

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS DE
TIERRA EN TÉRMINOS DE LA VARIABILIDAD DE LOS
ESPECTROS DE DISEÑO**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

ELABORADO POR

JORGE LUIS MACEDO ESCUDERO

ASESOR

Dr. ZENON AGUILAR BARDALES

LIMA-PERÚ

2013

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS DE
TIERRA EN TÉRMINOS DE LA VARIABILIDAD DE LOS
ESPECTROS DE DISEÑO

Ing° Jorge Luis Macedo Escudero

Presentado a la Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en
cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTECNICA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

2013

Autor : Ing. Jorge Luis Macedo Escudero.

Recomendado : Dr. Zenón Aguilar Bardales
Asesor de la Tesis

Aceptado por : Dr. Jorge Elias Alva Hurtado
Jefe de la Sección de Posgrado

2013; Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados. El autor autoriza a la UNI-FIC a reproducir la tesis en su totalidad o en partes con fines académicos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por las gracias recibidas.

A toda mi amada familia. A mis padres Jorge y Aída por acompañarme todos estos años, brindándome su apoyo incondicional y por enseñarme con el ejemplo que las cosas más importantes de la vida son las más simples. Jamás serán suficientes las palabras para terminar de agradecerles todo el amor que me brindaron, solo me queda decir que me esforzaré siempre por ser mejor persona tal como me lo enseñaron. A mi compañera de toda la vida Jazmín por mostrarme siempre su amor, por caminar junto a mi lado inspirándome día a día y por apoyarme de forma incondicional. A mi hermano Roger por los consejos, el apoyo y el ejemplo brindado. A mis sobrinos Royer, José y a la pequeña Estefany por motivarme a ser un buen ejemplo para ellos.

A mi asesor el Dr. Zenón Aguilar Bardales, por la eficiente y dedicada orientación, y por sus revisiones las cuales hicieron posible la realización de este trabajo.

Al Dr. Víctor Sánchez Moya por el apoyo financiero para la realización del trabajo, al Dr. Jorge Alva Hurtado por las sugerencias y facilidades brindadas

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería por la formación profesional.

A mis amigos en general, por su amistad y constante apoyo.

A todas las personas que contribuyeron de alguna manera en el desarrollo de la presente Tesis

RESUMEN

En este estudio se desarrolla una metodología para la evaluación del comportamiento sísmico de presas de tierra en términos de la variabilidad de los diferentes espectros de diseño usados como parte del estado de la práctica del diseño sísmico de presas de tierra en el Perú y a nivel internacional. La metodología implementada como parte de este estudio es desarrollada en un proceso secuencial, siguiendo un procedimiento por etapas y es aplicada al caso particular de la presa Yuracmayo.

La metodología implementada consta de tres (3) etapas. En una primera etapa se considera la cuantificación de la demanda sísmica en el sitio de la presa Yuracmayo. Con este fin se desarrolla un estudio de peligro sísmico probabilístico y determinístico y se definen los espectros de diseño para el sitio de la presa. En una segunda etapa se realiza la generación de registros sísmicos compatibles a los espectros de diseño previamente definidos. Con esta finalidad, se consideran los procedimientos que trabajan con la modificación de sismos de forma individual (con mayor uso en la práctica) y también aquellos que incluyen la selección y combinación de sets de movimientos sísmicos. Como parte de la generación de registros se creó además una base de datos para sismos de subducción de Perú y Chile. En la tercera etapa se evalúa la respuesta sísmica de la presa Yuracmayo para los movimientos sísmicos de diseño generados. Para evaluar la respuesta sísmica se consideran procedimientos de diferencias finitas y modelos constitutivos del estado del arte (e.g. el modelo UBCHYST (Byrne, 2010)), implementados en el software FLAC (Itasca, 2011). Finalmente se procede evaluar la variabilidad de la respuesta sísmica de la presa en términos de los espectros de diseño y las técnicas de generación de registros sísmicos, así como el comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo para los sismos de diseño considerados.

ABSTRACT

This study develops a methodology to evaluate the seismic performance and behavior of earth dams in terms of the variability of different design spectra commonly used as part of the state of the practice of seismic design of earth dams in Peru and internationally. The methodology implemented as part of this study is developed in a sequential process, following a procedure by stages and is applied to the particular case of the Yuracmayo earth dam.

The methodology used consists of three (3) stages. The first stage considers the seismic demand quantification at the Yuracmayo dam site. For this purpose a probabilistic-deterministic seismic hazard study is carried out and the design spectra for the dam site are defined. The second stage considers the generation of design earthquakes which are compatible with the design spectra previously defined. For this purpose, procedures that work with the modification of individual recorded earthquakes (most widely used procedure in practice) and those that include the selection and combination of sets of recorded earthquakes are considered. As part of the generation of design earthquakes it is also created a database for subduction earthquakes of Peru and Chile. In the third stage it is evaluated the seismic response of the Yuracmayo earth dam for the previously generated design earthquakes. For this purpose, finite difference methods and constitutive models of the state of the art (e.g UBCHYST model (Byrne, 2010)), implemented in the software FLAC (Itasca, 2011) were considered. Finally it is assessed the variability of the seismic response of the Yuracmayo dam in terms of the different considered design spectra and also considering the different design earthquakes generation techniques, beside of that, it is also assessed the performance and behavior of Yuracmayo earth dam for the considered design earthquakes.

CONTENIDO

RESUMEN	18
LISTA DE FIGURAS	18
LISTA DE TABLAS	18
1 CAPÍTULO I:	18
GENERALIDADES	18
1.1 MARCO GENERAL Y ANTECEDENTES.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	20
2 CAPÍTULO II:	22
ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO Y EVALUACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO PARA EL CASO DE ESTUDIO: PRESA YURACMAYO	22
2.1 INTRODUCCIÓN.....	22
2.2 ALCANCES DEL ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.....	22
2.3 ENFOQUE Y METODOLOGÍA.....	23
2.3.1 Análisis Determinístico de Peligro Sísmico.....	23
2.3.2 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico.....	24
2.4 TECTÓNICA REGIONAL Y MARCO SÍSMICO.....	25
2.4.1 Marco Tectónico Regional.....	25
2.5 CATÁLOGOS SÍSMICOS.....	26
2.6 PRINCIPALES SISMOS HISTÓRICOS.....	28
2.7 MODELOS TECTÓNICO.....	29
2.7.1 Potenciales Fuentes Sísmicas.....	29
2.7.1.1 Fuentes de Subducción.....	29
2.7.1.2 Principales Fuentes de Corteza.....	31
2.7.2 Parámetros y Recurrencia de las Fuentes Sísmicas.....	32
2.7.2.1 Sismicidad.....	33
2.7.2.2 Relaciones de Recurrencia Sísmica.....	34
2.8 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO.....	36
2.8.1 Tipo de Suelo.....	36
2.8.2 Relaciones Empíricas de Atenuación del Movimiento Sísmico.....	36
2.8.3 Análisis Determinístico de Peligro Sísmico.....	37
2.8.4 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico.....	37
2.8.4.1 Metodología.....	38
2.8.4.2 Incertidumbres.....	38
2.8.4.3 Desagregación del Peligro Sísmico Probabilístico.....	39
2.8.5 Espectros de Diseño Sísmico.....	40
2.8.5.1 Espectros de Peligro Uniforme.....	40

2.8.5.2 Espectros de Diseño Obtenidos a partir del SMCc.....	40
2.8.5.3 Espectro Medio Condicionado.....	41
2.8.5.4 Espectro de Diseño Definidos de Acuerdo a Códigos Sísmicos.....	42
2.9 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	42
2.9.1 Análisis de Peligro Sísmico Determinístico.....	42
2.9.2 Curvas de Peligro Sísmico Probabilístico.....	43
2.9.3 Desagregación del Peligro Sísmico por Fuentes Sísmicas.....	43
2.9.4 Desagregación del Peligro Sísmico por Magnitud y Distancia.....	44
2.9.5 Comparación con Estudios Regionales.....	45
2.9.6 Espectros de Diseño Sísmico.....	46
2.9.6.1 Espectros de Peligro Uniforme.....	46
2.9.6.2 Espectros de Diseño Evaluado para el SMCc.....	47
2.9.6.3 Espectro Medio Condicionado.....	47
2.9.6.4 Espectros de Diseño NTPE-030 y IBC 2009.....	47
3 CAPÍTULO III:	69
GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS COMPATIBLES A ESPECTROS DE DISEÑO	69
3.1 INTRODUCCIÓN.....	69
3.2 PROCEDIMIENTOS PARA LA GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO.....	69
3.2.1 Metodología de Ajuste Espectral mediante Fragmentos de Onda en el Dominio del Tiempo.....	70
3.2.2 Procedimiento Semi - Automatizado para la Selección de Sismos de Diseño -Universidad de Texas Austin.....	71
3.2.3 Procedimiento Automatizado para la Selección de Sismos de Diseño Universidad de Stanford.....	72
3.3 ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA GENERACIÓN DEL SET REGISTROS SÍSMICOS DE DISEÑO.....	73
3.4 GENERACIÓN DE SETS DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.....	73
3.4.1 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro de la Norma Técnica Peruana E030.....	79
3.4.2 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Determinístico.....	79
3.4.3 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro del Código IBC.....	79
3.4.4 Generación de Registros Sísmicos compatibles al Espectro de peligro uniforme con periodo de retomo de 475 años.....	79
3.4.5 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Medio Condicionado.....	79

3.4.6 Selección de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Determinístico en base alas metodologías de las Universidades de Texas y Stanford.....	80
4 CAPÍTULO IV	128
EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA PRESA YURACMAYO PARA LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS COMPATIBLES A LOS ESPECTROS DE DISEÑO.	128
4.1 INTRODUCCIÓN.....	128
4.1.1 Antecedentes.....	128
4.2 ENFOQUE Y METODOLOGÍA.....	128
4.3 PROCEDIMIENTO EXPLÍCITO DE DIFERENCIAS FINITAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS DE TIERRA.....	129
4.3.1 Procedimiento Explícito Implementado en Flac.....	129
4.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y MODELO NUMÉRICO.....	130
4.4.1 Propiedades de los Materiales para Realizar los Análisis Sísmicos.....	130
4.4.2 Modelo Numérico FLAC para la Presa Yuracmayo.....	132
4.5 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA PARA LOS SETS DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS.....	133
4.5.1 Condiciones Iniciales.....	133
4.5.2 Análisis Sísmico de la Presa Yuracmayo.....	134
4.6 COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN FUNCIÓN DE LOS ESPECTROS ESPECIFICADOS PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.....	136
4.6.1 Discusión de Resultados.....	136
5 CAPÍTULO V:	173
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	173
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	178
ANEXO I	186
ANEXO II	199

CONTENIDO

RESUMEN	22
LISTA DE FIGURAS	22
LISTA DE TABLAS	22

1 CAPÍTULO I:	22
GENERALIDADES	22
1.1 MARCO GENERAL Y ANTECEDENTES	22
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	24
2 CAPÍTULO II:	26
ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO Y EVALUACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO PARA EL CASO DE ESTUDIO: PRESA YURACMAYO	26
2.1 INTRODUCCIÓN	26
2.2 ALCANCES DEL ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO PARA EL SITIO DE LA PRESA Y	
2.3 ENFOQUE Y METODOLOGÍA	27
2.3.1 Análisis Determinístico de Peligro Sísmico	27
2.3.2 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico	28
2.4 TECTÓNICA REGIONAL Y MARCO SÍSMICO	29
2.4.1 Marco Tectónico Regional.....	29
2.5 CATÁLOGOS SÍSMICOS	30
2.6 PRINCIPALES SISMOS HISTÓRICOS	32
2.7 MODELO SISMOTECTÓNICO	33
2.7.1 Potenciales Fuentes Sísmicas.....	33
2.7.1.1 Fuentes de Subducción	33
2.7.1.2 Principales Fuentes de Corteza	35
2.7.2 Parámetros y Recurrencia de las Fuentes Sísmicas	36
2.7.2.1 Sismicidad	37
2.7.2.2 Relaciones de Recurrencia Sísmica	38
2.8 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO	40
2.8.1 Tipo de Suelo	40
2.8.2 Relaciones Empíricas de Atenuación del Movimiento Sísmico	40
2.8.3 Análisis Determinístico de Peligro Sísmico	41
2.8.4 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico	41
2.8.4.1 Metodología	42
2.8.4.2 Incertidumbres	42
2.8.4.3 Desagregación del Peligro Sísmico Probabilístico	43
2.8.5 Espectros de Diseño Sísmico	44
2.8.5.1 Espectros de Peligro Uniforme	44

2.8.5.2 Espectros de Diseño Obtenidos a partir del SMCc	44
2.8.5.3 Espectro Medio Condicionado.....	45
2.8.5.4 Espectro de Diseño Definidos de Acuerdo a Códigos Sísmicos	46
2.9 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	46
2.9.1 Análisis de Peligro Sísmico Determinístico	46
2.9.2 Curvas de Peligro Sísmico Probabilístico	47
2.9.3 Desagregación del Peligro Sísmico por Fuentes Sísmicas	47
2.9.4 Desagregación del Peligro Sísmico por Magnitud y Distancia	48
2.9.5 Comparación con Estudios Regionales	49
2.9.6 Espectros de Diseño Sísmico	50
2.9.6.1 Espectros de Peligro Uniforme	50
2.9.6.2 Espectros de Diseño Evaluado para el SMCc.....	51
2.9.6.3 Espectro Medio Condicionado.....	51
2.9.6.4 Espectros de Diseño NTP E-030 y IBC 2009.....	51
3 CAPÍTULO III:	69
GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS COMPATIBLES A ESPECTROS DE DISEÑO	69
3.1 INTRODUCCIÓN.....	69
3.2 PROCEDIMIENTOS PARA LA GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO.	69
3.2.1 Metodología de Ajuste Espectral mediante Fragmentos de Onda en el Dominio del Tiempo.	70
3.2.2 Procedimiento Semi - Automatizado para la Selección de Sismos de Diseño – Universidad de Texas Austin.....	71
3.2.3 Procedimiento Automatizado para la Selección de Sismos de Diseño – Universidad de Stanford.	72
3.3 ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA GENERACIÓN DEL SET REGISTROS SÍSMICOS DE DISEÑO.	73
3.4 GENERACIÓN DE SETS DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.....	73

3.4.1	Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro de la Norma Técnica Peruana E030.....	79
3.4.2	Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Deterministico	79
3.4.3	Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro del Código IBC.....	79
3.4.4	Generación de Registros Sísmicos compatibles al Espectro de peligro uniforme con periodo de retorno de 475 años.....	79
3.4.5	Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Medio Condicionado.....	79
3.4.6	Selección de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Deterministico en base a las metodologías de las Universidades de Texas y Stanford.....	80
4	CAPÍTULO IV:	128
	EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA PRESA YURACMAYO PARA LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS COMPATIBLES A LOS ESPECTROS DE DISEÑO.	128
4.1	INTRODUCCIÓN.....	128
4.1.1	Antecedentes.....	128
4.2	ENFOQUE Y METODOLOGÍA	128
4.3	PROCEDIMIENTO EXPLÍCITO DE DIFERENCIAS FINITAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS DE TIERRA.....	129
4.3.1	Procedimiento Explícito Implementado en Flac.	129
4.4	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y MODELO NUMÉRICO.....	130
4.4.1	Propiedades de los Materiales para Realizar los Análisis Sísmicos	130
4.4.2	Modelo Numérico FLAC para la Presa Yuracmayo.....	132
4.5	Evaluación de la Respuesta Sísmica para los Sets de Movimientos Sísmicos.....	133
4.5.1	Condiciones Iniciales	133
4.5.2	Análisis Sísmico de la Presa Yuracmayo	134
4.6	COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN FUNCIÓN DE LOS ESPECTROS ESPECIFICADOS PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.....	136
4.6.1	Discusión de Resultados	136
5	CAPÍTULO V:	173
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	22
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	22
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	22
	ANEXO I	22
	ANEXO II	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Ubicación zonal de la Presa Yuracmayo. Fuente Propia.	25
Figura 1.2:	Vista general de la Presa Yuracmayo desde aguas abajo (Macedo, 2009)	25
Figura 2.1:	Marco tectónico regional y principales sismos históricos–Presa Yuracmayo	25
Figura 2.2:	Sismicidad regional histórica (instrumental)	25
Figura 2.3:	Fuentes sísmicas de corteza e interfaz	25
Figura 2.4:	Fuentes sísmicas de intraplaca	25
Figura 2.5:	Sección transversal fuentes sísmicas de subducción	25
Figura. 2.6:	Distribución de sismos para el catalogo sísmico del proyecto (sin depurar) - Izquierda: respecto a agencias sísmicas; Derecha: respecto a tipo de magnitudes. Fuente propia.	53
Figura 2.7	Distribución de sismos con respecto al tiempo en el catalogo del proyecto. Superior: Catalogo depurado según el algoritmo de Reassenberg. Inferior: Catalogo depurado según el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974). Fuente propia.	54
Figura 2.8	Distribución de sismos con respecto a magnitudes en el catalogo del proyecto. Superior: Catalogo depurado según el algoritmo de Reassenberg. Inferior: Catalogo depurado según el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974). Fuente propia.	55
Figura 2.9	Procedimiento para la obtención del espectro de peligro sísmico uniforme.(.Abrahamson, 2006).	56
Figura 2.10	Curvas de peligro sísmico uniforme con 5% de amortiguamiento para periodos espectrales discretos / valores medios - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.	57
Figura 2.11	Contribución de fuentes sismogénicas a la curva uniforme de peligro sísmico correspondiente a la aceleración máxima horizontal de terreno (pga) con 5% de amortiguamiento - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente Propia.	58
Figura 2.12	Contribución de fuentes sismogénicas a la curva uniforme de peligro sísmico correspondiente a un periodo espectral de 0,20seg con 5% de amortiguamiento - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.	59
Figura 2.13	Contribución de fuentes sismogénicas a la curva uniforme de peligro sísmico correspondiente a un periodo espectral de 1,00seg con 5% de amortiguamiento - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.	60
Figura 2.14	Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 475 años y aceleración máxima horizontal - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.	61
Figura 2.15	Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 2475 años y aceleración máxima horizontal- sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.	62

Figura 2.16	Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 2475 años y periodo espectral 0,20seg - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.	63
Figura 2.17	Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 2475 años y periodo espectral 1,00seg - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia	64
Figura 2.18	Espectro de peligro uniforme promedio para el sitio de la presa Yuracmayo-5% amortiguamiento períodos de retorno de 475, 975 y 2,475 años. Fuente propia.	65
Figura 2.19	Espectro de diseño determinístico de respuesta sísmica para afloramiento rocoso (Suelo tipo B) en el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia	66
Figura 2.20	Espectro de diseño medio condicionado para el sitio de la presa Yuracmayo junto con las desviaciones estándares asociadas.La región achurada corresponde al rango de periodos de interés para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	67
Figura 2.21	Espectros de diseño sísmico de acuerdo a la norma técnica peruana E-030 y el código IBC (2009). Fuente propia.	68
Figura 3.1	Procedimiento para la selección y generación de registros sísmicos de diseño, de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007).	81
Figura 3.2	Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.	82
Figura 3.3	Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.	83
Figura 3.4	Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.	84
Figura 3.5	Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transersal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.	85
Figura 3.6	Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.	86
Figura 3.7	Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.	87

- Figura 3.8 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia. 88
- Figura 3.9 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapaca (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia. 89
- Figura 3.10 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 90
- Figura 3.11 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 91
- Figura 3.12 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 92
- Figura 3.13 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 93
- Figura 3.14 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 94
- Figura 3.15 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 95
- Figura 3.16 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 96
- Figura 3.17 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia. 97

- Figura 3.18 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia. 98
- Figura 3.19 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia. 99
- Figura 3.20 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia. 100
- Figura 3.21 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia. 101
- Figura 3.22 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia. 102
- Figura 3.23 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia. 103
- Figura 3.24 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral el espectro del código IBC. Fuente propia. 104
- Figura 3.25 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia. 105
- Figura 3.26 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia. 106
- Figura 3.27 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia. 107
- Figura 3.28 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia. 108
- Figura 3.29 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia. 109

- Figura 3.30 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia. 110
- Figura 3.31 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia. 111
- Figura 3.33 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia. 113
- Figura 3.34 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 114
- Figura 3.35 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 115
- Figura 3.36 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 116
- Figura 3.37 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 117
- Figura 3.38 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 118
- Figura 3.39 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 119
- Figura 3.40 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 120
- Figura 3.41 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia. 121
- Figura 3.42 Selección de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico de la presa Yuracmayo de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007). En rojo: Espectro determinístico junto a desviaciones estándares asociadas, En azul: Espectro y desviaciones estándares ajustadas. En gris:

	Espectros de respuestas que conforman el set de movimientos sísmicos seleccionados. En verde: espectro de respuesta muestral de uno de los movimientos seleccionados. Fuente propia.	122
Figura 3.43	Comparación entre las desviaciones estándares del espectro objetivo (azul) y las desviación estándar de los movimientos sísmicos seleccionados (rojo). Selección de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico de la presa Yuracmayo de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007). Fuente propia.	123
Figura 3.44	Tiempos Historia de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del movimiento sísmico generado compatible al espectro determinístico de la presa Yuracmayo de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007). Fuente propia.	124
Figura 3.45	Comparación entre los espectros de respuesta de los movimientos seleccionados y los espectros de respuesta medio, percentil 2.5 y percentil 97.5 del sismo determinístico para la presa Yuracmayo. Generación de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico de acuerdo a la metodología propuesta por Jarayam, Lin y Baker (2011). Fuente propia.	125
Figura 3.46	Comparación entre los espectros de respuesta del espectro medio determinístico para la presa Yuracmayo y el movimiento sísmico generado de acuerdo a la metodología propuesta por Jarayam, Lin y Baker (2011). Fuente propia.	126
Figura 3.47	Comparación entre las desviaciones estándares del espectro determinístico para la presa Yuracmayo y las desviaciones estándares del movimiento sísmico generado de acuerdo a la metodología propuesta por Jarayam, Lin y Baker (2011). Fuente propia.	127
Figura 4.1	Resultados de la calibración numérica de un modelo dinámico para la presa Yuracmayo en base al estudio de Macedo et al. (2010). Arriba, la comparación entre el espectro numérico y el espectro registrado para el sismo del 29/03/2008. Abajo, la comparación para el evento sísmico del 16/02/2005.	138
Figura 4.2	Elementos básicos usados en el FLAC (Cundall, 1976). a) Zonas cuadrilaterales superpuestas b) Elementos triangulares típicos con vectores de velocidad c) Vectores de fuerzas nodales.	139
Figura 4.3	Ciclo básico de cálculos explícitos en el FLAC (Cundall, 1976).	140
Figura 4.4	Sección de análisis para la presa Yuracmayo. (Macedo, 2009)	141
Figura 4.5	Curvas de degradación para los materiales de la presa Yuracmayo (Macedo, 2009; Macedo et al., 2010) - Izquierda: Curvas de degradación del módulo de corte. Derecha: Curvas de degradación del amortiguamiento.	142
Figura 4.6	Modelo numérico de deferencias finitas FLAC para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	143
Figura 4.7	Variación del módulo de corte máximo de acuerdo al modelo hysteretic UBCHYST (Byrne, 2010; Puebla, 2012).	144

Figura 4.8	Distribución de presiones de poros como resultado del análisis de filtraciones para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	145
Figura 4.9	Distribución de desplazamientos verticales obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	146
Figura 4.10	Distribución de desplazamientos horizontales obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia	147
Figura 4.11	Vectores de desplazamientos obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	148
Figura 4.12	Geometría deformada obtenida del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	149
Figura 4.13	Distribución de los esfuerzos efectivos verticales obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	150
Figura 4.14	Distribución de los esfuerzos efectivos medios obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia	151
Figura 4.15	Puntos seleccionados para monitorear el comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo. DX: Puntos de monitoreo para desplazamientos horizontales, DY: Puntos de monitoreo para desplazamientos verticales. Fuente propia.	152
Figura 4.16	Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de la norma peruana E030. Fuente propia.	153
Figura 4.17	Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de la norma peruana E030. Fuente propia.	153
Figura 4.18	Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de la norma peruana E030. Fuente propia	154
Figura 4.19	Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro determinístico SMC. Fuente propia.	154
Figura 4.20	Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro determinístico SMC. Fuente propia	155
Figura 4.21	Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro determinístico SMC. Fuente propia.	155
Figura 4.22	Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.	156
Figura 4.23	Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.	156
Figura 4.24	Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.	157

Figura 4.25	Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme (EPU-475 Años). Fuente propia.	157
Figura 4.26	Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme (EPU-475 Años). Fuente propia.	158
Figura 4.27	Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme (EPU-475 Años). Fuente propia.	158
Figura 4.28	Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.	159
Figura 4.29	Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.	159
Figura 4.30	Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.	160
Figura 4.31	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Chile.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	160
Figura 4.32	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Chile.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	161
Figura 4.33	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Chile.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	161
Figura 4.34	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Chile.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	162
Figura 4.35	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	162
Figura 4.36	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	163
Figura 4.37	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	163
Figura 4.38	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	164

Figura 4.39	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	164
Figura 4.40	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia..	165
Figura 4.41	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	165
Figura 4.42	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	166
Figura 4.43	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	166
Figura 4.44	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	167
Figura 4.45	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	167
Figura 4.46	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	168
Figura 4.47	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales ponderados para el punto de control 13, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	169
Figura 4.48	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales ponderados para el punto de control 15, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	170
Figura 4.49	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales ponderados para el punto de control 2, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	171
Figura 4.50	Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales ponderados para el punto de control 6, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.	172

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1:	Principales Sismos Históricos	32
Tabla 2.2:	Intervalos de Tiempo con Períodos Completos para los Sismos Históricos. Fuente propia.	38
Tabla 2.3:	Características Geométricas y Geológicas Estimadas para las Potenciales Fuentes Sísmicas de Corteza en un radio de 300 km desde el Sitio Dela Presa Yuracmayo.	39
Tabla 2.4:	Parámetros Sísmicos para las Fuentes de Subducción. Fuente Propia.	40
Tabla 2.5:	Relaciones de Atenuación del Movimiento Sísmico Horizontal. Fuente propia.	43
Tabla 2.6:	Resultados del Análisis Determinístico de Peligro Sísmico. Aceleración máx. horizontal de terreno (PGA -g-) - Suelo Clase B (IBC 2009) o S1 (E030, 2003). Fuente propia	47
Tabla2.7:	Análisis de Desagregación, Sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.	49
Tabla 2.8:	Análisis Probabilístico – Sismo Base de Diseño (SBD) para 475 años. Fuente propia	49
Tabla 2.9:	Valores del Espectro de Respuesta de peligro uniforme para el sitio de la presa Yuracmayo Suelo Tipo S1 (Norma Peruana E-030). Fuente propia.	50
Tabla 3.1	Base de datos para la selección de registros de sismos con mecanismo de tipo subducción (Interfaz e Intraplaca). Fuente propia.	75
Tabla 3.2	Sismos seleccionados para la generación de movimientos sísmicos compatibles al espectro determinístico. Metodologías U. Texas, U Stanford. Fuente propia.	80
Tabla 4.1:	Propiedades geotécnicas para los materiales de la presa Yuracmayo.(Macedo, 2009)	132
Tabla 4.2:	Permeabilidades Para los Materieles de la Presa Yuracmayo. Macedo (2009).	132
Tabla 4.3	Desplazamientos (en metros) Obtenidos de los Análisis Sísmicos Realizados Para la Presa Yuracmayo. Fuente propia.	135

CAPÍTULO I:

GENERALIDADES

1.1 MARCO GENERAL Y ANTECEDENTES

El Perú se encuentra en una región geológica y sísmica muy compleja y activa la cual se ubica cercana al borde de convergencia entre la placa Sudamericana al este y la placa de Nazca al oeste. El borde entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana en esta región está marcada por la fosa Perú-Chile ubicada entre unos 100 a 120 km al oeste de la costa Peruana. La continua subducción de la placa de Nazca a lo largo de la fosa Perú-Chile es la principal fuente de generación de grandes sismos ($M > 7,0$) y el fuerte movimiento sísmico experimentado usualmente en la costa peruana. Teniendo en cuenta la sismicidad existente en el Perú es de vital importancia que las estructuras que forman parte de los proyectos de ingeniería, sean diseñadas considerando los niveles de demanda sísmica a las cuales serán sometidas. Las presas de tierra constituyen un tipo de estructura que de no presentar un adecuado comportamiento durante sismos podría, dependiendo del contexto y situación particular, generar daños ambientales y problemas sociales serios. Por lo tanto es de suma importancia garantizar el adecuado comportamiento durante sismos de estas estructuras especialmente en un país sísmico como el Perú.

En el Perú se han realizado investigaciones acerca del comportamiento sísmico de presas de tierra, entre las que se resaltan los trabajos realizados por Infantes (1999), Carrión (2001) y Macedo (2009). El diseño sísmico de presas de tierra considera la cuantificación de la demanda sísmica en el sitio de emplazamiento de la estructura mediante los espectros de diseño sísmico. Dependiendo del tipo de espectro de diseño en consideración, se tendrá un acelerograma o tiempo historia de aceleraciones de diseño particular, reflejándose en distintos patrones de respuesta sísmica para la presa en cuestión. Para ilustrar lo establecido, consideremos el hecho de que en algunos casos los espectros de diseño son evaluados en base a métodos probabilísticos asociados a un determinado periodo de retorno (la sección 2.8.5 expone la evaluación de estos espectros). En este sentido, lo estipulado por la normativa en el Perú (MEM, 1997) establece un periodo de retorno de 475 años, sin embargo otras normativas establecen, por ejemplo espectros basados en métodos determinísticos o códigos sísmicos (Byrne, 2006). Por lo tanto evaluar la variabilidad de la respuesta sísmica de las presas de tierra en términos de distintos espectros de diseño permitiría realizar un diseño sísmico adecuado para estas estructuras garantizando su adecuado comportamiento durante sismos. Así como la evaluación de los niveles de conservadurismo o subestimación de la respuesta sísmica, si este fuera el caso, para cada espectro de diseño en particular, reflejándose en una posible optimización del diseño sísmico cuando distintos escenarios son considerados.

Además, es importante mencionar el hecho de que las herramientas computacionales actuales, superiores a las herramientas disponibles años atrás, cuando se iniciaron en el Perú los diseños sísmicos de presas de tierra, (típicamente mediante metodologías de elementos finitos y modelos equivalentes lineales), facilitan el uso de técnicas matemáticas

con considerable demanda de recursos computacionales (tiempo, memoria y velocidad de computadores) como por ejemplo las técnicas de diferencias finitas o elementos finitos considerando modelos constitutivos avanzados capaces de desarrollar, de ser necesario, cálculos acoplados (como la generación de deformaciones, esfuerzos y excesos de presiones de poros de forma simultánea para materiales geotécnicos, los cuales constituyen las presas de tierra). Estas técnicas junto con los recursos computacionales existentes actualmente permiten evaluar el comportamiento sísmico de presas de tierra bajo un amplio rango de condiciones como niveles de deformaciones grandes y/o pequeñas así como distintos niveles de demanda sísmica expresadas por los espectros de diseño sísmico.

Bajo el marco de lo expuesto en los párrafos anteriores, esta tesis pretende establecer una metodología para la evaluación del comportamiento sísmico de presas de tierra considerando diferentes niveles de demanda sísmica, expresada por la variabilidad en los espectros de diseño. Así como presentar la importancia del uso de técnicas computacionales del estado de la práctica y del estado del arte en la evaluación del comportamiento sísmico de presas de tierra.

Para la ejecución de esta investigación se ha considerado como caso de estudio la presa Yuracmayo. El proyecto Yuracmayo consistió en la construcción de una presa en un sector de estrechamiento del valle del río Blanco (afluente del río Rimac), a una altitud de 4300 m.s.n.m, la construcción de la presa fue culminada en el año 1997. En referencia a la presa a la cual se aplicará la metodología desarrollada en esta Tesis, la Figura 1.1 muestra la ubicación zonal de la presa la cual será determinante en la cuantificación de la demanda sísmica en el sitio de la estructura. La presa Yuracmayo presenta una altura sobre la fundación de 56.0m, longitud de coronación de 558.5m y un volumen total de 1.67 MIO m³ de material morrénico distribuido entre sus diversos componentes. La Figura 1.2 muestra una vista general de la presa después de finalizada su construcción.

1.2 OBJETIVOS

Establecer una metodología para evaluar la respuesta sísmica de presas de tierra en términos de la variabilidad de los diferentes espectros de diseño usados usualmente como parte del estado de la práctica del diseño sísmico de presas de tierra en el ámbito del Perú y a nivel internacional. Con este fin se consideraran variables que cuantifiquen el comportamiento sísmico de estas estructuras (como por ejemplo los desplazamientos permanentes). Adicionalmente este trabajo pretende mostrar la utilidad de usar técnicas computaciones modernas y modelos constitutivos avanzados para la evaluación de la respuesta sísmica de presas de tierra.

Como objetivos específicos se consideran:

- Aplicar la metodología planteada en esta Tesis al caso de estudio, la presa de tierra Yuracmayo.
- Cuantificar la demanda sísmica en sitio de la presa Yuracmayo mediante metodologías probabilísticas y determinísticas, estableciendo espectros de diseño para la presa.
- Generar una base de datos conformada por sismos de subducción, típicos en el Perú, para la generación de registros sísmicos de diseño.

- Implementar y adecuar la aplicación de Herramientas de software creadas para sismos de corteza, típicos en Norte América, para ser aplicadas a sismos de subducción, típicos en el Perú, con fines de generación de registros sísmicos de diseño.
- Implementar procedimientos de generación de sismos de diseño que trabajen con sets de movimientos sísmicos y movimientos sísmicos individuales, que puedan ser aplicados como parte del estado de la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica en el Perú.
- Generar movimientos sísmicos de diseño compatibles a los niveles de demanda sísmica cuantificados para el sitio de la presa Yuracmayo.
- Implementar la aplicación de modelos constitutivos avanzados del estado del arte para el análisis sísmico de presas de tierra, tal como el modelo UBCHYST (Byrne, 2010) en herramientas de computo que permitan la modificación por usuario tal como FLAC (Itasca, 2011) y realizar su aplicación al caso de estudio de la Tesis (presa Yuracmayo).
- En base a la metodología establecida en esta Tesis evaluar el comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo en términos de la variabilidad de los espectros de diseño considerados, representativos de la demanda sísmica en el sitio de la presa.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El desarrollo de este trabajo se ha distribuido en 5 capítulos:

- En el capítulo I se describen los antecedentes que llevaron a la ejecución del trabajo, se presentan los objetivos de la investigación y finalmente se describe la organización del estudio.
- En el capítulo II se presentan los fundamentos para la cuantificación de la demanda sísmica mediante metodologías probabilísticas y determinísticas específicas de sitio, se describen además los diferentes tipos de espectros de diseño comúnmente usados en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica para cuantificar los niveles de demanda sísmica en un sitio en particular. Finalmente se desarrolla el estudio de peligro sísmico específico para el sitio de la presa Yuracmayo y se presentan los espectros de diseño que serán considerados en esta investigación.
- En el capítulo III se describen las metodologías y procedimientos usados en la práctica de la ingeniería sísmica para la generación de movimientos sísmicos de diseño (acelerogramas de diseño) compatibles a espectros de diseño predeterminados. Finalmente se presenta la generación de movimientos sísmicos de diseño para el sitio de la presa Yuracmayo.
- En el capítulo IV se describen los fundamentos de las técnicas de simulación numérica usadas en este estudio (diferencias finitas) para la evaluación del comportamiento sísmico de las presas de tierra, así como los modelos constitutivos para representar la respuesta de los suelos ante cargas sísmicas. A continuación, se evalúa la variabilidad de la respuesta dinámica de la presa Yuracmayo en términos de los espectros de diseño considerados, describiendo la caracterización de materiales, y los análisis dinámicos realizados. Finalmente se presentan los casos analizados y los resultados obtenidos.
- En el capítulo V se presentan las conclusiones de este estudio junto con algunas recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO II:

ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO Y EVALUACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO PARA EL CASO DE ESTUDIO: PRESA YURACMAYO

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las metodologías y resultados de los análisis de peligro sísmico probabilístico y determinístico realizados para la Presa Yuracmayo, caso de estudio de la presente investigación. En este contexto, el propósito principal del estudio de peligro sísmico desarrollado, se centra en la estimación de aceleraciones máximas horizontales de terreno (Peak Ground Accelerations, PGA, de sus siglas en inglés) y aceleraciones espectrales con 5% de amortiguamiento. Además en este capítulo, se describen los diferentes tipos de espectros de diseño usados en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica con la finalidad de cuantificar los niveles de demanda sísmica existentes en un sitio en particular. Finalmente se presenta la evaluación de los espectros de diseño considerados para el sitio de la presa Yuracmayo.

2.2 ALCANCES DEL ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.

Los alcances del estudio de peligro sísmico desarrollado para cuantificar la demanda sísmica existente en el sitio de la presa Yuracmayo incluyen los siguientes ítems:

- Revisión de literatura disponible publicada y no publicada; así como, datos relevantes para caracterizar el marco sismotectónico del área de la presa Yuracmayo.
- Descripción de las metodologías de análisis probabilístico y determinístico empleadas en el estudio para definir el peligro sísmico específico del área de la presa Yuracmayo.
- Mapas y tablas con los emplazamientos de las principales fuentes sismogénicas, fallas superficiales locales y regionales (de estudios publicados disponibles). Los sismos históricos y los datos de los Catálogos Sísmicos disponibles consultados han sido identificados en un radio mínimo de 500 km aproximadamente, contados a partir del sitio de la presa Yuracmayo.
- Identificación y Caracterización de fuentes sismogénicas (provenientes del proceso de subducción y asociadas a sistemas de fallamiento cortical) para la evaluación del peligro sísmico en el sitio de la presa Yuracmayo, basados principalmente en los mecanismos que regulan cada fuente sismogénica, geometrías asociadas, estimación de los parámetros de sismicidad local, evaluación de las tasas de recurrencia sísmica, y análisis de las magnitudes máximas.

- Curvas de peligro sísmico para la aceleración máxima horizontal de terreno (PGA) y aceleraciones espectrales (S_a) con 5% de amortiguamiento (para periodos estructurales discretos, T), de sistemas de un grado de libertad de hasta 4.0 s. Estas curvas están definidas para probabilidades anuales de excedencia fluctuando entre 500% y 0.5% en 50 años (periodos de retorno aproximados de 10 a 10,000 años, respectivamente).
- Contribución probabilística (desagregación sísmica por magnitud y distancia) de las fuentes sismogénicas que contribuyen al peligro sísmico específico del sitio de la presa Yuracmayo, para periodos estructurales correspondientes a cada ordenada espectral de interés (PGA, 0.20 s y 1.0 s principalmente).
- Cuantificación de las incertidumbres epistémicas y aleatorias asociadas al fenómeno sísmico.
- Resultados del análisis determinístico de peligro sísmico específico de sitio efectuado para el sitio de la presa Yuracmayo.
- Comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con publicaciones locales y regionales relacionadas con el peligro sísmico en el área de la presa Yuracmayo.
- Determinación de los espectros de diseño sísmico para aceleraciones horizontales, con 5% de amortiguamiento, definido para sitio Clase B (condición de suelo para afloramiento rocoso – según el International Building Code, 2009 IBC/ASCE 7)

2.3 ENFOQUE Y METODOLOGÍA

Actualmente existen dos (2) enfoques generales empleados en la evaluación del peligro sísmico específico de sitio (Reiter, 1991). Un enfoque es el análisis determinístico y un el segundo enfoque lo constituye el análisis probabilístico. Ambas metodologías son descritas con más detalle a continuación.

2.3.1 Análisis Determinístico de Peligro Sísmico

El análisis determinístico emplea datos geológicos y sísmicos históricos disponibles para generar estimaciones discretas, de valor único, sobre los parámetros sísmicos en el sitio de evaluación. El análisis determinístico se inicia con la identificación y caracterización de las fuentes sismogénicas localizadas dentro de una distancia específica del sitio. En áreas tectónicamente activas como el Perú, los terremotos generalmente se producen en la zona de subducción de placas tectónicas, y en las fallas corticales cercanas al sitio de evaluación. A continuación se establece la magnitud máxima asociada a cada fuente, sea falla cortical o mecanismo de subducción. El sismo de máxima magnitud que se espera vaya a generar cada fuente, se estima con base en el desarrollo del estado del conocimiento asociado al marco tectónico de la región en estudio. Para definir el Sismo Máximo Creíble, asociado a un estudio determinístico, se identifican las distancia más cercana del sitio a cada fuente sísmica, se evalúan las condiciones de suelo adyacente al sitio y finalmente se emplean ecuaciones de predicción del movimiento sísmico compatibles a los tipos de suelos y regiones tectónicas consideradas. Como resultados de la evaluación se obtienen, típicamente, parámetros espectrales relacionados con valores estadísticos correspondientes a la mediana (percentil 50), y a la media más una desviación estándar (percentil 84).

Para el análisis determinístico no es relevante la definición del intervalo de recurrencia del sismo máximo asociado a la fuente, el cual puede variar entre menos de 100 años a más de 10.000 años, dependiendo del ambiente geológico en consideración. Por años se pensó que la adopción de los valores provistos por un estudio determinístico resultaría en una evaluación conservadora de los parámetros que caracterizan a un fenómeno sísmico de un área en particular. Sin embargo, se ha demostrado que puede no ser el caso (Abrahamson, 2006).

El escenario sísmico (magnitud-distancia) que genera los movimientos sísmicos más grandes en el sitio se denomina Sismo Máximo Creíble de Control (SMCC, o CMCE de sus siglas en inglés). El SMCC es el sismo de mayor magnitud considerado que parece posible a lo largo de la falla reconocida, o dentro de una provincia tectónica definida geográficamente dentro de un marco sismotectónico supuesto o conocido, para la distancia más cercana entre la fuente y el sitio de análisis.

2.3.2 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico

El análisis probabilístico de peligro sísmico considera todos los posibles escenarios sísmicos, combinando cada par magnitud-distancia para cada fuente sismogénica. Dichos análisis son empleados para estimar la probabilidad de ocurrencia de aceleraciones de terreno (o espectrales) generados por sismos y para un periodo específico, característica que no es considerada por un estudio determinístico de peligro sísmico. El presente estudio, presenta el desarrollo de periodos de retorno específicos de 475, 975 y 2,475 años; 10%, 5% y 2 % de probabilidad de excedencia en 50 años, respectivamente.

La probabilidad o frecuencia de ocurrencia de todos los eventos asociados a cada fuente sísmica significativa identificada, se incorpora dentro del análisis probabilístico, que también incluye la tasa de atenuación de la energía liberada por el sismo, conforme la onda se propaga y se aleja de la fuente o hipocentro. Mientras que un estudio determinístico resulta sólo en un valor de parámetro sísmico (por ej. aceleración) asociado con el sismo máximo para cada escenario magnitud-distancia, el análisis probabilístico provee una curva de peligro sísmico que indica la frecuencia anual (asociado directamente al periodo de retorno) de exceder un valor espectral dado (Abrahamson, 2006).

El análisis probabilístico también provee un marco en el cual las incertidumbres (aleatorias y epistémicas) relacionadas con la magnitud de un sismo, emplazamiento, ecuaciones de predicción del movimiento sísmico y frecuencia de ocurrencia, puedan ser identificadas, cuantificadas y combinadas para generar una imagen más completa del peligro sísmico de un área en particular (Kramer, 1996; Bommer, 2012).

Esta metodología emplea los elementos de identificación y caracterización de la fuente semejante al análisis determinístico, más una evaluación sobre la probabilidad que ocurran los sismos de una magnitud dada en el sitio de análisis. La frecuencia de ocurrencia de sismos de diferentes magnitudes en cada fuente sísmica, junto con sus incertidumbres inherentes, están directamente consideradas en el análisis probabilístico. Al igual que la posible ocurrencia de eventos de cada magnitud en cualquier lugar de la fuente, incluyendo por supuesto la distancia más cercana (único parámetro que toma el análisis determinístico).

Los resultados del análisis probabilístico se emplean para seleccionar los parámetros sísmicos de diseño con base en la probabilidad de excedencia de un valor espectral

adoptado (por ej. aceleración máxima horizontal, aceleración espectral para un periodo dado, etc.), durante la vida útil de servicio de una estructura, o para un periodo de retorno establecido. Finalmente mediante el proceso de desagregación de peligro sísmico, los resultados de un enfoque probabilístico también pueden ser empleados para identificar que combinación de magnitudes y distancias, y/o fuentes sísmicas específicas, son los mayores contribuyentes al peligro sísmico definido en el sitio de interés.

