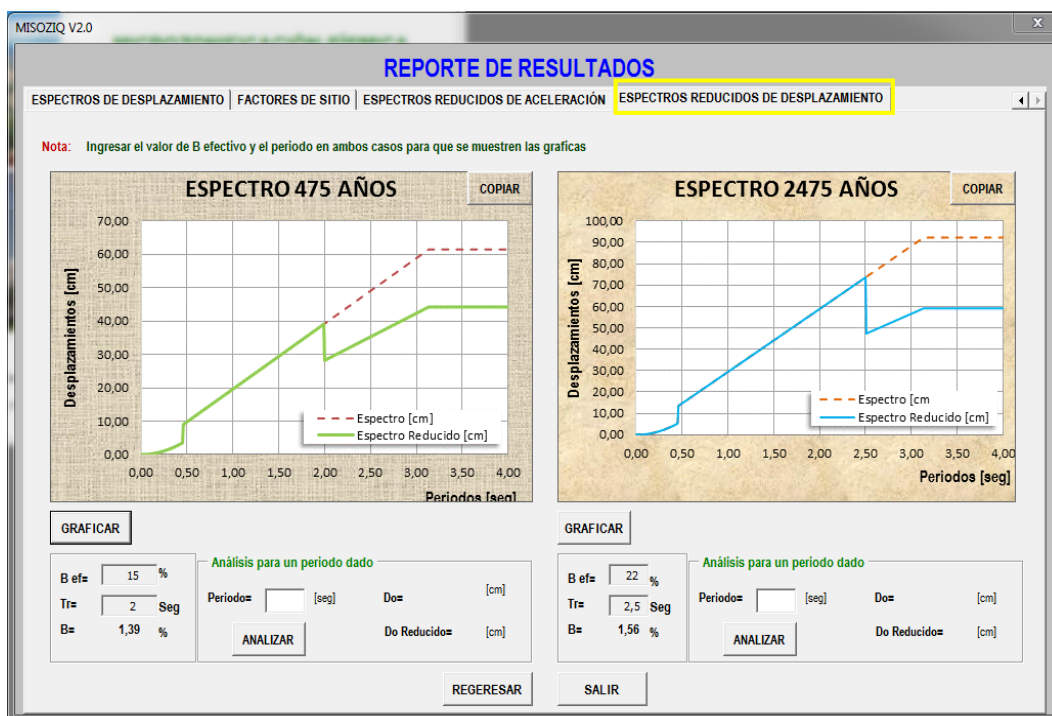


Figura 184: Espectros reducidos de desplazamiento para un período de retorno de 475 años & 2475 años

Si se desea conocer el valor exacto del desplazamiento para un período determinado se lo puede hacer ingresando este valor en la parte inferior de cada gráfica y dando “clic” en el botón “ANALIZAR”

This close-up shows the 'Análisis para un periodo dado' section of the software interface. The 'Periodo=' input field contains the value '3' with the unit '[seg]'. The corresponding calculated values are 'Do=' 58,9 [cm] and 'Do Reducido=' 42,36 [cm]. The 'ANALIZAR' button is prominently displayed below the input field.

Figura 185: Análisis para un período dado

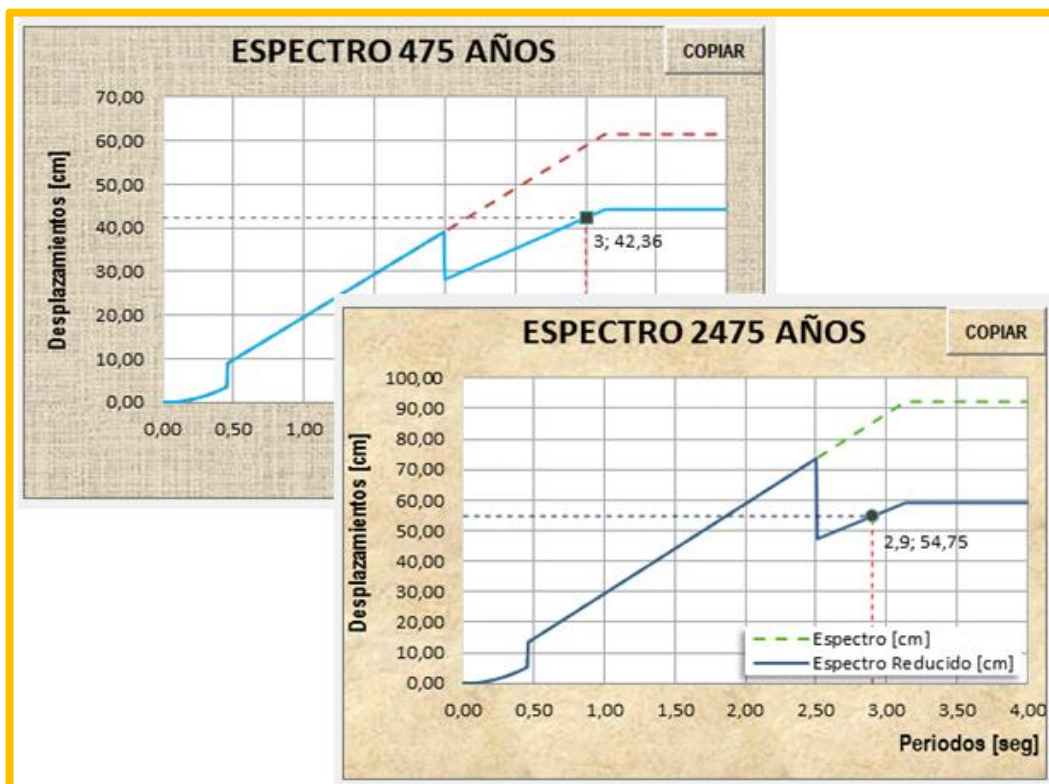


Figura 186: Espectros de Diseño & Espectros reducidos de desplazamientos. Período dado

En la parte inferior de cada ventana se tiene dos botones: “Salir” & “Regresar”, estos pueden ser seleccionados en cualquier momento que el usuario desee.



Figura 187: Botones de mando

Si se emplea el botón “Regresar”, este mostrará la ventana indicada en la figura 187.

En el caso de la segunda opción esta debe ser empleada una vez que el usuario desee salir del programa. Al dar clic en la “X” ubicada en la parte superior derecha de cada ventana, se mostrará un cuadro de dialogo en el que se indica que se debe utilizar el botón salir



Figura 188: Cuadro de dialogo, utilizar el botón salir

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Dado el aumento de la población en la capital en los últimos años y con una gran parte de ella habitando en viviendas que en muchos de los casos no cumplen con los requerimientos establecidos por el código y ubicadas en sitios inestables, el daño de un terremoto futuro en Quito podría ser muy devastador.
- El efecto local de amplificación de ondas sísmicas del suelo en un terremoto por la respuesta dinámica de una estratigrafía determinada, es causante de graves daños estructurales y no estructurales en casas y edificios, aspecto que no se toma muy en cuenta en el análisis y diseño de estructuras.
- El efecto de sitio por la acción sísmica de los terremotos depende del suelo y por lo tanto, las características que lo definen varían de acuerdo al suelo de fundación. En consecuencia es imprescindible en la determinación del espectro de respuesta dinámica del suelo en la superficie, el conocimiento del mismo respecto de la estratigrafía y características dinámicas,
- Una vez realizado el análisis de uno de los sectores de la ciudad de Quito con la ayuda del software EduShake y Degtra se demuestra que los resultados arrojados por los dos programas son similares lo que indica que se puede trabajar con cualquiera de ellos para entender de una mejor manera el comportamiento del suelo.

- Se han presentado los trabajos realizados por ERN 2012 y por la ORSTOM, con el propósito de dar a conocer los métodos de cálculo empleados para la determinación de los factores de sitio del Distrito Metropolitano de Quito.
- El programa MIZOSIQ V2.0 es un programa interactivo y de fácil utilización, el mismo que ha sido elaborado con la ayuda de las herramientas del Visual Basic del Excel.
- Para encontrar los factores de amplificación de sitio los acelerogramas empleados fueron normalizados a 0.4 g., que es la aceleración máxima del suelo en roca para Quito, de acuerdo al NEC-11, para un período de retorno de 475 años.
- Los espectros tanto de aceleración como de desplazamiento corresponden a 475 y 970 años de período de retorno, lo que implica 50 y 100 años de vida útil respectivamente, un 10% de probabilidad de excedencia en ambos casos.
- Se presentan los espectros reducidos con el fin de que sean empleados en el diseño de estructuras con aislación sísmica.
- MIZOSIQ V2.0 determina los espectros reducidos para el sismo de diseño, DE, que tiene un período de retorno de 475 años (50 años y 10% de probabilidad de excedencia) y para el sismo máximo considerado MCE, que tiene un período de retorno de 2475 años (50 años y 2% de probabilidad de excedencia). El sismo MCE se obtiene multiplicando por 1.5 las ordenadas espectrales del sismo DE.

7.2 RECOMENDACIONES

- Como la base de datos del programa se encuentra en el Excel, se recomienda que los valores de velocidad de onda de corte, períodos y factores F_a , F_d , F_s sean actualizados ya que para algunos sectores de la ciudad esta información no se conoce todavía.
- Debido al alto riesgo sísmico que presenta la ciudad, la modelación dinámica de los suelos es importante por cuanto da una información acerca de las acciones desfavorables que pueden afectar las cimentaciones de las construcciones ante la acción de un sismo, amplificado por las condiciones locales del suelo en donde se emplaza la estructura.

7.3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. (2010). Peligrosidad sísmica del Ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas, con aisladores de base FPS. *Revista internacional de Ingeniería de Estructuras*, 85-119.
- Aguiar, R. (2011). *Congreso internacional de las Ingenierías y la Arquitectura. Peligrosidad, vulnerabilidad y reforzamiento sísmico. Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador.*
- Aguiar, R. (2011). Estudios de Microzonificación Sísmica de Quito. 1-31. Quito.
- Aguiar, R. (2013). *Microzonificación Sísmica de Quito. Pichincha.*
- Aguiar, R. (2013). Microzonificación sísmica del centro norte de Quito. *Segunda Jornada de "Investigación científica desde las aulas"*, 1-39.
- Aguiar, R., & Castro, C. (2009). Ley de atenuación para estudios de peligrosidad sísmica del Ecuador. *CIENCIA*, 126-149.
- Aguiar, R., & Sangurima, K. (2013). Microzonificación Sísmica del Norte de Quito y el Sistema de Computación MIZOSIQ. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Aguiar, R., García, E., & Villamarín, J. (2010). leyes de atenuación para sismos corticales y de subducción para el Ecuador. *CIENCIA*, 1-18.
- Arguello, C. H. (s.f.). Historia sociológica sísmica de la provincia de Cotopaxi.

- Barona, D. M. (Noviembre de 2010). Vulnerabilidad Sísmica del Centro Histórico de Sangolquí. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., & Singaicho, J. C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587–1996). *Geophysical Journal International*, 1613-1633.
- Chatelain, J., Tucker, B., Guillier, B., Kaneko, F., Yepes, H., Fernandez, J., . . . Villacis, G. B. (1999). Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador. *GeoJournal*. 49, 185-196.
- Christian Hibschi, A. P. (1996). Falla activa de Quito y fuentes simogenéticas regionales: Un estudio del riesgo sísmico de Quito (Ecuador) con el análisis de los sedimentos cuaternarios.
- D'ERCOLE, F. D.-R. (Agosto de 2001). Catografía de las amenazas de origen natural por cantón en el Ecuador. Quito, Ecuador.
- EduPro Civil Systems, I. (s.f.). *EduPro Civil Systems, Inc.* Recuperado el 13 de Junio de 2013, de <http://www.proshake.com/>
- EduPro Civil Systems, I. (s.f.). ProShake User's Manual. *Versión 1.1.* Redmond, Washington.
- EPN, G. I. (1994). The Quito - Ecuador, Earthquake Risk Management Project an Overview. Quito: Geohazards International Publication.