2.4 TECTÓNICA REGIONAL Y MARCO SÍSMICO

El sitio de la presa Yuracmayo se ubica en una región geológica y sísmica muy compleja y activa del centro- de Perú. Esta región está localizada al este de uno de los bordes de placas tectónicas más activos de la Tierra donde han ocurrido numerosos sismos destructivos. Una breve descripción de las características tectónicas y geológicas de la región de los sitios del proyecto se presenta a continuación.

2.4.1 Marco Tectónico Regional

En lo referente al marco tectónico, Perú se encuentra cercano a un borde de placa convergente entre la placa Sudamericana al este y la placa de Nazca al oeste, marcada por la fosa Perú-Chile a unos entre los 140 a 180 km al oeste de la costa Peruana.

La margen oeste de la placa Sudamericana se caracteriza por su angosta planicie costera, las elevadas montañas de su cordillera oriental y occidental, y las numerosas fallas y pliegues que enmarcan el límite este de los Andes en Perú y el norte de Chile. La continua subducción de la placa de Nazca debajo del oeste Peruano es la principal fuente de generación de grandes sismos ($M > 7.0$) y los fuertes movimiento sísmicos experimentados usualmente en la costa peruana.

Estas características tectónicas así como los epicentros y magnitudes de sismos pasados se muestran en las Figuras 2.1 y 2.2.

La geometría de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana fue modelada por Cahill e Isacks (1992). El modelo de subducción de Cahill e Isacks (1992) de la placa de Nazca en la zona Sur y Central del Perú se muestra buzando inicialmente al este con un ángulo de 10 a 25 grados hasta una profundidad de 50 km, a partir de donde, la placa empieza suavemente a flexionarse hacia abajo con un ángulo de 30 grados (Langer and Spence, 1995).

En la zona Central y Norte del Perú, la placa de Nazca empieza a ubicarse en forma casi horizontal a una profundidad de 100 km, buzando con un ángulo de aproximadamente 3°, y continúa casi horizontal por algo de 500 km hacia el este, donde desciende bruscamente hasta los 600 km aproximadamente, como se muestra en las Figuras 2.3, 2.4 y 2.5. Esta región “plana” de la placa de Nazca en la zona Central del Perú se extiende por 1,800 km aproximadamente desde el Ecuador en el norte hasta los 17 grados de latitud sur en el Perú, cerca al margen sur del límite del risco de Nazca (Figura 2.3, 2.4). La región plana de la placa de Nazca empezó a desarrollarse cerca de 5 millones de años atrás, estimación basada en un detenimiento abrupto del vulcanismo Cuaternario en la Cordillera Occidental de Sudamérica (Jordan et al., 1983).

Al sur de los 17 grados de latitud sur, la subducción de la placa de Nazca tiene un buzamiento consistente de 30 grados con rumbo este-noreste y la configuración plana de la

placa de Nazca desaparece para volver a aparecer al sur de los 26 grados de latitud sur debajo del noroeste Argentino. Los estudios detallados de Cahill e Isacks (1992) sugieren que la placa de Nazca no está seccionada, sino se presenta relativamente curva a medida que cambia su geometría con la profundidad. Cálculos de la velocidad del movimiento de la placa de Nazca con respecto a la placa Sudamericana realizados por UNAVCO (http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/model/) en la fosa Perú-Chile sugieren valores entre 60-75 mm/año. La convergencia entre placas ocurre oblicuamente en dirección N65-70E, o 10 a 20 grados en sentido horario a partir del azimut N53E normal a la fosa Perú-Chile y la línea de costa central del Perú.

La geometría de la fosa Perú-Chile en la zona de subducción y su potencial para producir sismos importantes en regiones superficiales de la placa de Nazca (subducción de interfaz) y en regiones más profundas debajo del área oeste del Perú (subducción de intraplaca), son algunos de los parámetros más importantes de entrada para el análisis de peligro sísmico en el sitio de la presa Yuracmayo.

2.5 CATÁLOGOS SÍSMICOS

Para este estudio se ha compilado un catálogo sísmico con eventos registrados instrumentalmente al combinar diferentes catálogos existentes para sismos en un área comprendida entre los 71.5 grados a 81.0 grados de longitud Oeste, y desde los 7 grados hasta los 16 grados de latitud Sur. El catálogo fue compilado de los siguientes centros sísmicos:

- USGS/NEIC 1973 al presente (Catálogo PDE): Este catálogo incluye eventos desde 1973 compilados por el USGS/NEIC (U.S. Geologic Survey, National Earthquake Information Center) y sus predecesores en la costa Oeste de los Estados Unidos y el Geodetic Survey, el National Oceanic Survey, y el Environmental Research Laboratories del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. El catálogo fue obtenido en línea en <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>.
- El proyecto SISRA. El catálogo incluye eventos registrados en el periodo 1471-1981 compilados por el Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina. Se accedió al catálogo mediante la web: http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html.
- El ANSS (Advanced National Seismic System). El catálogo fue preparado luego de agrupar catálogos “maestros” de instituciones colaboradoras del ANSS y eliminar eventos duplicados de algún evento sísmico. El catálogo ANSS contiene información sísmica de hipocentros, fechas y magnitudes. Se accedió al catálogo mediante la web: <http://www.ncedc.org/anss/>.
- Centennial Earthquake Catalogue: Este es un catálogo global con magnitudes y ubicaciones de sismos registrados instrumentalmente compilados por Engdahl and Villaseñor (2002). El catálogo se extiende desde 1900 hasta Junio del 2002.
- NGDC (NOAA) Significant Worldwide Earthquake Database: Este catálogo contiene eventos emplazados alrededor del mundo desde el 2.150 AC, a la actualidad. Dichos sismos cumplen con, al menos, uno de los siguientes criterios: causar más de US\$1 millón en daños documentados, 10 muertes o más, una magnitud M 7,5 o mayor, una Intensidad Mercalli Modificada mayor o igual a X, o que hayan generado tsunamis.

- Catálogo del Instituto Geofísico del Perú (IGP): Este catálogo incluye eventos registrados en el periodo 1471-2005 compilados por el Centro Nacional de Datos Geofísicos-Sismología. Se accedió al catálogo mediante la web: <http://www.igp.gob.pe/sismologia/bds/catálogo/presentacion.htm>

La información reportada por agencias sísmicas presenta una variedad de escalas para representar el tamaño o magnitud de los eventos sísmicos. La práctica actual de ingeniería sísmica utiliza la magnitud momento (M_w) como escala preferente para análisis y reportes sísmicos debido a que la medida del tamaño del sismo puede ser relacionada a parámetros físicos, como la cantidad del desplazamiento de la falla y la energía liberada por las ondas sísmicas. Otras magnitudes (M_s , m_b , etc.) tienen una relación empírica con algún proceso físico debido a que éstas están basadas en las amplitudes de ondas registradas en un sismómetro (Mc Guire 2004). Debido a esto, en este estudio sísmico se ha dado el siguiente orden de preferencia para representar un evento sísmico:

- 1) Magnitud de momento sísmico (M_w),
- 2) Magnitud de ondas de superficie (M_s),
- 3) Magnitud de ondas de cuerpo (m_b)
- 4) Magnitud local (ML).

La Figura 2.6 (a y b), muestra la frecuencia de distribuciones de magnitudes y los tipos de escala para magnitudes reportadas por las agencias sísmicas arriba consignadas. Antes de cualquier análisis de data sísmica, es necesario convertir las múltiples escalas de magnitudes a una sola magnitud. Debido a esto, en este estudio los valores de magnitudes m_b y M_s se consideraron equivalentes a la magnitud momento (M_w) si las magnitudes están dentro de los rangos intervalos M_s 5 a 8, m_b 4 a 6 y ML 4 a 7 (Boore and Joyner 1982). Para las magnitudes con valores reportados fuera de estos intervalos es necesario utilizar una relación de conversión de la magnitud dada a magnitud momento M_w . En este estudio, donde fuera necesario, se usaron las relaciones propuestas por el GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program, <http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/>) para la conversión de magnitudes m_b a M_s y las expresiones propuestas por el ISC (International Seismological Center; Scordilis, 2006) para la conversión de magnitudes M_s a M_w .

Con la finalidad de seleccionar los eventos más confiables y depurar elementos duplicados en términos de ubicación, tiempo de ocurrencia y magnitud de los eventos, se emplearon diferentes criterios al momento de priorizar aquellos sismos provenientes de los catálogos mencionados. En la combinación de catálogos se dio prioridad a los eventos reportados por las agencias NGDC/CENT/ANSS/PDE, en el orden establecido debido a su extenso uso de magnitudes momento. Asimismo, se asignaron prioridades de segundo orden a los otros catálogos (SISRA, IGP) para dar el orden de preferencia usada en el proceso de eliminación de eventos duplicados en función del uso de datos de redes sísmicas internacionales en el área del sitio de la presa Yuracmayo.

El catálogo para el presente estudio, después de esta depuración inicial, contiene 2,836 eventos registrados mayores a M_w 4.5 desde el año 1555, al 30 de Junio del 2012. Los eventos del catálogo se ilustran en la Figura 2.2. Basados en los eventos del nuevo catálogo, el evento sísmico más grande (M_w 8.4-9.5) ocurrió en 1746 a una profundidad estimada de 30 km.

El catálogo incluye 5 grandes sismos a partir de 1940, estos son citados a continuación. El sismo del 24 de mayo de 1940 (Mw 8.3), el sismo del 24 de agosto de 1942 (Mw 8.5), el sismo del 17 de Octubre de 1966 (Mw 8.1), el sismo del 03 de octubre de 1974 (Mw 8.1), y el sismo del 15 de agosto del 2007 (Mw 8.0). El catálogo incluye también sismos importantes como los sismos del 31 de mayo de 1970 (M 7.8), 21 de febrero de 1996 (Mw 7.5) y el sismo de Nazca del 12 de Noviembre de 1996 (Mw 7.7). El sismo del 23 de junio de 2001 (Mw 8.4) escapa de la ventana considerada para el catálogo del presente estudio.

2.6 PRINCIPALES SISMOS HISTÓRICOS

Los principales sismos que han afectado la parte Central del Perú se muestran en la Tabla 2.1. Los epicentros de los sismos históricos e instrumentales con magnitudes $M_w \geq 5$, considerados en un radio de 500 km del sitio de la presa Yuracmayo se muestran en la Figura 2.2. La Figura 2.2 distingue además sismos superficiales (0 a 50 km de profundidad), sismos intermedios (51 a 100 km de profundidad) y sismos profundos (mayor a 101 km de profundidad).

Tabla 2.1: Principales Sismos Históricos

Año	Magnitud (M)	Fuente	Mecanismo de la Fuente	Profundidad Estimada (km) ²	Longitud de Ruptura (km) ³
1586	8.1-8.5	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	60	175
1619	8.6	?	?	50	100-150
1664	7.5-7.8	?	?	15	75
1678	7.7-8.0	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	40	100-150
1687	8.4-8.8	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	30	300
1725	7.5-7.6	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	40	75
1746	8.4-9.5	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	30	350
1940	8.3	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	60	180
1942	8.2	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	60	200
1942	7.9	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	30	265
1946	7.2-7.3	Corteza	Normal	12	20
1960	7.6	Interfaz	Inversa Cabalgamiento	52	147
1963	7.8	Interfaz	Inversa Cabalgamiento	543	Nd
1966	7.7-8.2	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	38	100
1970	7.8-8.0	Intraplaca	Normal	64	130
1974	7.9	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	27	140
1996	7.5	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	15	85
1996	7.7	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	33	85
2007	8	Interfaz	Inversa/Cabalgamiento	39	Nd

Notas:

- 1) Las magnitudes fueron estimadas de los catálogos sísmicos usados en el proyecto.
- 2) Las profundidades fueron estimadas con base a los catálogos sísmicos considerados y NGDC (2012).
- 3) Las longitudes de ruptura fueron estimadas por Dorbath et al (1990) y Bilek (2009).

Nd: No disponible.

2.7 MODELO SISMOTECTÓNICO

La caracterización del modelo sismotectónico es muy importante en la evaluación del peligro sísmico. El modelo sismotectónico representa las características sísmicas de las principales regiones tectónicas que contribuyen al peligro sísmico. En el modelo se definen todas las fuentes con capacidad sismogénica que puedan contribuir al peligro sísmico en el sitio. Fuentes con capacidad sismogénica son aquellas asociadas con áreas de ruptura producidas por eventos sísmicos históricos importantes, o aquellas estructuras geológicas que, desde el punto de vista de la ingeniería, muestran evidencias de movimientos sísmicos durante la época del Holoceno (10 a 15 mil años atrás). El modelo sismotectónico para los sitios del proyecto han sido desarrollados basados en la información geológica, tectónica y sismológica disponible. Las fuentes que conforman el modelo sismotectónico están definidas en función de ubicación, geometría, tipo de falla, máximas magnitudes, relaciones de recurrencia y razones promedio de desplazamiento.

En la Figura 2.5 se muestra una sección transversal a través del área del sitio de la presa Yuracmayo. El modelo sismotectónico para el proyecto incluye la zona de subducción de interfaz (fosa Perú-Chile) y la zona de subducción de intraplaca superior e intraplaca inferior de la placa de Nazca.

Las características y detalles de las fuentes sísmicas usadas en el modelo sismotectónico son descritas a continuación.

2.7.1 Potenciales Fuentes Sísmicas

Se han identificado ocho (08) potenciales fuentes sísmicas en un radio de 500 km desde el sitio de la presa Yuracmayo (para cada fuente se ha considerado los periodos de completitud en cuanto a información sísmica de acuerdo a la Tabla 2.2). La identificación de las ocho (08) fuentes está basada en revisión de literatura disponible, datos, reportes y mapas que describen la tectónica, fallas, sismicidad histórica y peligro sísmico para las regiones adyacentes al sitio de la presa Yuracmayo. De las ocho (08) fuentes sísmicas, tres (3) son fuentes de corteza superficiales de la placa Sudamericana (ver Tabla 2.3), tres (3) son fuentes asociadas con la zona de subducción (ver Tabla 2.4), y dos (2) se corresponden con las fuentes sismogénicas de área (Sección 2.7.1.2.).

Los movimientos sísmicos en el área de la presa Yuracmayo están dominados por las fuentes con magnitudes más grandes y/o con las distancias más cercanas a los sitios del proyecto, especialmente aquellas fuentes con altas tasas de desplazamiento (aquellas con las menores tasas de recurrencia para eventos con grandes magnitudes). Estas fuentes son descritas con más detalle a continuación.

2.7.1.1 Fuentes de Subducción

Aspectos Generales

La fosa Perú-Chile está localizada aproximadamente a unos 300 km al oeste del sitio del Área de la presa Yuracmayo (Figuras 2.1, 2.2 y 2.5). La zona de subducción asociada a la fosa Perú-Chile contiene tres (3) fuentes sísmicas:

- La fuente de interfaz poco profunda de la placa de Nazca y Sudamericana, ubicada al oeste de los sitios de análisis.

- La fuente de intraplaca superior de Nazca, ubicada debajo de la fuente de interfaz.
- La fuente de intraplaca inferior de Nazca, ubicada generalmente debajo del continente Sudamericano.

Estas tres (3) fuentes sísmicas se describen a continuación.

Fuente de Interfaz de la placa de Nazca y Sudamericana

La fuente de interfaz poco profunda, que empieza en la fosa Perú-Chile, es donde la placa de Nazca inicialmente entra en contacto y subduce debajo de la placa Sudamericana (Figura 2.5). El contacto entre las placas produce una “restricción” del desplazamiento de éstas y por lo tanto acumulación de energía por deformación. Debido a que el desplazamiento relativo entre las placas es muy alto y porque el movimiento se encuentra “restringido”, la energía de deformación acumulada es muy alta y la resistencia del material constitutivo de las placas es vencida frecuentemente. Este continuo mecanismo es la causa de la ocurrencia de los grandes sismos registrados en esta fuente.

Basados en la distribución espacial de sismos históricos y la estructura de la placa de Nazca en esta región, se ha sugerido que la región de interfaz puede ser dividida en tres segmentos: segmento Norte, segmento Central y segmento Sur (Dorbath et al 1990, Langer and Spence, 1995). Los tres segmentos están limitados por los linderos del risco de Nazca y la fractura de Mendaña. Los movimientos a lo largo del segmento Central son los que más influyen los movimientos sísmicos en el sitio de la presa Yuracmayo.

La distribución de sismos en el segmento Central se muestra en la Figura 2.2. El modelo usado para representar la geometría de la fuente de subducción de interfaz, en el área de la presa Yuracmayo, incluye un buzamiento inicial de 8 grados hasta una profundidad de 10 km y 22 grados hasta una profundidad de 50 km. Estos buzamientos representan un estimado razonable de la distribución de sismicidad para los sismos de interfaz como se muestra en la Figura 2.5 y son concordantes con los trabajos realizados por Langer and Spence (1995), y Cahill and Isacks (1992). Esta geometría ubica a esta fuente a una distancia de 150 km (distancia más cercana) del área de la presa Yuracmayo.

Las magnitudes máximas para sismos de interfaz pueden estar en un rango de M 8.0 a M 9.5. El evento histórico más grande registrado en el mundo en la región de interfaz fue el sismo de Valdivia, Chile, de 1960 M 9.5 que ocurrió a lo largo de la fosa Perú-Chile mucho más al sur del proyecto. La data histórica muestra que los sismos más grandes que ocurrieron en la zona central de la región de interfaz desde el año 1555 ocurrieron en 1687 (M 8.4 a M 8.8) y en 1746 (M 8.6 a M 9.5). En este estudio hemos asignado una magnitud máxima de M 9.2 basado en el sismo de 1746 (M 8.6 a M 9.5) y en la máxima área de ruptura impuesta por la longitud continua de la placa de Nazca desde la fractura de Mendaña hasta el Risco de Nazca. (Figura 2.2).

Fuente de Intraplaca Superior de la Placa de Nazca

La fuente de intraplaca superior es la sección de la placa de Nazca ubicada inmediatamente a continuación de la zona de interfaz entre placas, y debajo de la placa Sudamericana al oeste del Área de la presa Yuracmayo. Los sismos que ocurren en la región de intraplaca superior generalmente son de mecanismo de desplazamiento normal. En esta región, se han registrado magnitudes máximas de hasta M 8.0, como lo evidencia el sismo de 1970 M 7.8 a M 8.0 que ocurrió en la zona inclinada inferior de la fractura de Mendaña.

La geometría de subducción de la placa de Nazca, estimada con una inclinación de 27 grados con rumbo noreste hasta una profundidad de 100 km aproximadamente, ubica la región de intraplaca superior a 130 km (distancia más cercana) del área de la presa Yuracmayo.

Fuente de Intraplaca Inferior de la Placa de Nazca

La fuente de intraplaca inferior representa la porción relativamente plana y con poca inclinación de la placa de Nazca debajo de los Andes (Figura 2.5). Esta porción de la región de intraplaca incluye todos los sismos que ocurren en la placa de Nazca a profundidades mayores a los 100 km. Sismos de desplazamiento normal ocurren en cualquier lugar de esta parte de la placa y pueden tener magnitudes máximas en el rango de de M 7.8 a M 8.0.

La geometría de la región plana de la placa de Nazca, estimada con una inclinación de alrededor de tres grados (3°) hacia el noreste desde 100 km a 120 km de profundidad, ubica la región inferior de intraplaca a 102 km aproximadamente, debajo del sitio de la presa Yuracmayo.

2.7.1.2 Principales Fuentes de Corteza

Basados en el mapa de fallas publicado por Machare et al (2003) para el Perú (Figuras 2.1 y 2.2), se han identificado tres (3) sistemas de fallas con potencial capacidad sismogénica dentro de un radio aproximado de 300 km contados a partir del sitio del depósito de la presa Yuracmayo. El mapa de fallas contiene información de localización, geometría, edad y actividad de fallas Cuaternarias y plegamientos relacionados a fallas. Para este estudio, los ángulos de buzamiento de las fallas utilizados son los descritos en Machare et al (2003).

Para los casos en los que el ángulo de buzamiento no fue especificado, se utilizó la siguiente definición basada en el tipo de falla y en los siguientes ángulos de buzamiento ampliamente aceptados en la comunidad científica: transcurrente (90 grados), inversa (45 grados) y normal (60 grados). Las razones de desplazamiento promedio y/o información de recurrencia fueron obtenidas con base en la revisión de literatura (Machare et al., 2003; Schwartz, 1988), asumiendo un espesor de la corteza igual a 25 km.

Las fuentes de corteza que pueden contribuir al peligro sísmico para el sitio de la presa Yuracmayo son descritas a continuación y las características de las mismas, relevantes para propósitos del presente estudio, se muestran en la Tabla 2.3:

Falla Cayesh

La falla de Cayesh (Figura 2.1) es la falla mapeada más cercana al sitio de la presa Yuracmayo con capacidad sismogénica. Machare et al. (2003) caracterizó la falla como una de tipo de desplazamiento predominante normal, el rumbo de la falla es aproximadamente N28W, tiene una longitud de unos 18 km y tiene una tasa de desplazamiento del orden de 0.2 a 1.0 mm/yr. De las características geológicas y geométricas de la falla se infiere que esta puede tener una magnitud máxima asociada en el rango de M 6.0 a 7.2. La falla se encuentra a una distancia aproximada de 90 km respecto del sitio de la presa Yuracmayo.

Falla Huaytapallana

La falla Huaytapallana (Figura 2.1) se ubica a una distancia aproximada de 95 km del sitio de la presa Yuracmayo (distancia mínima). De acuerdo a Machare et al. (2003) la falla posee un desplazamiento tipo reverso/oblicuo, el rumbo de la falla es de aproximadamente N35W, y tiene un buzamiento inferido hacia el este. La longitud total mapeada de la falla es de aproximadamente 25 km. Machare et al. (2003) sugieren una tasa de desplazamiento anual menor a 1 mm/yr para esta falla así mismo se asocia a esta falla el sismo del 24 de Julio de 1969 que produjo escarpes horizontales y verticales en Antacama Arroyo. De las características geológicas y geométricas de la falla se infiere que esta puede tener una magnitud máxima asociada en el rango de M 6.7 a 7.1.

Cordillera Blanca

El sistema de fallas de la Cordillera Blanca presenta un rumbo aproximado NO y se encuentra entre los 9° y 11° de latitud S, con elevaciones que superan los 6,000 m. s. n. m, incluyendo el nevado Huascarán con 6,768 m de altitud, perteneciente a la Cordillera Occidental del Perú. Esta zona de falla, catalogada como una con tipo de desplazamiento normal, puede ser considerada como la falla más activa de la parte central - Norte del Perú y tiene una longitud de aproximadamente 220 Km de largo, con un buzamiento de unos 40° hacia el oeste. La falla de Cordillera Blanca no ha experimentado ruptura de la superficie, por lo menos desde principios de los años 1500 a lo largo de toda su longitud (Schwartz, 1988). De igual manera, Schwartz (1988), sugiere una recurrencia de 3,000 años para sismos importantes (M 7.0) en esta falla. Machare et al. (2003) proponen una tasa de desplazamiento del orden de 1 mm/año a 5 mm/año así mismo las características geomorfológicas y geométricas de falla sugieren que las magnitudes máximas asociadas a un evento sísmico se encuentran en el rango de M 6.9 – 7.2. Según su geometría y características estructurales se han identificado cuatro secciones: La Sección A, de 42.9 km de longitud y localizada en el extremo norte del sistema; la Sección B de 76.8 km; la Sección C de 54.4 km y la Sección D de 32.4 km de longitud localizada en el extremo sur del sistema. El segmento más cercano al sitio de la presa Yuracmayo es el segmento sur, situado a una distancia mínima de 205 km aproximadamente.

Fuentes Sismogénicas de Área

En el presente análisis, se han incluido dos (2) fuentes de área (BAEQ, de sus siglas en inglés, Background Area Earthquakes). Estas se encuentran identificadas en la Figura 2.3 como las fuentes sismogénicas F4 y F5. Éstas permiten representar los sismos que se producen en la corteza superficial (por ejemplo, profundidades ≤ 30 km), no asociadas a fallas conocidas o catalogadas, y definido con base en los catálogos disponibles y datos de sismicidad histórica. Para su caracterización se consideraron sismos con profundidades menores a 40 km. Las magnitudes máximas estimadas para estas fuentes van desde M 6.9 a M 7.2. Las fuentes de área así consideradas también incluyen los sismos que se producen en posibles fallas no catalogadas, o ciegas, y demás estructuras geológicas capaces de generar sismos moderados a fuertes que no hayan sido aún reconocidos.

2.7.2 Parámetros y Recurrencia de las Fuentes Sísmicas

Luego de caracterizar las fuentes sísmicas en función de sus características geometrías espaciales, geológicas, niveles de actividad y edades, se emplearon los parámetros para

evaluar tres (3) requerimientos del análisis determinístico y probabilístico de peligro sísmico:

- Evaluación de las magnitudes máximas para cada fuente sísmica.
- Selección y estimación de los parámetros sísmicos necesarios para realizar el estudio determinístico y
- Selección y estimación de los parámetros sísmicos necesarios para completar el estudio probabilístico.

Un estudio probabilístico de peligro sísmico requiere además parámetros para caracterizar la distribución de sismos en función de magnitudes y periodos de retorno. Estos parámetros adicionales son usados para evaluar relaciones de recurrencia sísmica, o la frecuencia de ocurrencia de sismos. Estos parámetros son evaluados de los catálogos sísmicos en base a métodos estadísticos. La recurrencia sísmica puede ser representada en base a modelos exponenciales, característicos o una combinación de ambas (Youngs y Coppersmith, 1985). Los modelos usados en este estudio se describen a continuación.

2.7.2.1 Sismicidad

La metodología para determinar el peligro sísmico está basada en asumir que los eventos sísmicos son independientes. Debido a esto, el catálogo usado para determinar la actividad sísmica debe estar libre de eventos sísmicos que son consecuencia del evento sísmico principal (réplicas y premonitores). Con esta finalidad, el catálogo del proyecto fue depurado usando el algoritmo de Reasenberg (1985), y Gardner y Knopoff (1974). El propósito del proceso de depurado es eliminar todas las réplicas y premonitores del catálogo completo del proyecto. Antes de la depuración, las magnitudes sísmicas fueron transformadas a una sola magnitud usando los criterios establecidos en la Sección 2.5. Las Figuras 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 muestran la distribución de los hipocentros sísmicos en el catálogo del proyecto luego de eliminar los eventos duplicados, premonitores y réplicas. Este catálogo depurado del proyecto contiene 2,215 y 1,100 eventos mayores o iguales a M 4.5 usando el algoritmo de Reasenberg (1985) y Gardner y Knopoff (1974), respectivamente. La Figura 2.7 muestra la distribución de los dos (2) algoritmos de depuración con respecto al tiempo, la Figura 2.8 con respecto a la magnitud. Los resultados indican un patrón similar para el catálogo depurado mediante el uso de ambos algoritmos, sin embargo el catálogo obtenido usando el método de Gardner y Knopoff (1974) contiene sólo aproximadamente la mitad de eventos sísmicos. La información sísmica contenida en el catálogo depurado muestra que las magnitudes registradas no están completas en diferentes intervalos de tiempo, especialmente para eventos con magnitudes pequeñas. Con la finalidad de usar la información sísmica en una manera consistente, las magnitudes sísmicas fueron agrupadas en diferentes intervalos de tiempo de acuerdo a la metodología propuesta por Stepp (1972). El resultado de la evaluación se muestra en la Tabla 2.2 para los distintos intervalos de magnitudes evaluadas. Sismos con magnitudes entre M 4.5 y M 6.5 se estiman completos desde 1963; mientras que sismos con magnitudes entre M 6.5 y M 7.0 se estiman completos desde 1912 hasta el presente. Sismos con magnitudes mayores a M 7.0 se asumieron completos desde el año 1555.

Tabla 2.2: Intervalos de Tiempo con Períodos Completos para los Sismos Históricos.
 Fuente propia.

Rango de Magnitudes (M)	Tiempo (años)	
	Zona de Subducción	Zona de Corteza
4.5 – 5.5	50	50
5.5 – 6.0	50	50
6.0 – 6.5	50	50
6.5 – 7.0	100	50
7.0 – 7.5	457	ND
7.5 – 8.0	457	ND
8.0 – 8.5	457	ND
8.5 – 9.0	457	ND
9.0 – 9.5	457	ND

Notas:
 ND: No disponible

2.7.2.2 Relaciones de Recurrencia Sísmica

Las relaciones de recurrencia sísmica representan la frecuencia de ocurrencia de sismos en una fuente. Estas relaciones son parámetros de entrada muy importantes para un análisis de peligro sísmico probabilístico. La recurrencia sísmica puede ser representada en base a modelos exponenciales truncados, característicos o una combinación de ambas (Youngs y Coppersmith, 1985). El modelo exponencial truncado obedece a la relación logarítmica lineal entre la frecuencia de sismos y sus magnitudes, propuesta por Gutenberg y Richter (1954) y expresada como:

$$\text{Log } N = a - b M \quad (2.1)$$

Donde N es el número acumulativo de sismos mayores o iguales a la magnitud M, y “a” y “b” son constantes obtenidas del ajuste. El valor de “a” representa la actividad sísmica, o el número de sismos observados a partir de alguna magnitud mínima. El valor de “b” es la pendiente de la relación logarítmica lineal de la frecuencia de sismos y sus magnitudes, y controla la frecuencia de ocurrencia de sismos con diferentes magnitudes. Menores valores de “b” indican una frecuencia de ocurrencia de sismos grandes alta y por lo tanto mayor peligro sísmico. El modelo característico de Young and Coppersmith (1985) es una modificación del modelo exponencial que fue desarrollado para capturar el comportamiento de recurrencia no lineal observado para sismos grandes que han ocurrido en algunas fallas. El modelo de Young and Coppersmith (1985) difiere del modelo exponencial en que éste está basado en una frecuencia de distribución de sismos diferente alrededor de un sismo característico. Para cada intervalo de tiempo y fuente sísmica, se realizaron cálculos de frecuencia sísmica anual y análisis de regresión logarítmica lineal para determinar valores de b, razones de actividad sísmica y relaciones de recurrencia (Gutenberg y Richter, 1954). Todos los cálculos fueron desarrollados con los eventos principales únicamente (obtenidos mediante la depuración del catálogo original usando el algoritmo de Reassenberg) y fueron cuantificados usando el método de máxima verosimilitud. Los parámetros seleccionados para las fuentes sísmicas se muestran en las Tablas 2.3 y 2.4. La Tabla 2.3 muestra los parámetros de recurrencia para las fuentes de corteza, mientras que la Tabla 2.4 muestra los parámetros de recurrencia para las fuentes de subducción.

Tabla 2.3: Características Geométricas y Geológicas Estimadas para las Potenciales Fuentes Sísmicas de Corteza en un radio de 300 km desde el Sitio Dela Presa Yuracmayo.

Falla o Zona de Falla (Tipo) ¹	Nombre o Identificación de la Falla ²	Rumbo / Buzamiento Aproximado (Buzamiento/Dirección) ³	Distancia Mínima al sitio del proyecto (km)	Longitud Total (km) ⁴	Tiempo del Desplazamiento más Reciente (años) ⁵	Razón de Desplazamiento Estimado (mm/yr) Ponderación ⁶ (0.2-0.6-0.2)	Magnitud Sísmica (M) ⁷ Ponderación (0.2-0.6-0.2)	Modelo de Recurrencia
Cayesh (N)	PE-04	N28W/70(SW)	90	~20	<15,000	0.2-0.5-1.0	6.5-6.7-6.8	Característico
Huyatapallana (N)	PE-05	N35W/60 (NE)	95	~25	1969	0.1-0.5-1.0	6.7-6.8-6.9	Característico
Cordillera Blanca A (N)	PE-06a	N50W/60 (SW)	360	~50	<10,000	0.1-0.5-1.0	7.0-7.1-7.2	Característico
Cordillera Blanca B (N)	PE-06b	N35W/60 (SW)	294	~80	<15,000	1.0-1.5-3.0	7.1-7.3-7.4	Característico
Cordillera Blanca C (N)	PE-06c	N40W/60 (SW)	240	~55	<2,500	0.8-1.4-3.0	7.0-7.1-7.2	Característico
Cordillera Blanca D (N)	PE-06d	N38W/60 (SW)	205	~32	<2,000	0.7-1.3-3.0	6.8-7.0-7.2	Característico

Notas:

- 1) Las fallas fueron identificadas usando los datos y mapas compilados por Machare et al. (2003). El tipo de falla es: N = desplazamiento normal, R= reversa o inversa.
- 2) El nombre o identificación de las fallas según el mapa de Machare et al. (2003).
- 3) El rumbo y buzamiento, así como la dirección de buzamiento se obtuvo de Machare et al. (2003) y con base en información publicada en la literatura.
- 4) La longitud total de la falla fue obtenida de Machare et al. (2003), o estimada/escalada de mapas de fallas disponibles.
- 5) El tiempo del desplazamiento más reciente fue obtenido de Machare et al. (2003).
- 6) El rango para la razón de desplazamiento y las ponderaciones fueron estimados de Machare et al. (2003).
- 7) El rango de magnitudes máximas para las Fuentes fue calculado con base en las características geológicas y geométricas de las fuentes sísmicas, así como de las relaciones entre la longitud de ruptura y magnitud propuesta por Wells y Coppersmith (1994), Dorbath et al. (1990) y Slemmons (1982). Las magnitudes máximas para los sismos de subducción fueron también estimadas con base en los registros sísmicos pasados y en la experiencia de otras zonas de subducción a nivel mundial. **M** = magnitud momento.
- 8) Los modelos característicos están descritos por Schwarts and Coppersmith (1984) y McGuire (2004).
- 9) Además de las fuentes sismogénicas de fallas de corteza, se consideraron las fuentes de área F4 y F5. Para la fuente F4, se consideró una actividad $N_M > 5$ menor a 1, un valor de b de 1.04 y un modelo exponencial. Para la fuente F5, se consideró una actividad $N_M > 5$ de 0.8, un valor de b de 0.95 y un modelo exponencial.

Tabla 2.4: Parámetros Sísmicos para las Fuentes de Subducción. Fuente Propia.

Fuente Sísmica (Tipo) ¹	Modelo para la Fuente	Distancia más Cercana al Sitio (km)	Actividad Sísmica (Promedio $N_m N_m \geq M 5.0$)	Magnitud Máxima (M) (Ponderación 0.2<0.6<0.2)	Razón de Desplazamiento Promedio (mm/yr) Peso (0.2-0.6-0.2)	Pendiente "b"
F1-Interfaz (R)	Youngs and Coppersmith	150	1.50	8.9<9.1<9.2	50-65-75	0.72
F2-Intraplaca Superior (N)	Youngs and Coppersmith	130	1.00	7.8<8.0<8.2	-	0.85
F3-Intraplaca Inferior (N)	Exponencial Truncado	102	1.40	7.8<8.0<8.2	-	0.81

Notas:

¹Las fuentes son identificadas en las figuras 2.3, 2.4 y 2.5. El tipo de falla es: N = falla con desplazamiento normal; R = falla con desplazamiento reverso/inverso.

2.8 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

El análisis de peligro sísmico para el sitio de la presa Yuracmayo se realizó considerando las coordenadas 11.84° de latitud sur y 76.16° de longitud oeste.

2.8.1 Tipo de Suelo

El suelo tipo B (roca), definido en el International Building Code (IBC) 2009 y el ASCE 7-05 (2005), fue usado para los cálculos del movimiento sísmico para el área de la presa Yuracmayo. El suelo tipo B es definido como un sitio con velocidad de ondas de corte (V_s) entre los 760 m/s y 1500 m/s para los primeros 30 m superiores de una columna de suelo. Este tipo de suelo representa un afloramiento de roca blanda. Esta clasificación es equivalente a un suelo tipo S1 de acuerdo a la norma sísmica peruana E-030.

2.8.2 Relaciones Empíricas de Atenuación del Movimiento Sísmico

La información disponible para caracterizar la atenuación del movimiento sísmico y respuesta espectral con la distancia y magnitud en esta región del Perú es escasa. Debido a esto, el análisis estuvo basado en relaciones empíricas de atenuación desarrolladas internacionalmente y en las recomendaciones de Arango (2010) respecto al uso de ecuaciones de predicción de movimiento sísmico en Sudamérica. Las relaciones de atenuación usadas en este estudio están disponibles en la literatura y fueron seleccionadas considerando que las condiciones tectónicas y geológicas de la zona central del Perú, sean similares a las regiones en donde las relaciones de atenuación fueron desarrolladas.

El cálculo del movimiento sísmico y las aceleraciones espectrales producidas por sismos de subducción fue realizado con base en las relaciones empíricas de atenuación desarrolladas por Zhao et al (2006), Youngs et al (1997), y McVerry et al (2006).

Para la atenuación del movimiento sísmico y aceleraciones espectrales proveniente de las fallas y de las fuentes sismogénicas de área, se utilizaron las relaciones de Atenuación de Próxima Generación (Next Generation Attenuation, NGA, de sus siglas en inglés) publicadas por el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), en el año 2008.

Las relaciones NGA son catalogadas hoy como exponentes del estado del arte, probadas, confirmadas y de aplicación en la práctica. A pesar que estas relaciones fueron desarrolladas para la Región Oeste de los Estados Unidos, éstas incorporan datos de movimientos sísmicos provenientes a partir de una gran base internacional de datos, y basada en la presunción que la liberación de esfuerzos en regiones de corteza superficial es similar a nivel mundial. Un ejemplo de esto es la relación de Abrahamson y Silva (2008) desarrollada con datos a partir de 2,754 registros de 135 sismos, de los cuales 62 sismos ocurrieron fuera de los Estados Unidos.

Para este estudio, se utilizaron las relaciones desarrolladas por Abrahamson y Silva (2008), Campbell y Bozorgnia (2008), Boore y Atkinson (2008) y Sadigh et al. (1997). Estas relaciones de atenuación estiman aceleraciones espectrales en función de la magnitud, distancia de la fuente al sitio, características de las fallas y la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m de la columna de suelo. La Tabla 2.5 resume las leyes de atenuación consideradas para las fuentes de subducción y las fuentes continentales.

2.8.3 Análisis Determinístico de Peligro Sísmico

El análisis de peligro sísmico determinístico está basado en el concepto del Sismo Máximo Creíble (SMC – MCE, de sus siglas en inglés). EL SMC es el sismo máximo que puede ocurrir a lo largo de una determinada falla o dentro de una provincia tectónica definida geográficamente, bajo un marco tectónico conocido o presumido (ICOLD, 1989).

En un análisis determinístico de peligro sísmico, el movimiento sísmico es evaluado para el SMC de cada fuente dentro de la zona o región de interés usando la distancia más cercana de la fuente al sitio. El SMC que produce el movimiento sísmico más grande en el sitio se denomina Sismo Máximo Creíble de Control (SMCc).

El análisis determinístico de peligro sísmico no ofrece información acerca del intervalo de recurrencia de los sismos, que pueden variar de menos de cien (100) años a más de diez mil (10000) años, dependiendo del entorno geológico en consideración. El análisis determinístico es limitado debido a que no puede estimar el periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia del movimiento sísmico, ni considera las incertidumbres (aleatorias y epistémicas) asociadas al fenómeno sísmico.

Los movimientos sísmicos calculados para las principales fuentes sísmicas se muestran en la Tabla 2.6. Los valores son para la mediana (percentil 50) y la media + 1 desviación estándar (percentil 84). Estos valores fueron calculados con base en el promedio ponderado geoméricamente de cada una de las tres (3) relaciones de atenuación para la zona de subducción y de las cuatro (4) relaciones de atenuación para la zona de corteza (fallas y fuentes de área).

2.8.4 Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico

El análisis probabilístico de peligro sísmico estima la probabilidad de que un parámetro sísmico (por ej. aceleración) sea excedido en un periodo determinado (generalmente se toma la vida útil de la instalación o estructura, en años). Esta probabilidad de excedencia es evaluada basada en intervalos de recurrencia sísmica, distancia del sitio a la fuente, y atenuación del movimiento sísmico con la distancia.

2.8.4.1 Metodología

La metodología de peligro sísmico usada para este estudio está basada en el procedimiento descrito por Cornell (1968) y McGuire (2004). Los cálculos de peligro sísmico fueron desarrollados usando el software EZ-FRISK v 7.62 de Risk Engineering (2012). La metodología incluye el cálculo de la frecuencia de excedencia de un parámetro sísmico en un determinado sitio. Específicamente, el análisis está basado en calcular la razón anual de eventos n , asociada con el parámetro sísmico de interés S_a , que exceda un nivel especificado z , en el sitio de análisis.

El análisis sísmico probabilístico se cuantifica por:

$$H(a) = \sum_i v_i \iint P[A > a|m, r] f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (2.2)$$

Donde el peligro $H(a)$ es la frecuencia anual de excedencia que produce un movimiento sísmico A mayor a a , donde A es un parámetro de interés como la aceleración máxima del terreno, velocidad, desplazamiento o aceleración espectral para un periodo determinado. La sumatoria se extiende para todas las fuentes sísmicas.

El parámetro v_i es la razón anual de sismos con una magnitud mayor o igual a una mínima magnitud, y $f_M(m)$ y $f_R(r)$ son funciones de densidad de probabilidad de la fuente i para una magnitud y distancia, respectivamente. $P[A > a|m, r]$ es la probabilidad de que un sismo de magnitud m y distancia r produzca un movimiento sísmico de amplitud A que sea mayor a a , del sitio de interés.

Las incertidumbres en las magnitudes máximas están representadas en los valores de v_i y $f_M(m)$, que están definidas por los modelos de recurrencia de las fuentes sísmicas. Las incertidumbres espaciales $f_R(r)$ están definidas por las dimensiones de cada fuente y sus distancias y orientaciones relativas al sitio.

En un análisis probabilístico de peligro sísmico, las incertidumbres temporales son comúnmente descritas por un modelo de Poisson en el cual los eventos de un proceso de Poisson (ocurrencia de sismos) se dan aleatoriamente, independiente de algún evento anterior. La probabilidad condicional de que un movimiento sísmico con intensidad "A" exceda la intensidad "a" durante un intervalo de tiempo t es calculada como:

$$P[A > a|m, r] = 1 - e^{-\lambda_m t} \quad (2.3)$$

donde λ_m es la razón anual de excedencia de un determinado nivel de movimiento sísmico con intensidad "a".

2.8.4.2 Incertidumbres

Dos (2) tipos de incertidumbres son generalmente consideradas en un análisis probabilístico de peligro sísmico (variabilidad aleatoria, e incertidumbre epistémica). La variabilidad aleatoria es la aleatoriedad natural en algún proceso debido a simplificaciones en el modelo de un proceso complejo. La variabilidad aleatoria es parametrizada a través de una función de densidad de probabilidades (Abrahamson, 2006). La incertidumbre epistémica es la incertidumbre científica en el modelo simplificado de un proceso y parametrizada por modelos alternativos (Abrahamson, 2006).

Los parámetros simplificados del modelo para las fuentes sísmicas incluyen la magnitud máxima, la razón de desplazamiento, la atenuación del movimiento sísmico y funciones de densidad de la magnitud sísmica.

La incertidumbre epistémica es usualmente tomada en cuenta utilizando la metodología de árboles lógicos. En este estudio, la incertidumbre epistémica fue considerada con respecto a los siguientes parámetros:

- Relaciones empíricas de atenuación: las ponderaciones consideradas para las relaciones de atenuación en la zona de subducción y en la zona de corteza superficial se muestran en la Tabla 2.5. Los pesos considerados toman en cuenta las recomendaciones dadas por Arango (2010)
- Magnitudes máximas de fallas sísmicas: El rango y las ponderaciones asignadas a las magnitudes máximas se muestran en las Tablas 2.3 y 2.4. A las magnitudes máximas más probables se les asignó una ponderación de 0.6; mientras que los límites superiores e inferiores de las máximas magnitudes, se les asignó una ponderación de 0.2.
- Razón de desplazamiento de fallas sísmicas, cuando fuera necesario: El rango y las ponderaciones asignadas a las razones de desplazamiento se muestran en las Tablas 2.3 y 2.4. A las razones de desplazamiento más probables se les asignó una ponderación de 0.6; mientras que los límites superiores e inferiores de desplazamiento se les asignó una ponderación de 0.2.

Tabla 2.5: Relaciones de Atenuación del Movimiento Sísmico Horizontal. Fuente propia.

Fuente Sísmica	Ecuación de Atenuación del Movimiento Sísmico	Ponderación
Zona de Interfaz	Zhao et al, (2006)	0,40
	Youngs et al, (para interplaca, 1997)	0,20
	McVerry et al, (2006)	0,40
Zona de Intraplaca Superior	Zhao et al, (2006)	0,40
	Youngs et al, (para intraplaca, 1997)	0,20
	McVerry et al, (2006)	0,40
Zona de Intraplaca Inferior	Zhao et al, (2006)	0,40
	Youngs et al, (para intraplaca, 1997)	0,20
	McVerry et al, (2006)	0,40
Fuentes de Corteza	Abrahamson y Silva (NGA, 2008)	0,25
	Boore y Atkinson (NGA, 2008)	0,25
	Campbell y Bozorgnia (NGA, 2008)	0,25
	Sadigh (NGA, 1997)	0,25

2.8.4.3 Desagregación del Peligro Sísmico Probabilístico

Las curvas de peligro sísmico incluyen el efecto combinado de las magnitudes y distancias de cada fuente asociados a la probabilidad de excedencia de un determinado movimiento sísmico. Al desagregar el peligro, es posible calcular la correspondiente fracción de contribución de diferentes escenarios sísmicos (magnitud y distancia) al peligro sísmico total. La desagregación identifica también las fuentes sísmicas que contribuyen al peligro sísmico del sitio (Abrahamson, 2006).

En este estudio, los resultados del análisis de desagregación están presentados en función de pares bidimensionales de magnitud y distancia. Los pares definen el rango en el que la contribución al peligro es calculada. Por ejemplo, un par unidimensional de Mw 5.0 a Mw 5.5 es la contribución al peligro de sismos con magnitudes entre Mw 5.0 y Mw 5.5. Bidimensionalmente, este par representa la contribución al peligro de sismos con una magnitud entre Mw 5.0 y Mw 5.5 ubicados (por ejemplo) de 0 a 5 km del sitio de análisis

2.8.5 Espectros de Diseño Sísmico

El diseño sísmico de presas de tierra considera la cuantificación de la demanda sísmica en el sitio de emplazamiento de la estructura mediante los espectros de diseño sísmico

La demanda que las estructuras puedan experimentar durante su vida útil debido a la ocurrencia de eventos sísmicos puede obtenerse de la forma y valores de los espectros de diseño obtenidos en base a los análisis de peligro sísmico específicos en el sitio de interés o según especificaciones dadas en los códigos de diseño sísmico (o combinación de ambas).

A continuación se presenta una descripción de los espectros de diseño considerados usualmente en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica en el ámbito del Perú e internacionalmente, y que serán los considerados en este estudio.

2.8.5.1 Espectros de Peligro Uniforme

Dentro del marco de la metodología de análisis de peligro sísmico probabilístico (Sección 2.8.4.1), al combinar los puntos correspondientes a los valores espectrales que presentan la misma probabilidad de excedencia, para valores de periodos espectrales discretos, se obtiene el espectro elástico de peligro uniforme (generalmente asociado al 5% de amortiguamiento), para una condición de suelo definida. Esta curva resulta a partir de la envolvente de valores espectrales, considerando la posibilidad de ocurrencia de sismos medianos cercanos al sitio, que producen movimientos con frecuencias altas, y sismos grandes con epicentros alejados del sitio, que impactan en la zona de estudio.

Estos espectros de diseño obtenidos para un periodo de retorno en particular, proveen parámetros de respuesta que pueden ser usados directamente en la estimación de las demandas sísmicas para el diseño de estructuras y son en algunos casos preferidos respecto a los espectros derivados de fijar una forma espectral al valor de la aceleración máxima (EERI, 1989). El procedimiento para la obtención de un espectro de peligro uniforme se esquematiza en la Figura 2.9

2.8.5.2 Espectros de Diseño Obtenidos a partir del SMCC

Considerando la metodología de análisis de peligro sísmico determinístico, y el hecho de que la forma espectral depende de la magnitud del SMCC y la distancia del mismo al sitio de interés, para distintos valores de periodos espectrales discretos, en algunos casos se considera la obtención de los espectros de diseño en función de la magnitud y distancia controlados por el SMCC para lo cual se usan ecuaciones de predicciones de movimientos compatibles con el marco tectónico del sitio de interés.

2.8.5.3 Espectro Medio Condicionado

Basados en el hecho de que un análisis dinámico busca predecir la respuesta de una estructura sometida a un movimiento sísmico (el cual es representado típicamente por un acelerograma de diseño) con una aceleración espectral comúnmente definida para un período determinado (típicamente el periodo fundamental de la estructura), Baker (2011) argumenta que el espectro de peligro uniforme usado con frecuencia como espectro de diseño, puede ser inadecuado en ciertas ocasiones, pues no es representativo de un movimiento sísmico en particular, si no por el contrario es una envolvente de las diferentes combinaciones de movimientos sísmicos (originados por eventos de campo cercano y lejano) que pueden ocurrir en el sitio de evaluación, para rangos de distancias y magnitudes. En este sentido, el espectro de peligro uniforme considera los valores espectrales correspondientes a la envolvente incluso para periodos alejados del periodo de interés o periodo fundamental de la estructura. Ahora, teniendo en cuenta que los acelerogramas de diseño se definen en base a los espectros de diseño, el espectro de peligro uniforme, de acuerdo a Baker (2011) podría no ser adecuado, en algunos casos, para la posterior generación de acelerogramas de diseño al no ser representativo de un movimiento sísmico si no ser una envolvente de la combinación de distintos movimientos sísmicos.

Por las razones expuestas en el párrafo anterior el trabajo de Baker y Cornell (2006), así como el trabajo de Baker (2011) plantean el espectro condicional (CS por sus siglas en inglés) como un espectro de diseño adecuado para la generación posterior de movimientos sísmicos de diseño.

El espectro condicional es un espectro de diseño que estima la distribución del espectro de respuesta (considerando la media y en algunos casos la desviación estándar), condicionado en la ocurrencia de un valor de aceleración espectral para un periodo discreto de vibración en particular (típicamente el periodo fundamental de la estructura). Cuando la desviación estándar no es considerada, el espectro se denomina espectro condicional medio (CMS, por sus siglas en ingles). De acuerdo a Baker (2011), este tipo de espectro es capaz de vincular la información sobre los resultados de un estudio de peligro sísmico probabilístico con la selección de movimientos sísmicos de diseño a ser usados con fines de análisis dinámicos.

A continuación se describen los pasos a seguir, de acuerdo a Baker (2011), para la obtención del espectro medio condicionado,

- Obtener la aceleración objetivo de diseño para el periodo de interés de la estructura, (mediante un análisis probabilístico de peligro sísmico) así como la magnitud y distancia asociadas para este periodo, mediante un análisis de desagregación.
- Usar ecuaciones de predicción de movimiento (conocidas en la literatura de años atrás como leyes de atenuación) para obtener el logaritmo de la media de las aceleraciones espectrales y de ser el caso, las desviaciones estándares asociadas, para el rango de periodos considerados.
- Para el rango de periodo de interés evaluar el parámetro ϵ (para cada periodo de vibración), definido como el número de desviaciones estándares que el logaritmo natural de la aceleración espectral difiere del logaritmo natural de la aceleración espectral obtenida mediante el uso de una ecuación de predicción de movimiento sísmico.
- Obtener el parámetro ϵ para el periodo de interés y obtener las aceleraciones espectrales medias condicionadas para otros periodos. Considerando para esto los

coeficientes de correlacione entre pares de épsilon para el periodo de interés y algún otro periodo, de acuerdo a la metodología propuesta por Baker y Jarayam (2008).El espectro definido de esta manera se denomina espectro medio condicionado.

2.8.5.4 Espectro de Diseño Definidos de Acuerdo a Códigos Sísmicos

La práctica ingeniería geotécnica sísmica considera además de los espectros definidos en las secciones anteriores espectros de diseño definidos en función de lo estipulado en los códigos sismoresistentes. Para efectos de este estudio, basados en la práctica de la ingeniería sísmica en Perú, los códigos considerados son la norma sismoresistente peruana (norma técnica E-030) y el Código Internacional de edificaciones (IBC por sus siglas ingles) del año 2009. Los procedimientos para la obtención de cada uno de estos espectros están definidos en las respectivas normas (NTP – E030, IBC 2009).

La norma técnica peruana considera tres zonas sísmicas, definiendo la forma y valores del espectro de diseño en función de la aceleración máxima para un periodo de retorno de 475 años (10 % de excedencia en 50 años de vida útil). La derivación de la forma espectral a partir de la aceleración máxima está basada en la metodología propuesta por Newmark y Hall (1982). El IBC 2009 considera la definición del espectro de diseño específico en función de las aceleraciones espectrales obtenidas de un análisis probabilístico de peligro sísmico de sitio para periodos espectrales de 0.2 seg. y 1.0 seg. considerando un periodo de retorno de 2475 años así como resultados del análisis determinístico para el sitio de interés.

2.9 RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.9.1 Análisis de Peligro Sísmico Determinístico

Los resultados del análisis de peligro sísmico determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo, se muestran en la Tabla 2.6. Los valores son para la mediana (percentil 50) y la media + 1 desviación estándar (percentil 84). Los resultados determinísticos se obtuvieron a partir del promedio geométrico de las aceleraciones máximas horizontales de terreno (PGA, de sus siglas en inglés, peak ground acceleration) obtenidas de aplicar las relaciones de atenuación empíricas definidas por Zhao et al (2006), Youngs et al (Interface e Intraplaca, 1997), y McVerry et al (2006) para sismos de subducción. Para las fuentes de corteza se usaron las relaciones de atenuación NGA de Abrahamson & Silva (2008), Boore y Atkinson (2008), Campbell y Borzognia (2008) y Sadigh et al. (2007).

La Tabla 2.6 indica que la fuente de intraplaca Inferior de Nazca provee la máxima aceleración PGA en el sitio, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad (g). Por lo tanto, un evento con Mw 8.0 en la fuente de intraplaca inferior a una distancia de 102 km es el evento de control determinístico, y el sismo máximo creíble de control (SMCc) en el sitio de la presa Yuracmayo.

Tabla 2.6: Resultados del Análisis Determinístico de Peligro Sísmico. Aceleración máx. horizontal de terreno (PGA -g-) - Suelo Clase B (IBC 2009) o S1 (E030, 2003). Fuente propia

Fuente Sísmica (Tipo) ¹	Distancia Aproximada más Cercana de la Fuente al Sitio ² (km)	Magnitud Maxima - MCE ³ (M)	Aceleración Máxima para la Mediana ⁴ (g)	Aceleración Máxima para el percentil 84 ⁴ (g)
F1-Interfaz (R)	150	9.2	0.10	0.18
F2-Intraplaca Superior (N)	130	8.0	0.13	0.26
F3-Intraplaca Inferior (N) - SMC	102	8.0	0.23	0.42
Falla Cayesh	90	6.7	<0.05	0.09
Falla Huaytapallana (N)	95	6.8	<0.05	0.07
Falla Cordillera Blanca.A (N)	360	7.2	<0.05	<0.05
Falla Cordillera Blanca. B (N)	294	7.3	<0.05	<0.05
Falla Cordillera Blanca. C (N)	240	7.1	<0.05	<0.05
Falla Cordillera Blanca. D (N)	205	7.0	<0.05	<0.05

Notas:

¹ Las Fallas sísmicas fueron obtenidas de la literatura disponible, datos y mapas. El número de falla identifica la falla en las Figuras 2.1, 2.3 y 2.4. El tipo de falla es: N = falla con desplazamiento normal; R = falla con desplazamiento reverso/inverso.

² La distancia más cercana de las fuentes al sitio fue escalada de las Figuras 2.1 para las fuentes de corteza, y medidas de la sección transversal (Figura 2.5) para la zona de subducción. Para las fuentes de subducción, R_{rup} o D_{fault} = la distancia más cercana a la falla.

³ La magnitud máxima seleccionada del intervalo potencial de cada fuente. **M** = magnitud momento.

⁴ Los valores fueron calculados como el promedio geométrico. Las ponderaciones para la zona de interfase son: Zhao (0,40), Youngs (0,20), McVerry (0,40). Las ponderaciones para la zona de intraplaca son: Zhao (0,4), Youngs (0,2), McVerry (0,4). Las ponderaciones para la zona de corteza son 0,25 para cada relación de atenuación.

2.9.2 Curvas de Peligro Sísmico Probabilístico

La Figura 2.10 muestra las curvas probabilísticas de peligro sísmico para la aceleración máxima y aceleraciones espectrales de 0.2 seg y 1.0 seg. con 5% de amortiguamiento para un suelo tipo B (2009-IBC) o S1 (Norma técnica peruana). Dichas curvas están definidas como valores promedio para periodos de retorno entre 10 y 10,000 años. La interpolación de las curvas mostradas en la Figura 2.10 para un periodo de retorno de 475 años (probabilidad de excedencia de 0,002) indica que la aceleración máxima horizontal de terreno (PGA) y las aceleraciones espectrales para periodos de 0,2 s y 1,0 s son 0,28 g, 0.69 g y 0,25 g, respectivamente.

2.9.3 Desagregación del Peligro Sísmico por Fuentes Sísmicas

Las Figuras 2.11, 2.12 y 2.13 muestran las contribuciones de cada fuente en forma individual a las curvas promedio de peligro sísmico representadas por aceleraciones espectrales con 5% de amortiguamiento correspondientes a la aceleración máxima (PGA), y para periodos espectrales de 0.2 seg y de 1.0 seg. El análisis de desagregación indica que, para periodos correspondientes al PGA y a 0.2 seg. las fuentes principales que

contribuyen mayormente a los valores de aceleración máxima en área de la presa Yuracmayo lo constituyen los mecanismos de subducción de intraplaca superior e inferior de la placa de Nazca.

Se observa también que los sismos generados en la zona de interfaz y de la intraplaca superior de la placa de Nazca presentan una mayor contribución a los valores de ordenadas espectrales para un periodo de vibración de 1.0 segundo, producto de la mayor distancia entre el sitio de la presa Yuracmayo y las ubicaciones epicentrales de eventos asociados a dichas fuentes sismogénicas.

Por otro lado, la contribución de las fallas corticales locales y regionales incluidas en el análisis resulta mínima, desde el punto de vista probabilístico, en comparación a la contribución de los sismos que se producen por la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana. Estos resultados son los esperados ya que las magnitudes potenciales asociadas a dichas fuentes corticales y razones de desplazamiento anuales son menores a las provenientes del mecanismo de subducción.

2.9.4 Desagregación del Peligro Sísmico por Magnitud y Distancia

Los resultados del análisis de desagregación por magnitud, -distancia para el sitio de la presa Yuracmayo se muestran en las Figuras 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17. Los resultados son para la aceleración máxima de terreno (PGA) asociado a un periodo de retorno de 475 años, y ordenadas espectrales correspondientes a aceleración máxima de terreno (PGA), 0.2 segundos y 1.0 segundos asociados a un periodo de retorno de 2,475 años.

Los análisis efectuados para un periodo de retorno de 475 años, considerando la aceleración máxima en terreno (PGA) indican que en promedio, el mayor contribuyente al peligro sísmico está definido por sismos con magnitudes moderadas a elevadas (Mw 6.5 a Mw 8.0) a distancias que fluctúan entre 100 km a 150 km del sitio. Probablemente, esto se corresponde con sismos generados en la intraplaca superior e inferior de la placa de Nazca. Se observa también una menor contribución de aquellos sismos con magnitudes muy elevadas (Mw 8.5 a Mw 9.0) asociados a eventos en la zona de interfaz cercanos a la fosa Perú-Chile.

Para un periodo de retorno de 2475 años, y considerando periodos espectrales relacionados con la aceleración máxima de terreno (PGA) y para 0.2 s, el mayor contribuyente al peligro sísmico está definido por sismos con magnitudes en el rango (Mw 7.0 a Mw 8.5) a distancias que fluctúan entre 100 y 150 km, claramente asociados con sismos generados en la intraplaca superior e inferior de la placa de Nazca.

Para periodos de vibración más largos (por ej. 1.0 seg) la fuente sísmica dominante está visiblemente definida por la contribución de sismos con magnitudes muy elevadas relacionados con eventos de interfaz (Mw 8.0 a Mw 9.5), emplazada a distancias superiores a los 150 km del sitio de la presa Yuracmayo.

Los resultados de desagregación para periodos de vibración (PGA 0.2 seg y 1.0 seg) asociados a periodos de retorno de 475 años y 2,475 años se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Análisis de Desagregación, Sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

Período (Seg.)	Periodo de Retorno = 475 Años				Periodo de Retorno = 2475 Años			
	Magnitud ¹		Distancia (km) ¹		Magnitud ¹		Distancia (km) ¹	
	Moda	Prom.	Moda	Prom.	Moda	Prom.	Moda	Prom.
PGA	7.75	7.41	112.50	128.30	7.75	7.62	112.50	120.40
0.2	7.75	7.48	112.50	127.00	7.75	7.68	112.50	119.60
1.0	8.75	8.75	162.50	168.00	8.75	8.79	162.50	166.00

Notas:

¹ Los valores son para las fuentes con mayor contribución al peligro (para el PGA y periodo espectral de 0.2 se.g. es la fuente de intraplaca inferior. Para el periodo espectral de 1.0 seg es la fuente de interfaz)

² El parámetro épsilon (definición en la sección 2.8.5.3) obtenido del análisis de desagregación presenta un valor modal de 0.70 y un valor promedio de 0.90 para un periodo de retorno de 475 años y periodo discreto de vibración de 1.0 seg..

2.9.5 Comparación con Estudios Regionales

Estudios de peligro sísmico regionales para todo el Perú fueron desarrollados principalmente en los trabajos de Castillo y Alva (1993), Monroy et al (2006) y Gamarra (2010). Estos trabajos presentan valores para roca o suelo Clase B (IBC, 2009) y Tipo S1 según la Norma Sísmica Peruana E-030 a excepción del trabajo de Gamarra (2010) que fue desarrollado para suelo de clasificación tipo D según el código IBC (2009). En la Tabla 2.8, se muestra los resultados obtenidos a partir del presente estudio y los resultados de estudios regionales. El presente estudio específico de sitio, indica valores de aceleraciones espectrales para un periodo de retorno de 475 años y para la aceleración máxima horizontal de terreno (PGA) correspondientes con la cota superior del estudio desarrollado por Monroy et al (2006) y cercanos a la cota inferior del estudio desarrollado por Castillo y Alva (1993). Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio para la aceleración máxima de terreno (PGA) y ordenadas espectrales para 475 años de periodo de retorno son menores que aquellos definidos por Gamarra (2010) debido a que las ecuaciones de predicción o leyes de atenuación de dicho estudio fueron representativas de condiciones de suelo tipo D (el presente estudio considera un suelo tipo B según IBC – 2009).

Tabla 2.8: Análisis Probabilístico – Sismo Base de Diseño (SBD) para 475 años. Fuente propia

Estudios de Peligro Sísmico	Aceleración Máxima Horizontal (PGA) (g)	Ordenadas Espectrales, T _n = 0.2 s(g)	Ordenadas Espectrales, T _n = 1.0 s(g)
Castillo y Alva (1993)	0.28 – 0.30	-	-
Monroy et al, (2006)	0.26 – 0.28	0.58 – 0.63	0.25 – 0.27
Gamarra (2010)	0.34 -0.36		
Este Estudio	0.28	0.69	0.25

2.9.6 Espectros de Diseño Sísmico

En esta sección se presentan los espectros de diseño que serán considerados para efectos del presente estudio. Estos espectros fueron evaluados en base a los análisis de peligro sísmico probabilísticos y determinísticos presentados en secciones anteriores y a las estipulaciones de los códigos sísmicos, donde fuera necesario. A continuación se describen los espectros considerados.

2.9.6.1 Espectros de Peligro Uniforme

Los espectros de peligro sísmico uniforme promedio con 5% de amortiguamiento para periodos de retorno específicos de 475, 975 y 2,475 años para un suelo tipo B (IBC) o S1 (Norma Técnica Peruana) y en función de periodos estructurales que van desde PGA (0.01s) a 4.0 segundos, se muestra en la Figura 2.18. La aceleración espectral para un periodo de 0.01 segundos es esencialmente equivalente a la aceleración máxima de terreno, PGA. El término peligro uniforme se usa debido a que existe una probabilidad de excedencia de movimientos sísmicos igual a lo largo de todos los periodos (Abrahamson, 2006). La Figura 2.18 muestra que la aceleración espectral máxima ocurre a un periodo de 0.2 segundos para los tres (3) espectros de peligro uniforme.

En la Tabla 2.9 se muestra los valores de las ordenadas espectrales con 5% de amortiguamiento del espectro de peligro uniforme promedio asociado a las aceleraciones horizontales para un periodo de retorno de 475 años (sismo base de diseño SBD), 975 y 2,475 años.

Tabla 2.9: Valores del Espectro de Respuesta de peligro uniforme para el sitio de la presa Yuracmayo Suelo Tipo S1 (Norma Peruana E-030). Fuente propia.

Periodo Estructural (segundos)	Ordenadas Espectrales con 5% de Amortiguamiento (g)		
	SBD (475 años)	975 años	2,475 años
Acel. Max.	0.28	0.37	0.53
0.05	0.39	0.54	0.82
0.1	0.61	0.89	1.30
0.2	0.69	0.96	$S_s = 1.40$
0.3	0.56	0.75	1.16
0.4	0.47	0.64	0.90
0.5	0.40	0.54	0.74
0.75	0.29	0.39	0.53
1.0	0.25	0.31	$S_1 = 0.42$
2.0	0.15	0.19	0.25
3.0	0.07	0.10	0.16
4.0	0.05	0.07	0.09

2.9.6.2 Espectros de Diseño Evaluados para el SMCc

La Figura 2.19 muestra los valores de aceleraciones horizontales con 5% de amortiguamiento, generados por el SMCc en el sitio de la presa Yuracmayo, tanto para el percentil 84 (P.84) como para los valores correspondientes a la mediana o al percentil 50 (P.50). El espectro correspondiente al P.84 será considerado como el espectro de diseño para el SMCc.

2.9.6.3 Espectro Medio Condicionado

El espectro medio condicionado (CMS) para el sitio de la presa Yuracmayo ha sido construido en función del espectro de peligro uniforme con periodo de retorno de 475, este periodo de retorno es concordante con lo estipulado en la reglamentación actual para presas de tierra en el Perú (guías ambientales MEM, 1997), y será considerado en este estudio con la finalidad de buscar una respuesta sísmica menos conservadora a del espectro de peligro uniforme en la presa Yuracmayo (considerando que el espectro de peligro uniforme es una envolvente de un conjunto de eventos sísmicos), cuando los análisis dinámicos sean realizados.

El CMS ha sido construido para un rango de periodos de vibración estructural entre 0.75 segundos y 1.25 segundos, intervalo que comprende al periodo fundamental de vibración de la presa Yuracmayo (con periodo fundamental de 1.0 seg.). La Figura 2.20 muestra el CMS construido para el sitio de la presa Yuracmayo junto con los valores correspondientes a la adición y sustracción de una desviación estandar. El CMS fue construido de acuerdo a la metodología descrita en la sección 2.8.5.3 con los valores del parámetro épsilon referenciados en la Tabla 2.7 y un escenario sísmico correspondiente a un sismo con magnitud **M** 8.8 y una distancia a la ruptura de 165.0 km. El escenario sísmico se obtuvo del análisis de desagregación mostrado en la misma tabla.

2.9.6.4 Espectros de Diseño NTP E-030 y IBC 2009

El espectro correspondiente a la Norma Técnica Peruana E -030, fue obtenido de acuerdo a los lineamientos establecidos en dicha norma y considerando que el sitio de la presa Yuracmayo se encuentra en la zona 3 y considerando condiciones de suelo tipo S1. El espectro de diseño específico de sitio, de acuerdo al código internacional IBC 2009, fue evaluado en base a los resultados de los análisis de peligro sísmico probabilístico y determinístico de acuerdo a los procedimientos establecidos en el IBC 2009. La Figura 2.21 muestra el espectro de diseño genérico y el espectro de diseño específico de sitio evaluado según el código IBC 2009 junto con el espectro obtenido de acuerdo a la NTP E 030, mostrándose adicionalmente los espectros de peligro uniforme y determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo.

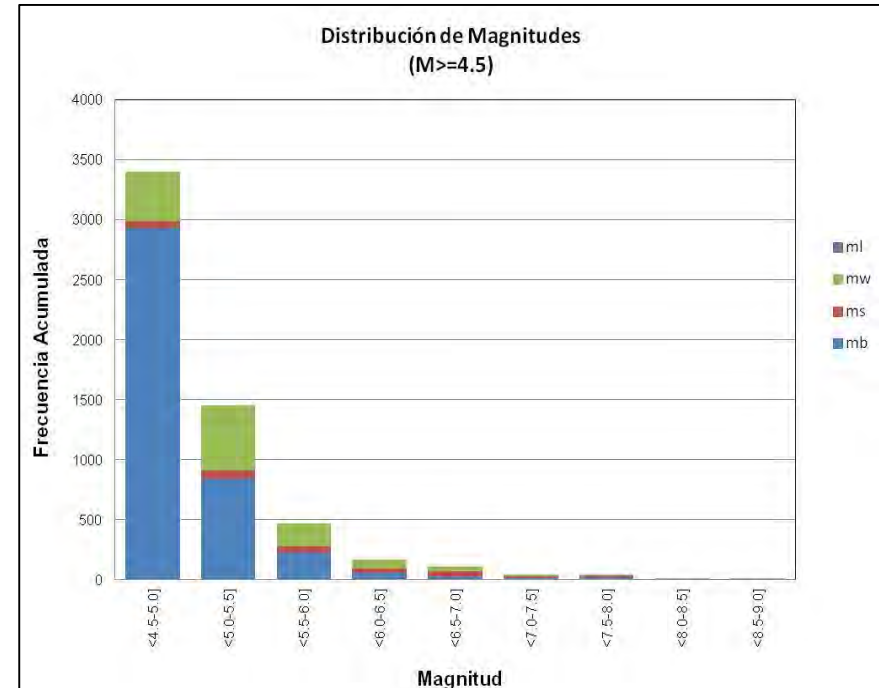
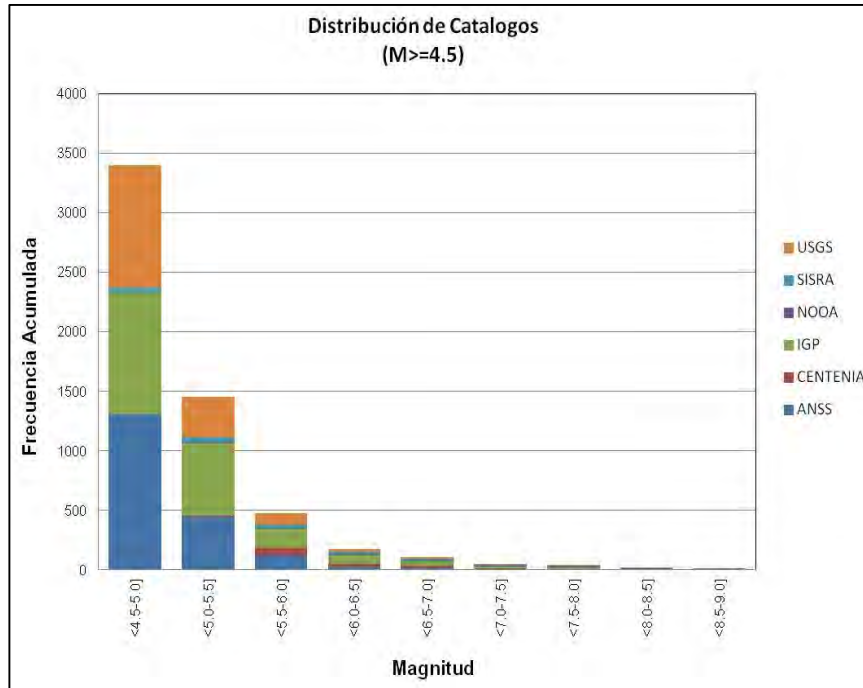


Figura. 2.6: Distribución de sismos para el catalogo sísmico del proyecto (sin depurar) - Izquierda: respecto a agencias sísmicas; Derecha: respecto a tipo de magnitudes. Fuente propia.

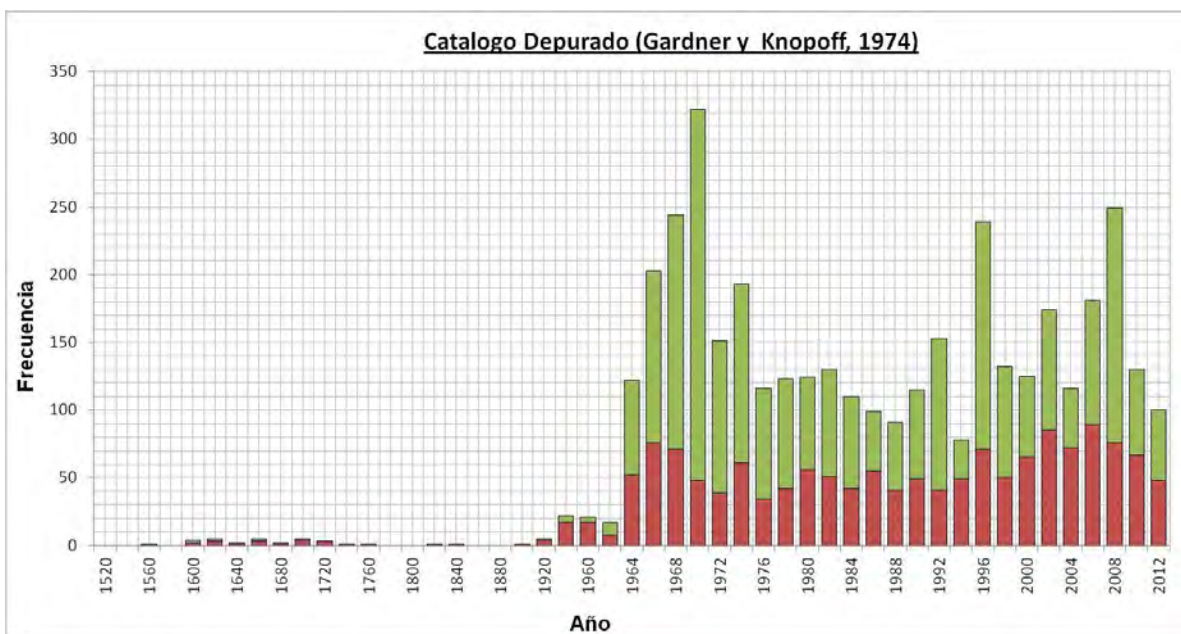
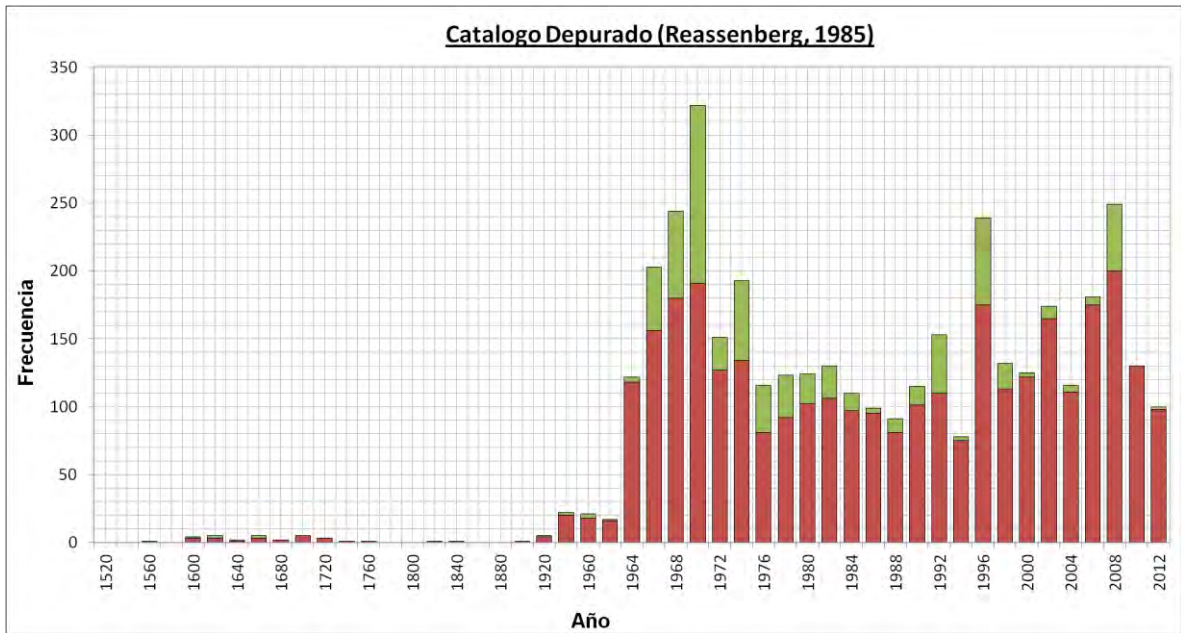


Figura 2.7 Distribución de sismos con respecto al tiempo en el catalogo del proyecto. Superior: Catalogo depurado según el algoritmo de Reassenberg. Inferior: Catalogo depurado según el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974). Fuente propia.

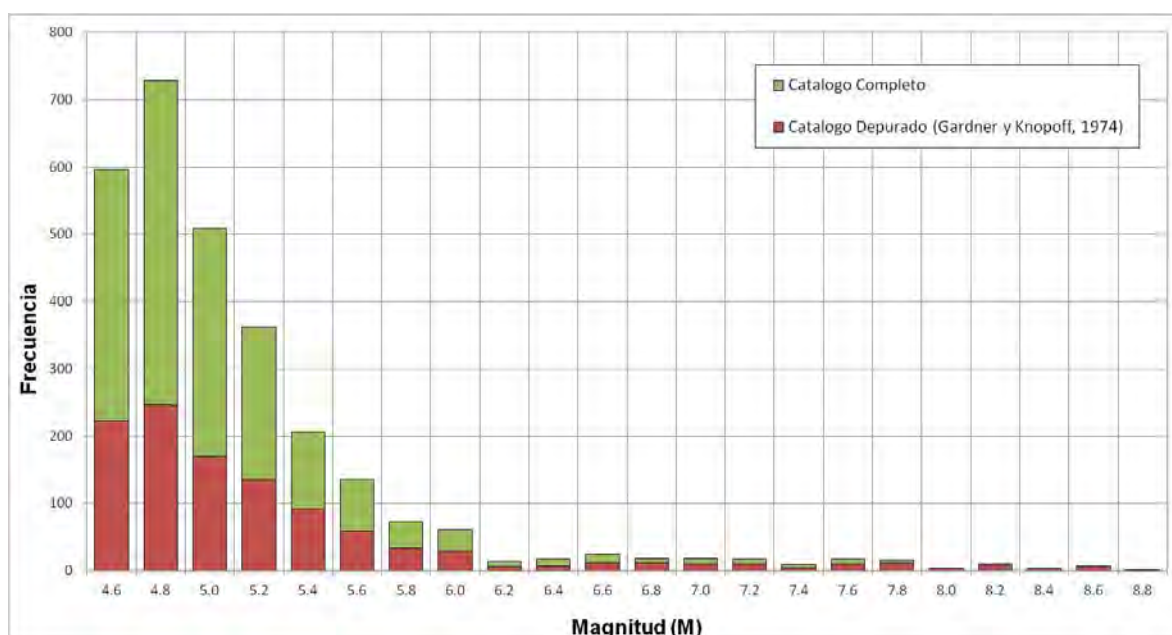
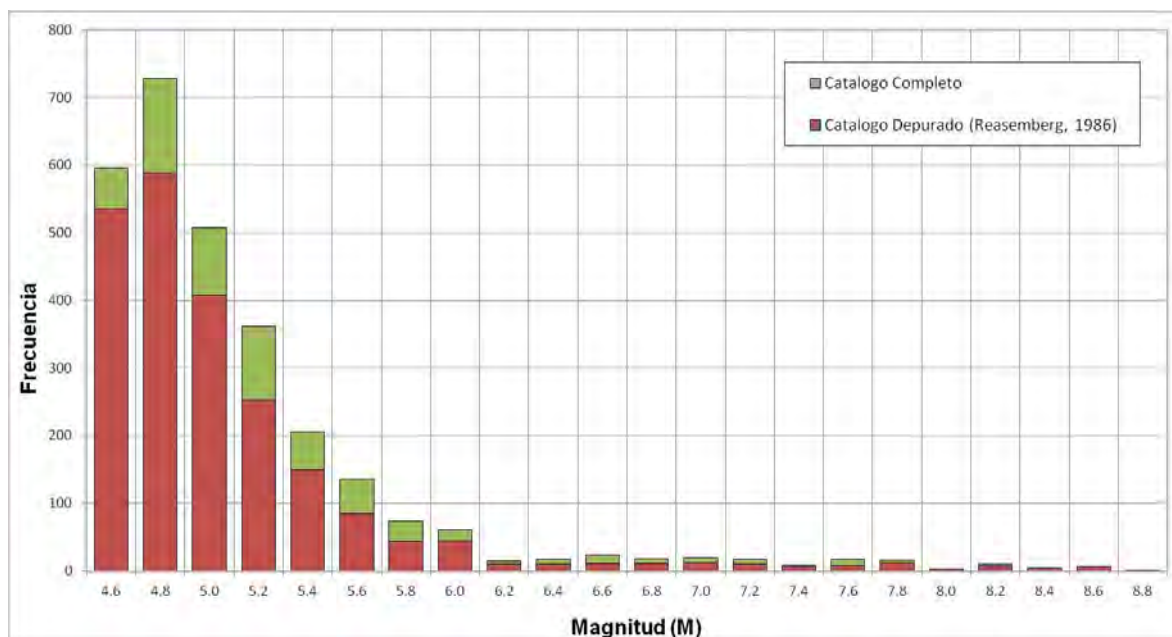


Figura 2.8 Distribución de sismos con respecto a magnitudes en el catalogo del proyecto. Superior: Catalogo depurado según el algoritmo de Reassenberg. Inferior: Catalogo depurado según el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974). Fuente propia.

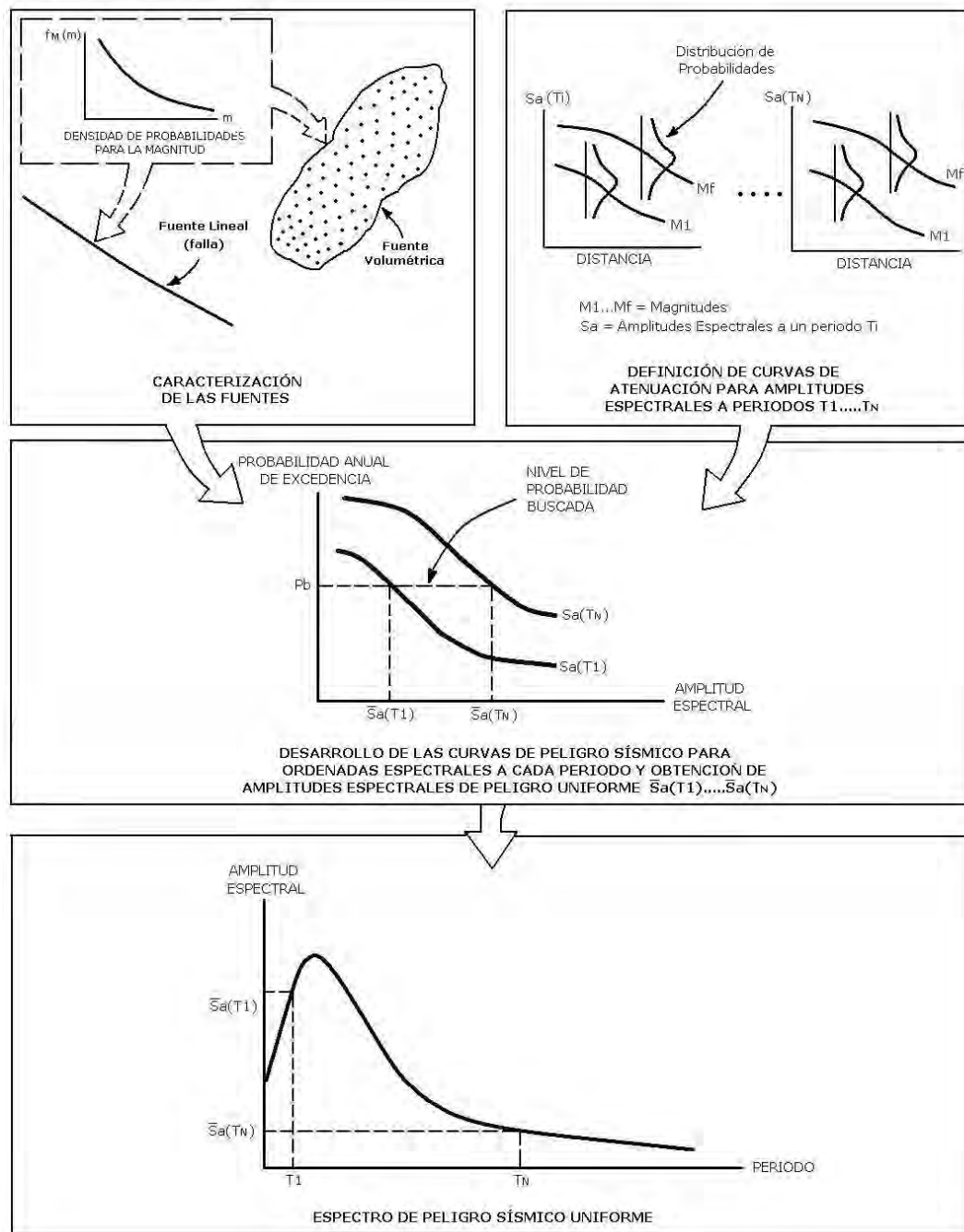


Figura 2.9 Procedimiento para la obtención del espectro de peligro sísmico uniforme. (Abrahamson, 2006).