- EPN, G. I. (Diciembre de 1995). Proyecto para manejo del riesgo sísmico de Quito. *Síntesis*. Quito.
- ERN. (2012). Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica a nivel local. Programa para la reducción de riesgos urbanos. Distrito Metropolitano de Quito.
- Fuentes, J. (Abril de 2013). *El terremoto de 1985: cuando la tierra sacudió a la mitad de Chile*. Obtenido de <http://www.guioteca.com/los-80/el-terremoto-de-1985-cuando-la-tierra-sacudio-a-la-mitad-de-chile/>
- García, E. P. (Agosto de 2010). Análisis sísmico del puente carrizal y contribuciones a la peligrosidad sísmica del Ecuador. Quito, Pichincha, Ecuador.
- García, H. (2013). Aplicación de la metodología de Shebalin al sismo del 22 de marzo de 1859 Quito. *ESPE*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Hibsch, C., Alvarado, A. P., Yepes, H. A., Sébrier, M., & Pérez, V. H. (1996). Falla activa de Quito y fuentes simogenéticas regionales: Un estudio del riesgo sísmico de Quito (Ecuador) con el análisis de los sedimentos cuaternarios.
- hoy.com.ec. (27 de Marzo de 1995). *História de algunos sismos en Ecuador*. Recuperado el 24 de Mayo de 2013, de <http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/historia-de-algunos-sismos-en-ecuador-26747.html>

IG - EPN. (30 de Enero de 2012). *Terremoto de Esmeraldas de 1906 - Uno de los sismos más grandes de la historia reciente*. Recuperado el 15 de Junio de 2013

IG-EPN. (2010-2012). *Sismos con inensidad VIII*. Recuperado el Enero de 2013, de Servicio Nacional de Sismología y Vulcanología: <http://www.igepn.edu.ec/index.php/sismos/sismicidad/grandes-terremotos.html>

IG-EPN. (2010-2013). *Recursos. Línea de tiempo*. Recuperado el 22 de Mayo de 2013, de Servicio Nacional de Vulcanología y Sismología: <http://www.igepn.edu.ec/index.php/recursos/linea-de-tiempo.html>

IG-EPN. (9 de Agosto de 2011). *Instituto Geofísico*. Recuperado el 15 de Julio de 2013, de Sismo de Pomasquí - 10 de agosto de 1990: <http://www.igepn.edu.ec/recursos/noticias/item/466-sismo-de-pomasqu%C3%AD-10-de-agosto-de-1990.html>

IG-EPN. (5 de Marzo de 2012). *Los terremotos del Nor Oriente del Ecuador del 5 de marzo de 1987*. Recuperado el 22 de Mayo de 2013, de Servicio Nacional de Sismología y Vulcanología : <http://www.igepn.edu.ec/index.php/recursos/noticias/item/601-los-terremotos-del-nor-oriente-del-ecuador-del-5-de-marzo-de-1987.html>

INETER. (2005). *Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales*. Obtenido de Microzonificación de Managua:

<http://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/sis/proyectos/micromana/4-AmplificaciondelSuelo-res.htm>

Instituto Geofísico EPN; José Egred. (1999). *Catálogo de Terremotos del Ecuador*. Quito.

Maggio, A. (30 de 03 de 2010). *Chile, País de Terremotos*. Obtenido de <http://www.bomba18.cl/18/terremotos.htm>

National Earthquake Information Center. (02 de October de 2012). *Today in Earthquake History*. Recuperado el 15 de Junio de 2013, de <http://earthquake.usgs.gov/learn/today/index.php?month=1&day=31&submit=View+Date>

Naya, A. (2010). El riesgo sísmico en Quito: Análisis y simulaciones. Université Nice Sophia Antipolis.

Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-11. (Abril de 6 de 2011). *Capítulo 2: Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo resistente*. (pag. 10, 43-46). Ecuador.

Noticreto, R. (1995). Reflexiones acerca de daños causados por sismos. *Revista Noticreto No.36*.

Ochoa, C. A. (Mayo de 2012). Diseño de Áreas de Refugio Temporal (ART) para Ayuda Humanitaria Post-Terremoto para el Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Pichincha, Ecuador.

Ordáz, M., Castellanos, F., & Zapata, A. (25 de Julio de 2005). Manual DEGTRA. *Instituto de Ingeniería UNAM*.

ORSTOM, P. G. (Julio de 1997). Microzonificación de Quito (Ecuador). *Informe de Actividades*.

Peñaherrera, R. L. (2012). *Estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Quito*. Quito.

Pérez, J. (2010). *MSN NOTICIAS Actualizado: 21/01/2010*. Recuperado el 26 de Mayo del 2013, de Los terremotos más mortíferos sufridos en la zona. Ecuador, 1987. 25.000 muertos: <http://noticias.es.msn.com/mundo/fotos.aspx?cp-documentid=151785193&page=8>

PLANMAN. (2012). Estudio de Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de los Centros Educativos Municipales en el Distrito Metropolitano de Quito. Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad. Distrito Metropolitano de Quito, Fase A 153 p., y Fase B, 120 p.,. Quito.

Quishpe, D. (Noviembre de 2012). Espectros para el Distrito Metropolitano de Quito asociado a las fallas de: Quito y Nanegalito. Escuela Politécnica del Ejército. Quito, Pichincha, Ecuador.

Riesgos, C. 9. (s.f.). Estudio de impacto ambiental de la primera línea del metro de Quito, documento para la socialización. 4-6.

- Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador. Corporacion Editorial Nacional, IG- EPN.
- Robert, D., & F. D. (Agosto de 2001). Catografía de las amenazas de origen natural por cantón en el Ecuador. Quito, Ecuador.
- Sánchez, G. R. (2001). *La Catedral de Quito y el terremoto de 1755, en actas del III Congreso Internacional de Barroco Iberoamericano*. Sevilla.
- Sangurima, K. (Mayo de 2013). Programa MIZOSIQ y la microzonificación sísmica de Quito. Pichincha, Ecuador.
- Schmidt, V. (2011). Factores de Amplificación del suelo en función del período obtenido a partir de regresiones para Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 27-39.
- Shelley, E. O., Contreras, N., Giralt, A., & Blanch, I. (Octubre de 2000). *Informe elaborado para el Gobierno del Distrito Federal*. Mexico.
- Singaucho, J. C. (Junio de 2009). Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador. *Criterior Estructurales para mejorar la estimación de intensidades*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Valverde, J., Fernández, J., Jiménez, E., & Vaca, T. y. (2008). *FLACSO ANDES*. Obtenido de Centro Digital de Vanguardia para la Investigación de ciencias sociales. Región Andina Y América Latina:

http://www.flacsoandes.org/biblio/shared/biblio_view.php?bibid=126795&tab=opac

Verdugo, R. (s.f.). Dinámica de suelos – Amplificación Sísmica. Departamento de Ingeniería Civil. rverdugo@ing.uchile.cl, Chile.

Yépez, F. (s.f.). Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito y futuros proyectos de mitigación., (págs. 16-17).

7.4 ARTICULOS PUBLICADOS

- Aguiar & Astudillo (2012). *Comparación de tres formas de reforzar una estructura*. Escuela Politécnica del Ejército. Artículo presentado en la Primera Jornada de “Investigación Científica desde las Aulas”

- Aguiar & Astudillo (2013). *Sistema Computacional MIZOSIQ V2.0*. Escuela Politécnica del Ejército. Artículo a ser publicado en las Terceras Jornadas de “Investigación Científica desde las Aulas”

- Aguiar & Astudillo (2013). *Propuesta de factores de sitio para la ciudad de Quito*. Escuela Politécnica del Ejército. Artículo a ser publicado en las Terceras Jornadas de “Investigación Científica desde las Aulas”

ANEXOS

A.1 ESPECTROS DE ACELERACIÓN

Se presentan los espectros de aceleración encontrados para los sectores analizados en este estudio.

Se comparan estos espectros (promedio) con los planteados por ERN. Finalmente se indica el espectro de ERN, el espectro de aceleraciones del NEC-11 para roca, y el espectro propuesto en este trabajo el cual se determinó multiplicando las ordenadas espectrales del espectro del código (NEC-11), por los factores de sitio encontrados en este proyecto.

A1.1. Análisis de los puntos ubicados en la Zona Norte

A1.1.2. El Condado (Sector 60)

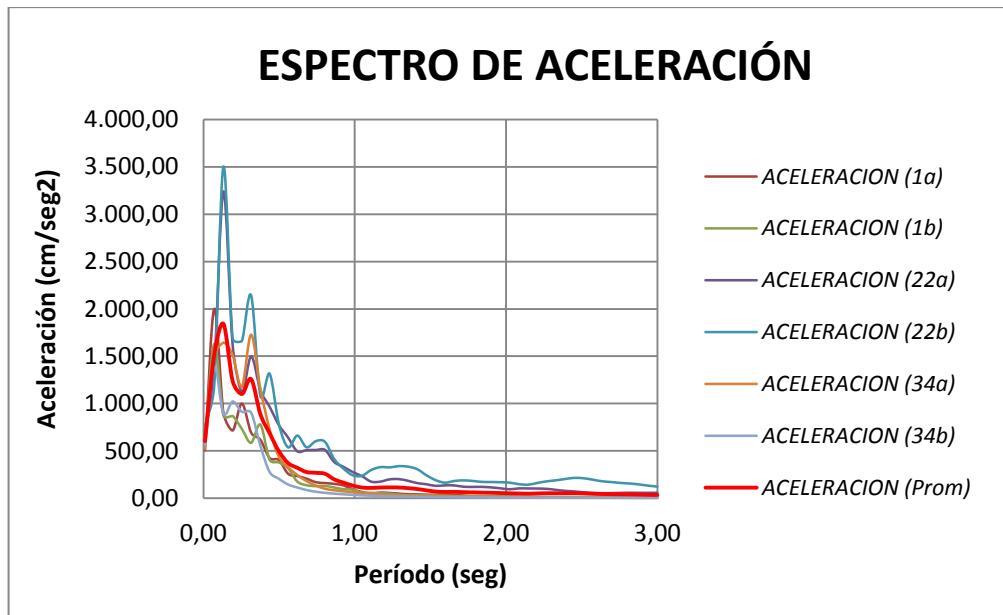


Figura 189: Espectros de aceleración. (Sector 60)