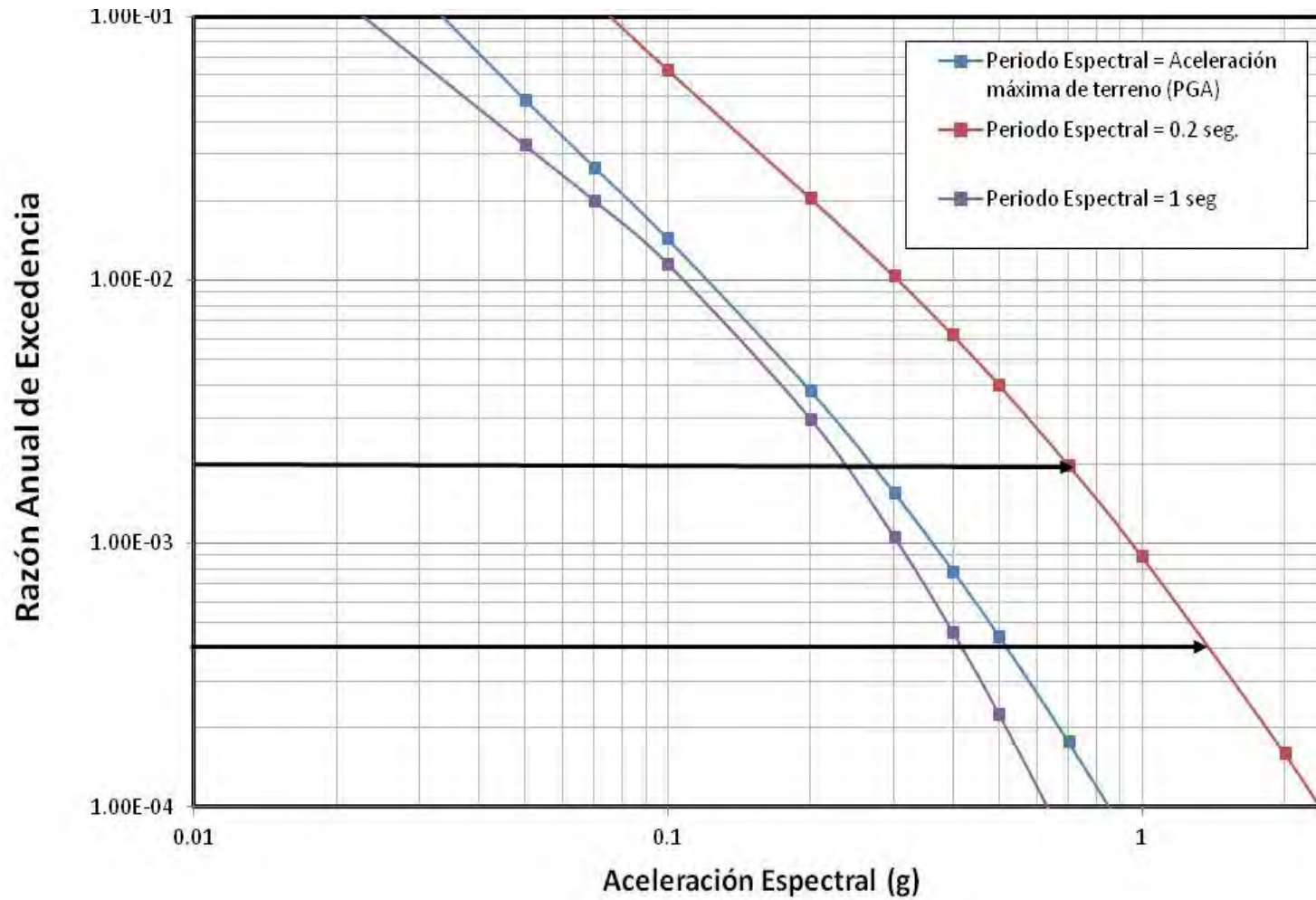


Figura 2.10 Curvas de peligro sísmico uniforme con 5% de amortiguamiento para periodos espectrales discretos / valores medios - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

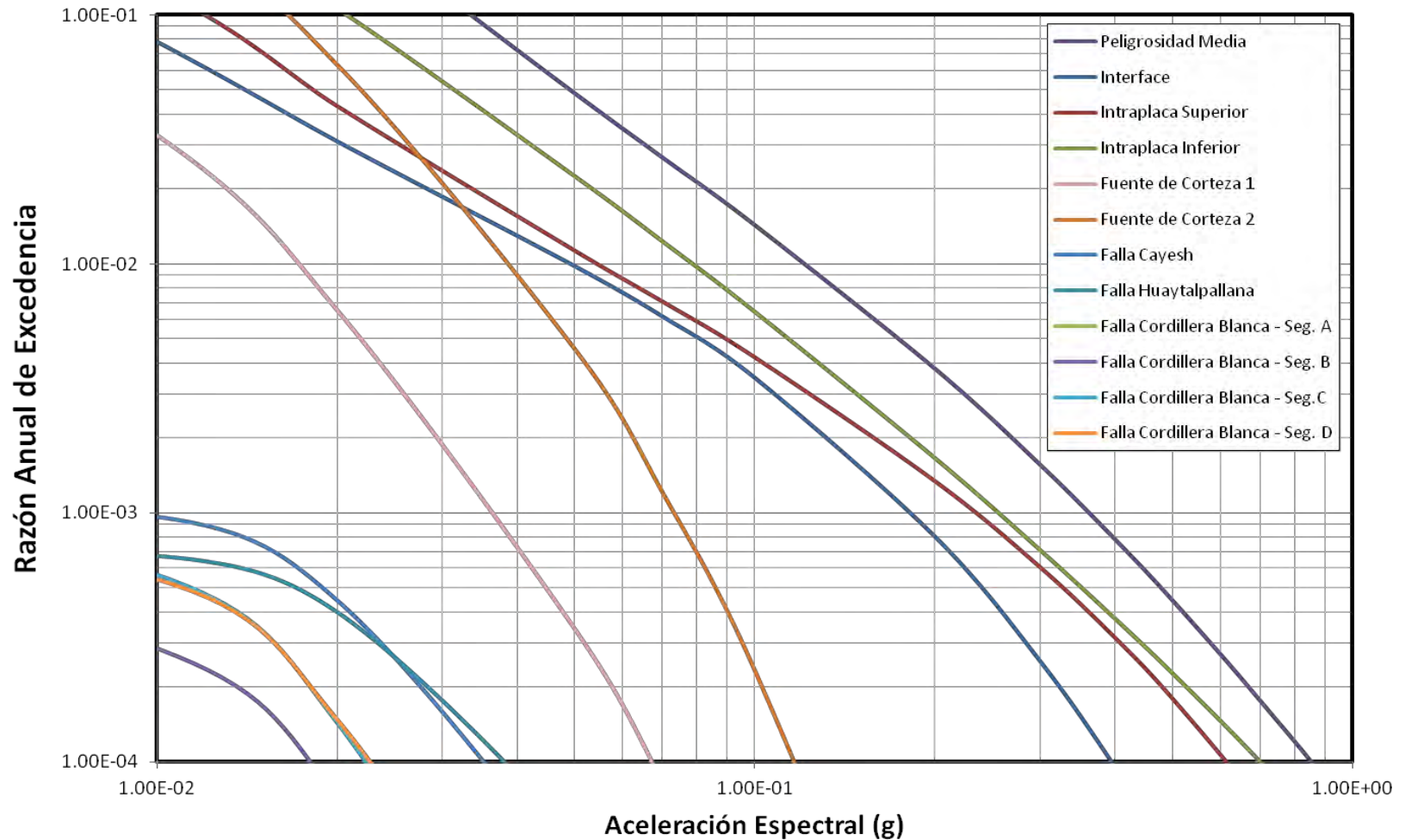


Figura 2.11 Contribución de fuentes sismogénicas a la curva uniforme de peligro sísmico correspondiente a la aceleración máxima horizontal de terreno (pga) con 5% de amortiguamiento - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente Propia.

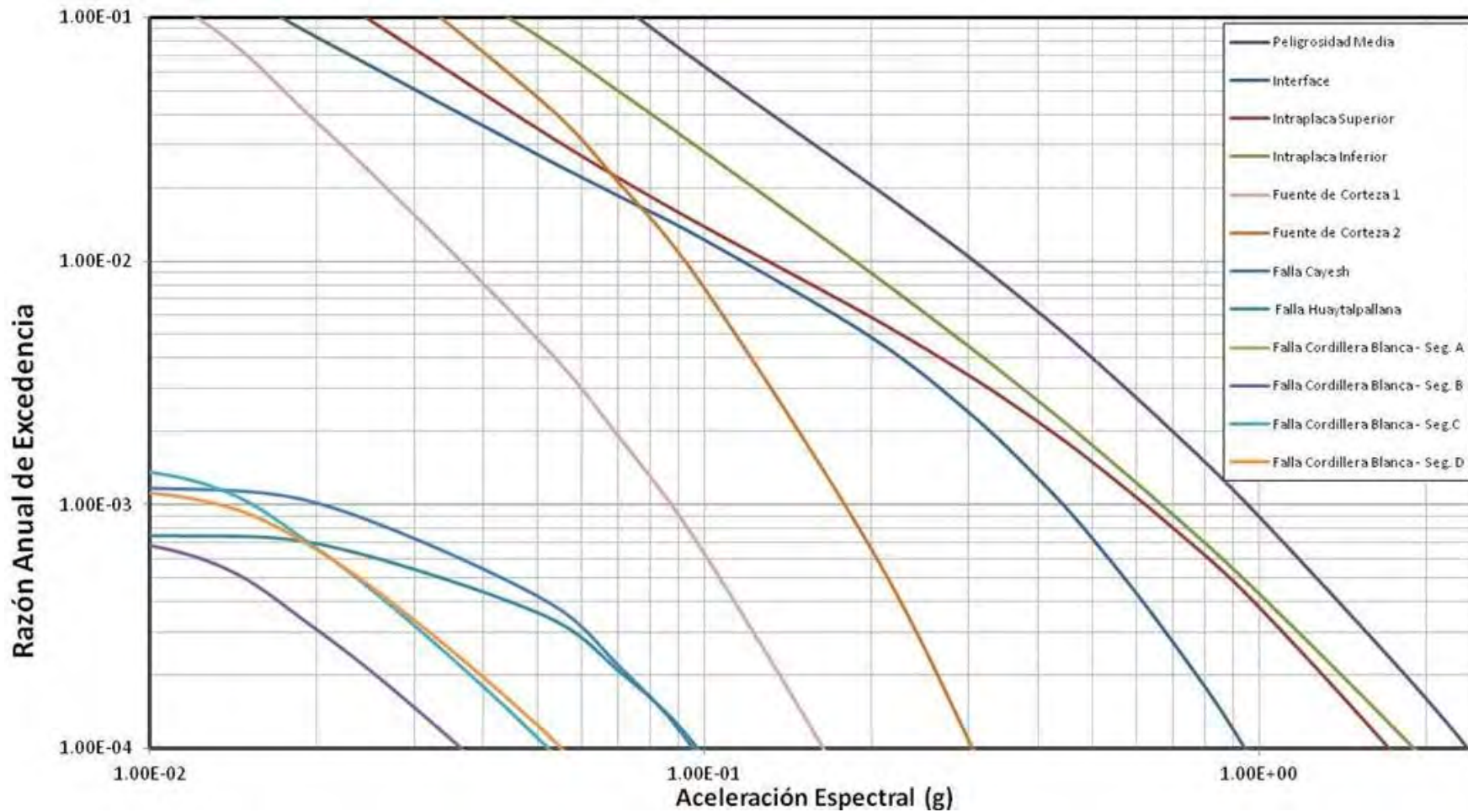


Figura 2.12 Contribución de fuentes sismogénicas a la curva uniforme de peligro sísmico correspondiente a un periodo espectral de 0,20seg con 5% de amortiguamiento - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

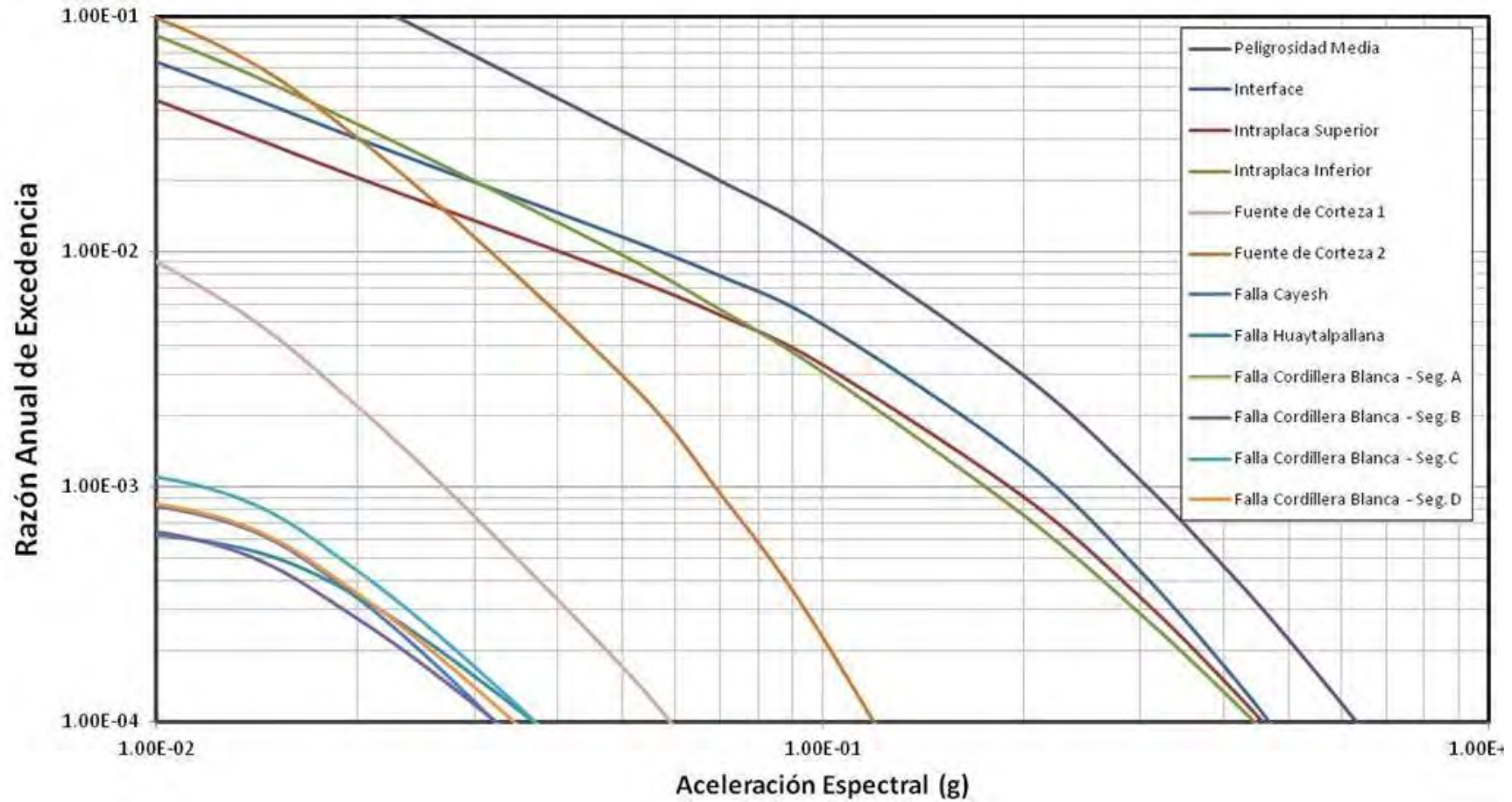


Figura 2.13 Contribución de fuentes sismogénicas a la curva uniforme de peligro sísmico correspondiente a un periodo espectral de 1,00seg con 5% de amortiguamiento - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

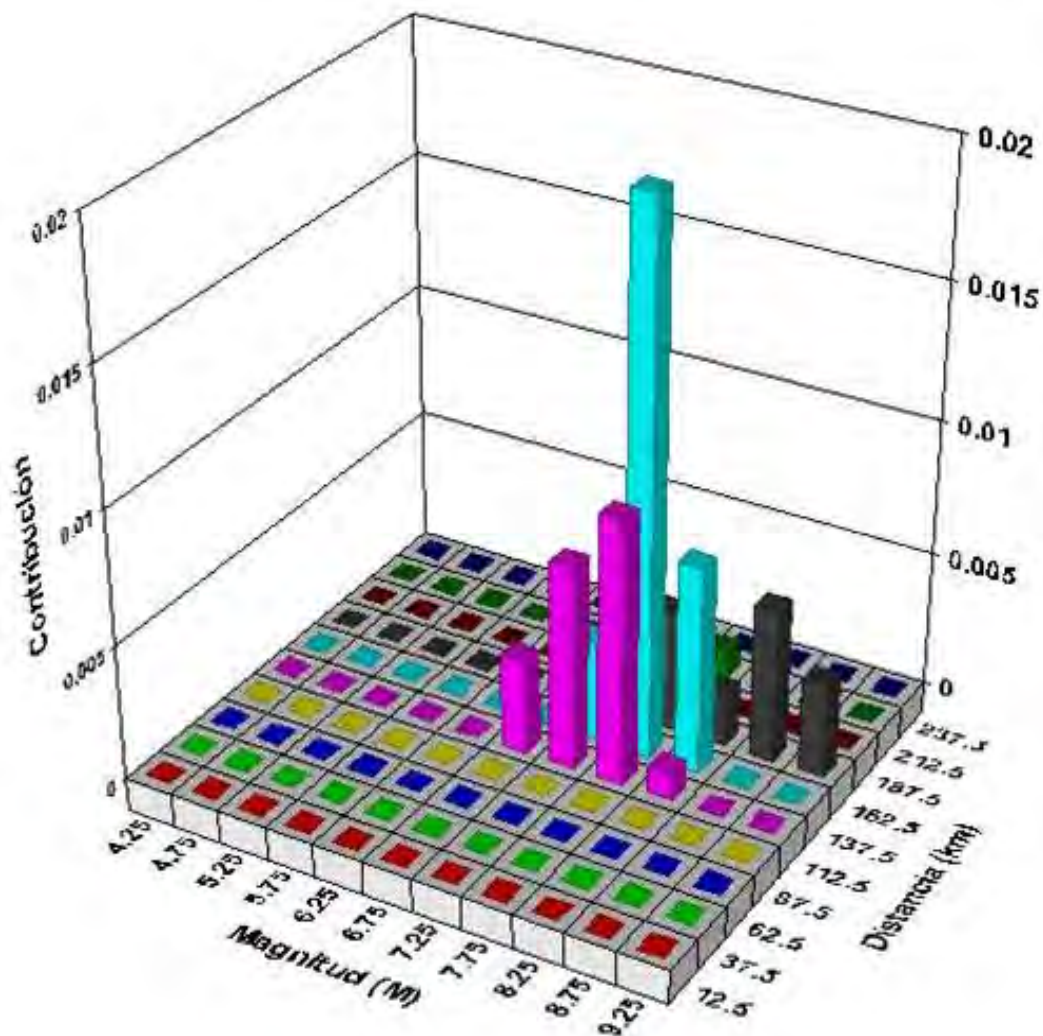


Figura 2.14 Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 475 años y aceleración máxima horizontal - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

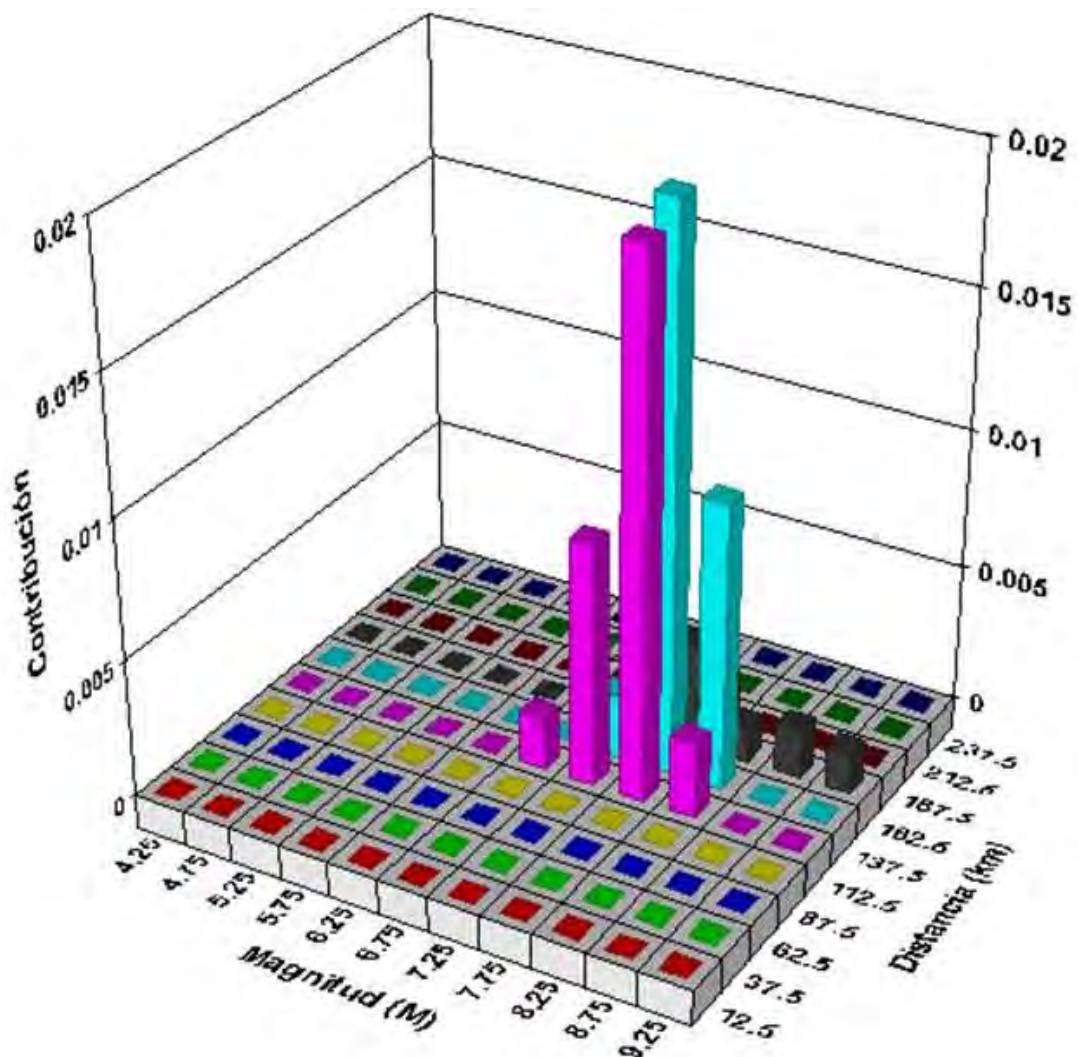


Figura 2.15 Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 2475 años y aceleración máxima horizontal- sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

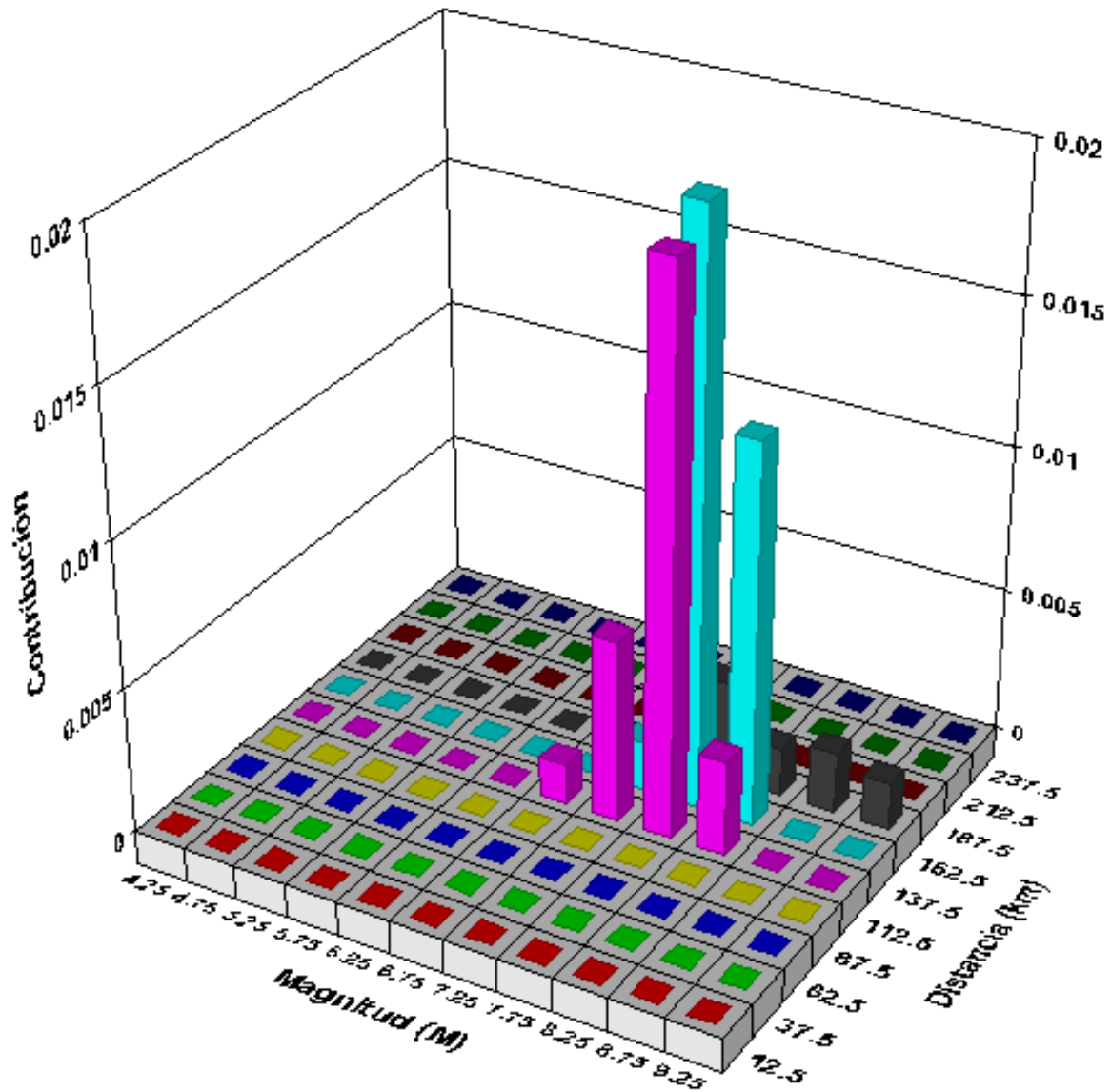


Figura 2.16 Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 2475 años y periodo espectral 0,20seg - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

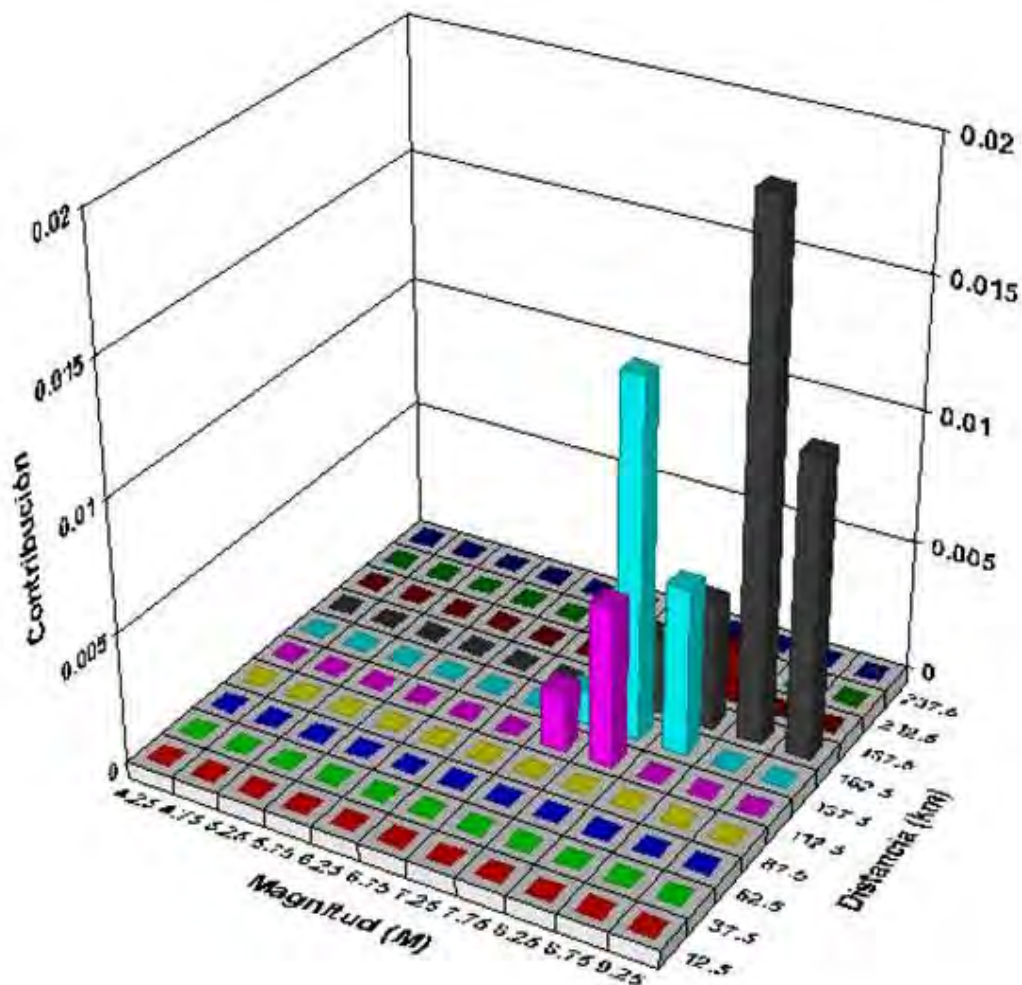


Figura 2.17 Desagregación del modelo de análisis probabilístico de peligro sísmico para un periodo de retorno de 2475 años y periodo espectral 1,00seg - sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia

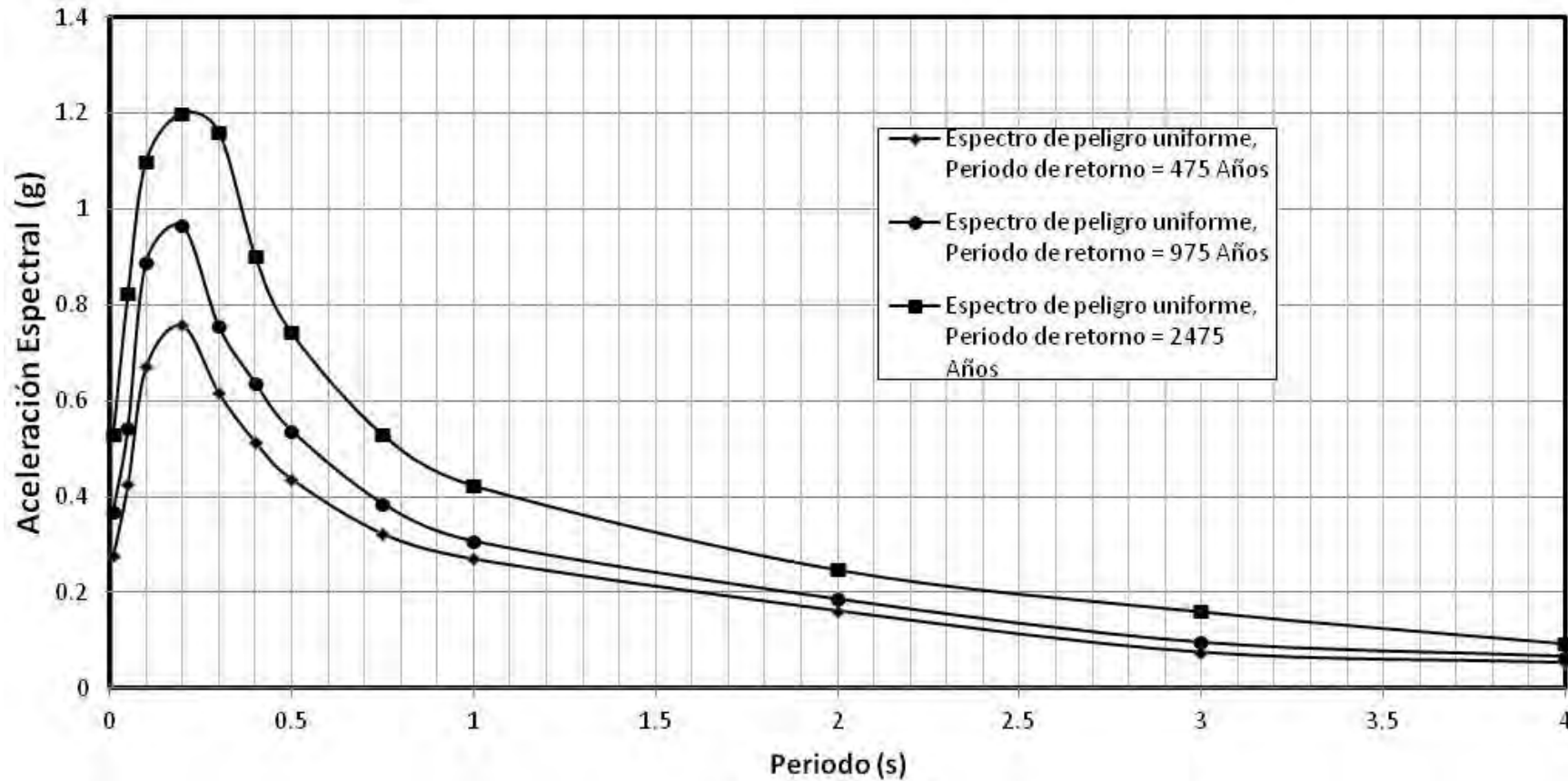


Figura 2.18 Espectro de peligro uniforme promedio para el sitio de la presa Yuracmayo- 5% amortiguamiento períodos de retorno de 475, 975 y 2,475 años. Fuente propia.

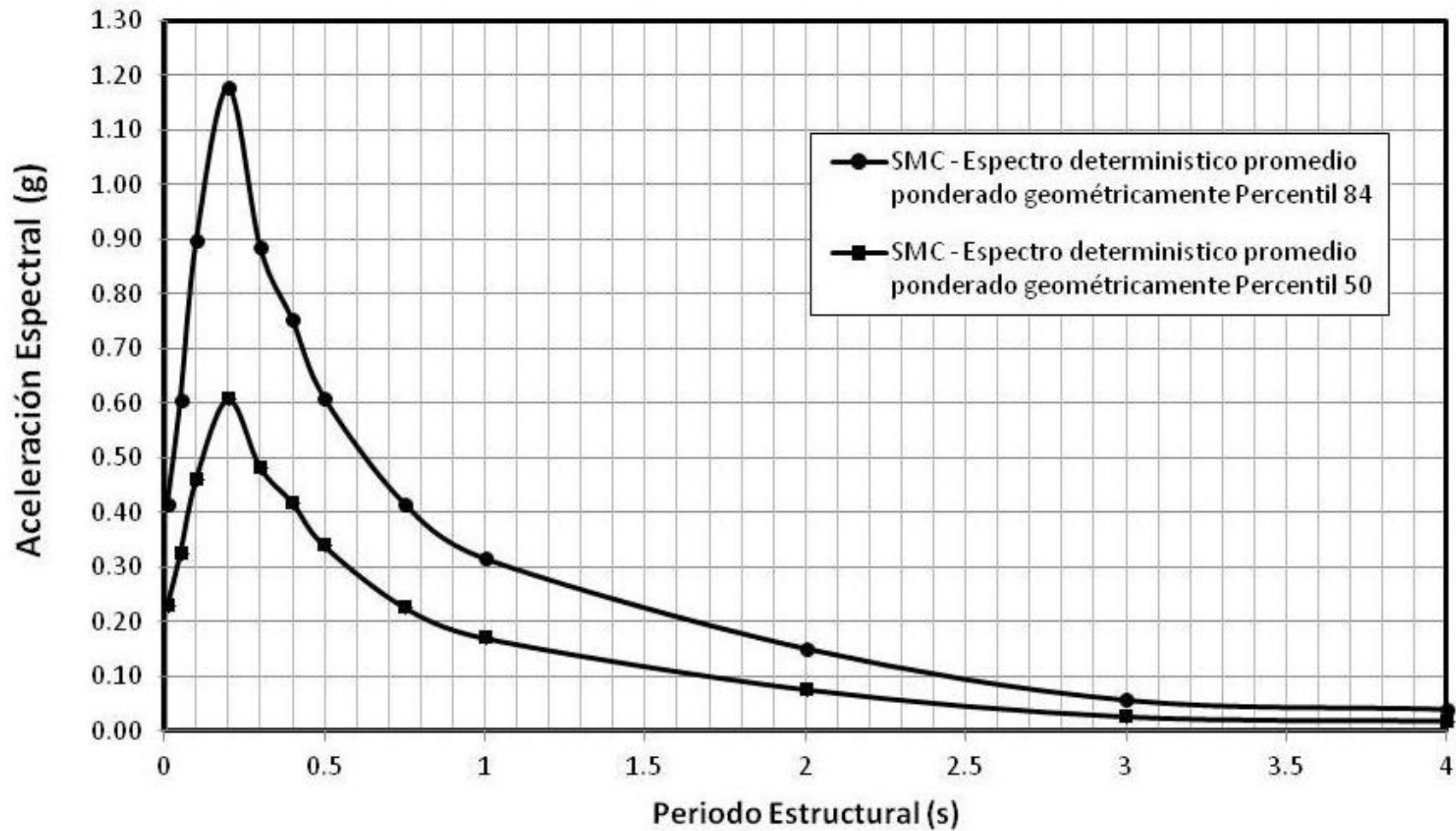


Figura 2.19 Espectro de diseño determinístico de respuesta sísmica para afloramiento rocoso (Suelo tipo B) en el sitio de la presa Yuracmayo.
Fuente propia

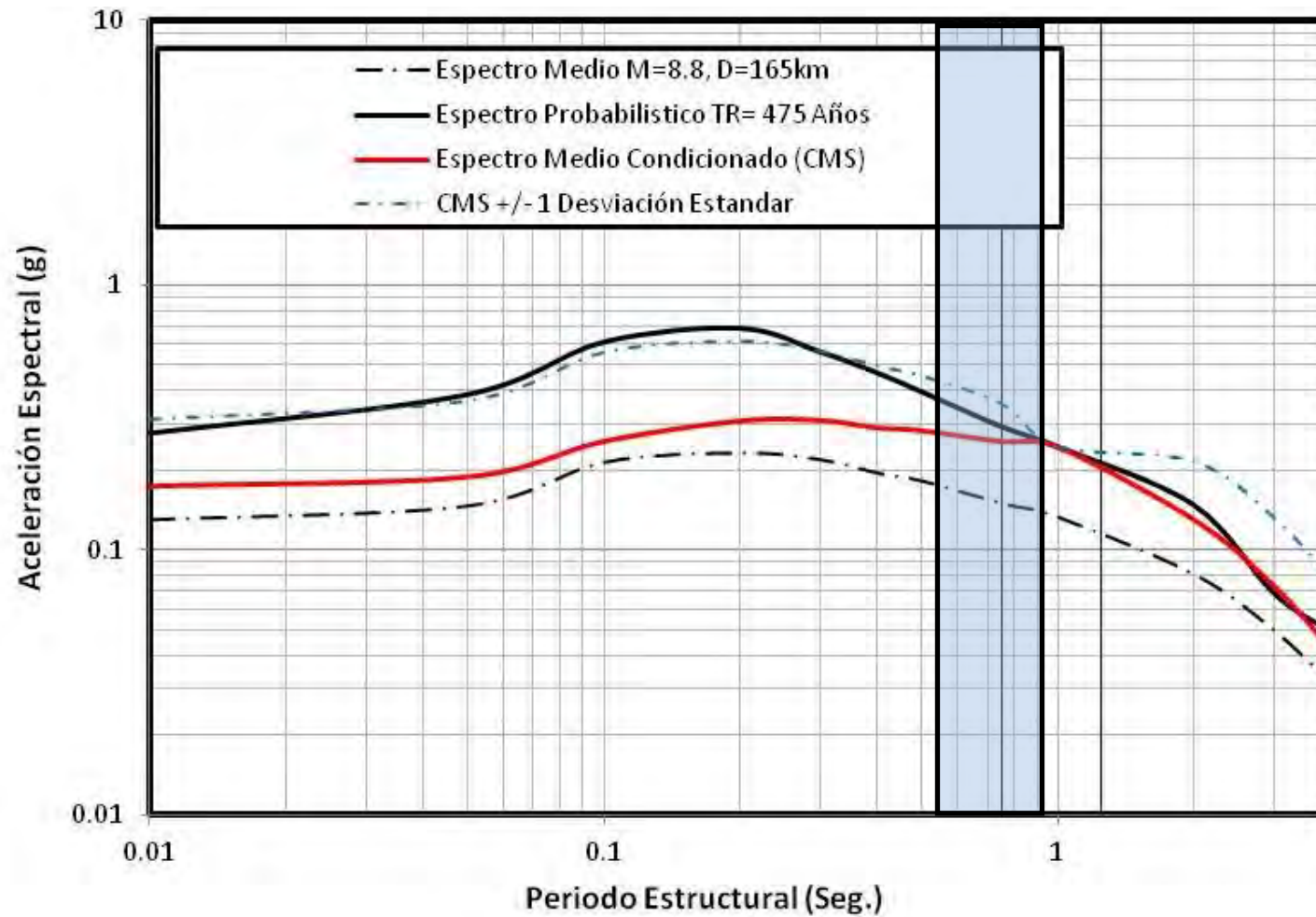


Figura 2.20 Espectro de diseño medio condicionado para el sitio de la presa Yuracmayo junto con las desviaciones estándares asociadas. La región achurada corresponde al rango de periodos de interés para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

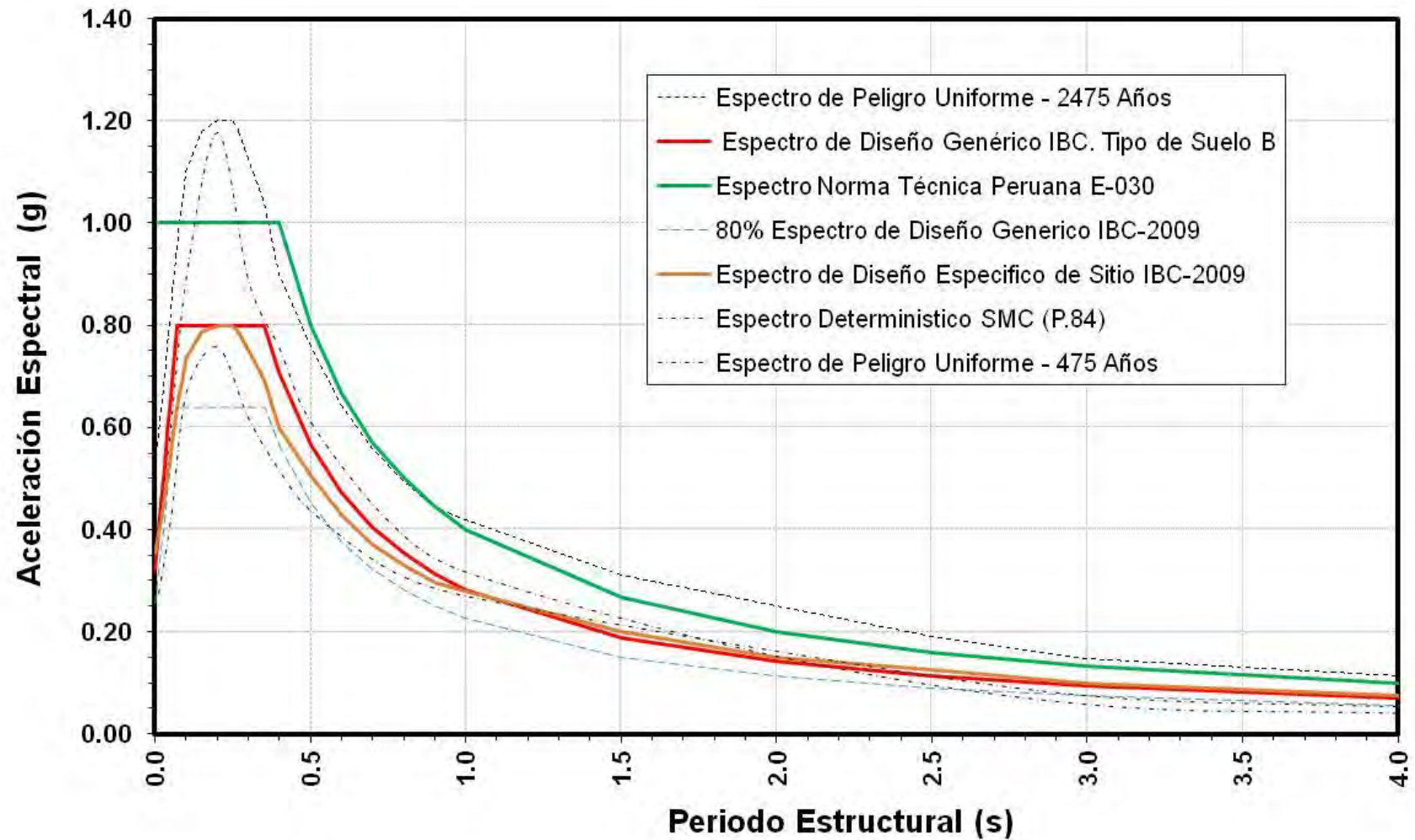


Figura 2.21 Espectros de diseño sísmico de acuerdo a la norma técnica peruana E-030 y el código IBC (2009). Fuente propia.

CAPÍTULO III:

GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS COMPATIBLES A ESPECTROS DE DISEÑO

3.1 INTRODUCCIÓN

Los registros sísmicos de diseño (típicamente aceleraciones) son datos de entrada muy importantes en la evaluación de la respuesta dinámica de estructuras frente a sismos. La adecuada selección, modificación y ajuste de registros sísmicos en función de la demanda sísmica en un lugar determinado, expresada por los espectros de diseño, reducirá la incertidumbre asociada a la inherente variabilidad de las aceleraciones sísmicas en el tiempo y en la respuesta de las estructuras frente a estas aceleraciones. En este capítulo se presentan las metodologías del estado de la práctica adoptadas por la comunidad internacional de ingenieros para la generación de movimientos sísmicos de diseño compatibles a la demanda sísmica existente en un sitio determinado. Finalmente se presenta la aplicación de estas metodologías para la generación de registros sísmicos de diseño compatibles a la sismicidad existente en el sitio de la presa Yuracmayo, en este sentido la demanda sísmica es la expresada por los espectros de diseño cuantificados en el capítulo II. Los registros sísmicos de diseño generados serán usados posteriormente para la evaluación de la respuesta sísmica de la presa Yuracmayo.

3.2 PROCEDIMIENTOS PARA LA GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO.

En el pasado una amplia variedad de técnicas han sido desarrolladas para la selección y generación de acelerogramas con la finalidad de realizar análisis sísmicos tiempo historia, una descripción detallada de estas técnicas puede encontrarse en los trabajos de Haselton et al. (2009) y Katsanos (2010). La metodología más simple para la generación de movimientos sísmicos, consiste en escalar los valores de la aceleración pico de sismos registrados instrumentalmente a los valores de aceleración pico especificados por un estudio de peligro sísmico para un sitio de análisis en particular, sin embargo la desventaja de esta metodología es que la forma espectral de los registros escalados puede ser bastante distinta a la forma espectral de los espectros de diseño. Otra metodología común en la práctica de la ingeniería sísmica consiste en la selección de movimientos sísmicos reales y su posterior ajuste de tal manera que la forma espectral de los mismos sea similar a la forma espectral de un espectro de diseño (típicamente similar al valor medio del espectro de diseño, sin considerar desviaciones estándares). Estos ajustes pueden ser realizados en el dominio del tiempo o en el dominio de las frecuencias, sin embargo se ha demostrado que los ajustes realizados en el dominio del tiempo permiten obtener movimientos sísmicos con características más aproximadas a las reales. Una descripción exhaustiva de estas técnicas pueden encontrarse en los trabajos de Beyer y Bommer (2007), Shantz (2006), Watson-Lamprey y Abrahamson (2006), Abrahamson (1992), Hancock et al. (2006) y Attik y Abrahamson (2009). Además de los procedimientos previamente descritos existen procedimientos alternativos en los cuales se trabaja con un conjunto o sets de movimientos sísmicos candidatos y no solo con un movimiento sísmico en particular como fue descrito previamente. Estos procedimientos presentan un grado mayor de dificultad pues deben de

minimizar la diferencia entre la media del set de movimientos sísmicos y el espectro de diseño, considerando la modificación de los movimientos sísmicos individuales que conforman un set, lo cual implica un proceso de selección y optimización (Naeim et al., 2004). Estos procedimientos además de permitir el ajuste a los valores medios del espectro de diseño, permiten también el ajuste a sus desviaciones estándares, de ser necesario.

De los procedimientos previamente descritos, el método de ajuste espectral es la metodología con mayor uso en el estado de la práctica actual de la ingeniería sísmica por lo tanto será la metodología considerada en este estudio para el ajuste a todos los espectros objetivo considerados. Se considerará además las metodologías que trabajan con sets de movimientos sísmicos con la finalidad de evaluar comparativamente la respuesta de la presa Yuracmayo cuando distintas metodologías de selección y ajuste son consideradas. Para tal comparación se considerara el espectro determinístico y sus desviaciones estándares.

A continuación se describen las metodologías consideradas en este estudio para la generación de movimientos sísmicos de diseño compatibles a los espectros objetivo especificados en el capítulo anterior:

3.2.1 Metodología de Ajuste Espectral Mediante Fragmentos de Onda en el Dominio del Tiempo.

Esta metodología está basada en añadir fragmentos de ondas (wavelets) al registro sísmico original o candidato con la finalidad de ajustar su espectro a un espectro objetivo. Cada fragmento de onda tiene como objetivo alcanzar la ordenada espectral del espectro objetivo en cada periodo espectral. El ajuste se realiza periodo por periodo o en grupo de periodos. Generalmente, se requieren múltiples iteraciones para conseguir una convergencia razonable entre el registro de aceleraciones ajustado espectralmente y el espectro objetivo. La metodología está basada en los trabajos de Lilhanand y Tseng (1988) y Abrahamson (1992) quién implemento la metodología en el software RSPmatch. Posteriormente Hancock (2005), introduce nuevas formas funcionales para las wavelets, actualizando la versión del software a RSPmatch 2005, finalmente como parte del proceso de optimización y actualización del software, Attik y Abrahamson (2009) introducen nuevas formas funcionales, que permiten optimizar el proceso de generación de registros sísmicos en términos de convergencia y mantenimiento de las características no estacionarias de los movimientos sísmicos reales, actualizando la versión del Software RSPmatch a su versión 2009. En este estudio se consideró el uso del software RSPmatch 2009 incorporado dentro de la plataforma EZFRISK de Risk Engineering INC.

Los principios de la metodología de ajuste espectral empleada en el RSPmatch son los siguientes:

- Calcular las respuestas de un sistema de un grado de libertad bajo la acción de un registro sísmico, considerando diferentes periodos y niveles de amortiguamiento.
- Comparar los picos de las respuestas del sistema de un grado de libertad con el espectro objetivo (el espectro el cual se usa para el ajuste), y determinar las diferencias existentes en términos de ordenadas espectrales.
- Adicionar wavelets con adecuadas fases y amplitudes al tiempo-historia de aceleraciones de tal manera que el pico de cada respuesta se ajuste al espectro de diseño (para el periodo de interés). Una wavelet es usada para el ajuste de cada respuesta del sistema de un grado de libertad.

3.2.2 Procedimiento Semi - Automatizado para la Selección de Sismos de Diseño – Universidad de Texas Austin.

Kottke y Rathje (2009, 2007) de la Universidad de Texas Austin desarrollaron un procedimiento semi automático en el cual registros candidatos pertenecientes a un set o conjunto de registros sísmicos son seleccionados, escalados individualmente y posteriormente combinados para generar sismos de diseño ajustados a un espectro objetivo (o espectro de diseño). Este procedimiento no sólo considera el ajuste a la media de un espectro de diseño si no también controla las desviaciones estándares de los registros candidatos, ya que los factores de escala lineales aplicados a los movimientos sísmicos individuales dependen de las desviaciones estándares consideradas en el espectro de diseño (cuando esta desviación es tomada en cuenta).

La selección de los registros es realizada mediante un algoritmo semi automatizado el cual evita la dificultosa tarea de probar combinaciones de movimientos sísmicos manualmente, lo cual no sería práctico en cuanto al tiempo necesario para conseguir una combinación adecuada. El procedimiento es semi automatizado debido a que en los casos en los cuales se tiene una base de datos con una cantidad de sismos grande, el tiempo de cómputo para probar todas las combinaciones posibles es demandante. En estos casos el procedimiento considera combinaciones definiendo previamente el número de sismos a ser elegidos para el posterior escalamiento y combinación. Para juzgar si el grado de ajuste a un espectro de diseño (y posiblemente las desviaciones estándares) es adecuado, el procedimiento considera el concepto del error cuadrático medio (Naeim, et al. 2004) el cual cuantifica matemáticamente las diferencias entre el espectro de diseño y el espectro del movimiento sísmico ajustado, para cada periodo de interés.

El procedimiento esta implementado en el software SigmaSpectra Kottke y Rathje (2009), desarrollado en la Universidad de Texas, este software trabaja en su versión original solamente con la base de sismos del proyecto NGA (Chiou et al., 2008), la cual está formada en su mayoría por sismos de corteza para la generación de leyes de atenuación en Estados Unidos, con aplicación mundial. Sin embargo, como parte de este estudio se ha considerado la modificación del software original, en cuanto a formatos de lectura, para que este pueda trabajar con sismos con mecanismos de tipo subducción que son los predominantes en el Perú. A continuación se resume la metodología planteada por Kottke y Rathje (2009, 2007).

Para evaluar el espectro de respuesta medio de un set de movimientos sísmicos escalados individualmente, el valor medio del logaritmo natural de las aceleraciones espectrales de los movimientos sísmicos que conforman el set en un determinado periodo T_i es calculado, de acuerdo a:

$$\ln Sa_{medio,i}^{escalado} = \frac{1}{n_m} [\ln(s_1 \cdot Sa_{1,i}) + \ln(s_2 \cdot Sa_{2,i}) + \dots + \ln(s_{n_m} \cdot Sa_{n_m,i})] \quad (3.1)$$

Donde:

T_i : Periodo espectral de interés.

$Sa_{j,i}$: Aceleración espectral del movimiento j en el periodo T_i .

s_j : Factor de escala lineal para el movimiento j del set.

n_m : Número de movimientos sísmicos a ser seleccionados en el set.

Usando las propiedades de los logaritmos la expresión anterior deriva en:

$$\ln Sa_{medio,i}^{escalado} = \frac{1}{n_m} [\ln(s_1) + \ln(s_2) + \dots + \ln(s_{n_m})] + \frac{1}{n_m} [\ln(Sa_{1,i}) + \ln(Sa_{2,i}) + \dots + \ln(Sa_{n_m,i})] \quad (3.2)$$

El primer término de la izquierda en la ecuación anterior controla las amplitudes del espectro medio de los registros candidatos mientras que el segundo término controla la forma espectral.

El procedimiento considera como primer paso la selección de movimientos sísmicos dentro del set que tengan una aceleración espectral media concordante con la forma del espectro de diseño, en un segundo paso se considera la evaluación de los factores de escalamiento individuales s_j que controlan las amplitudes en los periodos espectrales, de tal forma de minimizar las diferencias entre las aceleraciones espectrales del espectro de diseño y el espectro candidato (y controlar las desviaciones estándares, de ser necesario). Como puede notarse si el promedio de los factores de escalamiento individuales s_j se mantiene constante las amplitudes del espectro medio escalado no varían. Por lo tanto de existir la necesidad de controlar las desviaciones estándares de los sismos candidatos para ser concordantes a las del espectro de diseño, los factores de escalamiento individuales son variados pero manteniendo su valor promedio constante. La Figura 3.1 ilustra el proceso de escalamiento de acuerdo a este procedimiento.

3.2.3 Procedimiento Automatizado para la Selección de Sismos de Diseño – Universidad de Stanford.

Jarayam, Lin y Baker (2011), de la Universidad de Stanford propusieron un algoritmo de selección denominado por los mismos autores como computacionalmente eficiente para la generación de movimientos sísmicos compatibles a un espectro de diseño especificado (y de ser necesario a las desviaciones estándares del mismo). De forma similar a la metodología de Texas Austin, en este procedimiento se considera la selección de movimientos que conforman un set o base de datos de registros sísmicos. El algoritmo está basado en el hecho que la distribución de los logaritmos naturales de las aceleraciones espectrales, "Ln(Sa)" en distintos periodos espectrales es un vector aleatorio que puede ser aproximado a una distribución normal multivariable (Jarayam y Baker, 2008).

El primer paso del algoritmo consiste en parametrizar la distribución normal multivariable de las aceleraciones en los periodos de interés. Los parámetros para realizar esta parametrización son la media y desviaciones estándares de Ln (Sa) en los periodos de interés y la covarianza existente entre cada par de periodos. La covarianza entre pares de periodos es evaluada de acuerdo a Jarayam y Baker (2008) en base a las desviaciones estándares asociadas a cada periodo espectral. Con la finalidad de obtener las propiedades requeridas en los movimientos sísmicos seleccionados (compatibilidad a un espectro de diseño), la parametrización se realiza considerando los valores medios y desviaciones estándares del espectro de diseño.

Una vez que la distribución de valores medios y covarianzas es evaluada en base al espectro de diseño o espectro objetivo, la metodología usa una simulación Monte Carlo para generar probabilísticamente múltiples espectros de respuesta en base a la distribución normal multivariable parametrizada. En la práctica, este procedimiento puede ser realizado usando funciones estándares en lenguajes de programación comerciales (Visual Basic, Matlab, etc). Como siguiente paso para cada espectro de respuesta generado un movimiento sísmico perteneciente a la base de datos es seleccionado. Para cuantificar las

diferencias entre el espectro generado mediante la simulación Monte Carlo y el espectro del sismo seleccionado los autores de la metodología proponen el valor del error cuadrático (definido como la suma de los cuadrados de las diferencias en aceleraciones espectrales, para cada periodo de interés).

Considerando el hecho de que la distribución normal multivariable es parametrizada en base a los valores medio del espectro de diseño y sus desviaciones estándares, los espectros generados mediante la simulación Monte Carlo son compatibles a los espectros objetivo y por lo tanto los movimientos seleccionados de la base de datos también lo son (estrictamente hablando sus valores medios y desviaciones estándares), y su valor medio puede ser usado como un sismo de diseño compatible al espectro de diseño especificado.

La metodología esta implementada en el software “Ground Motion Selection” desarrollado por Jarayam, Lin y Baker (2011). El software originalmente trabaja con sismos de corteza de la base de datos del proyecto NGA, sin embargo fue modificado en este estudio para poder trabajar con sismos de subducción, los que son frecuentes en el Perú.

3.3 ESCENARIOS SÍSMICOS PARA LA GENERACIÓN DEL SET DE REGISTROS SÍSMICOS DE DISEÑO.

Los escenarios sísmicos considerados son aquellos definidos de acuerdo a los espectros cuantificados en el capítulo II, sección 2.9.6. En este sentido se generarán registros sísmicos de diseño compatibles a los siguientes espectros:

- Espectro de norma técnica peruana E-030.
- Espectro determinístico.
- Espectro del código internacional IBC.
- Espectro de peligro uniforme con 475 años de periodo de retorno (EPU-475).
- Espectro medio condicionado.

El método del ajuste espectral mediante fragmentos de onda será utilizado para la generación de registros sísmicos compatibles a todos los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Además con la finalidad de evaluar la influencia entre los métodos de selección y ajuste de registros sísmicos considerados en este estudio, se ha considerado el método de la Universidad de Texas y el método de la Universidad de Stanford para la generación de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico medio, teniendo en cuenta sus desviaciones estándares. Se ha considerado este espectro debido a que puede ser considerado en cierta medida demandante en cuanto a respuestas de la presa Yuracmayo (en comparación con el espectro CMS) y teniendo en cuenta que los otros espectros considerados en este estudio no presentan desviaciones estándares asociadas.

3.4 GENERACIÓN DE SETS DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.

Con la finalidad de la generación de registros sísmicos de diseño para la presa Yuracmayo, y teniendo en cuenta que la peligrosidad sísmica en el sitio de la presa Yuracmayo está dominada por las fuentes de subducción de intraplaca e interface (en general los sismos con mecanismo de subducción son los más importantes en el territorio peruano, en especial en los lugares cercanos a la costa), se consideró como paso inicial la generación de una base de datos de sismos con mecanismo de tipo subducción. La base de datos fue conformada con registros sísmicos seleccionados de la base de datos del programa

COSMOS (The Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems, <http://db.cosmos-eq.org/scripts/default.plx>), de la red acelerográfica del CISMID (Centro Peruano de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, <http://www.cismid-uni.org/>) y de la red acelerográfica de la universidad de Chile (RENADIC, www.renadic.cl). En general La bases de datos, contiene sismos con mecanismo tipo subducción registrados en Perú y Chile. En la Tabla 3.1 se muestra la base de datos de sismos con mecanismos de subducción considerados en este estudio, junto con las características más importantes de cada evento (Magnitud, distancia, estación de registro, etc).

Teniendo en cuenta que los métodos de las Universidades de Texas y Stanford trabajan con una base de datos y no registros sísmicos individuales, la selección de registros cuando dichas metodologías sean aplicadas considerará la totalidad de sismos existente en la base de datos conformada como sismos candidatos para la selección y/o combinación (considerando el espectro determinístico fue explicado anteriormente). Sin embargo para la aplicación de la metodología del ajuste espectral mediante fragmentos de onda, (la cual será usada como fue mencionado anteriormente, para la generación de registros sísmicos compatibles a todos los espectros tomados en cuenta en este estudio) se han considerado los sismos de Lima, 1974 (3 de Octubre, estación Parque de la reserva), Moquegua, 2001 (23 de Junio, estación Cesar Vizcarra), Tarapacá, 2005 (13 de Junio, estación Iquique Idiem) y el sismo de Maule, 2010 (27 de Febrero, estación Hualañe). Estos sismos fueron considerados en primera instancia por tener magnitudes y distancias epicentrales concordantes con las magnitudes y distancias que definen los espectros de diseño en el sitio de la presa Yuracmayo en conjunto (espectros de peligro uniforme y determinísticos). Los conceptos de magnitud sísmica y distancia son bastante conocidos y usados en la actual practica de ingeniería sísmica para selección de registros de aceleraciones (Stewart et al 2001; Bommer y Acevedo 2004). Así por ejemplo los sismos de Moquegua y Maule tienen magnitudes altas (mayores a 8.4 Mw) y distancias epicentrales mayores a 200 km, presentando características compatibles a los sismos generados en la zona de subducción de interface, la cual de acuerdo al estudio de peligro sísmico (capítulo II) controla la peligrosidad en periodos altos. El sismo de Lima de 1974 presenta una magnitud de 8.1 Mw y distancia epicentral en orden de 100 km, pudiendo considerarse representativo de los sismos que controlan la peligrosidad en periodos bajos a intermedios, presentando además características compatibles con el sismo determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Finalmente el sismo de Tarapacá tiene un mecanismo de subducción de intraplaca con una distancia epicentral del orden de 103 km y magnitud 7.8 Mw, presentando de esta manera características representativas del sismo determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Además de los puntos citados los sismos considerados son típicamente usados en la práctica común de la ingeniería sísmica en Perú y Chile para la evaluación de la respuesta dinámica de estructuras y en particular presas de tierra. Con la finalidad de evaluar comparativamente la respuesta de la presa Yuracmayo todos estos sismos serán ajustados espectralmente a los espectros definidos para la presa Yuracmayo.

Tabla 3.1 Base de datos para la selección de registros de sismos con mecanismo de tipo subducción (Interfaz e Intraplaca). Fuente propia.

SISMO/ID SISMO-COMPONENTE ⁽¹⁾	Nombre de la Estación	Magnitud (Mw)	Mecanismo	Coordenadas Sismo ⁽²⁾		Prof (km)	Distancia(km)	Coordenadas Estación ⁽²⁾	
				Latitud	Longitud			Latitud	Longitud
Lima_1974_11_09/MOL97411-090	LA MOLINA	7.1	Interface	12.50	77.78	15.0	102.0	12.08	76.95
Lima_1974_11_09/MOL97411-000									
Lima_1974_11_09/PRQ97411-000	PARQUE DE LA RESERVA	7.1	Interface	12.50	77.78	15.0	123.0	12.07	77.04
Lima_1974_11_09/PRQ97411-090									
Lima_1974_10_03/HUAC97410-000	CASA DR. HUACO	8.1	Interface	12.26	77.79	15.0	89.0	12.13	76.98
Lima_1974_10_03/HUAC97410-090									
Lima_1974_10_03/PRQ97410-090	PARQUE DE LA RESERVA	8.1	Interface	12.26	77.79	15.0	84.0	12.07	77.04
Lima_1974_10_03/PRQ97410-000									
Lima_1974_01_05/ZAR9741-000	ZARATE	6.6	Intraplaca	12.29	76.35	82.0	78.0	12.02	77.01
Lima_1974_01_05/ZAR9741-090									
Lima_1966_10_17/PRQ9661-090	PARQUE DE LA RESERVA	8.1	Interface	10.07	78.70	20.7	237.0	12.07	77.04
Lima_1966_10_17/PRQ9661-000									
Chimbote_1970/PRQ9701-090	PARQUE DE LA RESERVA	8.0	Intraplaca	9.20	78.80	73.0	373.0	12.07	77.04
Chimbote_1970/PRQ9701-000									
Chile_1985_3_3/MEL090	MELIPILLA	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	86.0	33.68	71.22
Chile_1985_3_3/MEL000									
Chile_1985_3_3/PAP140	PAPUDO	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	80.6	32.52	71.45
Chile_1985_3_3/PICH090	PICHILEMU	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	138.5	34.38	72.02
Chile_1985_3_3/PICH000									
Chile_1985_3_3/QUIN000	QUINTAY	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	54.0	33.27	71.32
Chile_1985_3_3/QUIN090									
Chile_1985_3_3/RAP090	RAPEL	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	108.2	34.03	71.58
Chile_1985_3_3/RAP000									
Chile_1985_3_3/SFEP080	SAN FELIPE	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	118.5	32.75	70.73
Chile_1985_3_3/SFEP170									
Chile_1985_3_3/SFER090	SAN FERNANDO	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	186.0	34.60	71.00
Chile_1985_3_3/SFER000									
Chile_1985_3_3/SISID000	SAN ISIDRO	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	63.0	35.02	71.32
Chile_1985_3_3/SISID090									
Chile_1985_3_3/TALC010	TALCA	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	224.7	35.43	71.63
Chile_1985_3_3/TALC280									
Chile_1985_3_3/VALP070	VALPARAISO	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	129.2	33.03	71.62
Chile_1985_3_3/VALP160									
Chile_1985_3_3/VALPAL050	VALP. ALMENDRAL	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	26.0	33.03	71.62
Chile_1985_3_3/VALPAL140									
Chile_1985_3_3/VENT000	VENTANAS	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	27.0	33.03	71.62
Chile_1985_3_3/VENT090									
Chile_1985_3_3/VINA200	VIÑA DEL MAR	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	31.0	33.02	71.57
Chile_1985_3_3/VINA290									
Chile_1985_3_3/ZAPA090	ZAPALLAR	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	74.0	32.57	71.47
Chile_1985_3_3/ZAPA000									

SISMO/ID SISMO-COMPONENTE ⁽¹⁾	Nombre de la Estación	Magnitud (Mw)	Mecanismo	Coordenadas Sismo ⁽²⁾		Prof (km)	Distancia(km)	Coordenadas Estación ⁽²⁾	
				Latitud	Longitud			Latitud	Longitud
Chile_1985_3_3/CAUQUE-000	CAUQUENES	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	319.8	36.00	72.22
Chile_1985_3_3/CAUQUE-090									
Chile_1985_3_3/CHILL-080	CHILLIAN INSTITUTE	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	319.9	36.00	72.22
Chile_1985_3_3/CHILL-350									
Chile_1985_3_3/COLB-000	COLBUN	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	290.5	35.72	71.43
Chile_1985_3_3/COLB-090									
Chile_1985_3_3/CONST-000	CONSTITUCIÓN	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	234.1	35.20	72.32
Chile_1985_3_3/CONST-090									
Chile_1985_3_3/ENDES-000	ENDESA	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	122.2	33.47	70.67
Chile_1985_3_3/ENDES-090									
Chile_1985_3_3/HUALAN-090	HUALANE	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	203.2	34.97	71.82
Chile_1985_3_3/HUALAN-000									
Chile_1985_3_3/ILLAP-070	ILLAPEL	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	184.7	31.63	71.17
Chile_1985_3_3/ILLAP-340									
Chile_1985_3_3/ILOC-090	ILLOCA	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	201.4	34.92	72.22
Chile_1985_3_3/ILOC-000									
Chile_1985_3_3/LALIG-200	LA LIGUA	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	103.0	32.45	71.25
Chile_1985_3_3/LALIG-290									
Chile_1985_3_3/LLAY-190	LLAYLLAY	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	104.6	32.83	70.98
Chile_1985_3_3/LLAY-280									
Chile_1985_3_3/LLOEO-10	LLOEO	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	61.6	32.64	71.63
Chile_1985_3_3/LLOEO-100									
Chile_1985_3_3/LOSVIL-090	LOS VILOS	8.0	Interface	33.14	71.87	40.0	141.5	31.92	71.50
Chile_1985_3_3/LOSVIL-000									
Chile_15_10_1997/ILLAP-000	ILLAPEL	7.1	Interface	31.02	71.23	68.0	68.0	31.63	71.17
Chile_15_10_1997/ILLAP-090									
Chile_15_10_1997/PAP-000	PAPUDO	7.1	Interface	31.02	71.23	68.0	168.3	32.52	71.45
Chile_15_10_1997/PAP-090									
Chile_15_10_1997/SANCENT-000	SANTIAGO CENTRO	7.1	Interface	31.02	71.23	68.0	279.0	33.47	70.65
Chile_15_10_1997/SANCENT-090									
Chile_2005_13_6/ARCRUZ-000	ARICA CERRO LA CRUZ	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	206.3	18.49	70.31
Chile_2005_13_6/ARCRUZ-090									
Chile_2005_13_6/ARCEM-000	ARICA CEMENTERIO	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	207.2	18.48	70.31
Chile_2005_13_6/ARCEM-090									
Chile_2005_13_6/ARCOS-000	ARICA COSTANERA	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	208.3	18.47	70.31
Chile_2005_13_6/ARCOS-090									
Chile_2005_13_6/CALAMA-000	CALAMA	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	274.0	22.46	68.93
Chile_2005_13_6/CALAMA-090									
Chile_2005_13_6/LOA-000	EL LOA	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	181.3	21.42	70.06
Chile_2005_13_6/LOA-090									
Chile_2005_13_6/IQUI-000	IQUIQUE	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	102.2	20.21	70.14
Chile_2005_13_6/IQUI-090									
Chile_2005_13_6/IQUIDIEM-000	IQUIQUE IDIEM	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	102.8	20.22	70.14

SISMO/ID SISMO-COMPONENTE ⁽¹⁾	Nombre de la Estación	Magnitud (Mw)	Mecanismo	Coordenadas Sismo ⁽²⁾		Prof (km)	Distancia(km)	Coordenadas Estación ⁽²⁾	
				Latitud	Longitud			Latitud	Longitud
Chile_2005_13_6/IQUIPLAZA-000	IQUIQUE PLAZA	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	103.4	20.21	70.15
Chile_2005_13_6/IQUIPLAZA-090									
Chile_2005_13_6/MEJ-000	MEJILLONES	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	368.3	23.10	70.45
Chile_2005_13_6/MEJ-090									
Chile_2005_13_6/PICA-000	PICA	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	54.4	20.49	69.33
Chile_2005_13_6/PICA-090									
Chile_2005_13_6/POCONCH-000	POCONCHILE	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	195.8	18.45	70.07
Chile_2005_13_6/POCONCH-090									
Chile_2005_13_6/PUTRE-000	PUTRE	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	204.6	18.19	69.56
Chile_2005_13_6/PUTRE-090									
Chile_2005_13_6/CUYA-000	CUYA	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	140.7	19.16	70.18
Chile_2005_13_6/CUYA-090									
Chile_2005_13_6/PISAG-000	PISAGUA	7.8	Intraplaca	20.01	69.24	108.0	117.2	19.60	70.21
Chile_2005_13_6/PISAG-090									
Chile_2010_27_02/ANG-090	ANGOLA	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	176.6	37.79	72.71
Chile_2010_27_02/ANG-000									
Chile_2010_27_02/CONCEP-000	CONCEPCION	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	63.4	36.83	73.05
Chile_2010_27_02/CONCEP-090									
Chile_2010_27_02/CONST-000	CONSTITUCION	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	140.7	35.34	72.40
Chile_2010_27_02/CONST-090									
Chile_2010_27_02/COPIAP-000	COPIAPO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	1041.3	27.37	70.32
Chile_2010_27_02/COPIAP-090									
Chile_2010_27_02/CURIC-000	CURICO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	264.9	34.99	71.24
Chile_2010_27_02/CURIC-090									
Chile_2010_27_02/HUALAÑ-000	HUALAÑE	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	215.8	34.98	71.81
Chile_2010_27_02/HUALAÑ-090									
Chile_2010_27_02/LLOLL-000	LLOLLEO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	347.7	33.62	71.60
Chile_2010_27_02/LLOLL-090									
Chile_2010_27_02/MAT-000	MATANZAS	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	299.9	33.96	71.87
Chile_2010_27_02/MAT-090									
Chile_2010_27_02/PAP-000	PAPUDO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	463.2	32.52	71.45
Chile_2010_27_02/PAP-090									
Chile_2010_27_02/SANTCENT-000	SANTIAGO CENTRO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	425.0	33.47	70.65
Chile_2010_27_02/SANTCENT-090									
Chile_2010_27_02/SANTFLOR-000	SANTIAGO LA FLORIDA	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	424.7	33.51	70.61
Chile_2010_27_02/SANTFLOR-090									
Chile_2010_27_02/SANTMAIP-000	SANTIAGO MAIPU	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	412.7	33.51	70.77
Chile_2010_27_02/SANTMAIP-090									
Chile_2010_27_02/SANTPEÑA-000	SANTIAGO PEÑALOLEN	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	427.7	33.50	70.58
Chile_2010_27_02/SANTPEÑA-090									
Chile_2010_27_02/SANTPTEALT-000	SANTIAGO PUENTE ALTO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	421.5	33.58	70.58
Chile_2010_27_02/SANTPTEALT-090									

SISMO/ID SISMO-COMPONENTE ⁽¹⁾	Nombre de la Estación	Magnitud (Mw)	Mecanismo	Coordenadas Sismo ⁽²⁾		Prof (km)	Distancia(km)	Coordenadas Estación ⁽²⁾	
				Latitud	Longitud			Latitud	Longitud
Chile_2010_27_02/TALC-000	TALCA	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	202.5	35.43	71.63
Chile_2010_27_02/TALC-090									
Chile_2010_27_02/VALD-000	VALDIVIA	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	393.1	39.83	73.24
Chile_2010_27_02/VALD-090									
Chile_2010_27_02/VALL-000	VALLENAR	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	899.5	28.58	70.76
Chile_2010_27_02/VALL-090									
Chile_2010_27_02/VALPALM-000	VALPARAISO ALMENDRAL	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	404.0	33.03	71.62
Chile_2010_27_02/VALPALM-090									
Chile_2010_27_02/VALPUTF-000	VALPARAISO UTFSM	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	404.0	33.03	71.62
Chile_2010_27_02/VALPUTF-090									
Chile_2010_27_02/VIÑSALT-000	VIÑA DEL MAR EL SALTO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	407.9	33.05	71.51
Chile_2010_27_02/VIÑSALT-090									
Chile_2010_27_02/VIÑACENT-000	VIÑACENTRO	8.8	Interface	36.29	73.24	30.1	407.9	33.02	71.55
Chile_2010_27_02/VIÑACENT-090									
Moquegua_2001_23_06/VIZCA-090	MOQUEGUA I - CESAR VIZCARRA	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	331.7	17.19	70.93
Moquegua_2001_23_06/VIZCA-000									
Moquegua_2001_23_06/JOBASAD-090	TACNA -JORGE BASADRE	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	437.9	18.02	70.25
Moquegua_2001_23_06/JOBASAD-000									
Moquegua_2001_23_06/ARICA-000	ARICA	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	457.9	18.48	70.31
Moquegua_2001_23_06/ARICA-090									
Moquegua_2001_23_06/ARCEM-000	ARICA CEMENTERIO	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	458.2	18.48	70.31
Moquegua_2001_23_06/ARCEM-090									
Moquegua_2001_23_06/CUYA-000	CUYA	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	514.7	19.16	70.18
Moquegua_2001_23_06/CUYA-090									
Moquegua_2001_23_06/PISAG-000	PISAGUA	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	544.4	19.60	70.21
Moquegua_2001_23_06/PISAG-090									
Moquegua_2001_23_06/POCON-000	POCONCHILE	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	479.2	18.45	70.07
Moquegua_2001_23_06/POCON-090									
Moquegua_2001_23_06/PUTRE-000	PUTRE	8.4	Interface	16.20	73.75	29.0	515.2	18.19	69.56
Moquegua_2001_23_06/PUTRE-090									
Pisco_2007_15_08/JALVA-090	ESTACIÓN JORGE ALVA	7.9	Interface	13.67	76.76	40.0	187.1	12.01	77.05
Pisco_2007_15_08/JALVA-000									
Pisco_2007_15_08/CDLCIP-090	ESTACIÓN CIP-LIMA	7.9	Interface	13.67	76.76	40.0	178.3	12.09	77.05
Pisco_2007_15_08/CDLCIP-000									
Pisco_2007_15_08/DHN-090	ESTACIÓN CALLAO	7.9	Interface	13.67	76.76	40.0	183.9	12.06	77.15
Pisco_2007_15_08/DHN-000									
Pisco_2007_15_08/MOL-090	ESTACIÓN LA MOLINA	7.9	Interface	13.67	76.76	40.0	174.9	12.10	76.89
Pisco_2007_15_08/MOL-000									
Pisco_2007_15_08/ICA2-090	ICA2 -UNSLG	7.9	Interface	13.67	76.76	40.0	123.4	14.09	75.73
Pisco_2007_15_08/ICA2-000									

Notas:

1. Los sismos son nombrados según la secuencia: Fecha y lugar del sismo/ ID asociado/ Componente de registro..
2. Las coordenadas son referidas a Latitudes Sur y Longitudes Oeste.

3.4.1 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro de la Norma Técnica Peruana E030

La generación de registros sísmicos compatibles al espectro de la Norma Técnica Peruana E030, en base a la metodología de ajuste espectral por fragmentos de ondas es mostrada en las Figuras 3.2 a 3.9. Los resultados son mostrados en términos de comparaciones espectrales entre los movimientos sísmicos originales previos al ajuste espectral y los movimientos sísmicos obtenidos después de realizado el ajuste. Además se muestran las comparaciones entre los tiempos historia de aceleraciones de los movimientos sísmicos originales y los movimientos sísmicos obtenidos después del ajuste. Los resultados son mostrados para los registros seleccionados para la aplicación de esta metodología (descritos en la sección 3.4).

3.4.2 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Determinístico

La generación de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo, en base a la metodología de ajuste espectral por fragmentos de ondas es mostrada en las Figuras 3.10 a 3.17. Los resultados son mostrados en términos de comparaciones espectrales entre los movimientos sísmicos originales previos al ajuste espectral y los movimientos sísmicos obtenidos después de realizado el ajuste. Además se muestran las comparaciones entre los tiempos historia de aceleraciones de los movimientos sísmicos originales y los movimientos sísmicos obtenidos después del ajuste. Los resultados son mostrados para los registros seleccionados para la aplicación de esta metodología (descritos en la sección 3.4).

3.4.3 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro del Código IBC

La generación de registros sísmicos compatibles al espectro del código IBC, en base a la metodología de ajuste espectral por fragmentos de ondas es mostrada en las Figuras 3.18 a 3.25. Los resultados son mostrados en términos de comparaciones espectrales entre los movimientos sísmicos originales previos al ajuste espectral y los movimientos sísmicos obtenidos después de realizado el ajuste. Además se muestran las comparaciones entre los tiempos historia de aceleraciones de los movimientos sísmicos originales y los movimientos sísmicos obtenidos después del ajuste. Los resultados son mostrados para los registros seleccionados para la aplicación de esta metodología (descritos en la sección 3.4).

3.4.4 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro de Peligro Uniforme con Periodo de Retorno de 475 años.

La generación de registros sísmicos compatibles al espectro de peligro uniforme con un periodo de retorno de 475 años, en base a la metodología de ajuste espectral por fragmentos de ondas es mostrada en las Figuras 3.26 a 3.33. Los resultados son mostrados en términos de comparaciones espectrales entre los movimientos sísmicos originales previos al ajuste espectral y los movimientos sísmicos obtenidos después de realizado el ajuste. Además se muestran las comparaciones entre los tiempos historia de aceleraciones de los movimientos sísmicos originales y los movimientos sísmicos obtenidos después del ajuste. Los resultados son mostrados para los registros seleccionados para la aplicación de esta metodología (descritos en la sección 3.4).

3.4.5 Generación de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Medio Condicionado.

La generación de registros sísmicos compatibles al espectro medio condicionado, en base a la metodología de ajuste espectral por fragmentos de ondas es mostrada en las Figuras 3.34

a 3.41. Los resultados son mostrados en términos de comparaciones espectrales entre los movimientos sísmicos originales previos al ajuste espectral y los movimientos sísmicos obtenidos después de realizado el ajuste. Además se muestran las comparaciones entre los tiempos historia de aceleraciones de los movimientos sísmicos originales y los movimientos sísmicos obtenidos después del ajuste. Los resultados son mostrados para los registros seleccionados para la aplicación de esta metodología (descritos en la sección 3.4).

3.4.6 Selección de Registros Sísmicos Compatibles al Espectro Determinístico en base a las Metodologías de las Universidades de Texas y Stanford.

La selección de registros sísmicos en base a la metodología de la Universidad de Texas (Kottke y Rathje, 2009), es mostrada en las Figuras 3.42 a 3.44. Las Figuras 3.42 y 3.43 muestran las comparaciones en términos de respuestas espectrales y desviaciones estándares y la Figura 3.44, muestra el tiempo historia de aceleraciones compatible al espectro determinístico de la presa Yuracmayo, generado en base a los registros sísmicos seleccionados. Finalmente la selección de registros sísmicos en base a la metodología de la Universidad de Stanford (Jarayam y Baker, 2011) es mostrada en las Figuras 3.45 a 3.47. Estas figuras muestran las comparaciones entre los registros sísmicos seleccionados y el espectro determinístico así como la comparación entre las desviaciones estándares de los registros seleccionados y las desviaciones estándares del espectro objetivo, en este caso el determinístico.

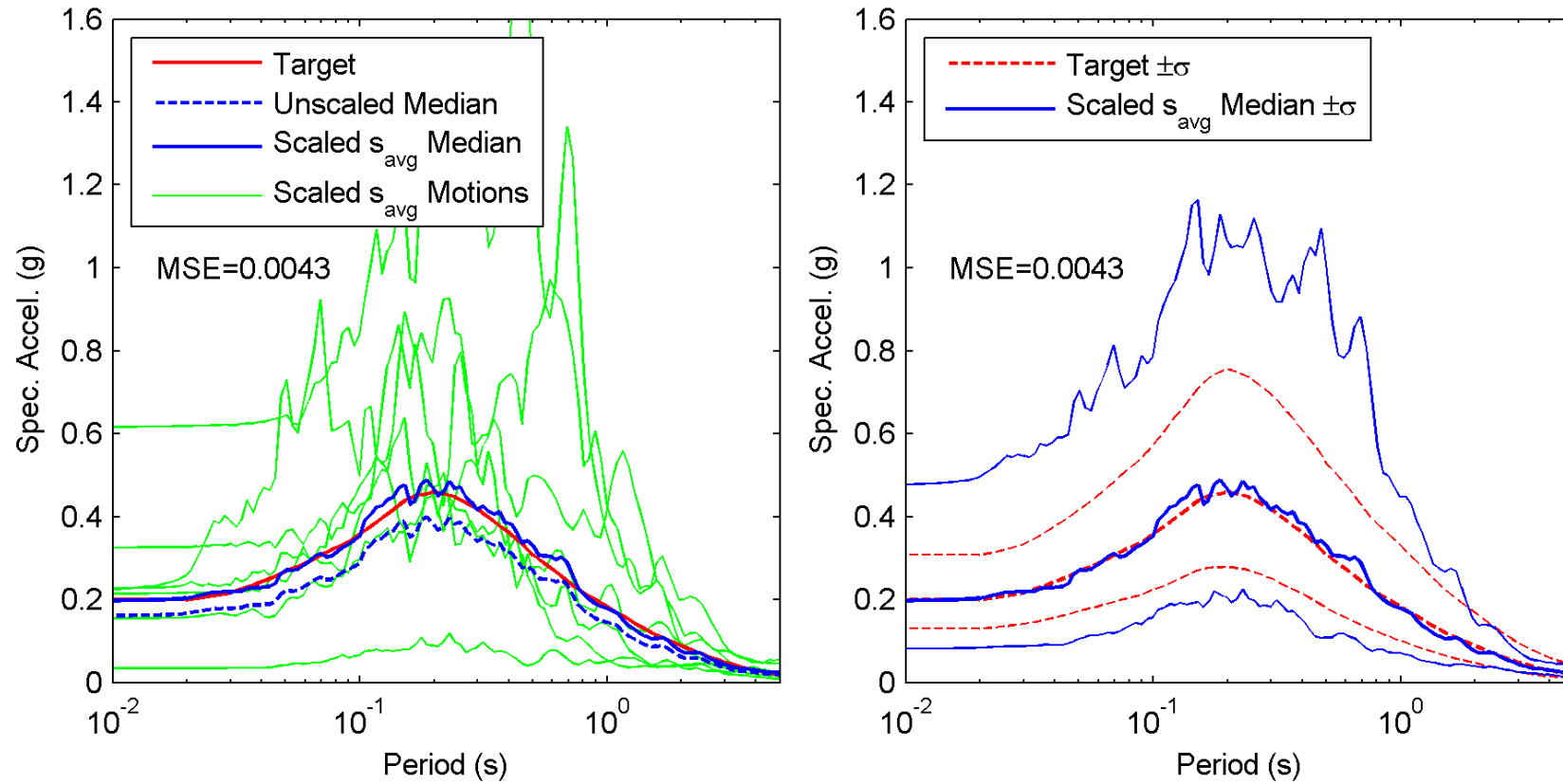
La selección de registros en base a estas metodologías se basó en la base de datos de registros sísmicos de subducción elaborada como parte de este estudio. La Tabla 3.2 muestra los registros individuales seleccionados por cada metodología y los factores de escala asociados. Los registros sísmicos generados serán usados en el siguiente capítulo para evaluar la respuesta sísmica de la presa Yuracmayo.

Tabla 3.2 Sismos seleccionados para la generación de movimientos sísmicos compatibles al espectro determinístico. Metodologías U. Texas, U Stanford. Fuente propia.

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN Y AJUSTE			
STANFORD (Jarayam y Baker, 2011)		TEXAS AUSTIN (Kottke y Rathje, 2009)	
Sismos Seleccionados de la Base de Datos	Factor de Escala	Sismos Seleccionados de la Base de Datos	Factor de Escala
Chile_1985_3_3/MEL000	1.0	Chile_1985_3_3\MEL000	0.92
Chile_1985_3_3/SFEP080	1.0	Chile_1985_3_3\PAP140	0.91
Chile_1985_3_3/RAP000	1.0	Chile_1985_3_3\PICH090	1.05
Chile_1985_3_3/VALPAL140	1.0	Chile_1985_3_3\RAP000	0.95
Chile_1985_3_3/SFER000	1.0	Chile_1985_3_3/SFER090	1.04
Chile_1985_3_3/SFER090	1.0	Chile_1985_3_3\VALP160	1.04
Lima_1974_10_03/HUAC97410-000	1.0	Chile_1985_3_3\VALPAL050	0.88
Chile_1985_3_3/TALC280	1.0	Chile_1985_3_3\VINA200	0.97
Chimbote_1970/PRQ9701-090	1.0	Chile_1985_3_3\ZAPA090	1.18
Chile_1985_3_3/ZAPA090	1.0	Lima_1974_11_09\PRQ97011-000	1.38

Notas:

1. Los sismos corresponden a la base de datos descrita en la Tabla 3.1.
2. Se consideraron sets de selección conformados por 10 movimientos sísmicos en cada metodología.



$$\ln Sa_{median,i}^{scaled} = \frac{1}{n_m} [\ln(s_1 \cdot Sa_{1,i}) + \dots + \ln(s_{n_m} \cdot Sa_{n_m,i})] = \frac{1}{n_m} \underbrace{(\ln s_1 + \dots + \ln s_{n_m})}_{\text{Controls Amplitude}} + \frac{1}{n_m} \underbrace{(\ln Sa_{1,i} + \dots + \ln Sa_{n_m,i})}_{\text{Controls Shape}}$$

Figura 3.1 Procedimiento para la selección y generación de registros sísmicos de diseño, de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007).