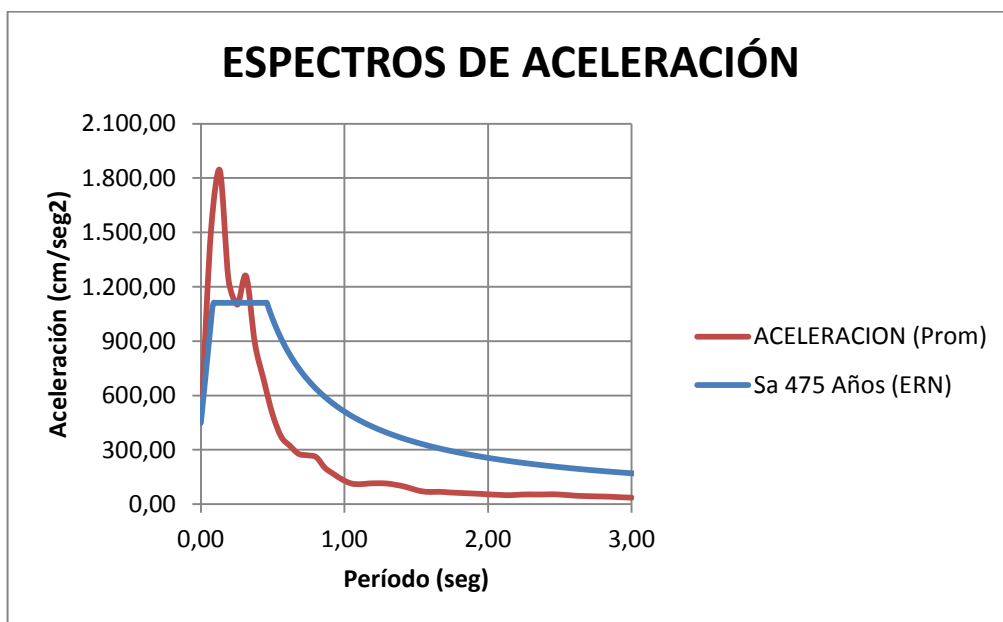


Figura 190: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

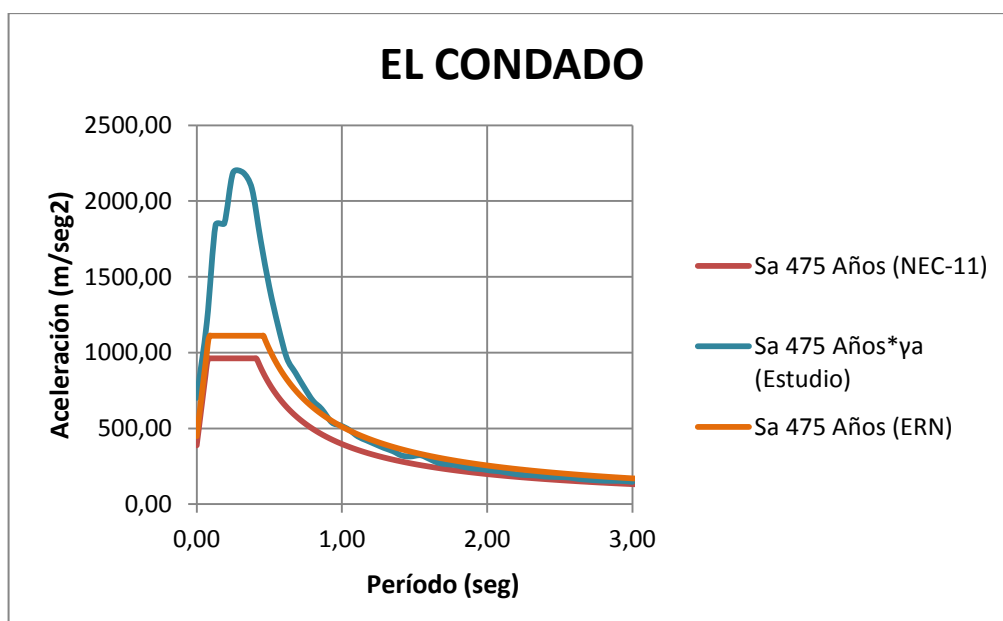


Figura 191: Comparación de espectros

A1.1.3. Marisol (Avenida Real Audiencia) (Sector 62)

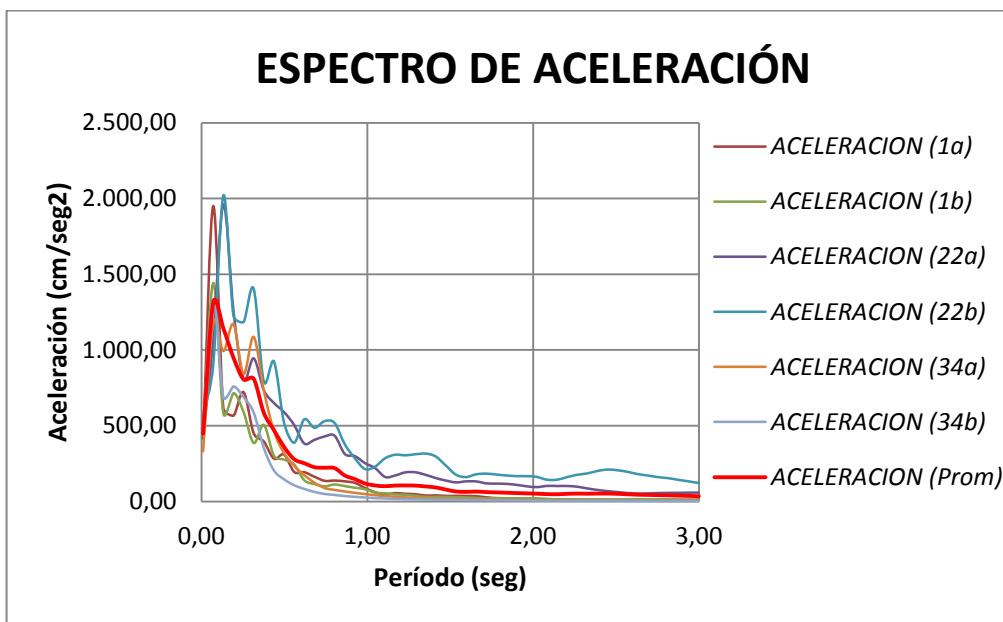


Figura 192: Espectros de aceleración. (Sector 62)

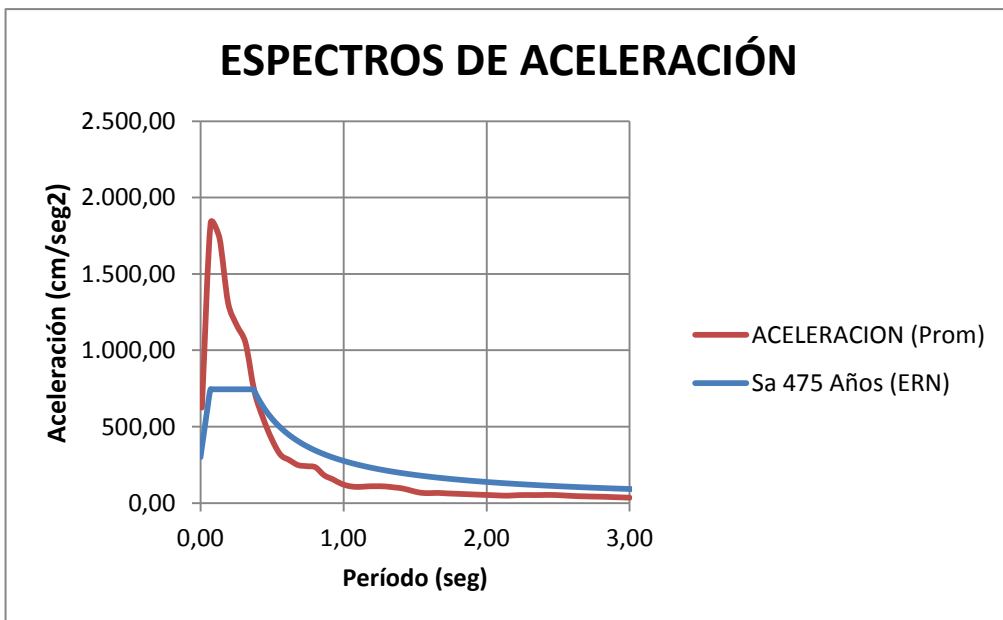


Figura 193: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

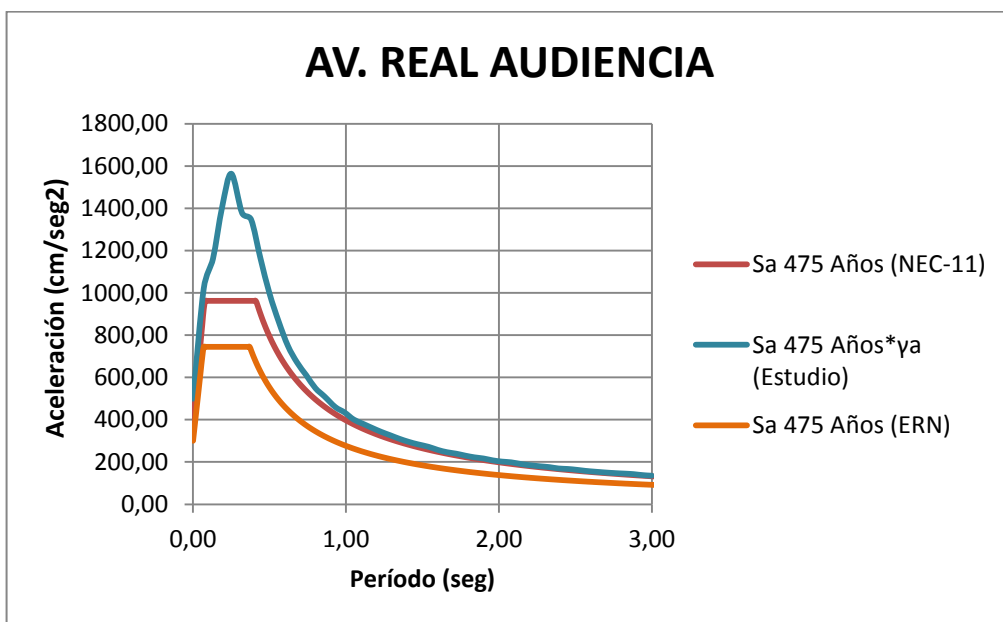


Figura 194: Comparación de espectros

A1.1.4. Andalucía (Sector 40)

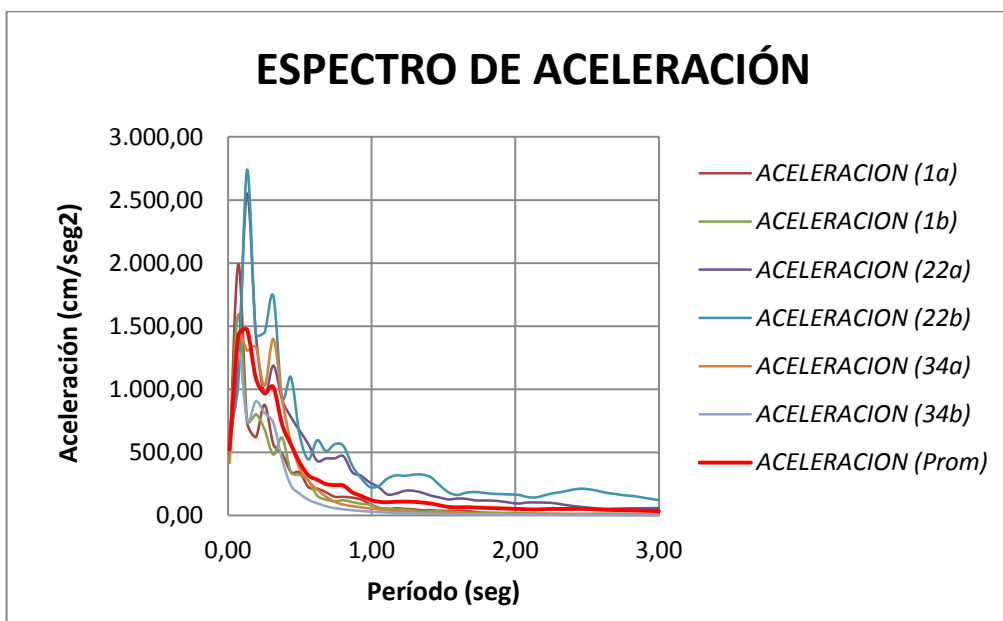


Figura 195: Espectros de aceleración. (Sector 40)