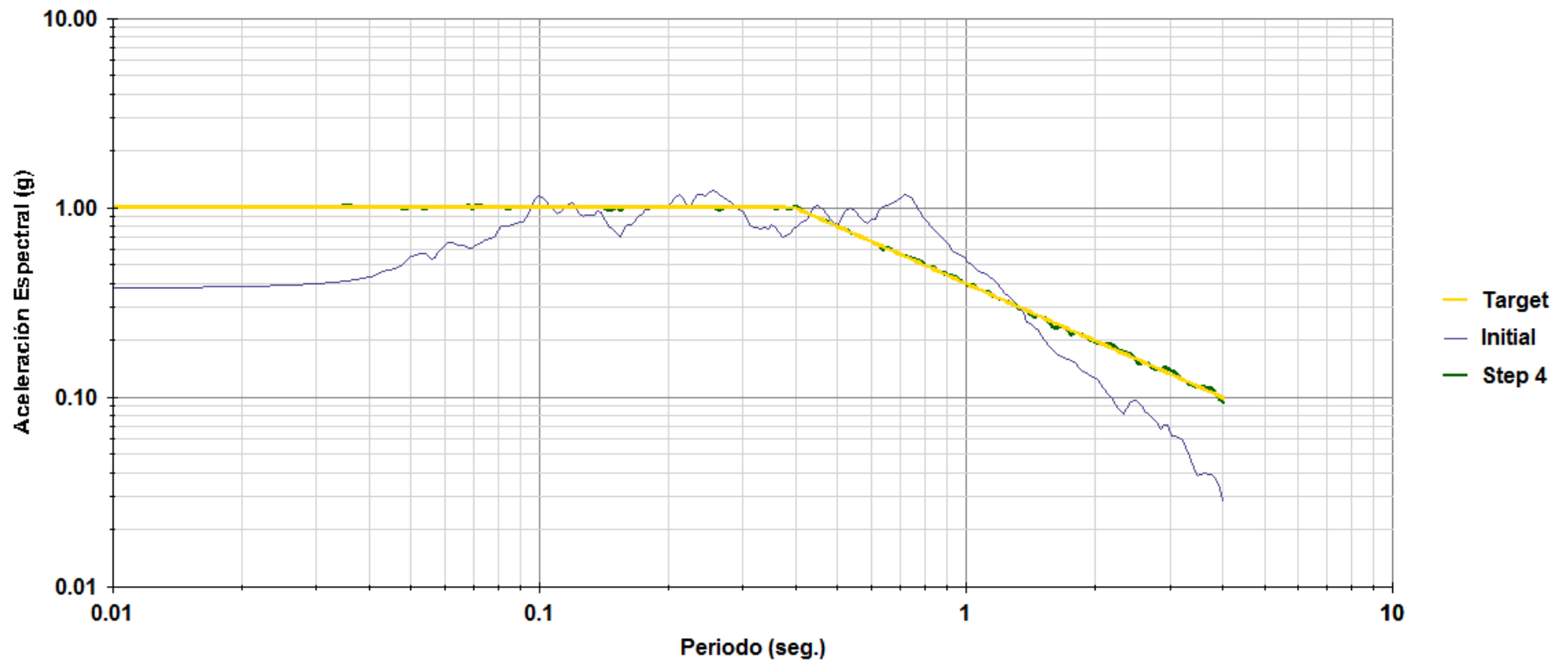


Figura 3.2 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

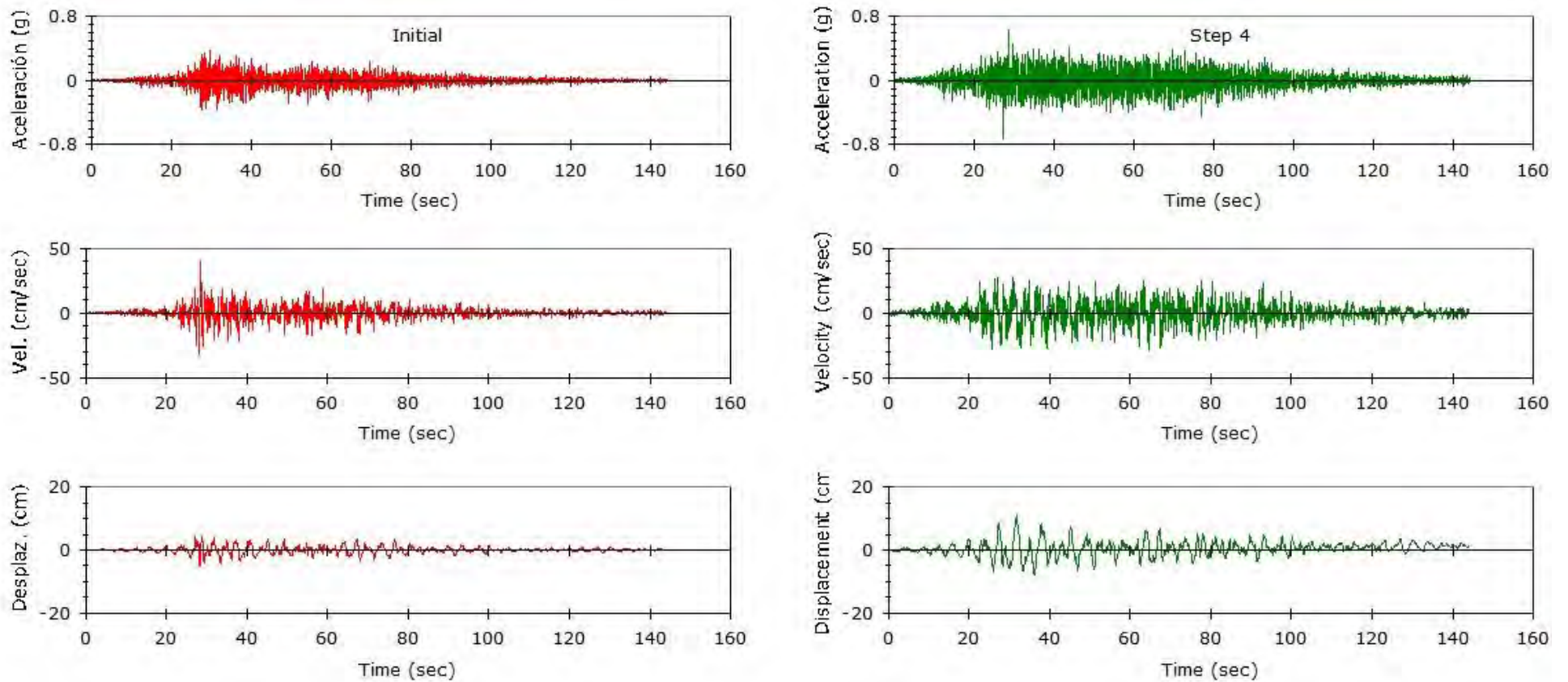


Figura 3.3 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

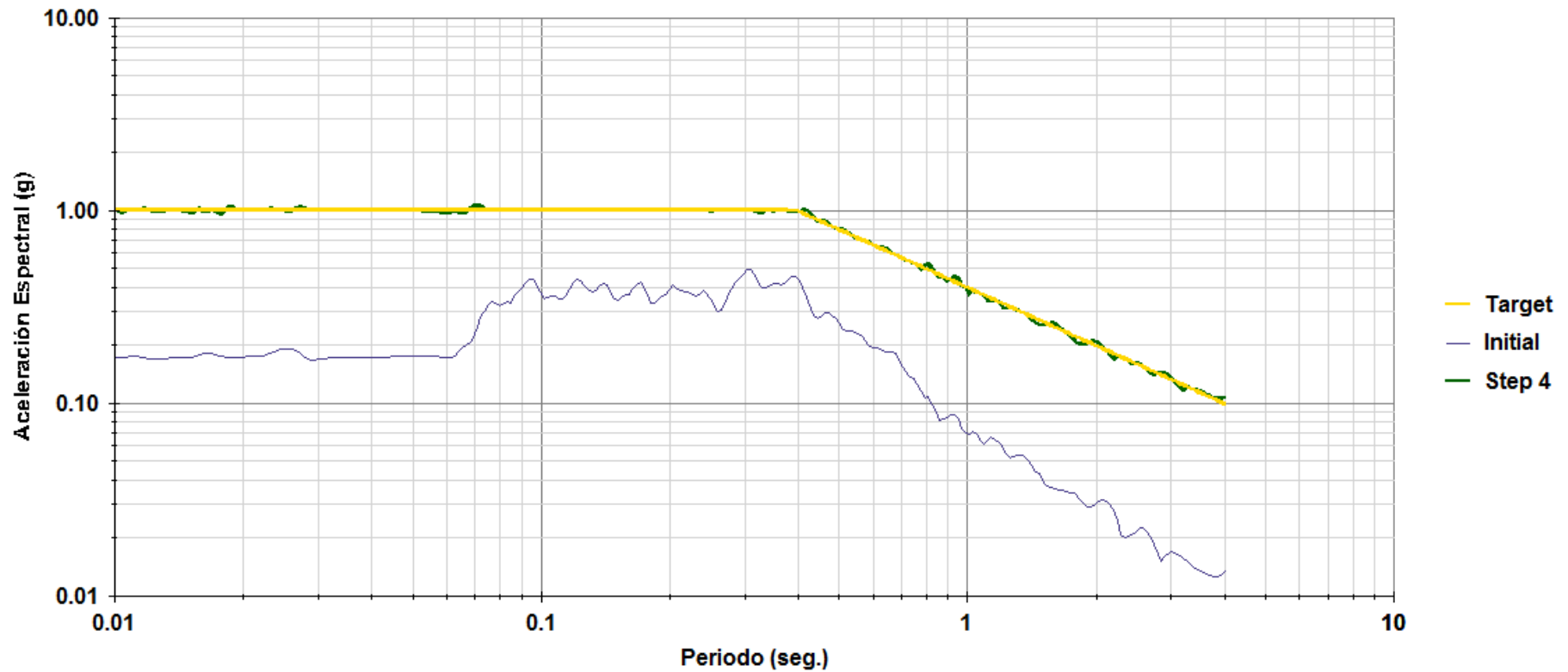


Figura 3.4 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

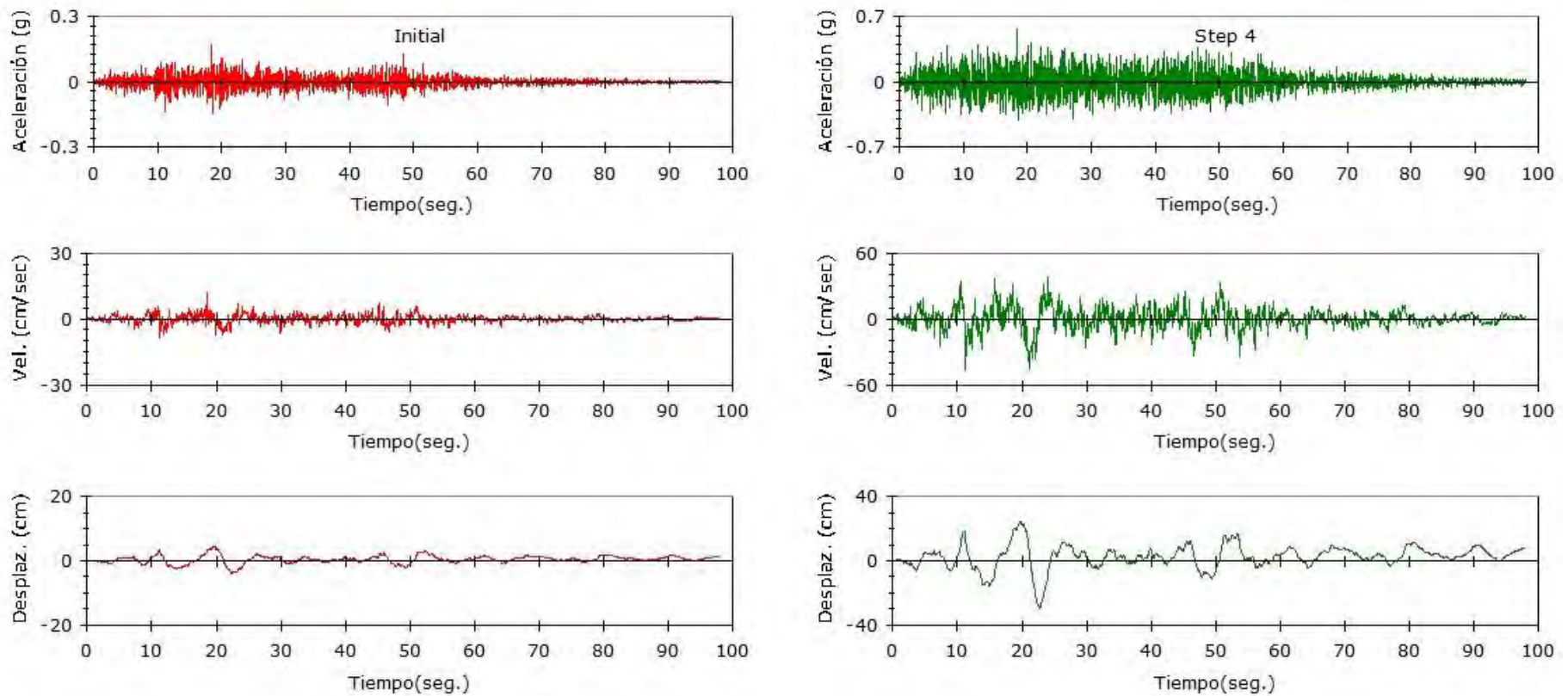


Figura 3.5 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transersal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

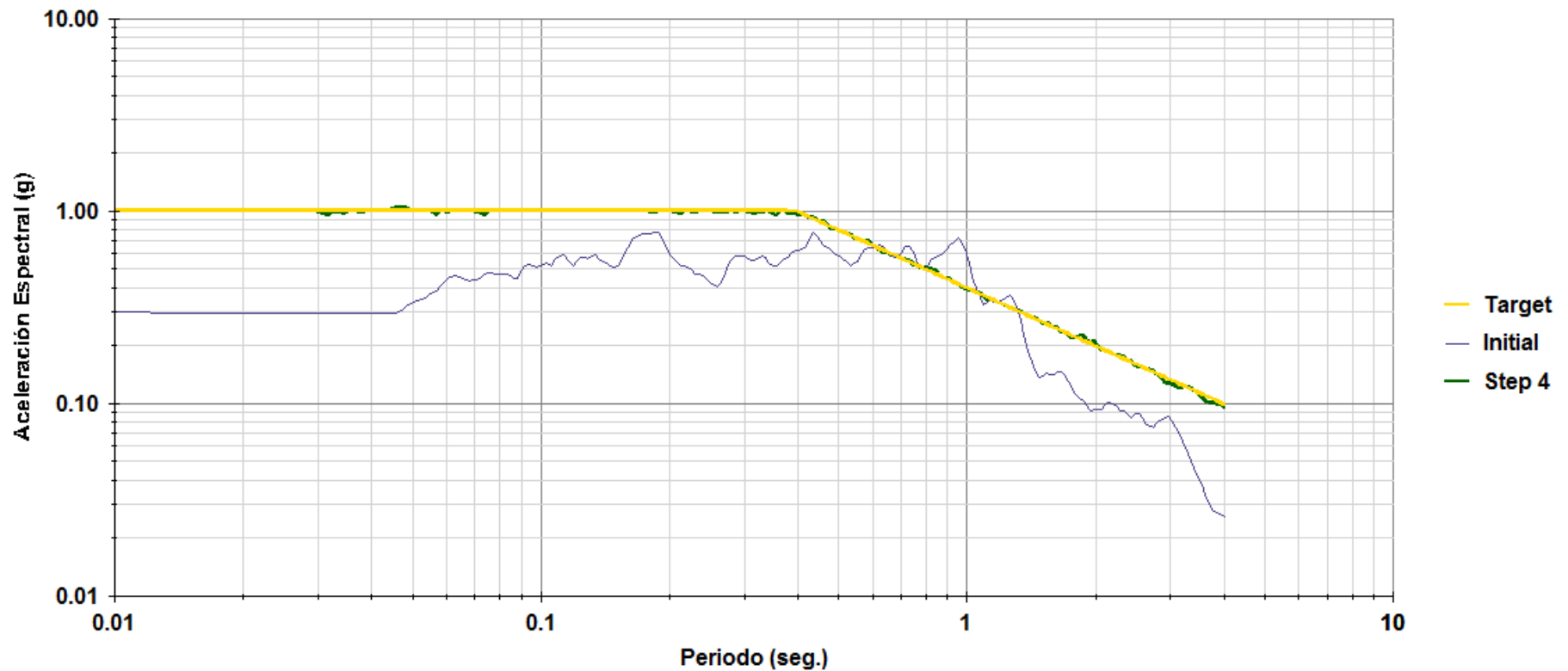


Figura 3.6 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

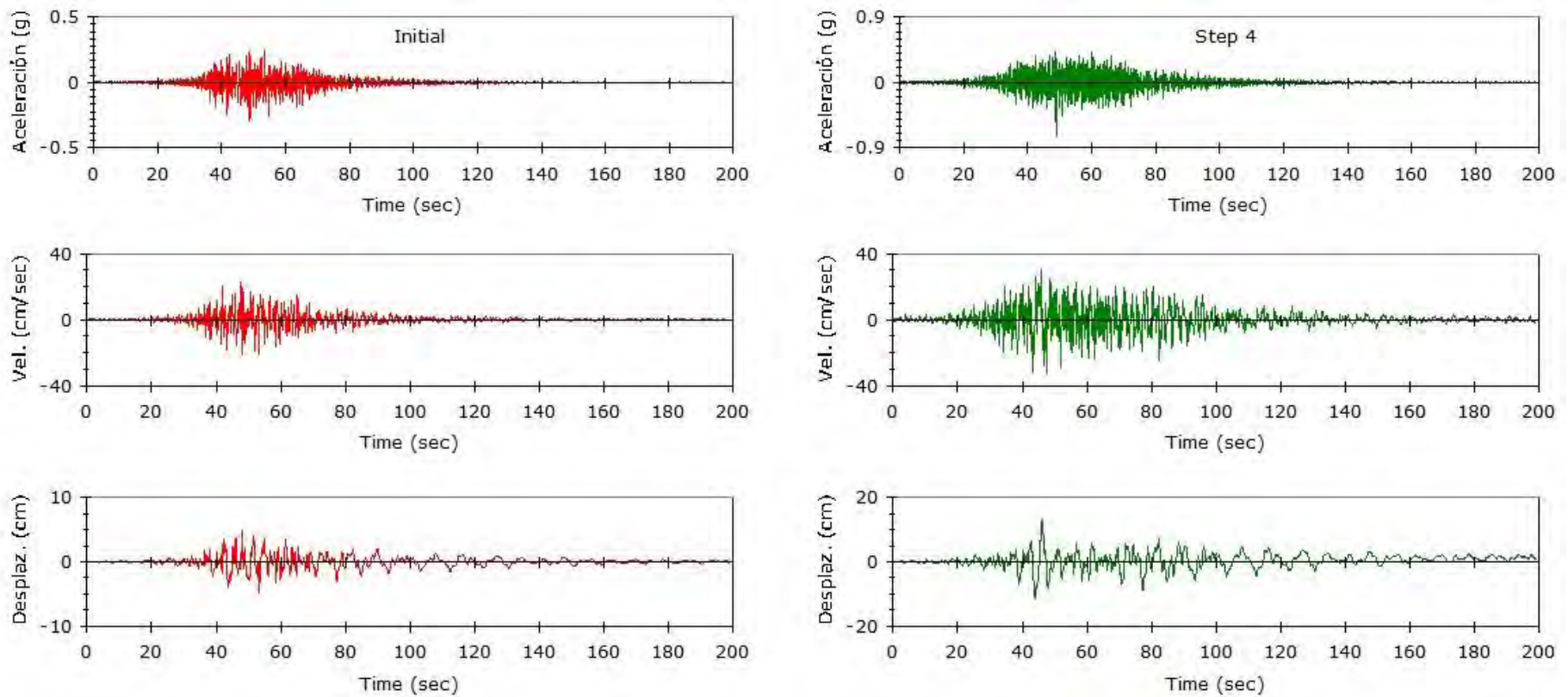


Figura 3.7 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

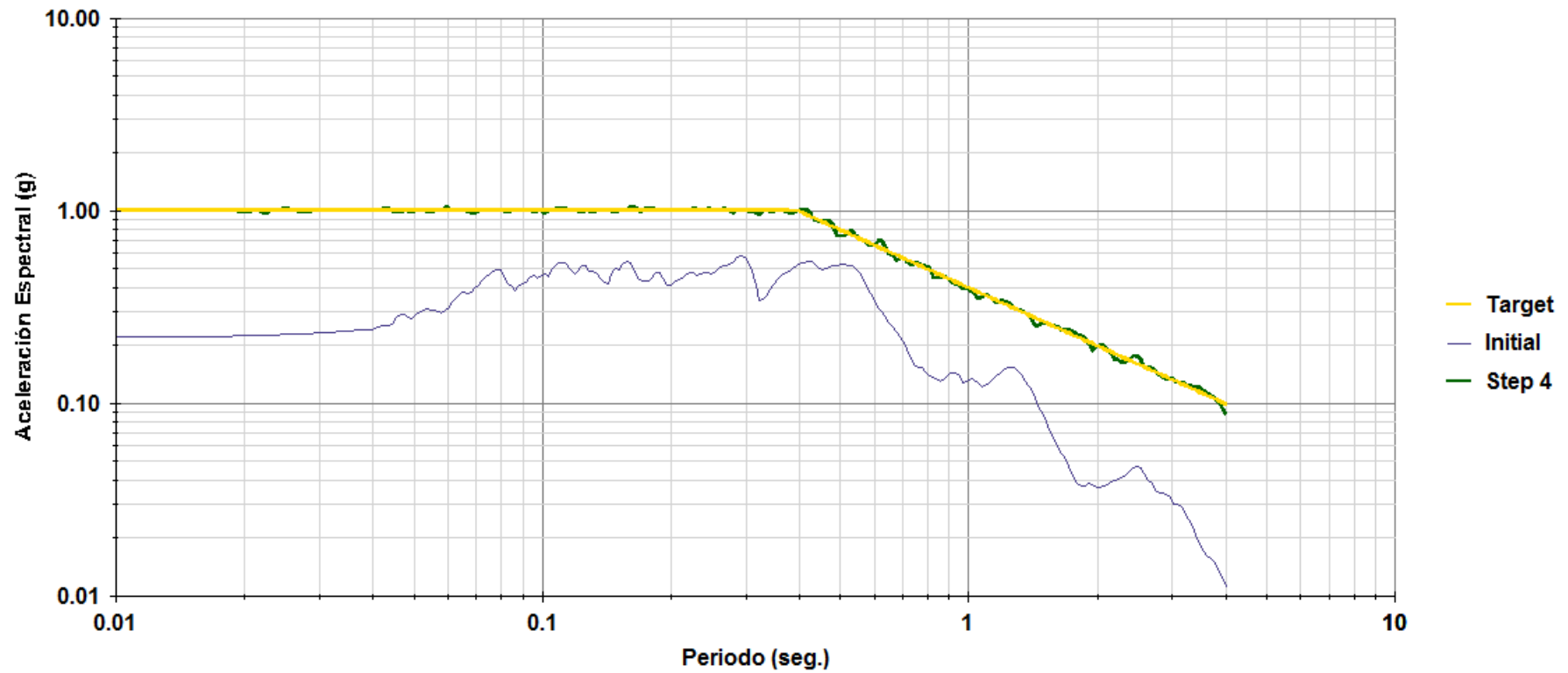


Figura 3.8 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

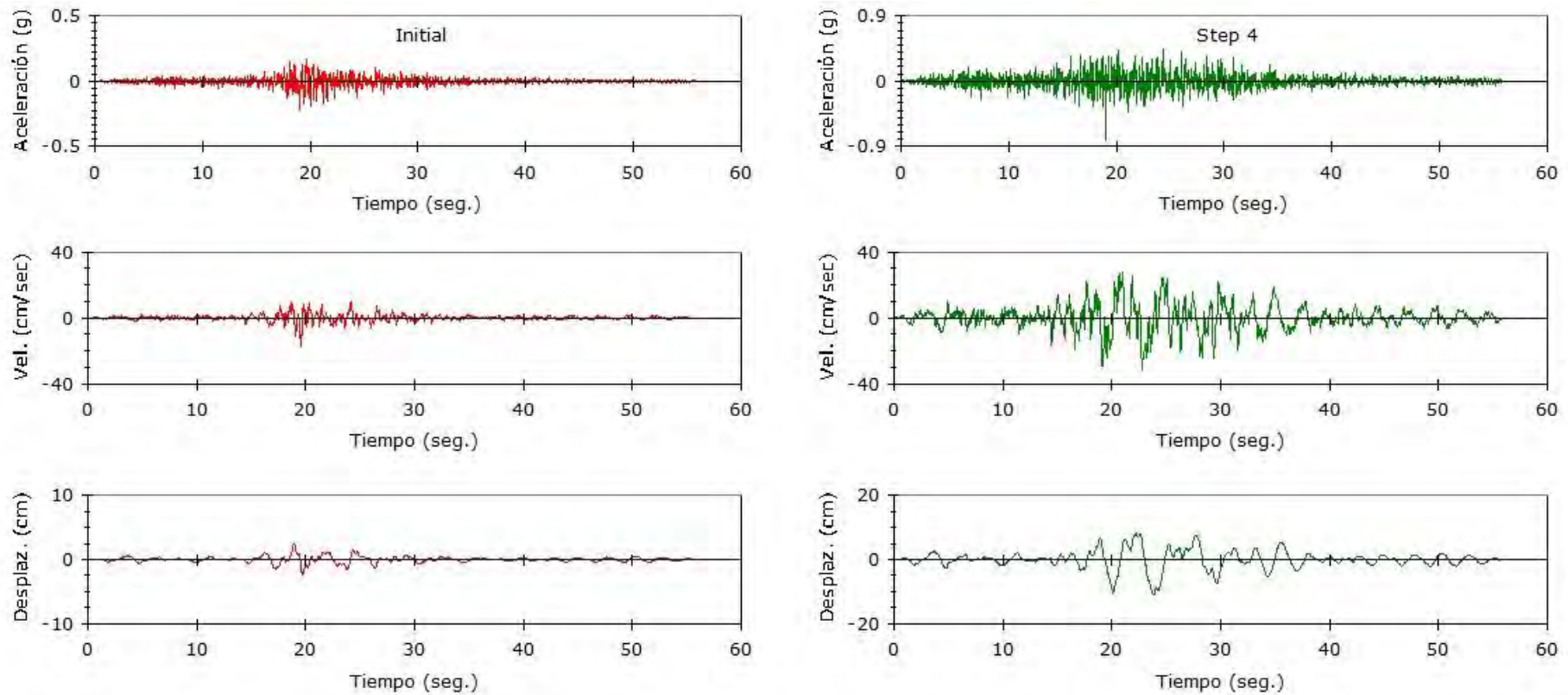


Figura 3.9 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapaca (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro de la Norma Técnica Peruana E030. Fuente propia.

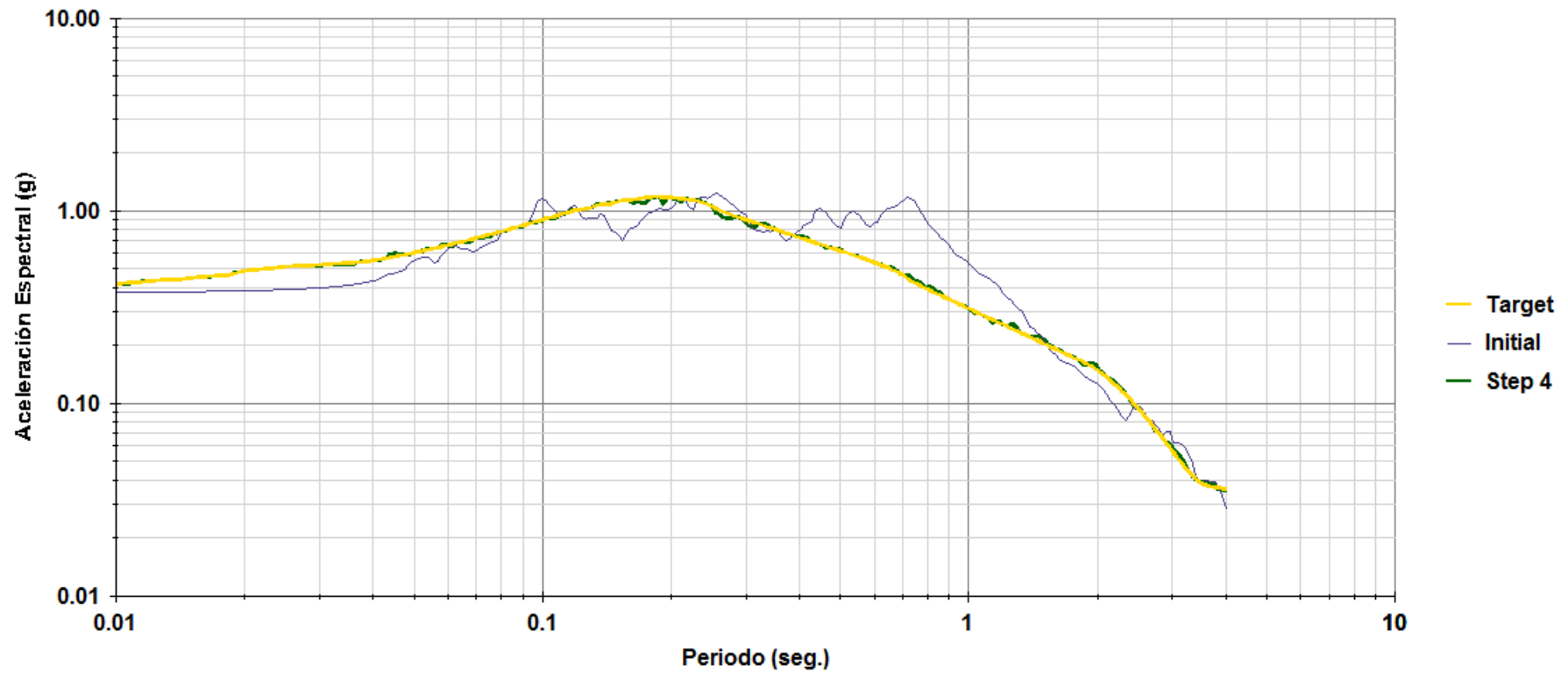


Figura 3.10 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

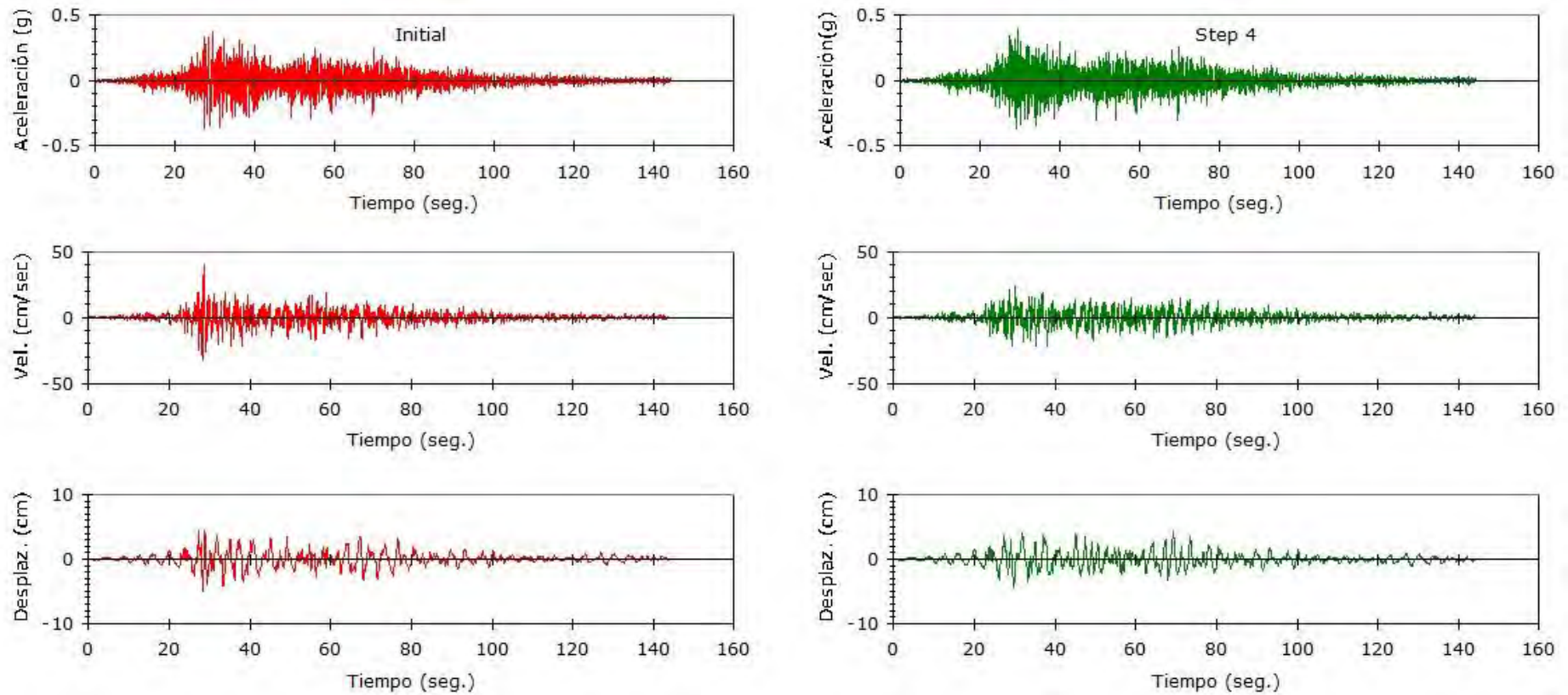


Figura 3.11 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

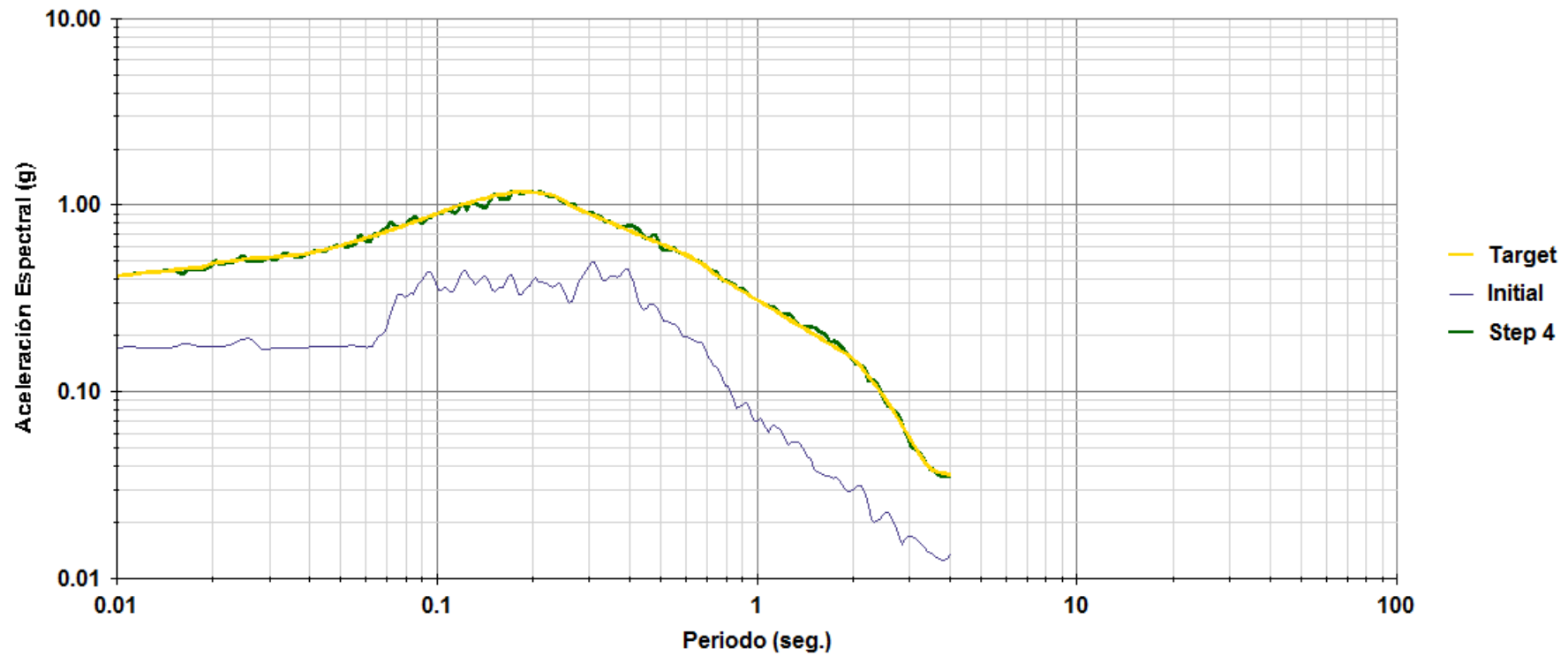


Figura 3.12 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

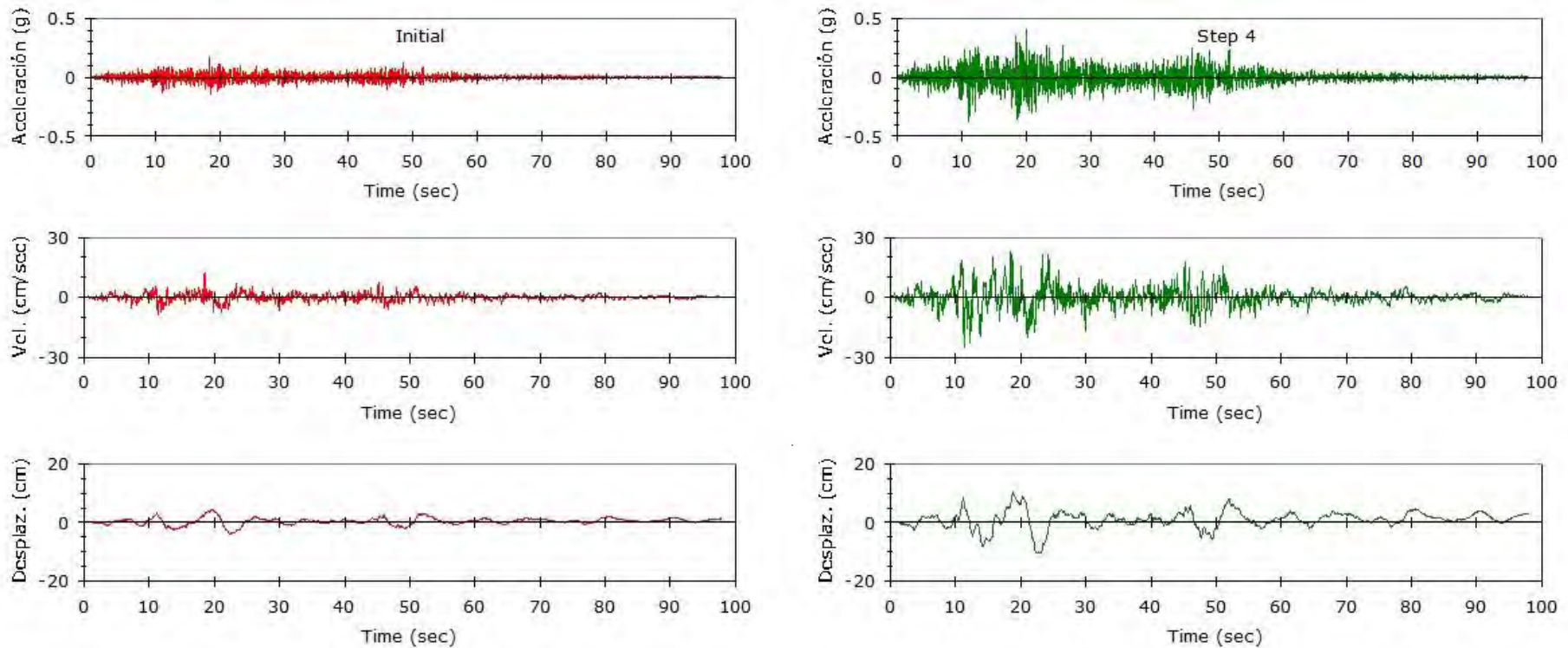


Figura 3.13 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

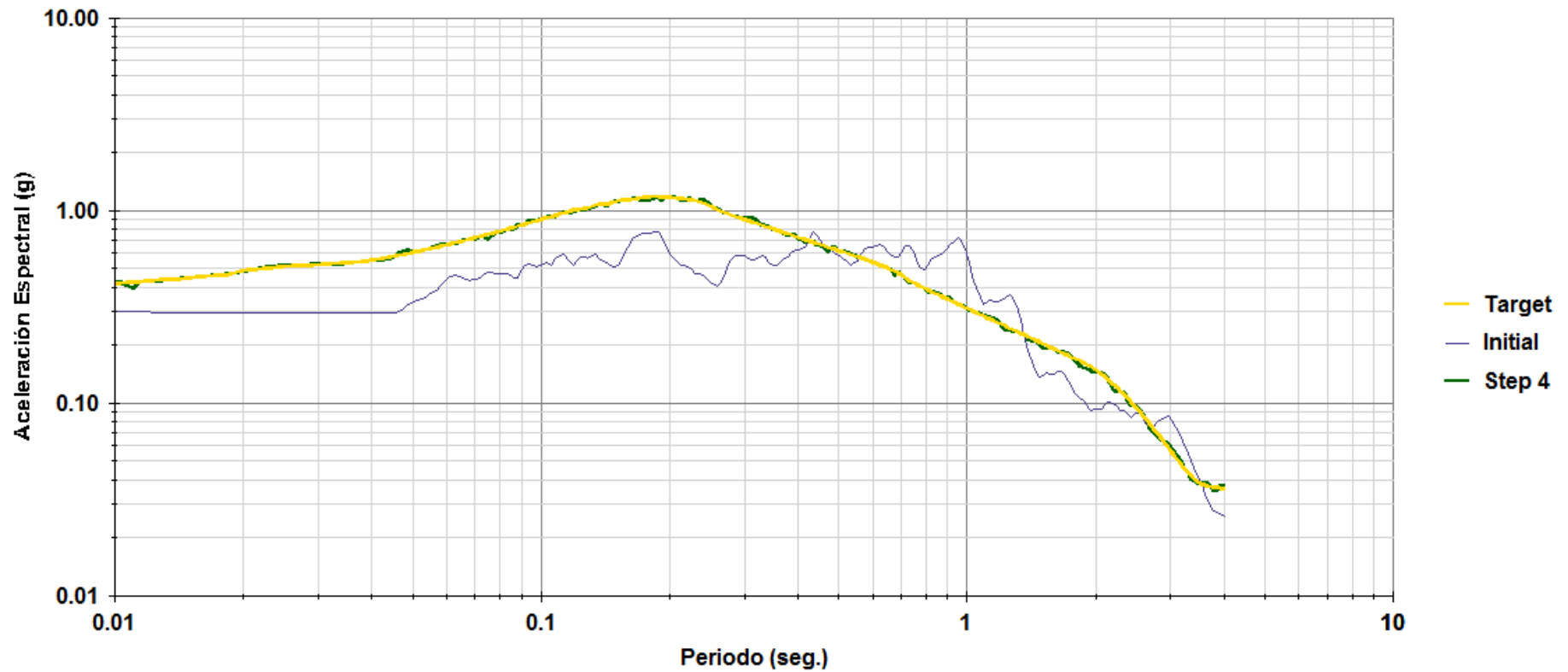


Figura 3.14 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

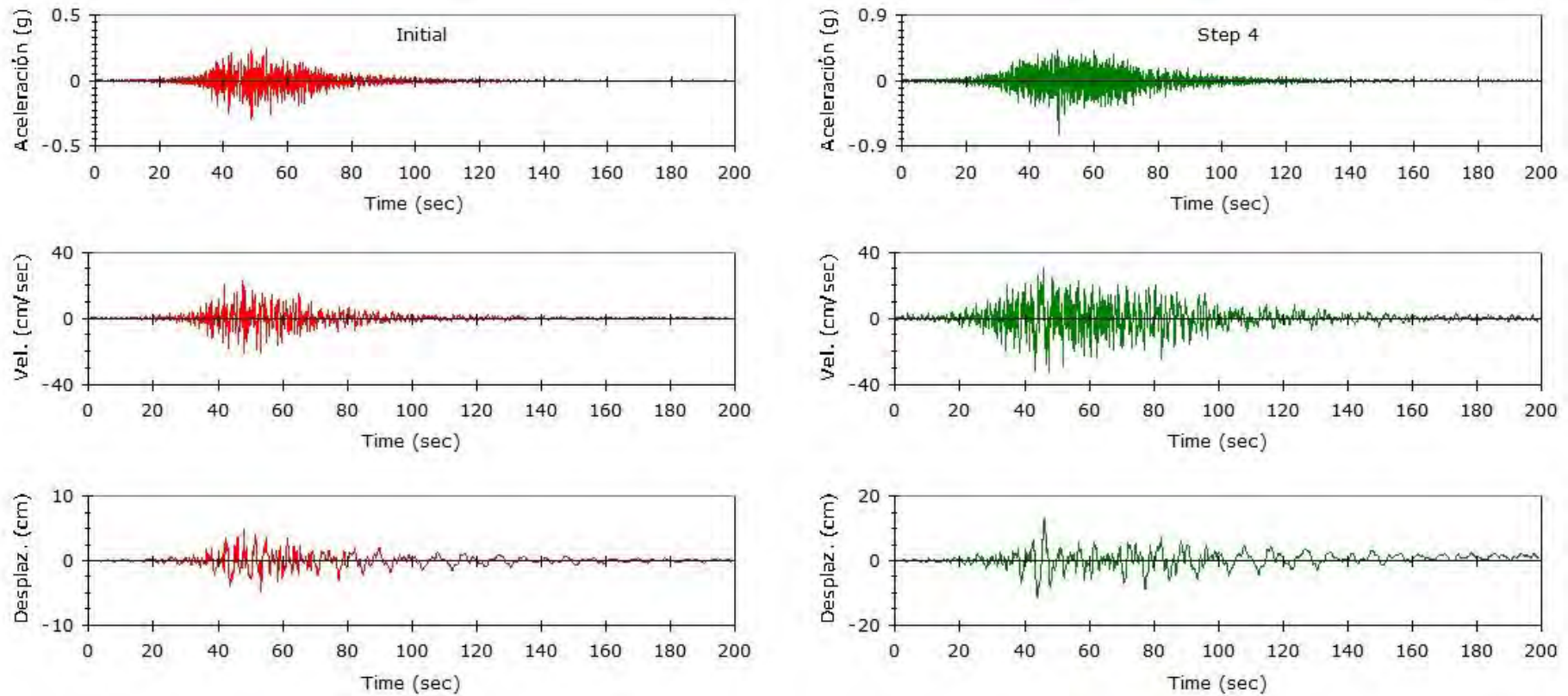


Figura 3.15 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

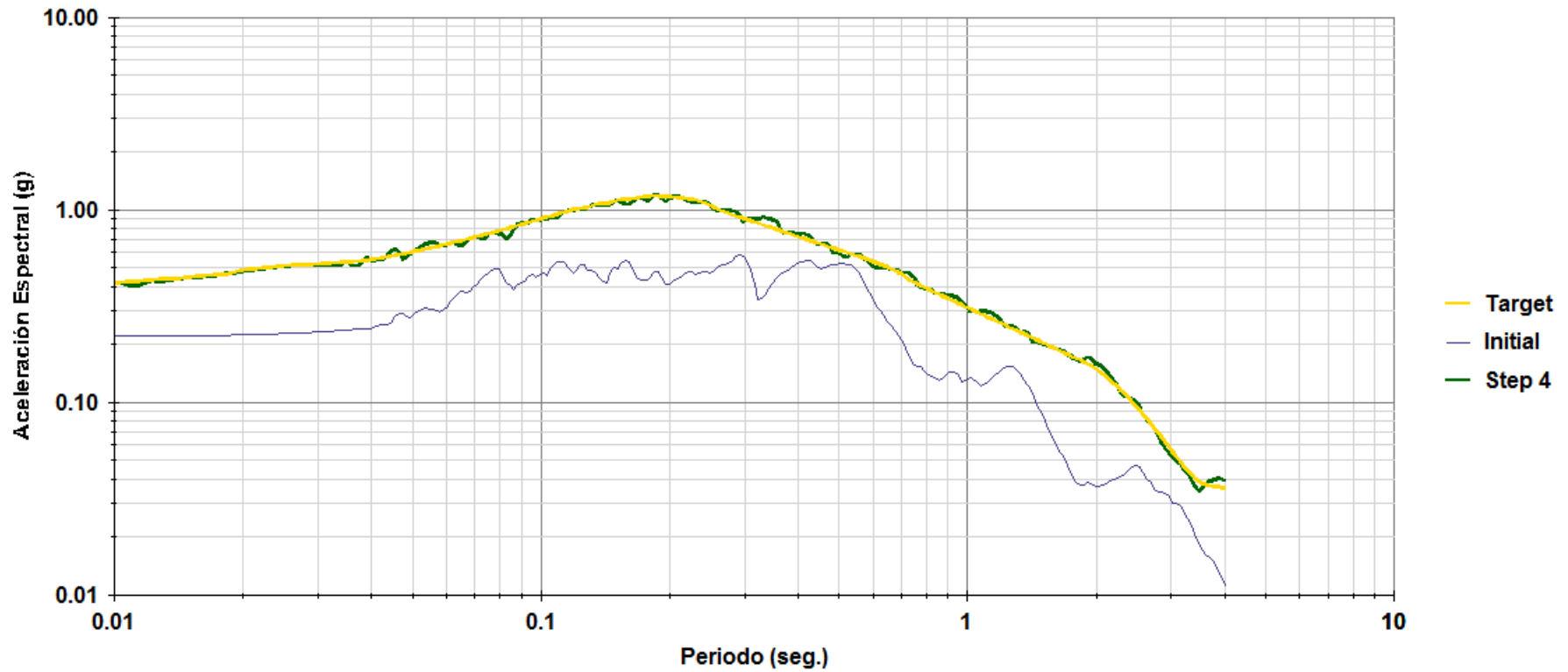


Figura 3.16 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

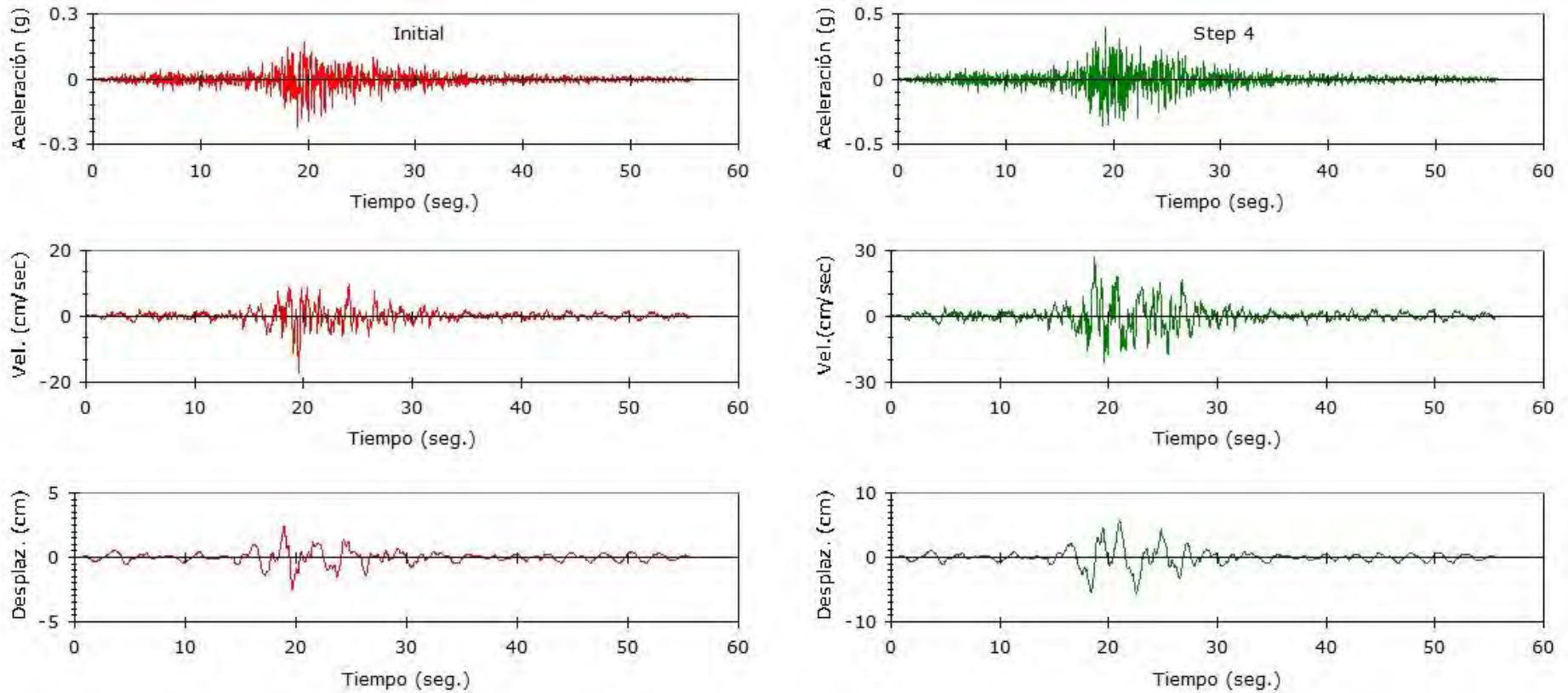


Figura 3.17 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro determinístico para el sitio de la presa Yuracmayo. Fuente propia.

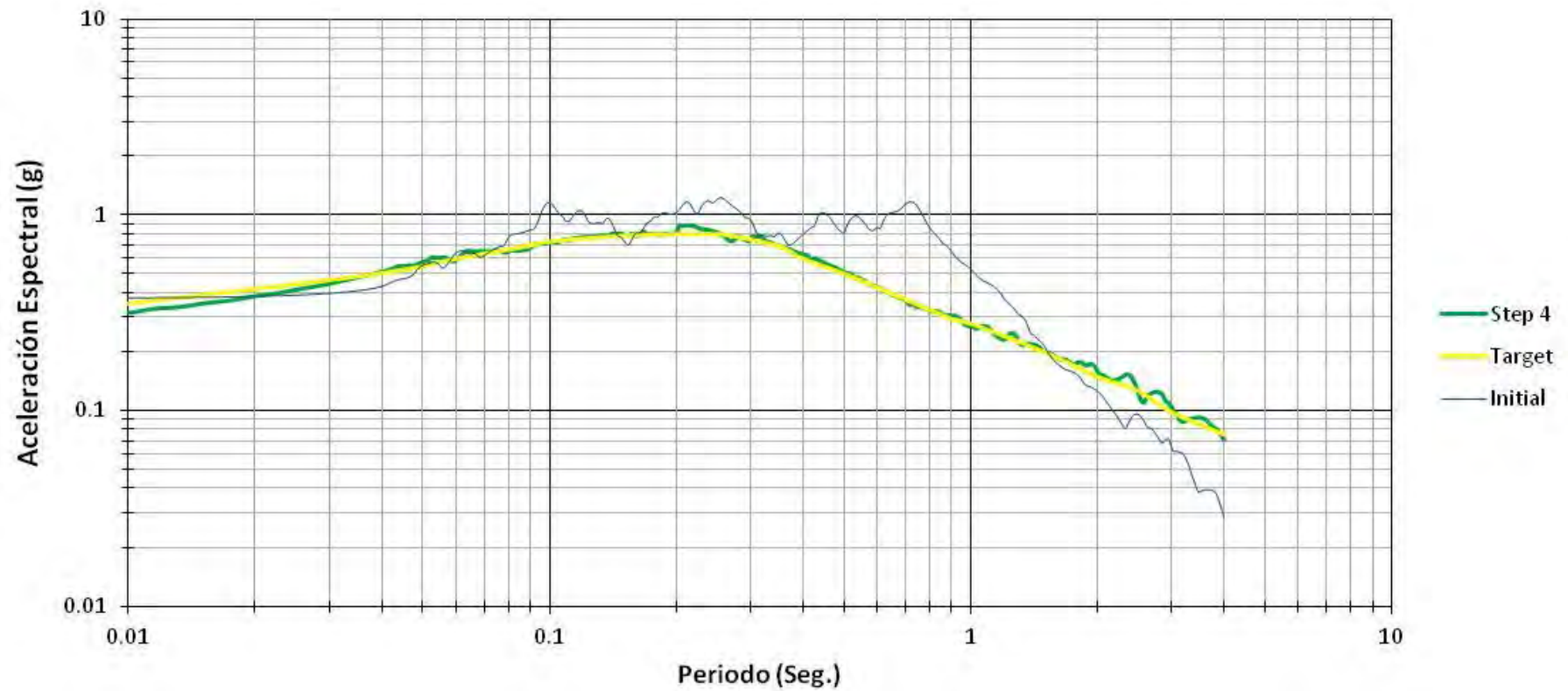


Figura 3.18 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

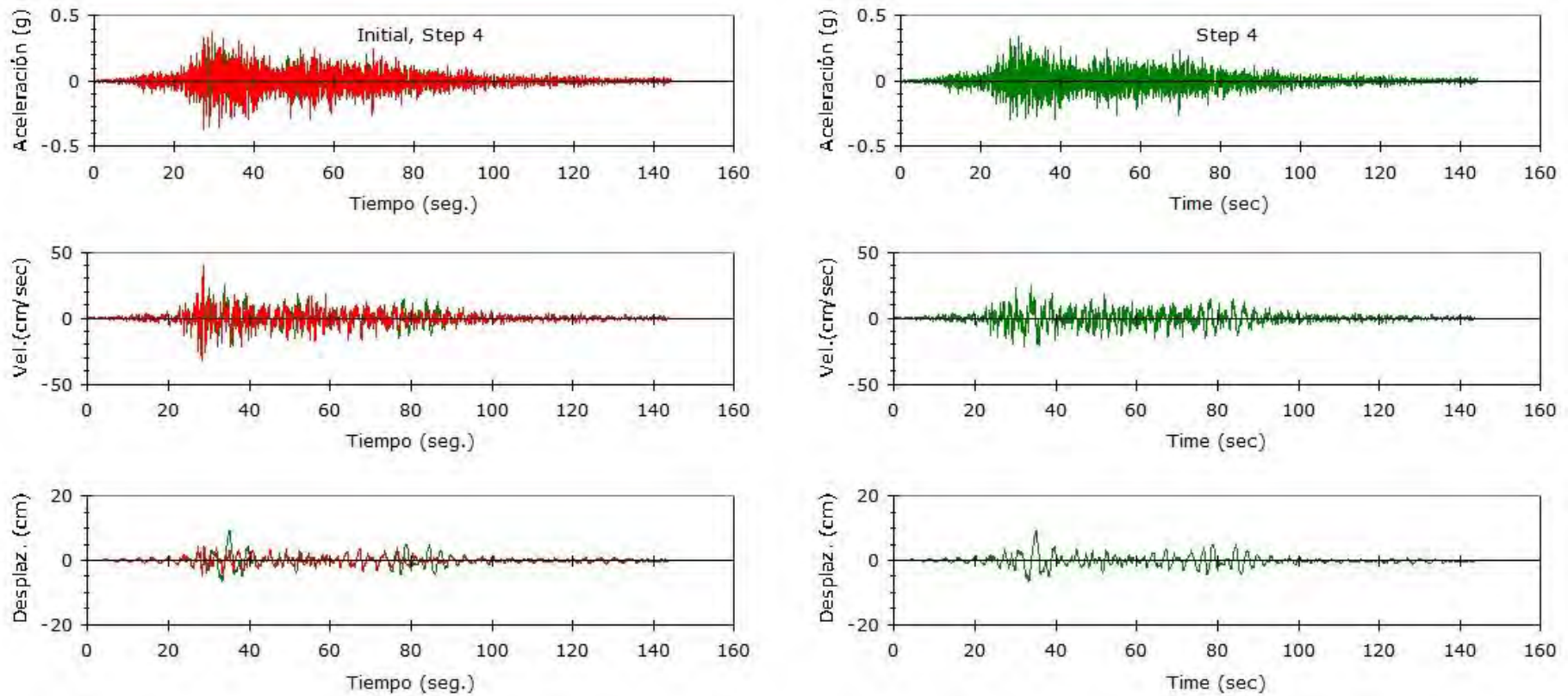


Figura 3.19 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

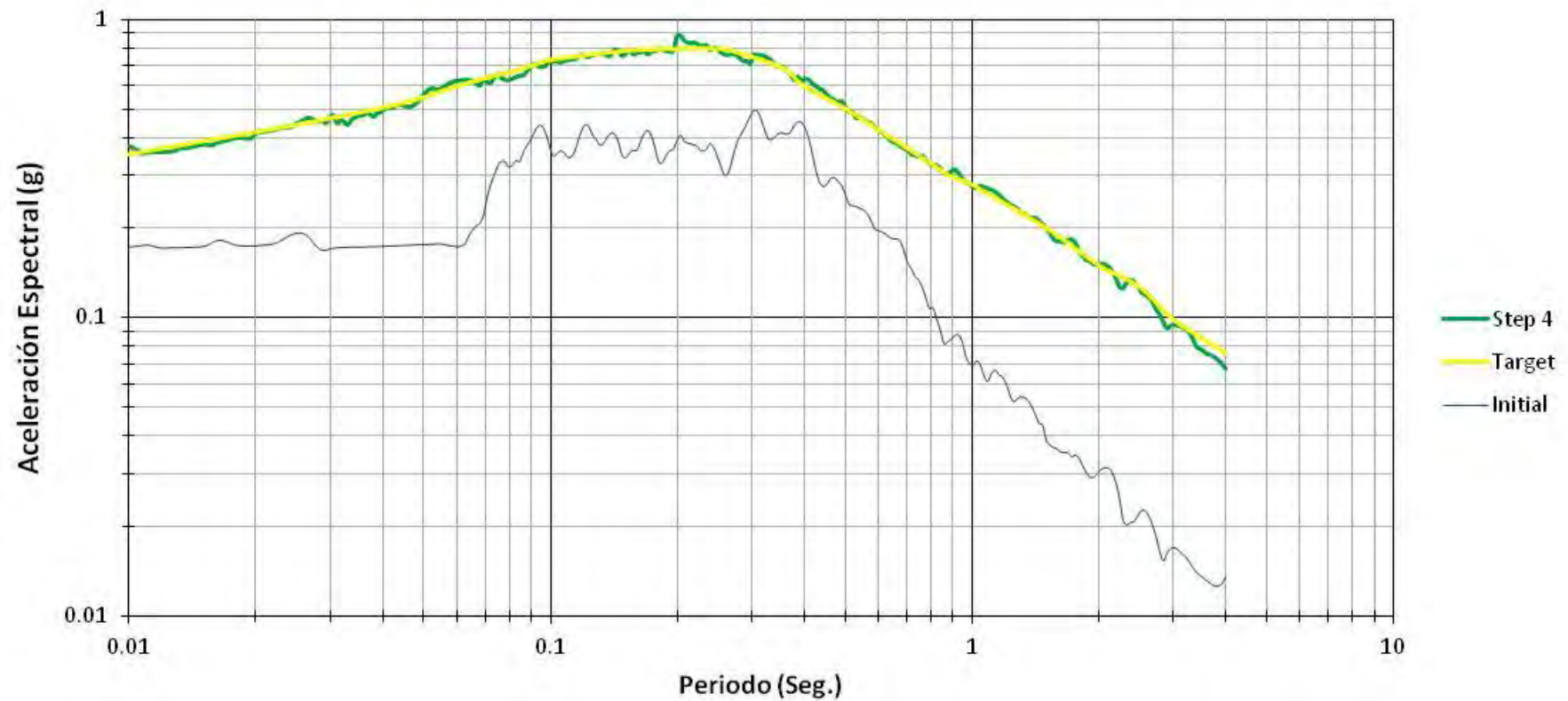


Figura 3.20 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

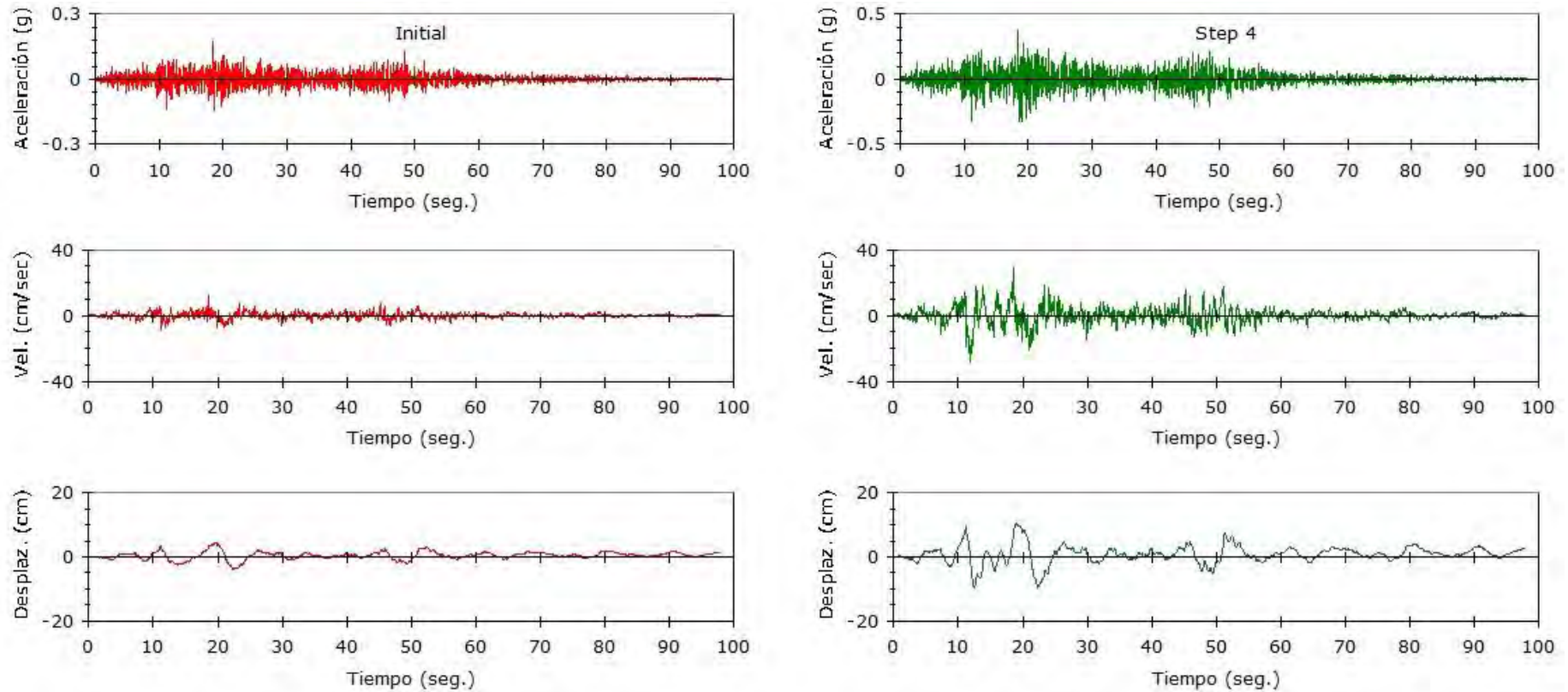


Figura 3.21 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

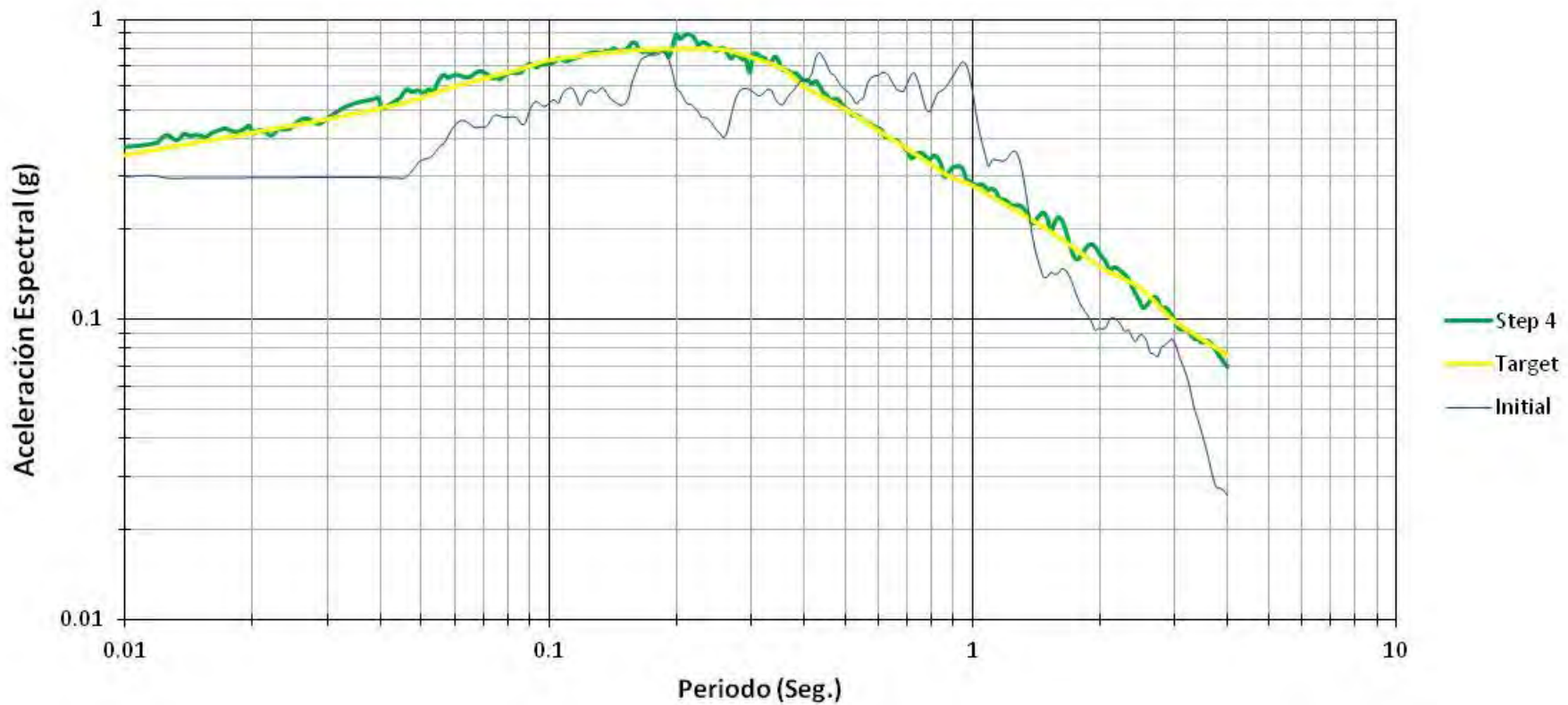


Figura 3.22 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

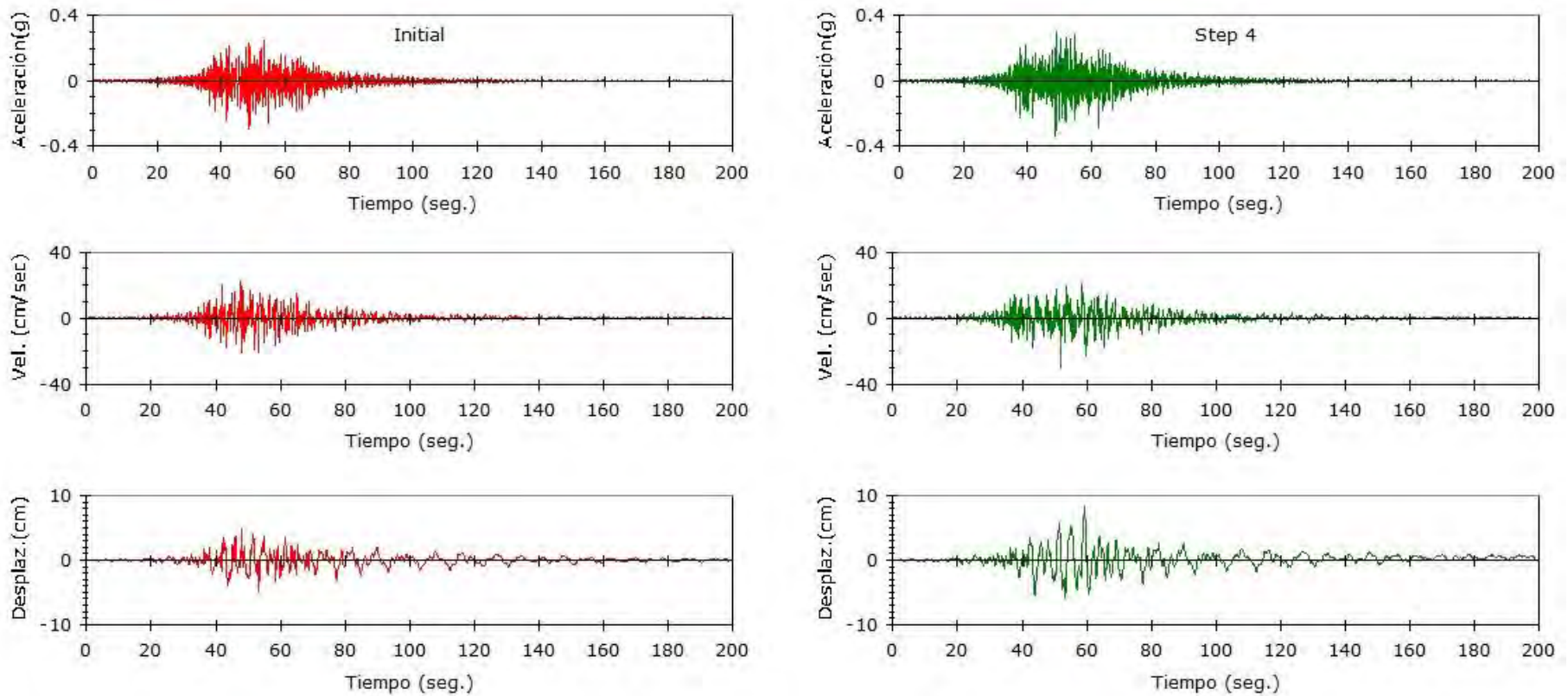


Figura 3.23 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

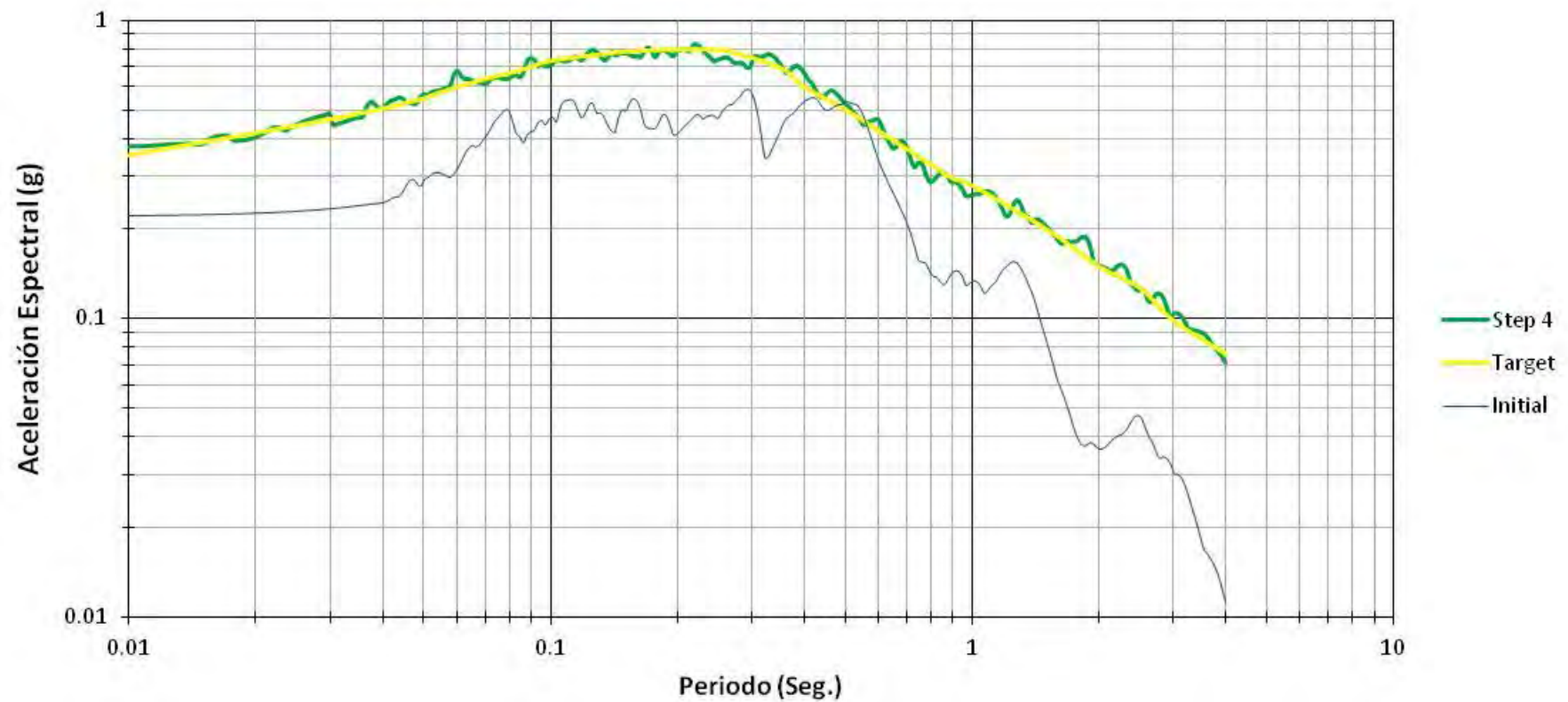


Figura 3.24 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral el espectro del código IBC. Fuente propia.