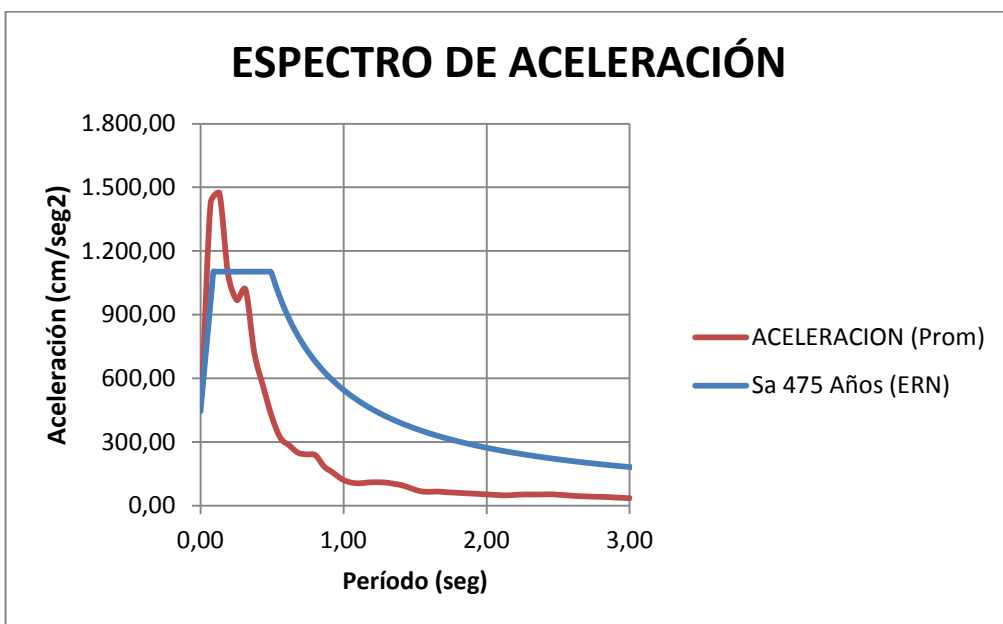


Figura 196: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

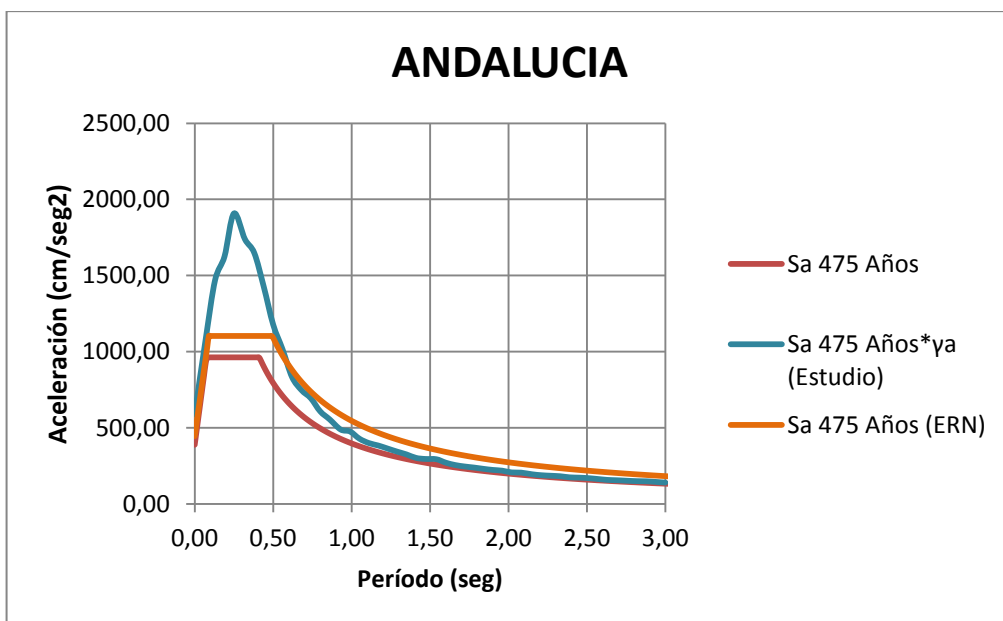


Figura 197: Comparación de espectros

A1.1.5. Quito Tennis (Sector 38)

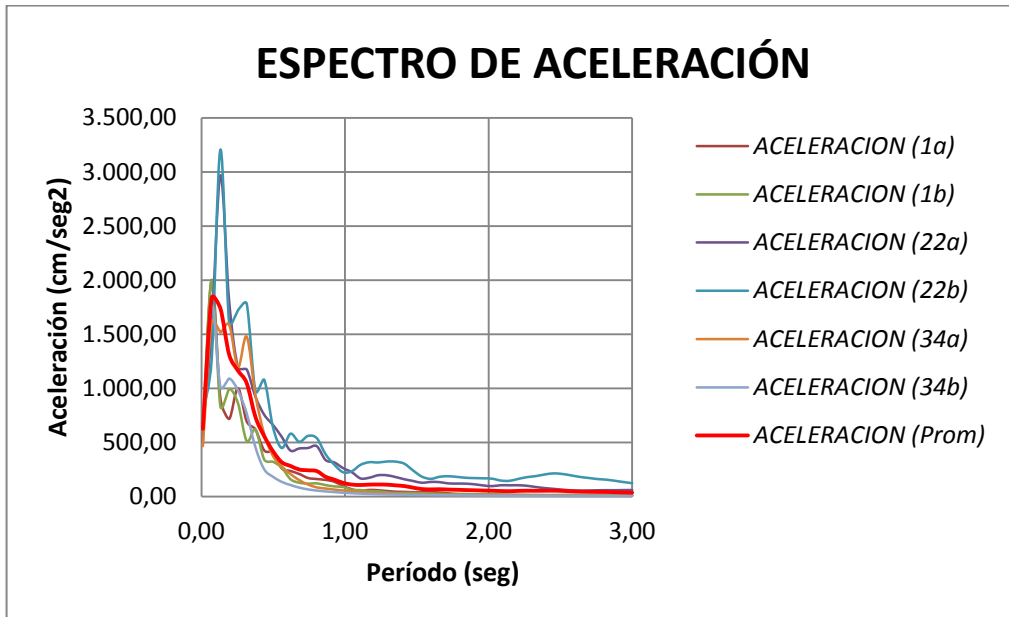


Figura 198: Espectros de aceleración. (Sector 38)

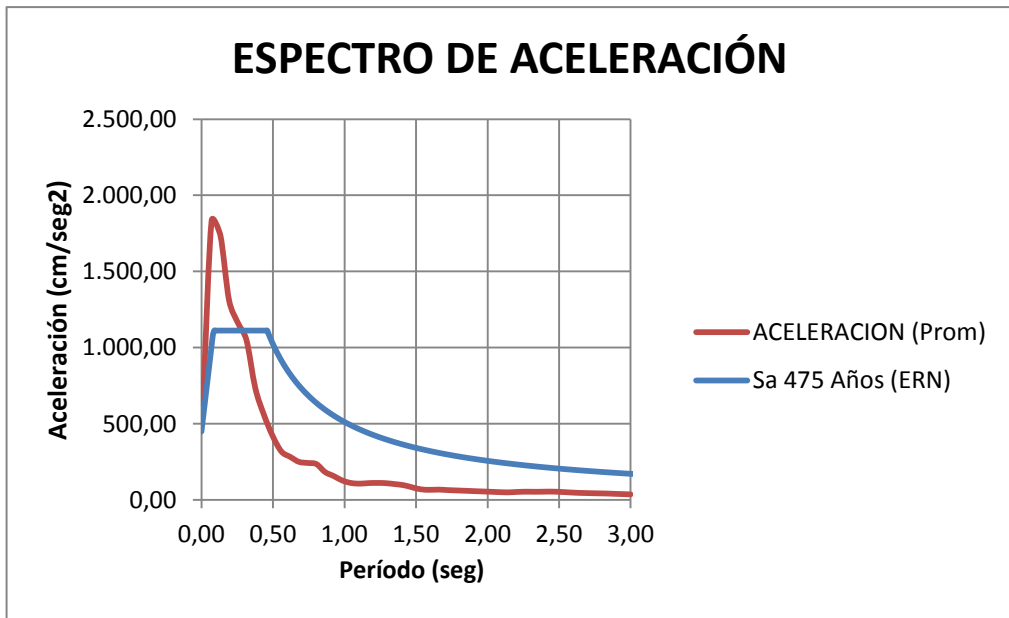


Figura 199: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

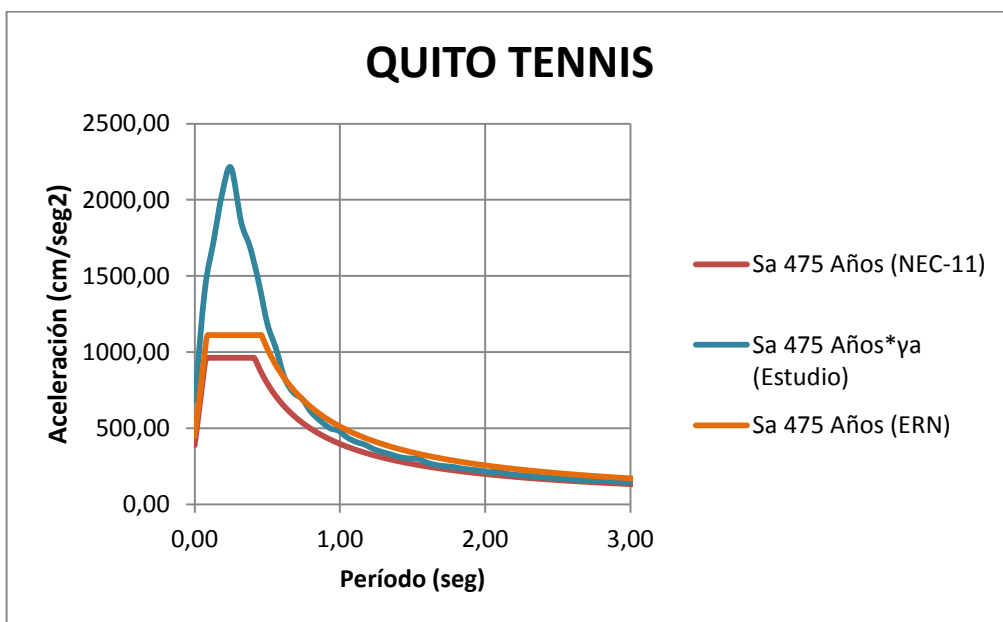


Figura 200: Comparación de espectros

A1.2. Análisis de los puntos ubicados en la Zona Centro

A1.2.1. La Gasca (Sector 12)

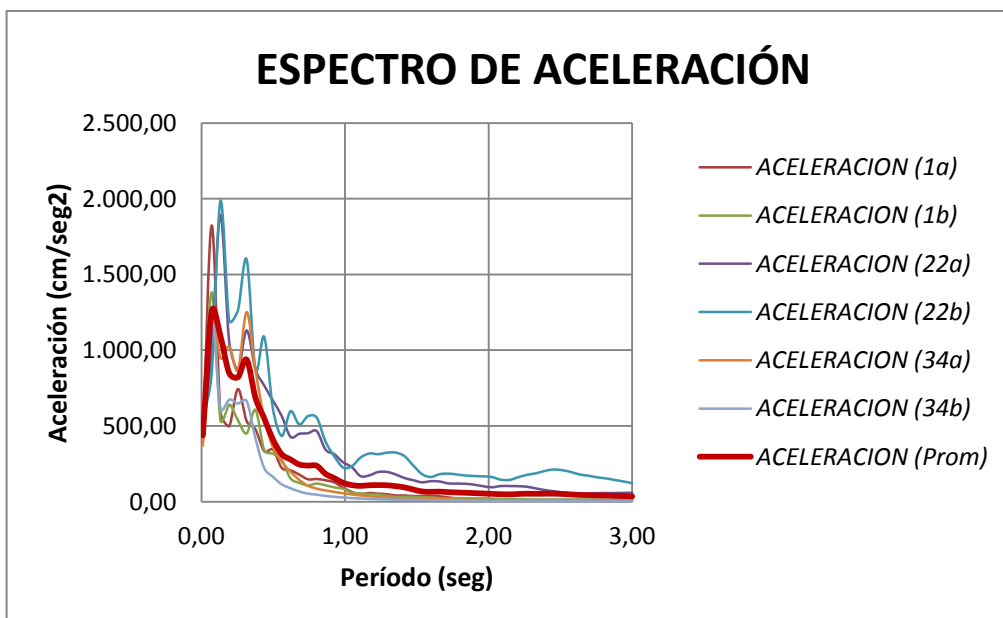


Figura 201: Espectros de aceleración. (Sector 12)

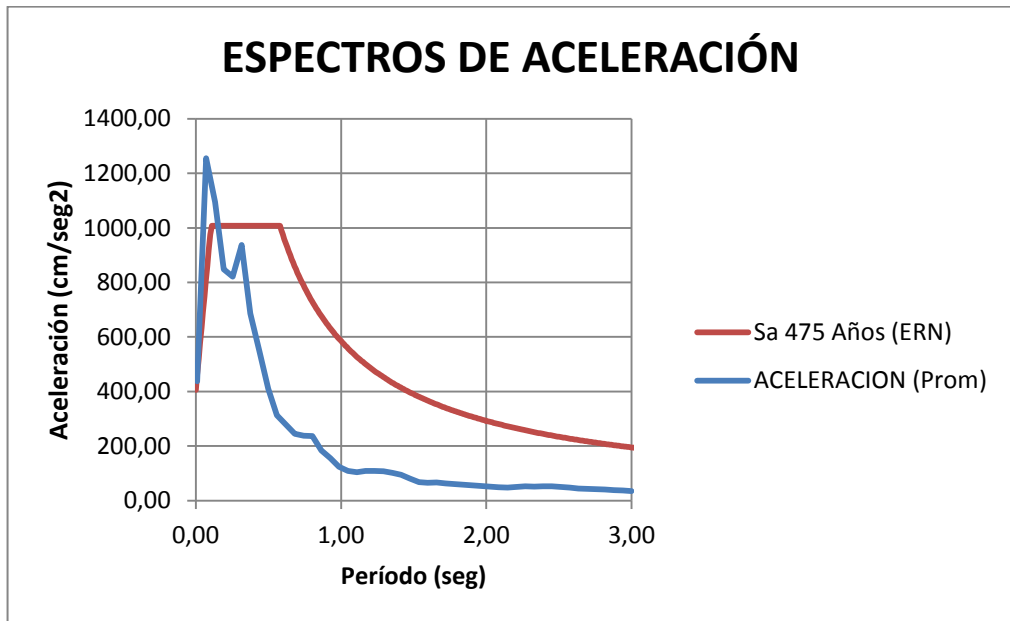


Figura 202: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

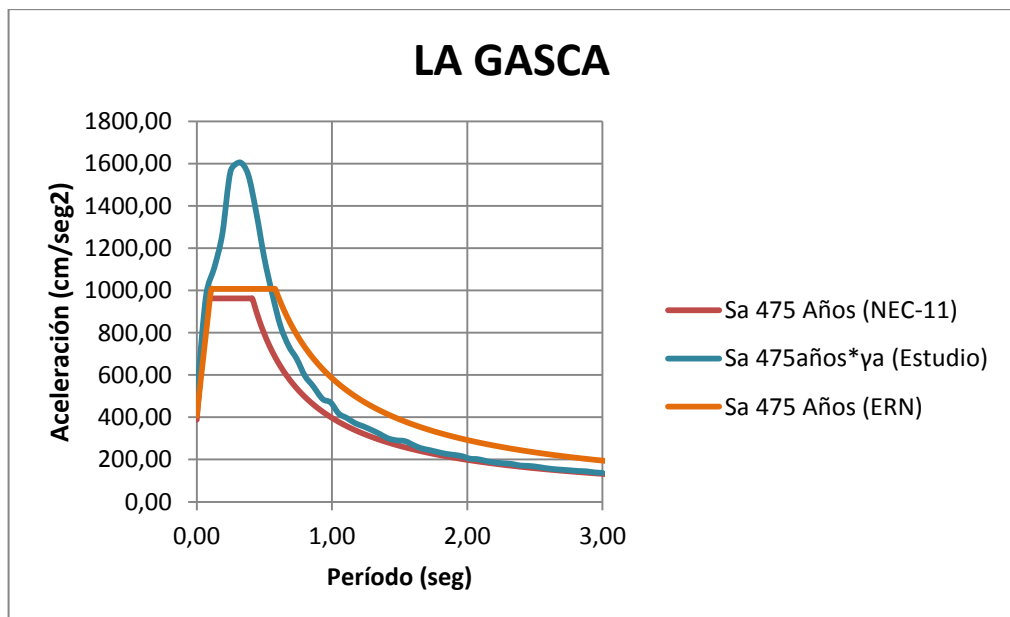


Figura 203: Comparación de espectros

A1.3. Análisis de los puntos ubicados en la Zona Sur

A1.3.1. Chimbacalle (Sector 31)

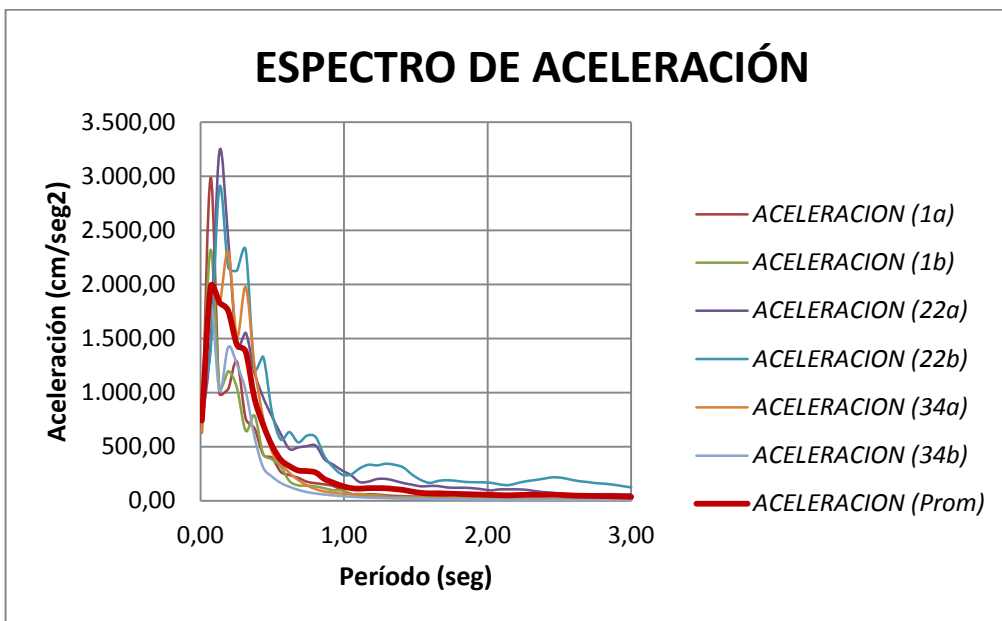


Figura 204: Espectros de aceleración. (Sector 31)

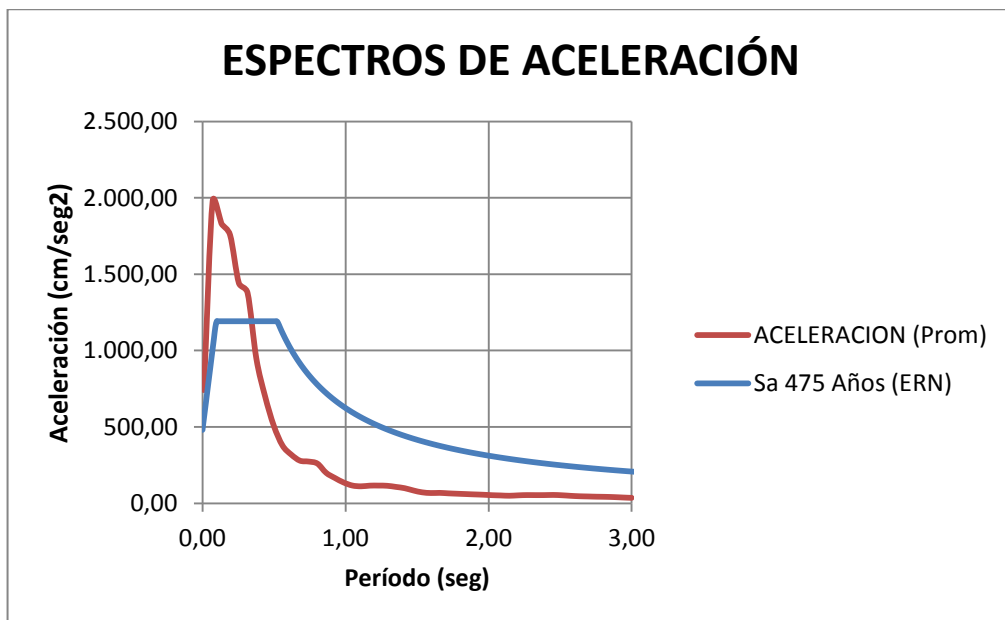


Figura 205: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

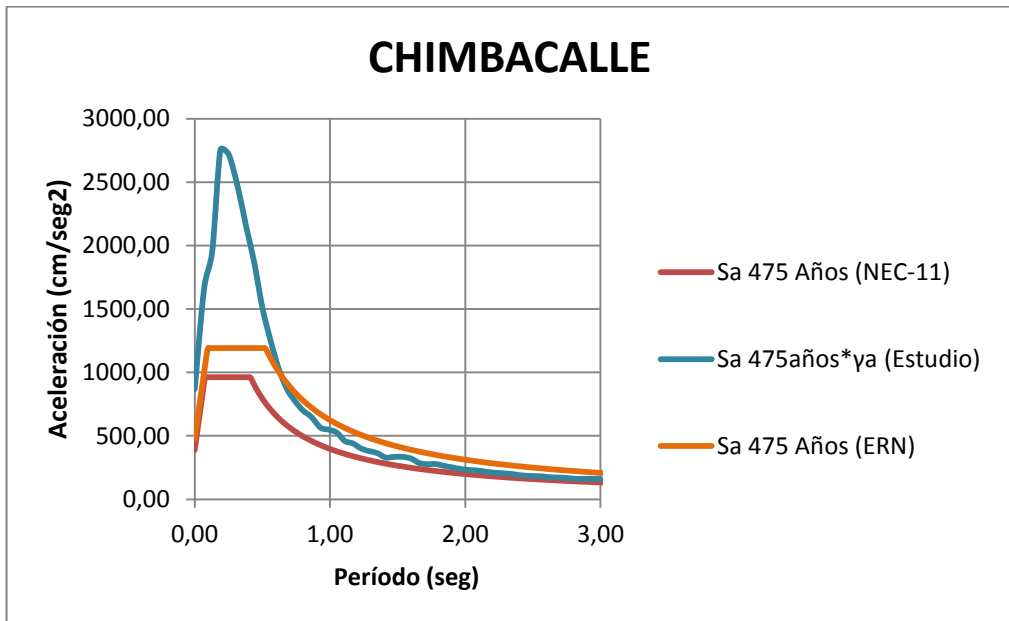


Figura 206: Comparación de espectros

A1.3.2. Solanda (Sector 53)

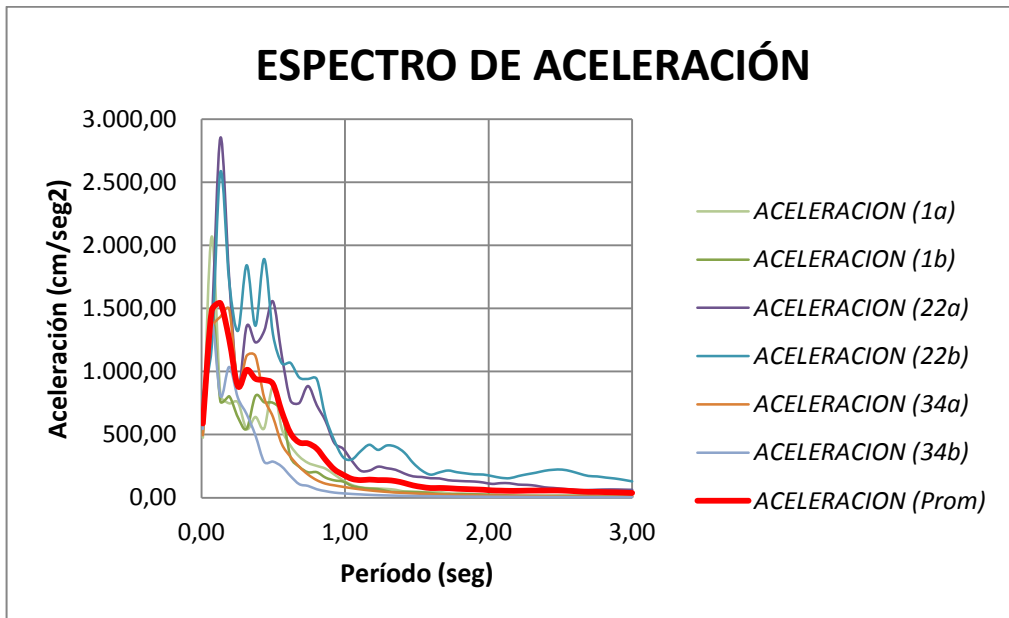


Figura 207: Espectros de aceleración. (Sector 53)

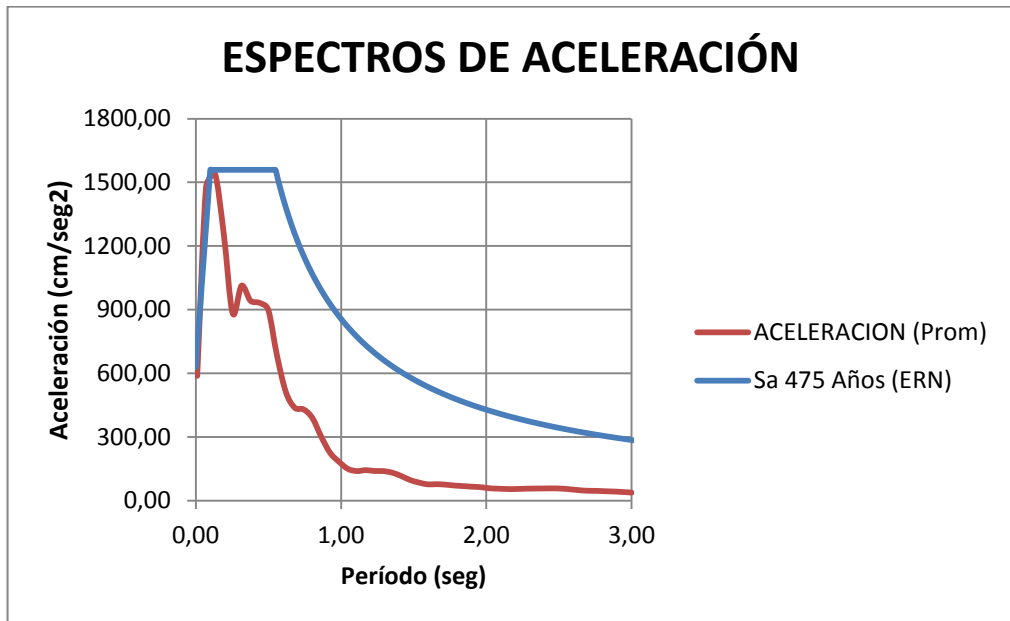


Figura 208: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

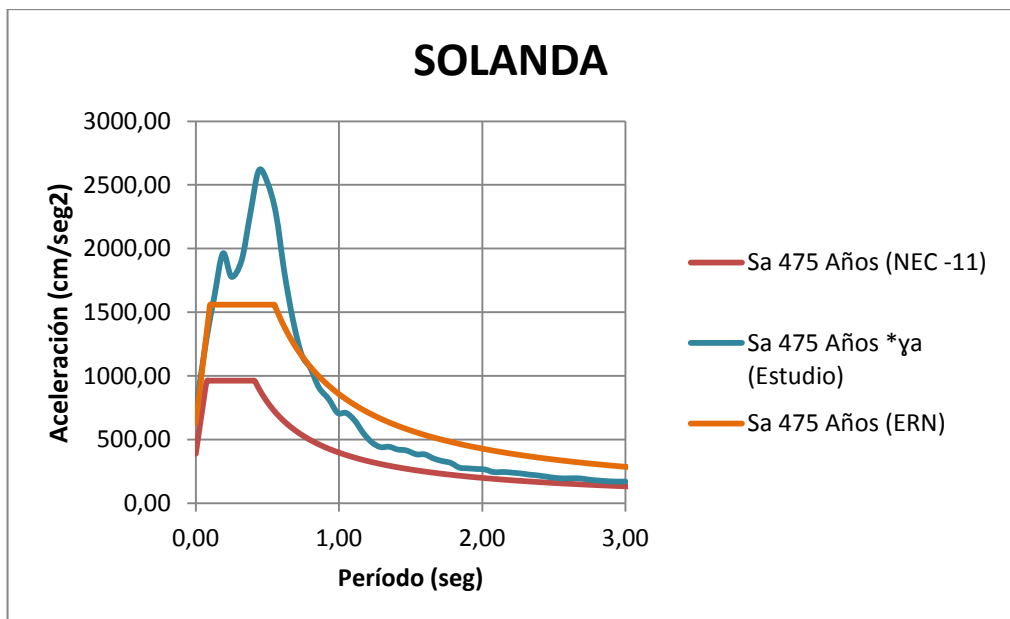


Figura 209: Comparación de espectros

A1.4. Análisis de las Unidades Educativas

A1.4.1. Colegio Benalcázar (Sector 30)

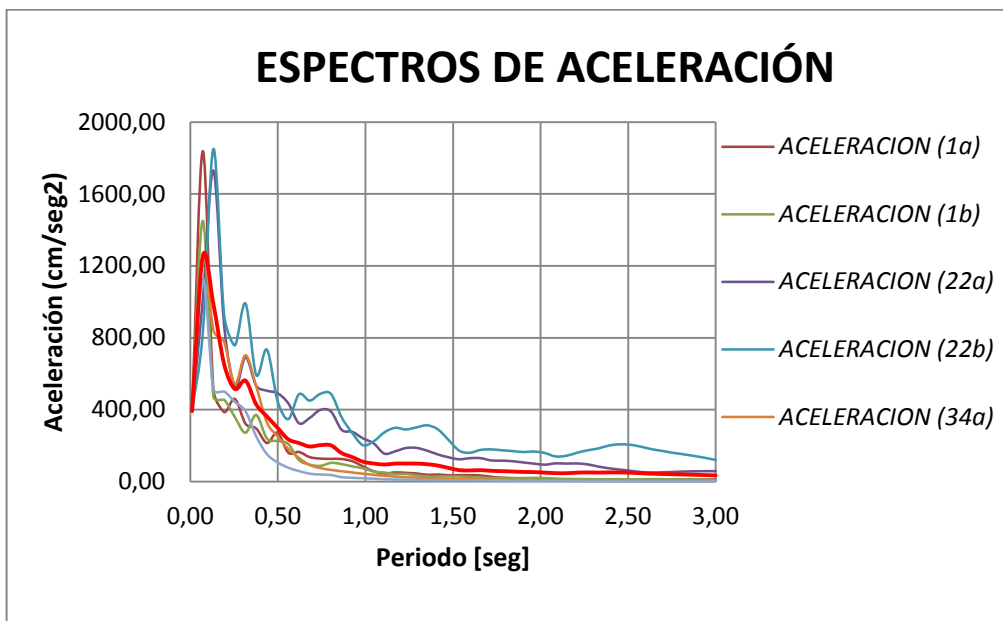


Figura 210: Espectros de aceleración. (Sector 30)

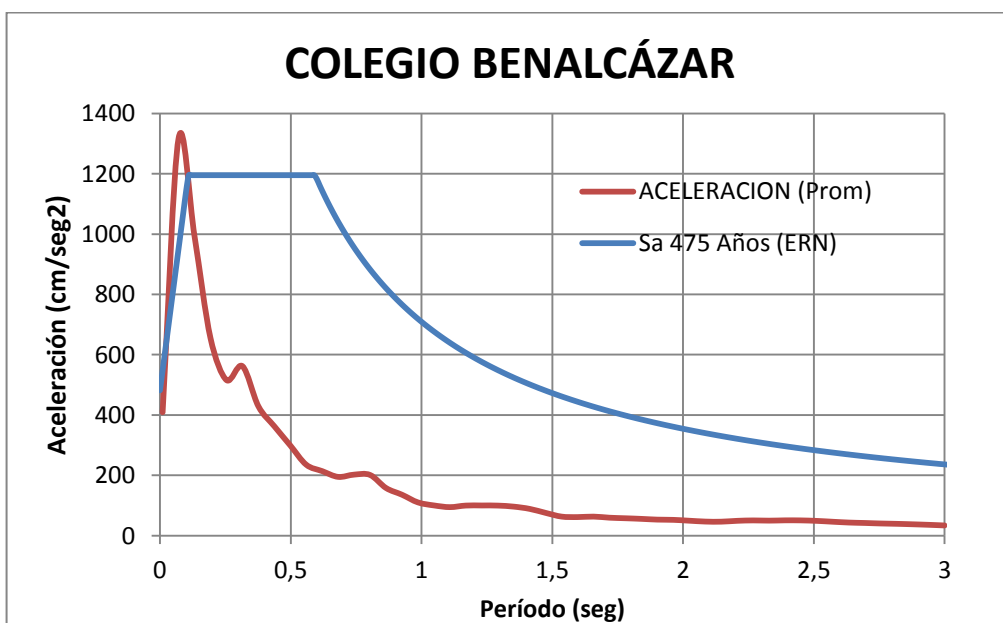


Figura 211: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

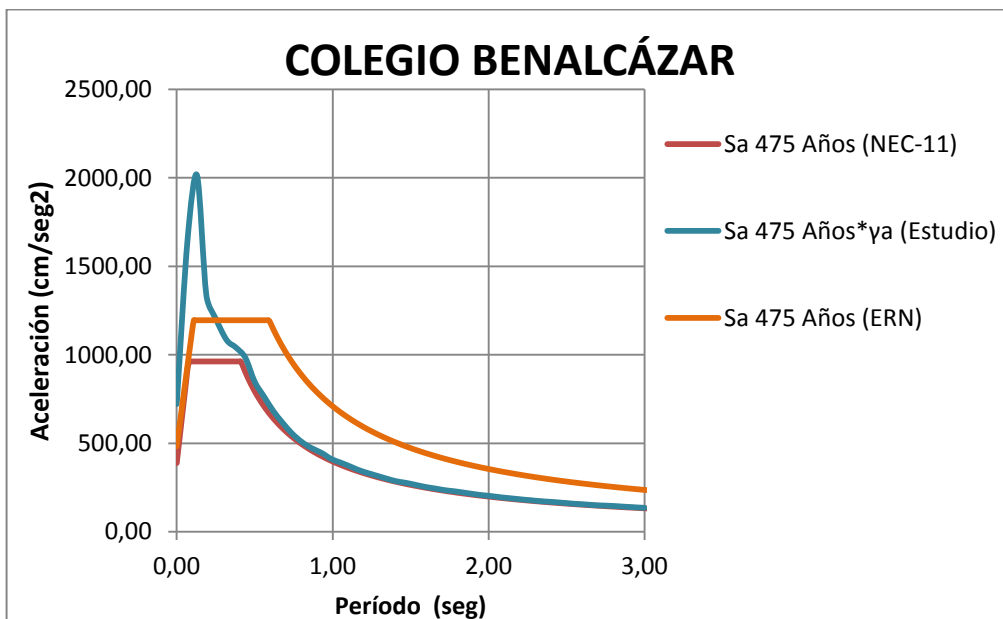


Figura 212: Comparación de espectros

A1.4.2. Sucre Longitudinal (Sector 11)

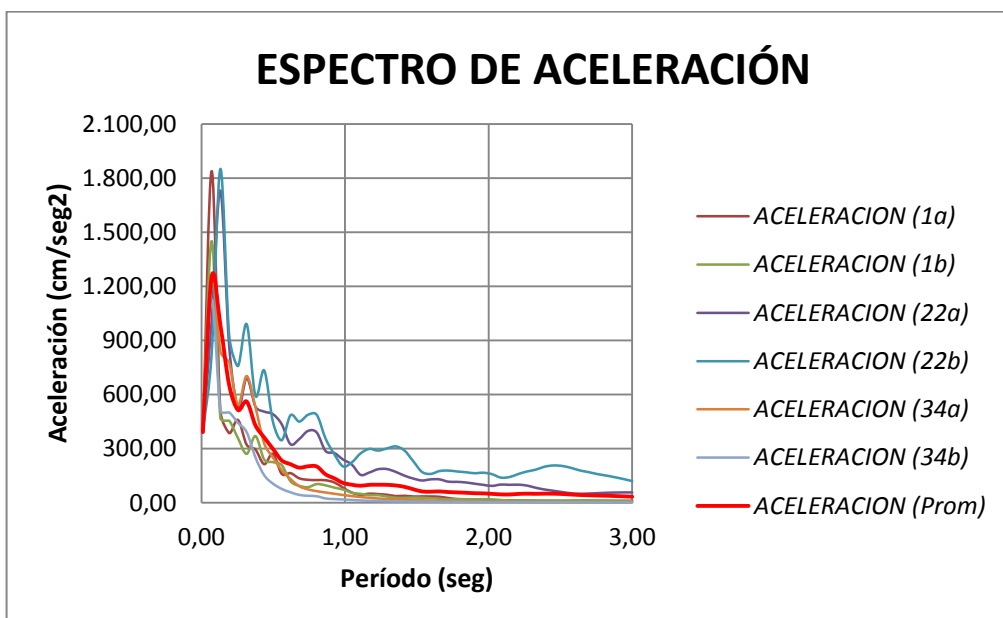


Figura 213: Espectros de aceleración. (Sector 11)

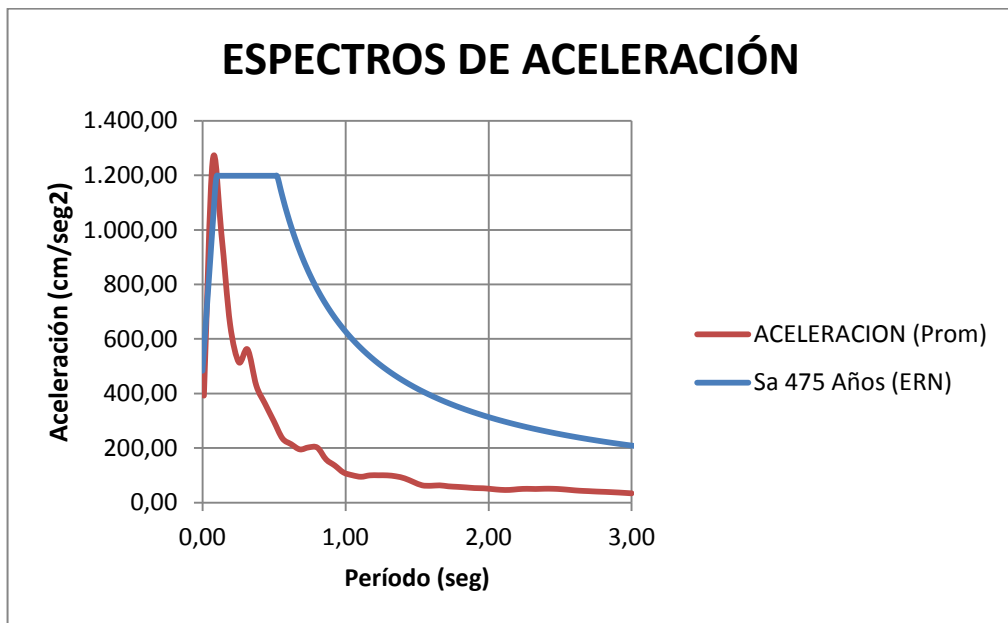


Figura 214: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

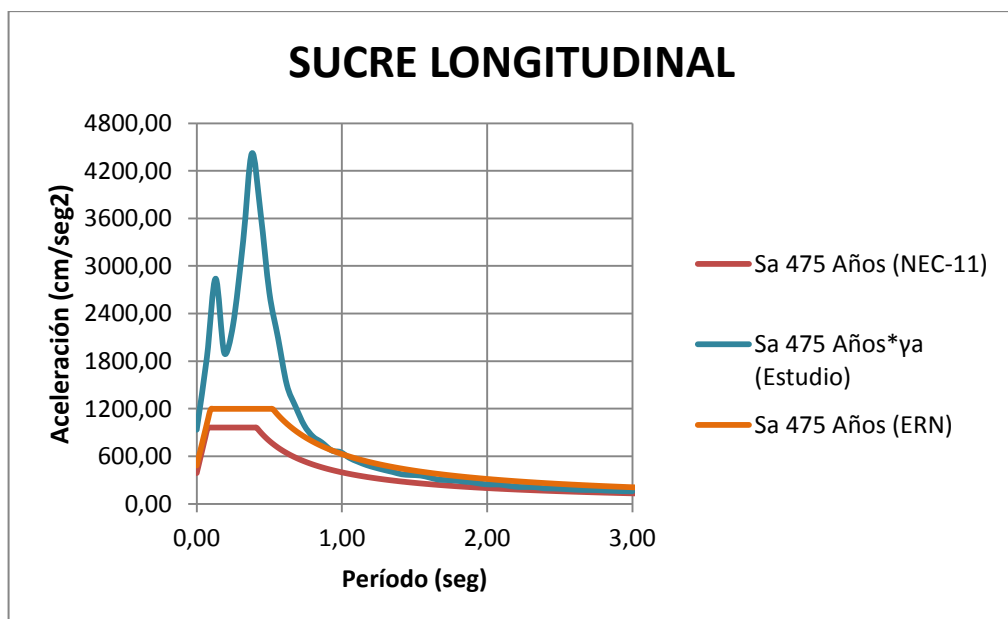


Figura 215: Comparación de espectros

A1.4.3. Sucre Transversal

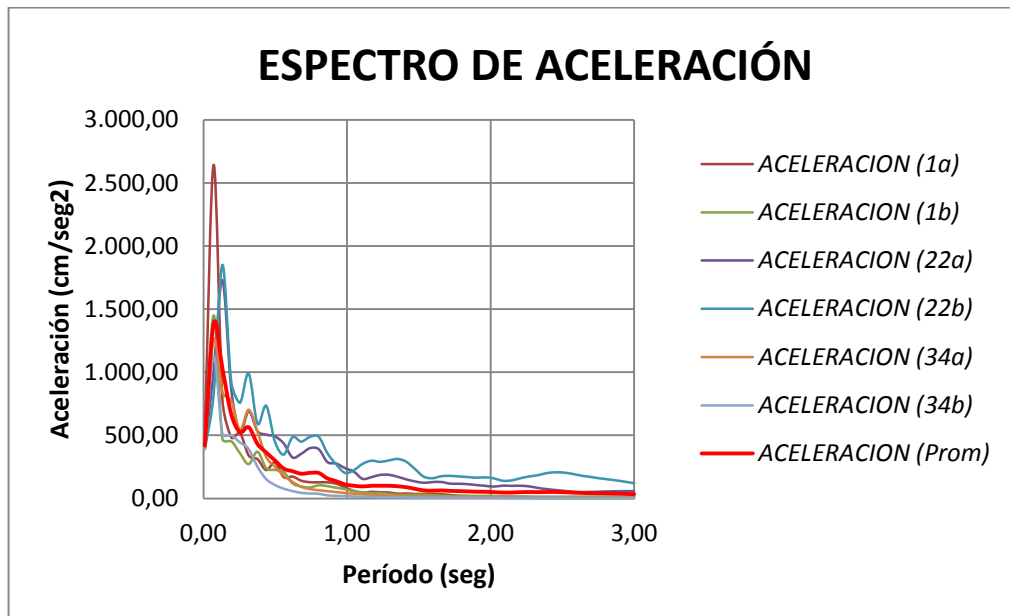


Figura 216: Espectros de aceleración. (Sector 11)

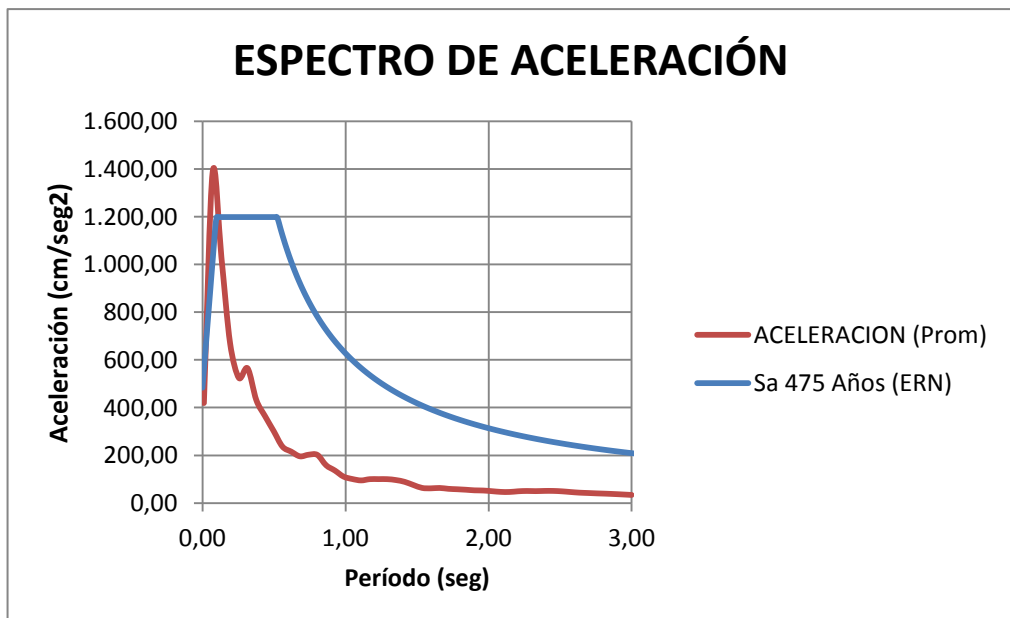


Figura 217: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

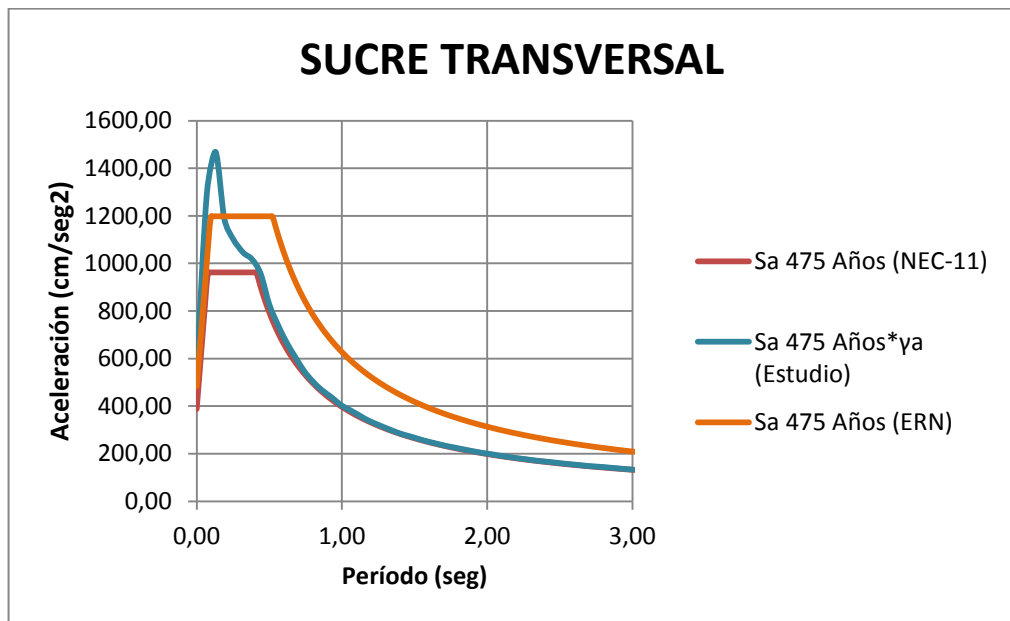


Figura 218: Comparación de espectros.

A1.4.4. Espejo (Sector 6)

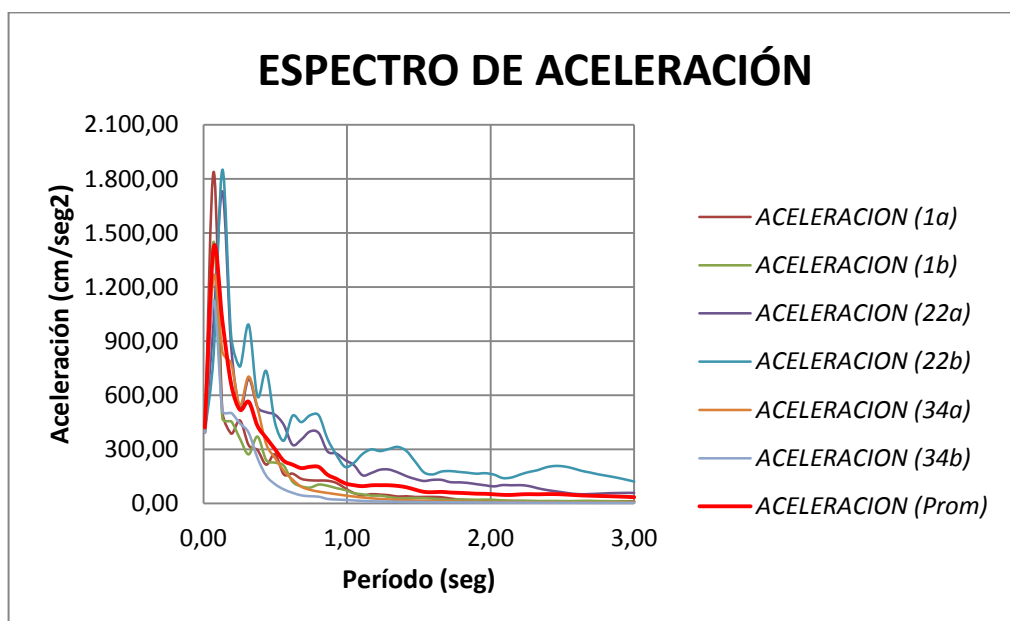


Figura 219: Espectros de aceleración. (Sector 6)

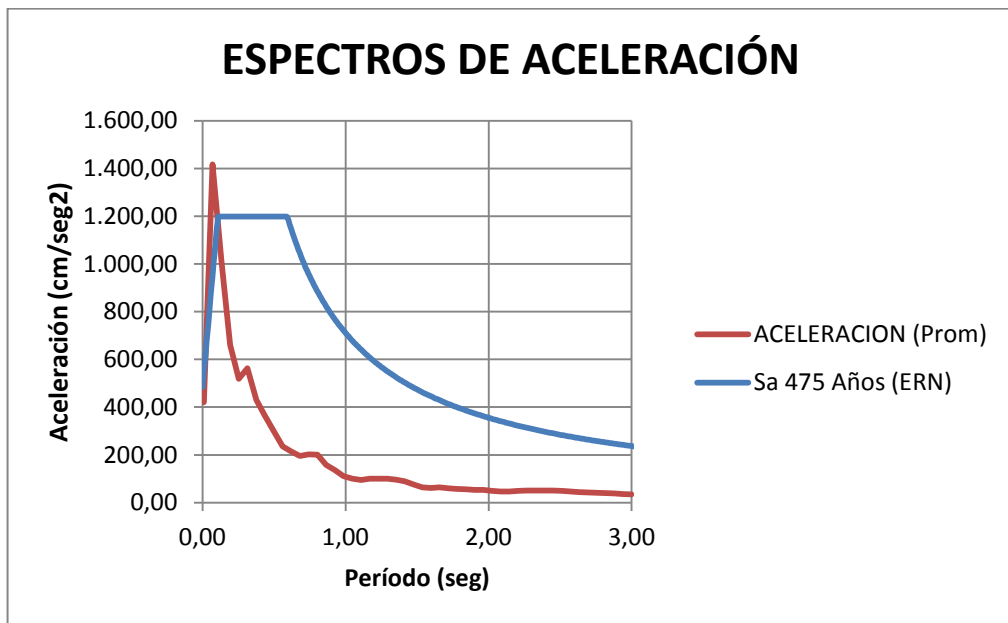


Figura 220: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

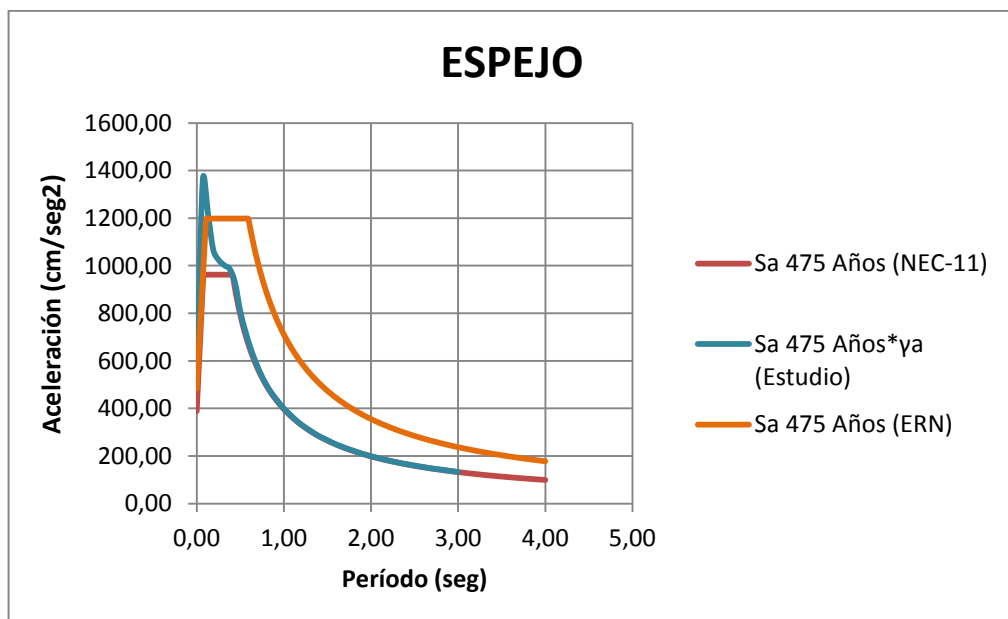


Figura 221: Comparación de espectros

A1.4.5. Fernández Madrid (Sector 11)

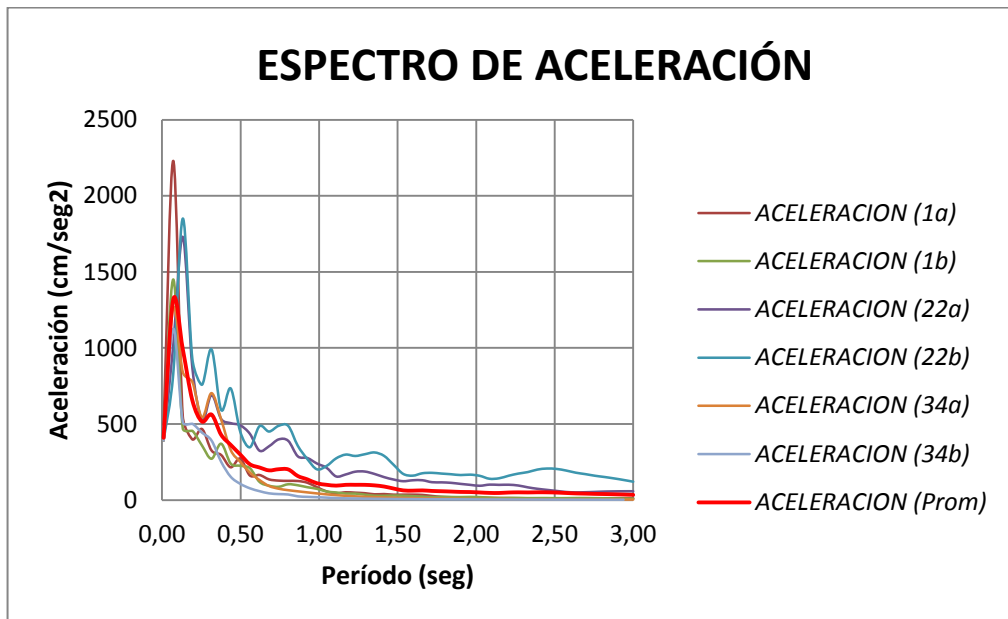


Figura 222: Espectros de aceleración. (Sector 11)

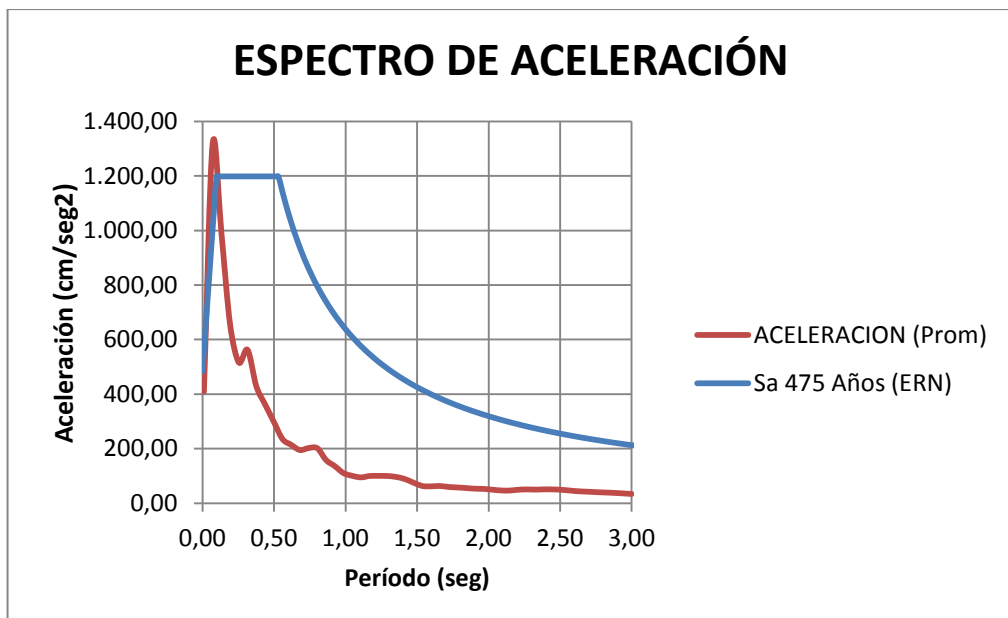


Figura 223: Espectro de aceleración promedio & Espectro ERN

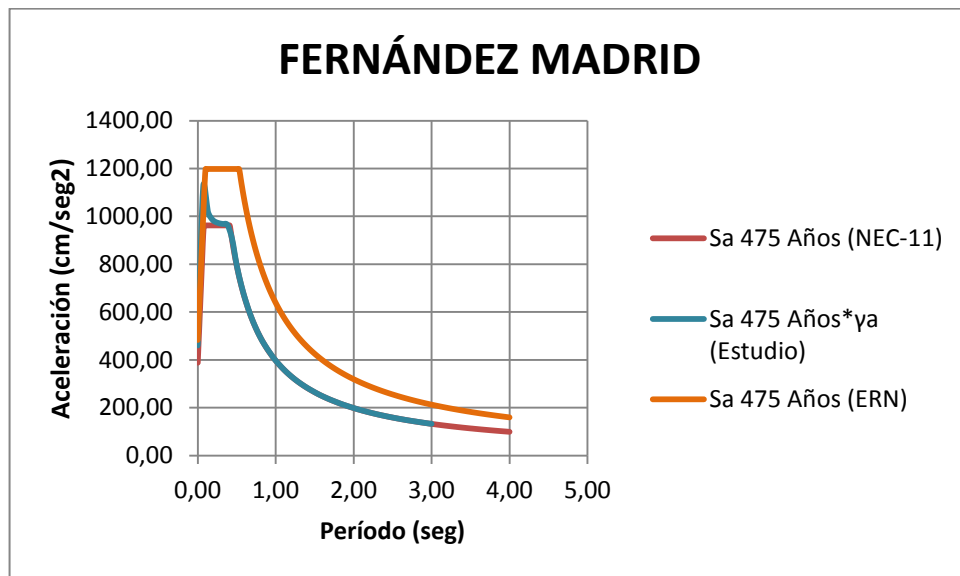


Figura 224: Comparación de espectros

BIOGRAFÍA DEL AUTOR

1. DATOS PERSONALES

Nombres: Silvia Dayana Astudillo Riera
Cédula: 1722075494
Lugar y Fecha de Nacimiento: Quito, 21 de Mayo de 1989
Estado Civil: Soltera
Edad: 24 años
Domicilio: Valle de Los Chillos, Barrio Don Eloy, Calle Bolívar N29-88 y Cuenca
Teléfonos: (02) 380 4519-0984563015
E-mail.: dayasweet89@hotmail.com

2. ESTUDIOS

Secundaria:

- Colegio Nacional Experimental Femenino "Espejo"; Bachiller en Ciencias. 2000-2007

Superior:

- Escuela Politécnica del Ejército (Sangolquí) 2007-2013
Egresada Ingeniería Civil

3. IDIOMAS

- Español
- Inglés

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR:

Silvia Dayana Astudillo Riera

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Ing. Alex Patricio Romero, Msc.

DIRECTOR DE LA UNIDAD DE ADMISIÓN Y REGISTRO

Ing. Amparito Navas Padilla

Lugar y fecha: _____