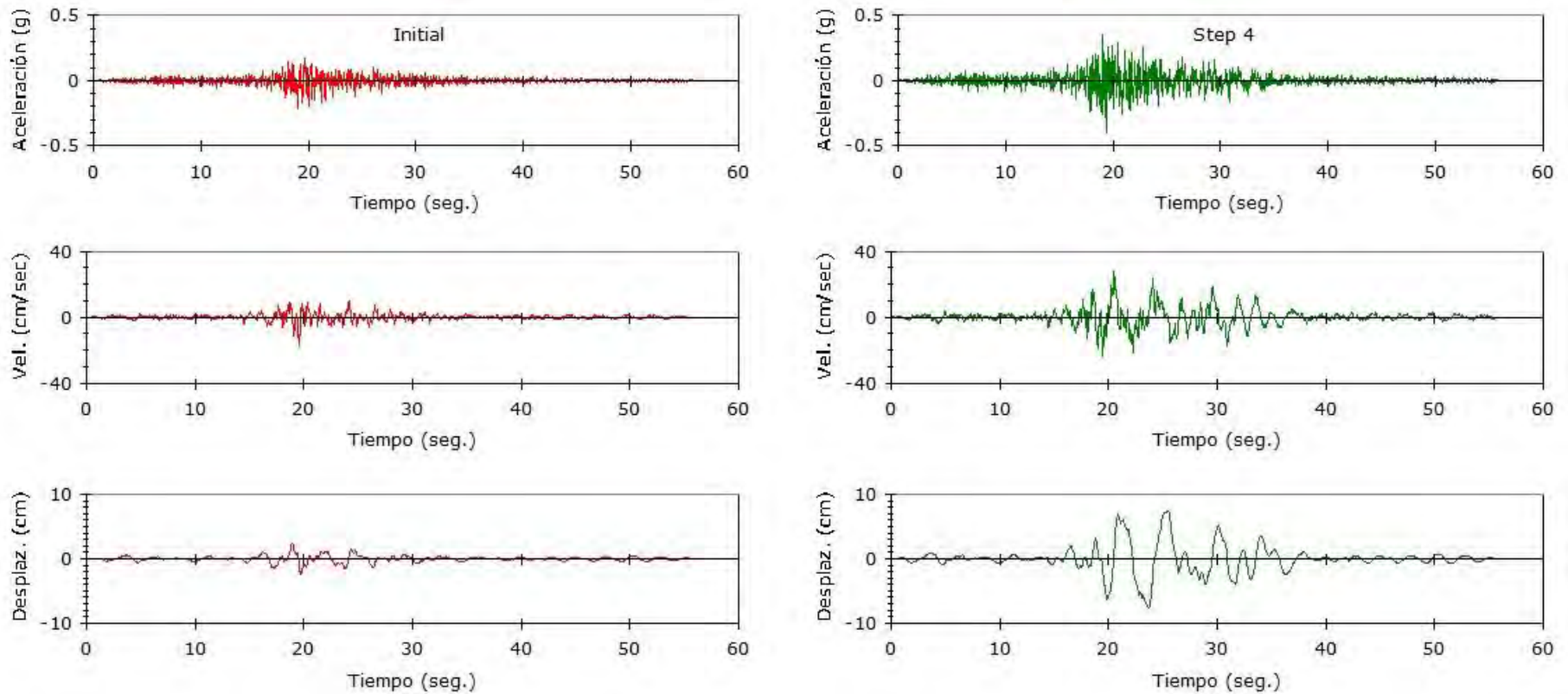


Figura 3.25 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

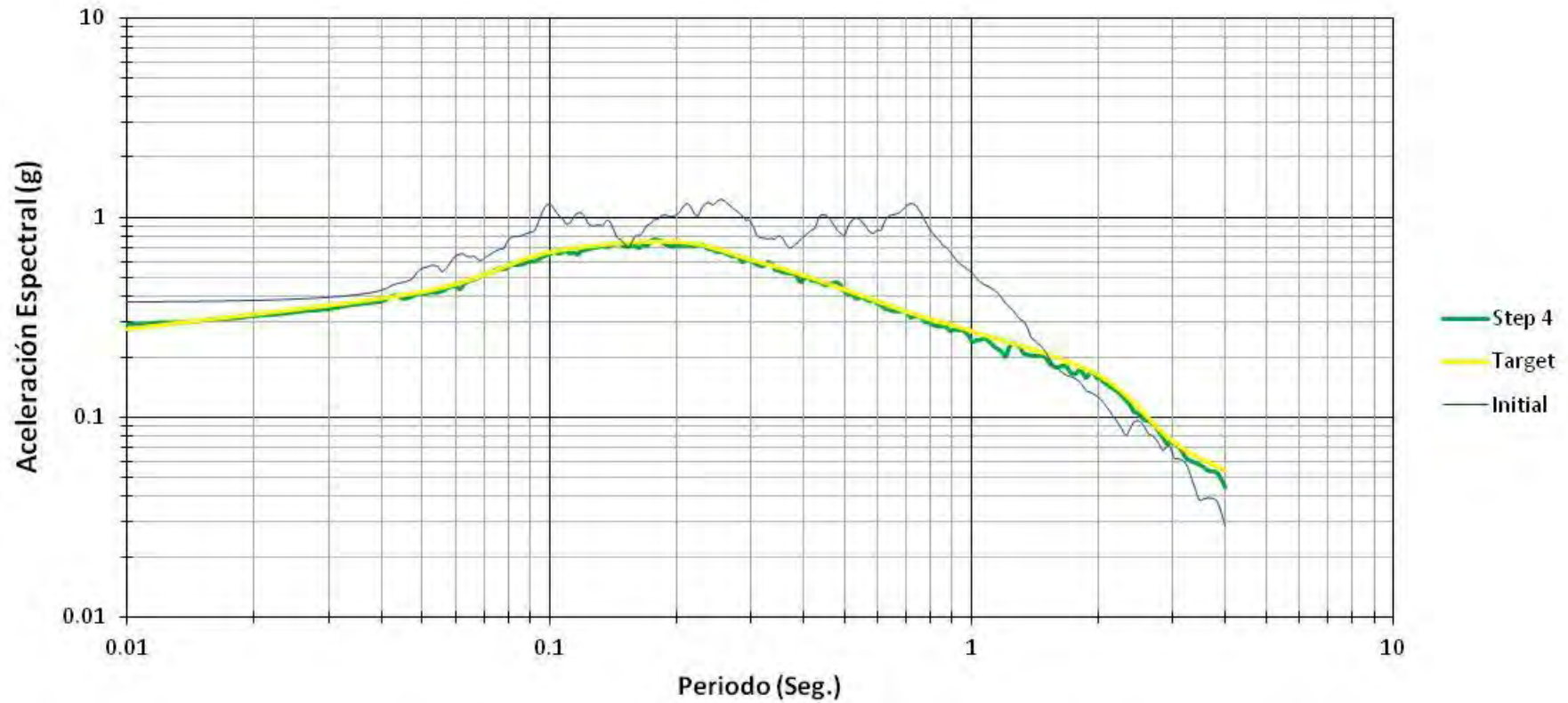


Figura 3.26 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

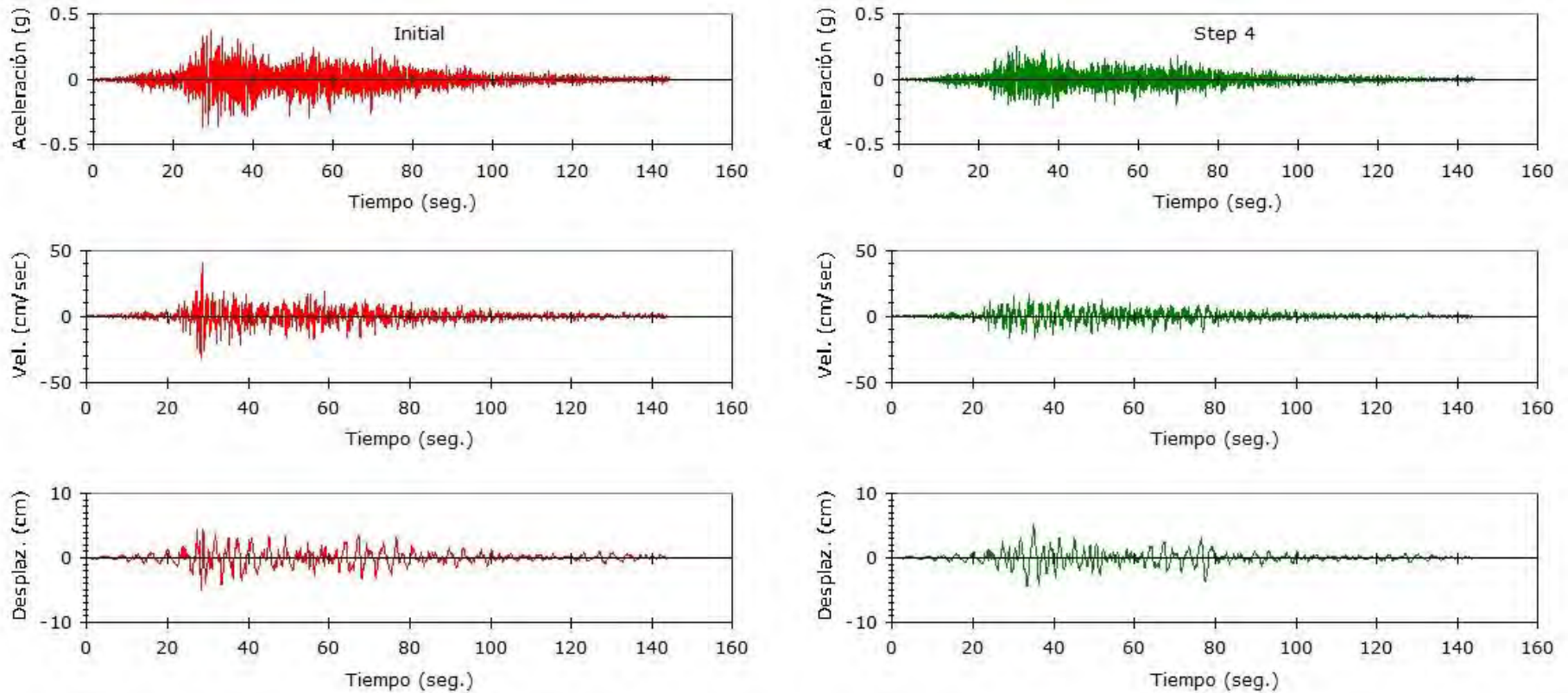


Figura 3.27 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

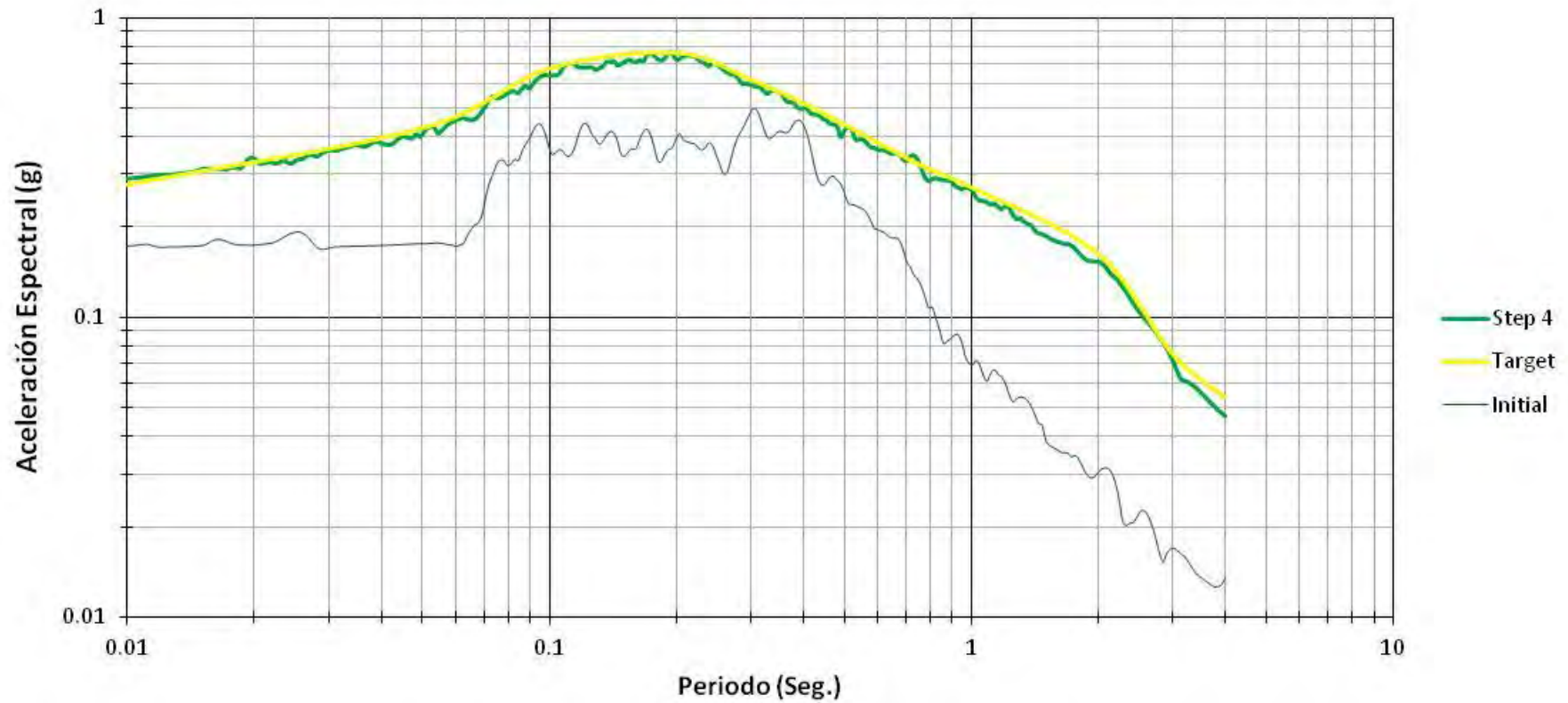


Figura 3.28 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

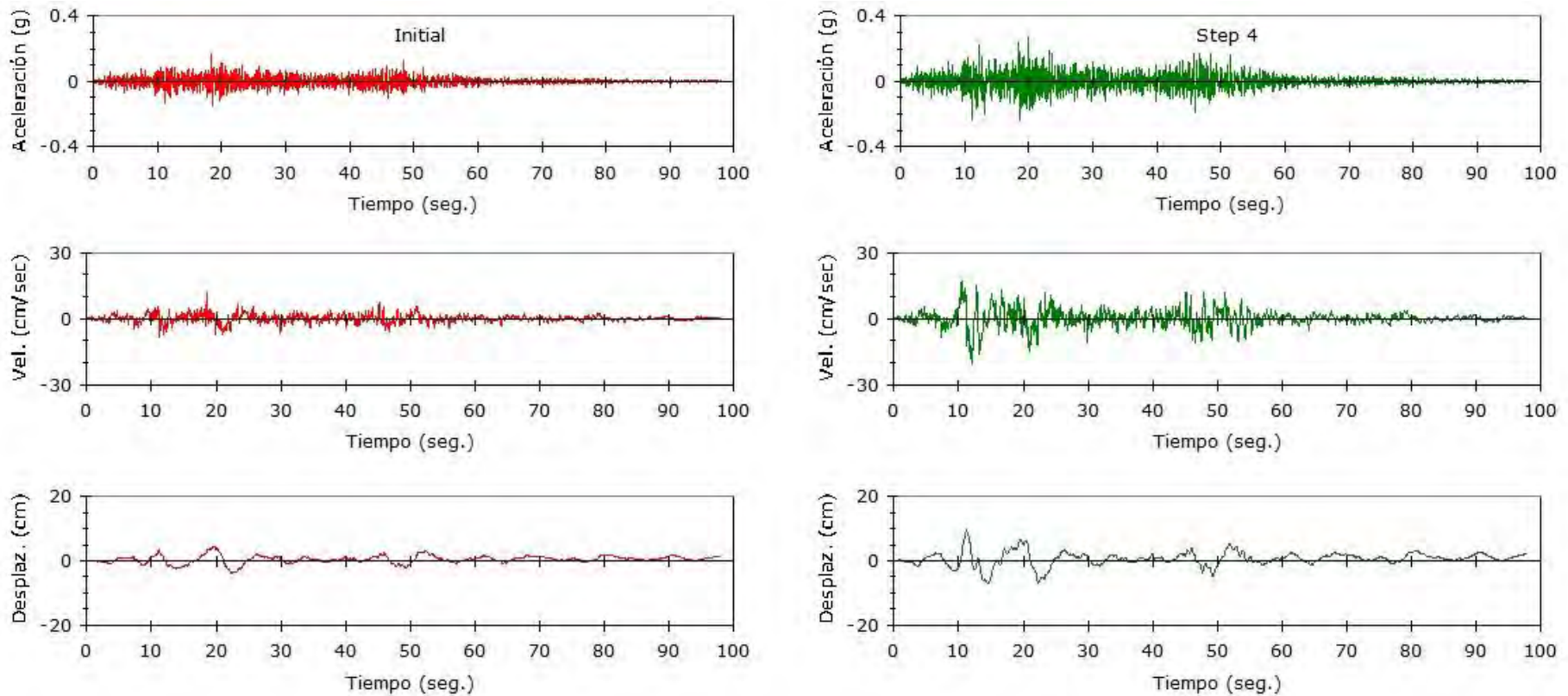


Figura 3.29 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

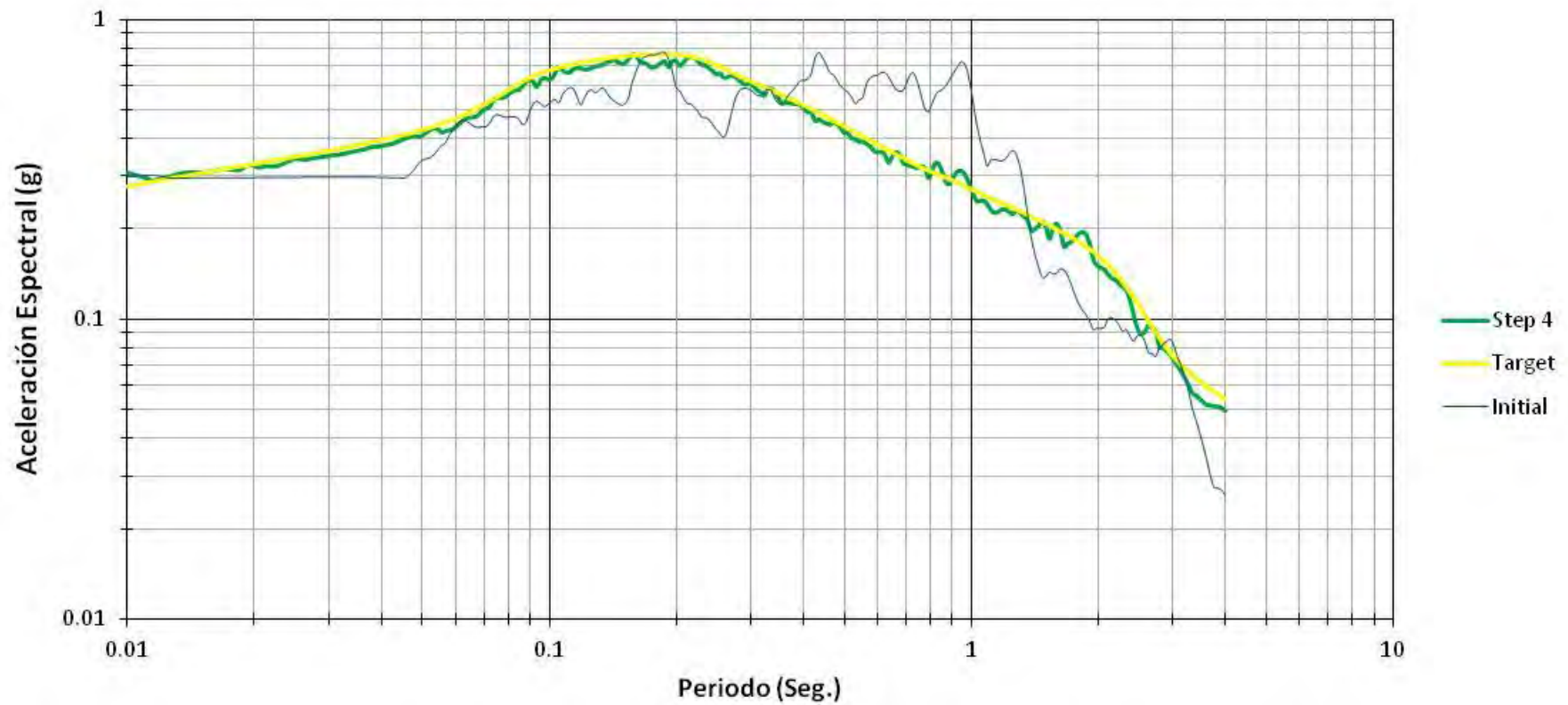


Figura 3.30 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

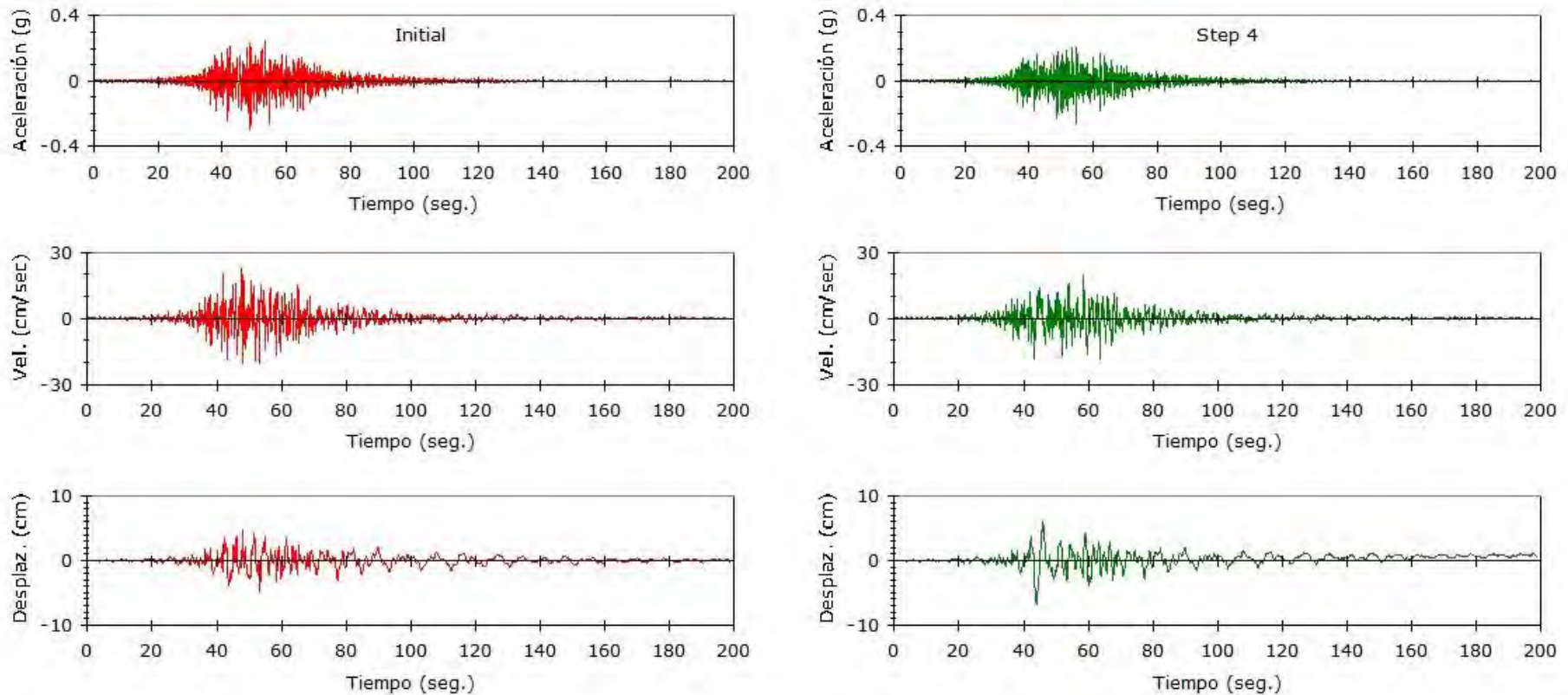


Figura 3.31 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

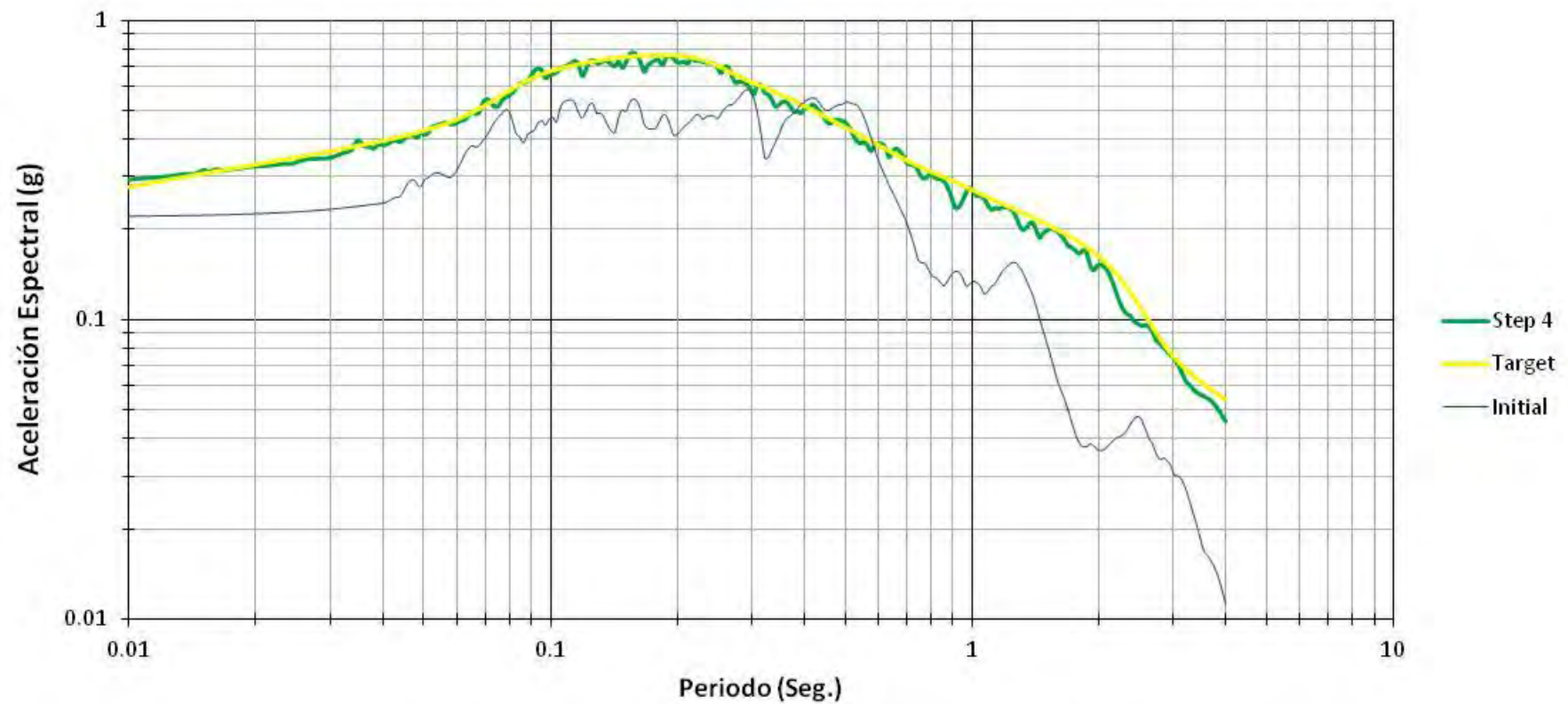


Figura 3.32 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

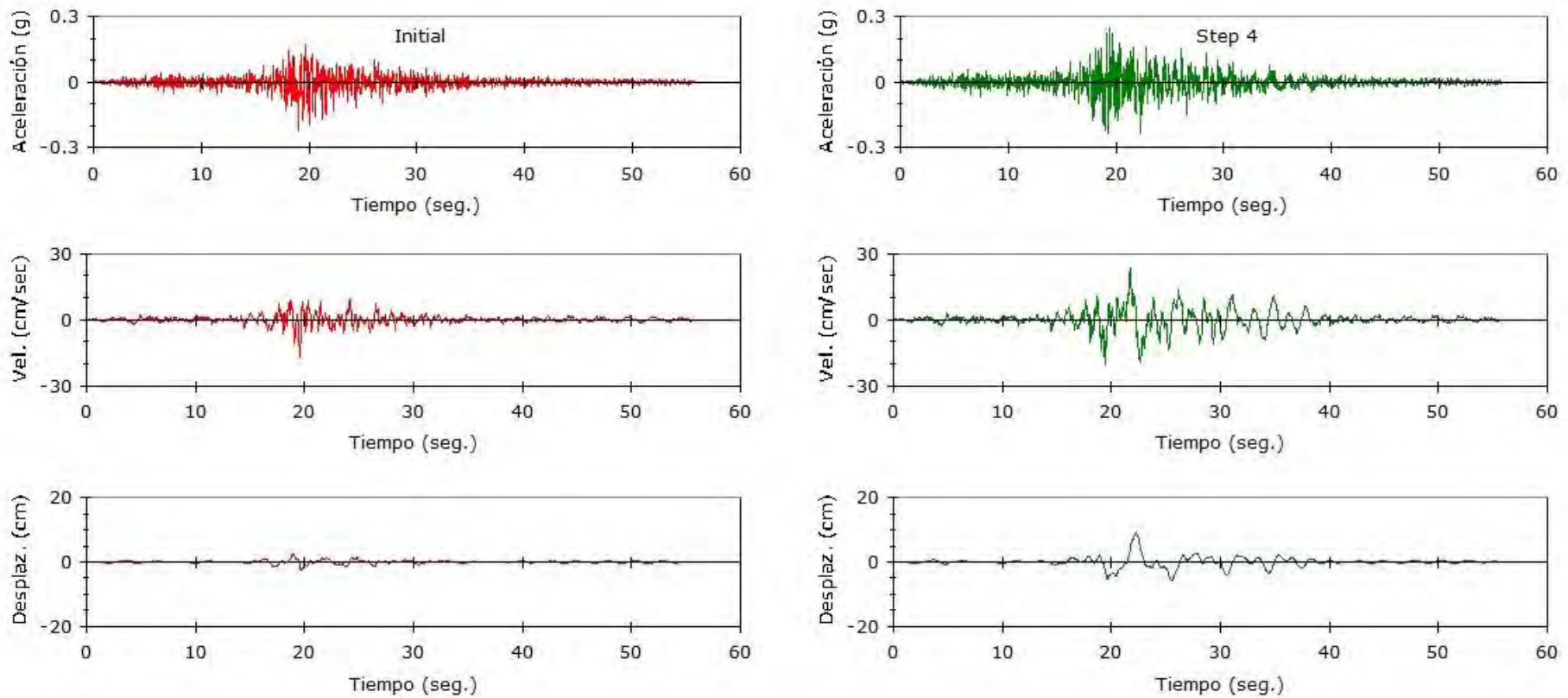


Figura 3.33 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme EPU-475. Fuente propia.

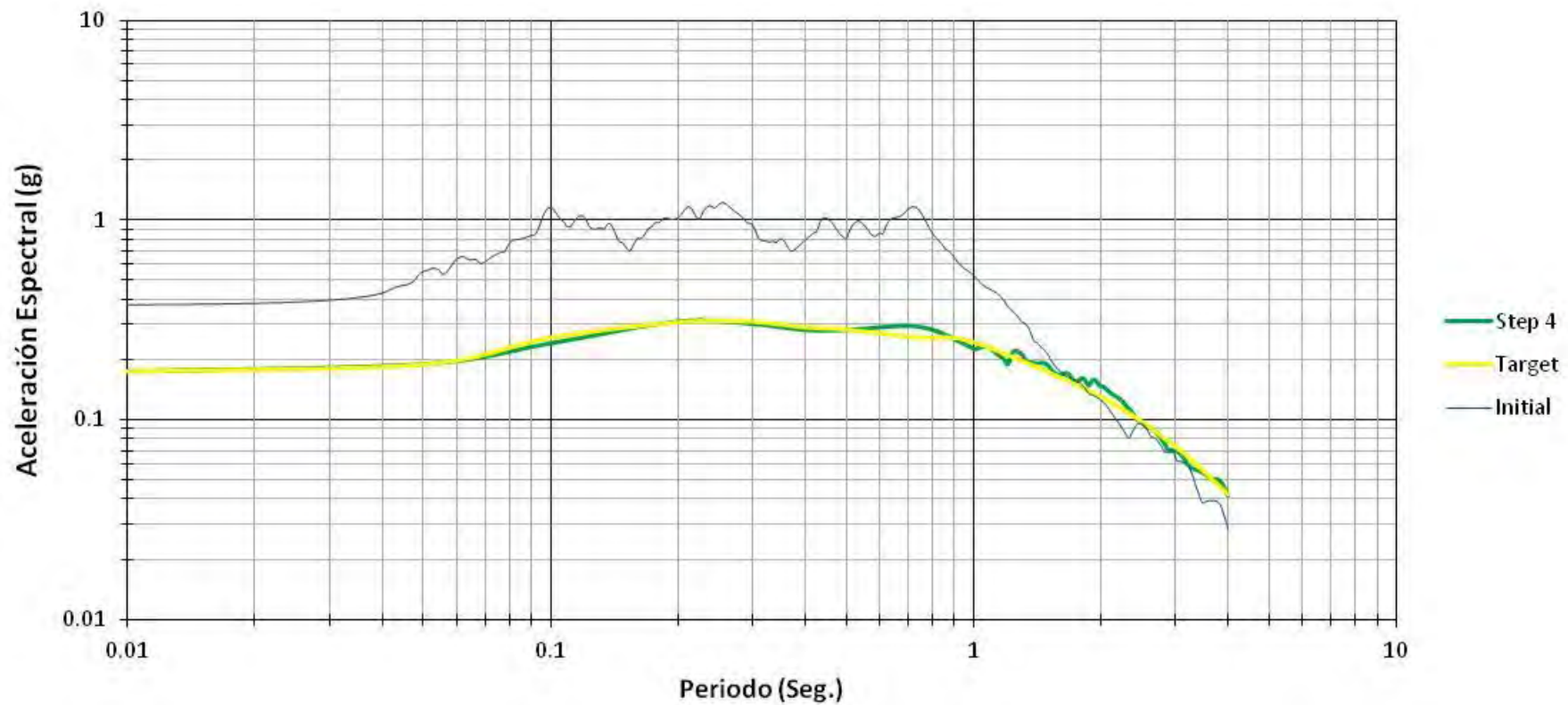


Figura 3.34 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

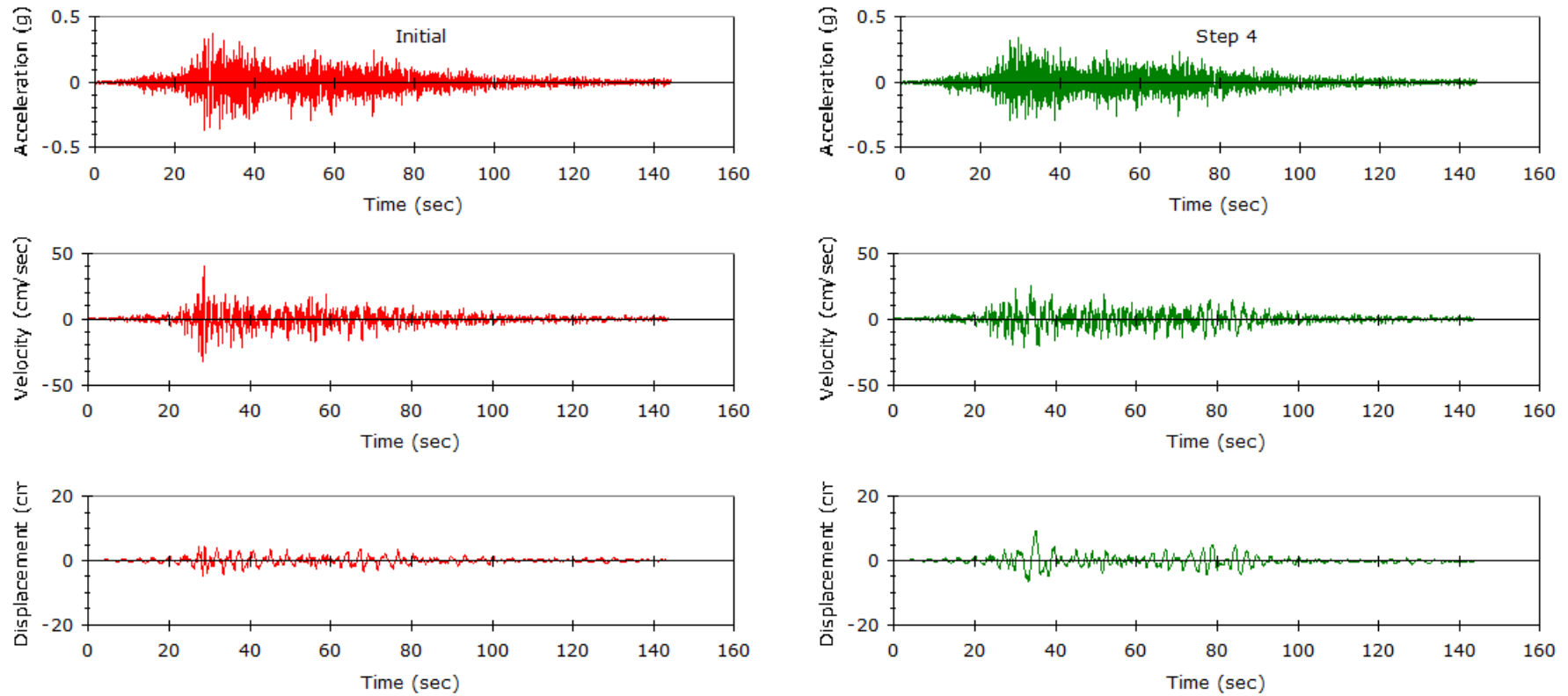


Figura 3.35 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Maule (27/02/2010), componente Horizontal, estación Hualañe. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

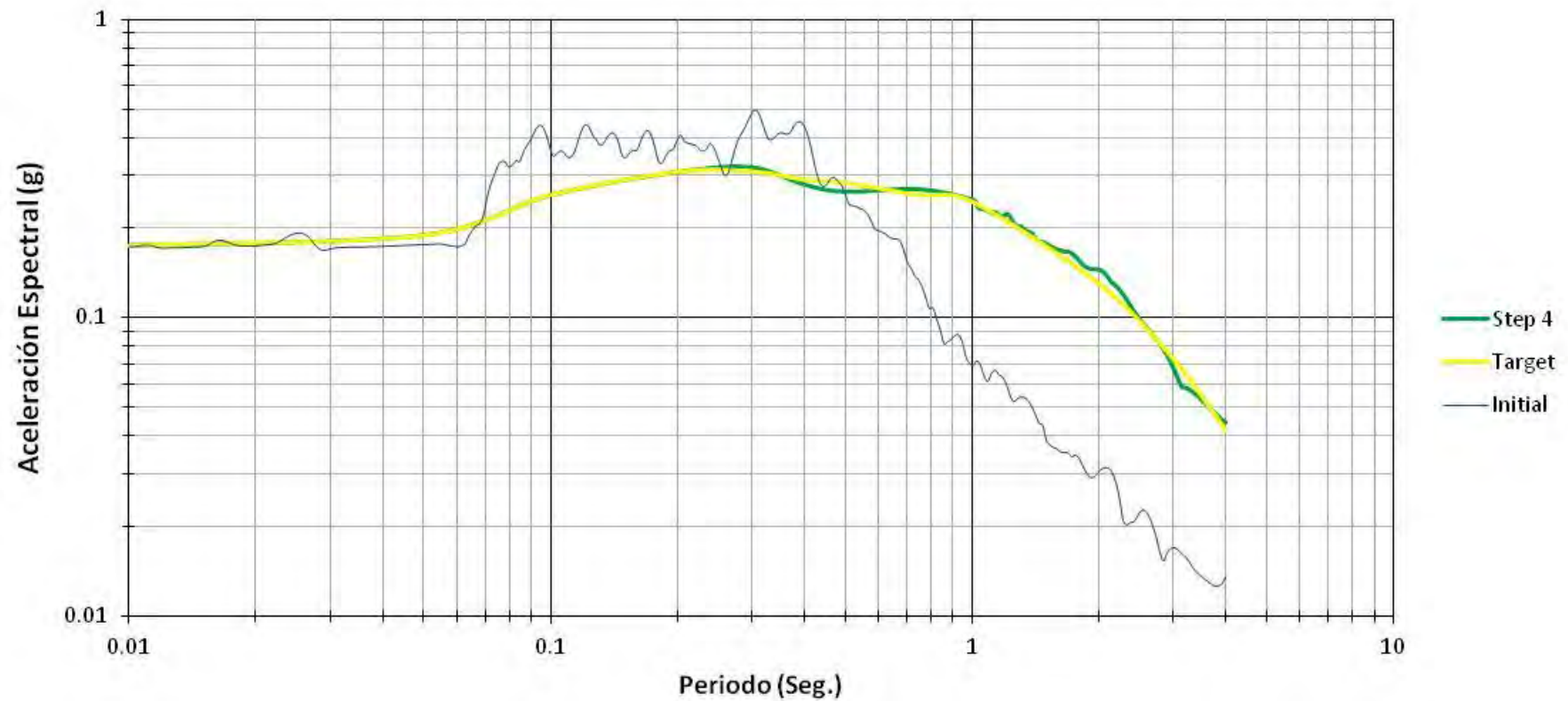


Figura 3.36 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

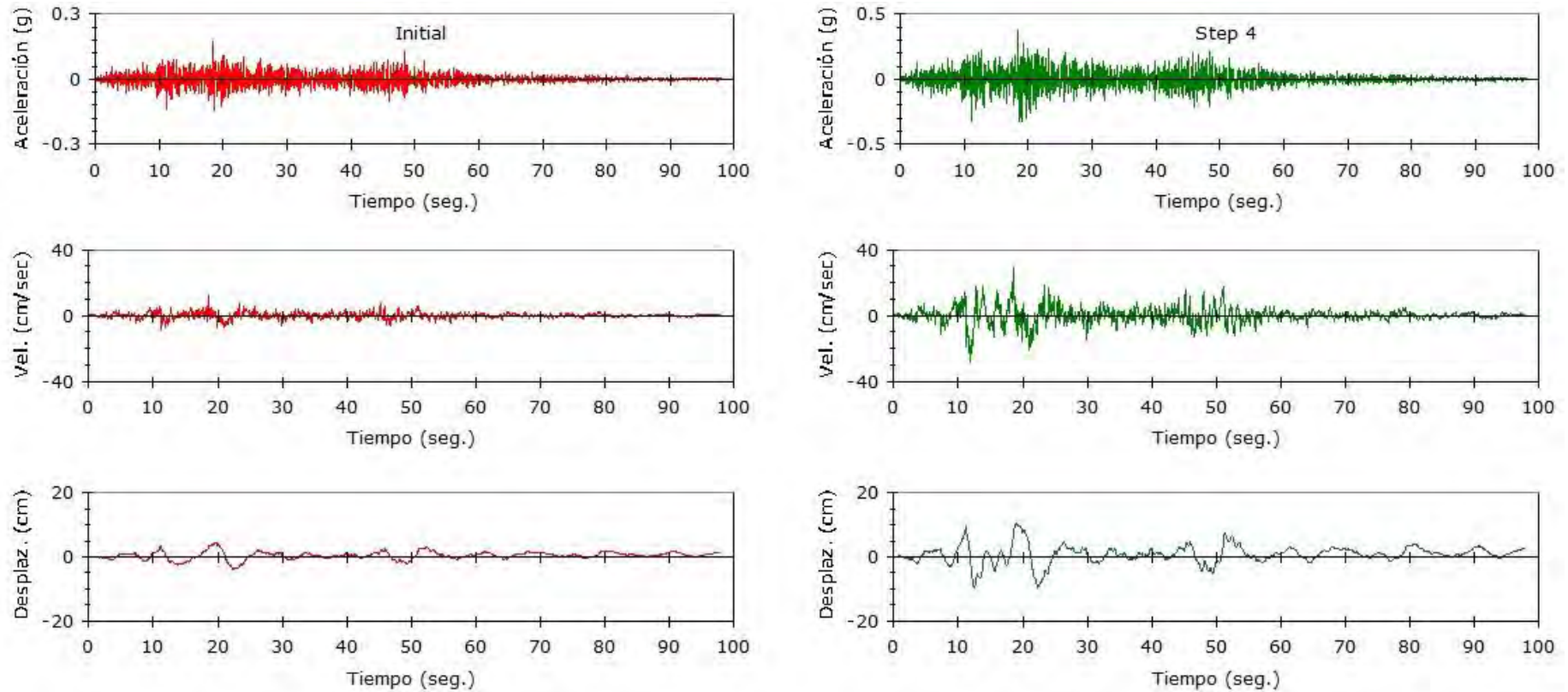


Figura 3.37 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Lima (10/03/1974), componente Transversal, estación Parque de la Reserva. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

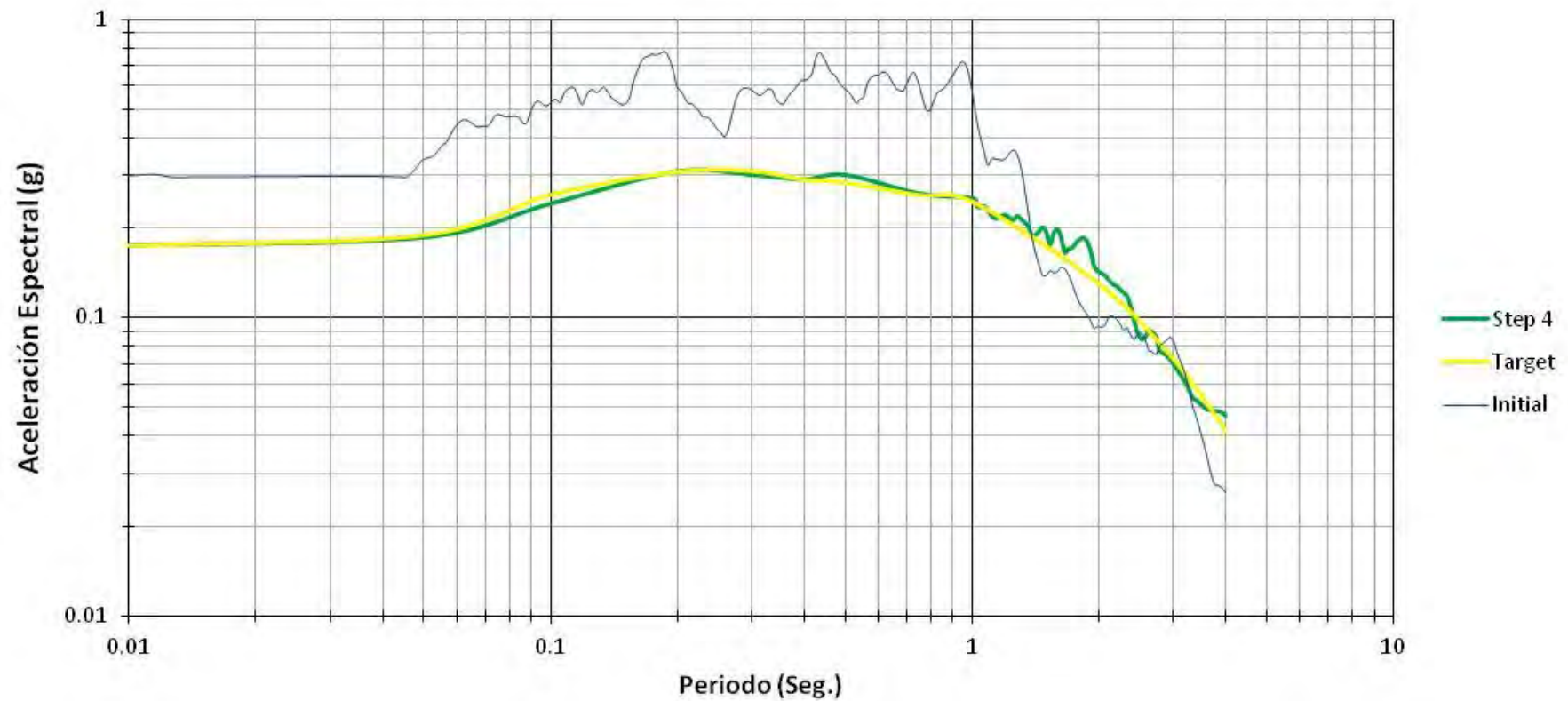


Figura 3.38 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

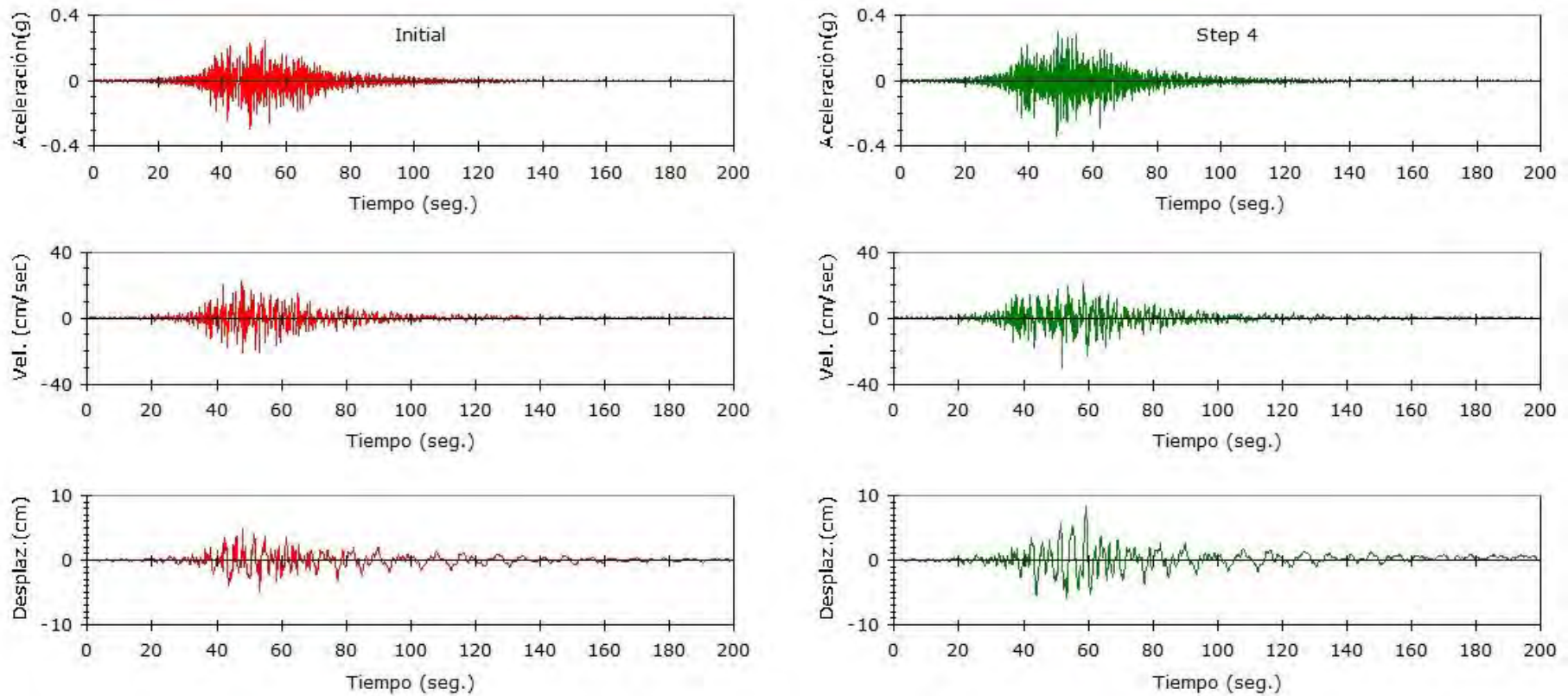


Figura 3.39 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Moquegua (23/06/2001), componente Transversal, estación Cesar Vizcarra. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

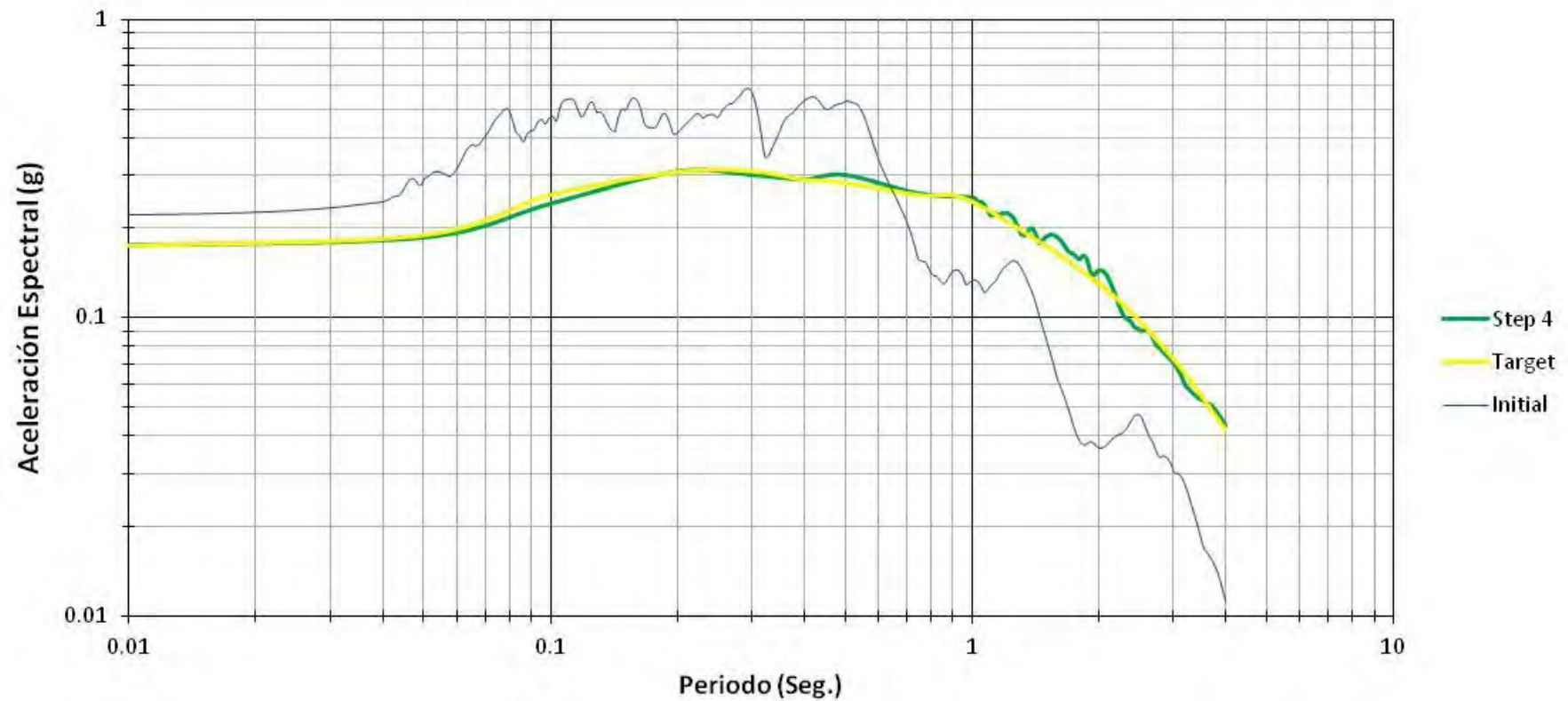


Figura 3.40 Comparación entre el espectro original y ajustado correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

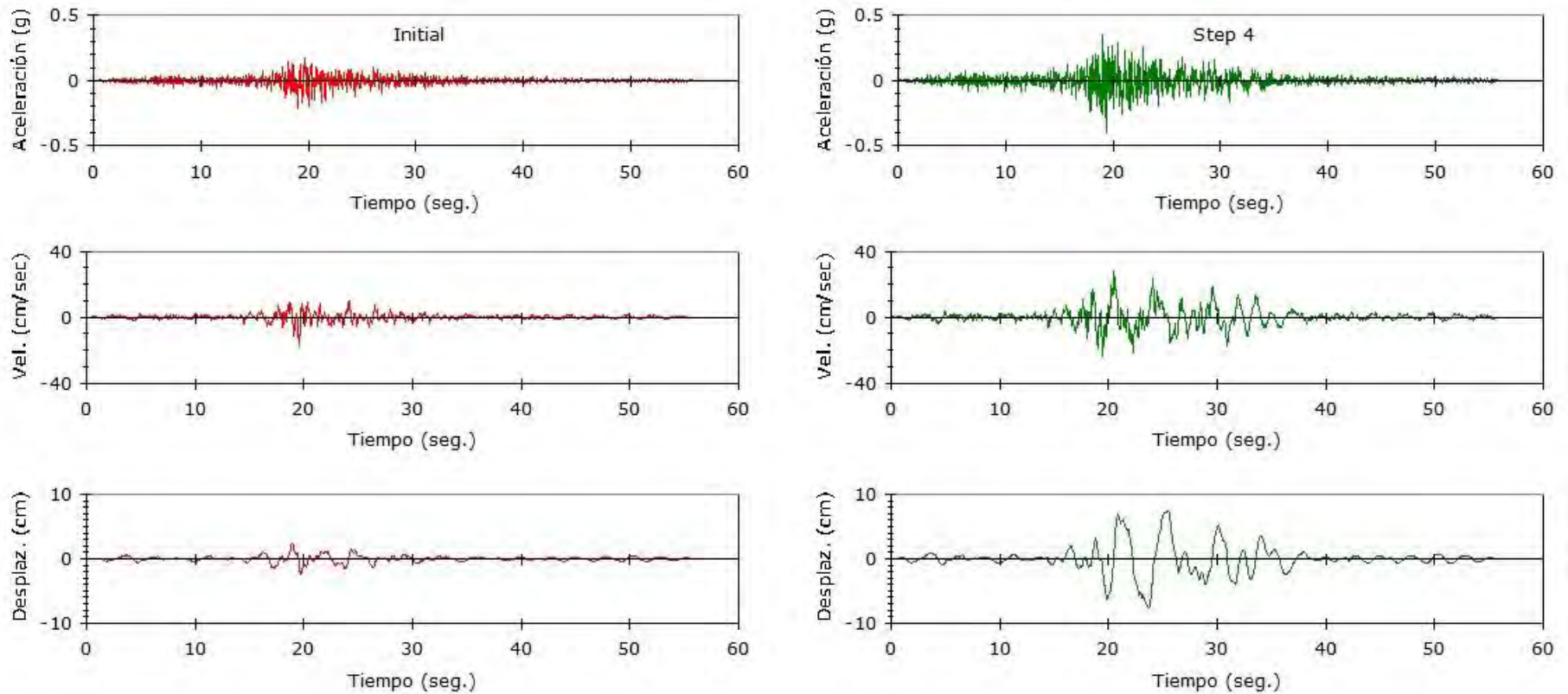


Figura 3.41 Comparación entre los registros sísmicos antes (izquierda) y después (derecha) del ajuste espectral correspondiente al sismo de Tarapacá (13/06/2005), componente Longitudinal, estación Iquique Idiem. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

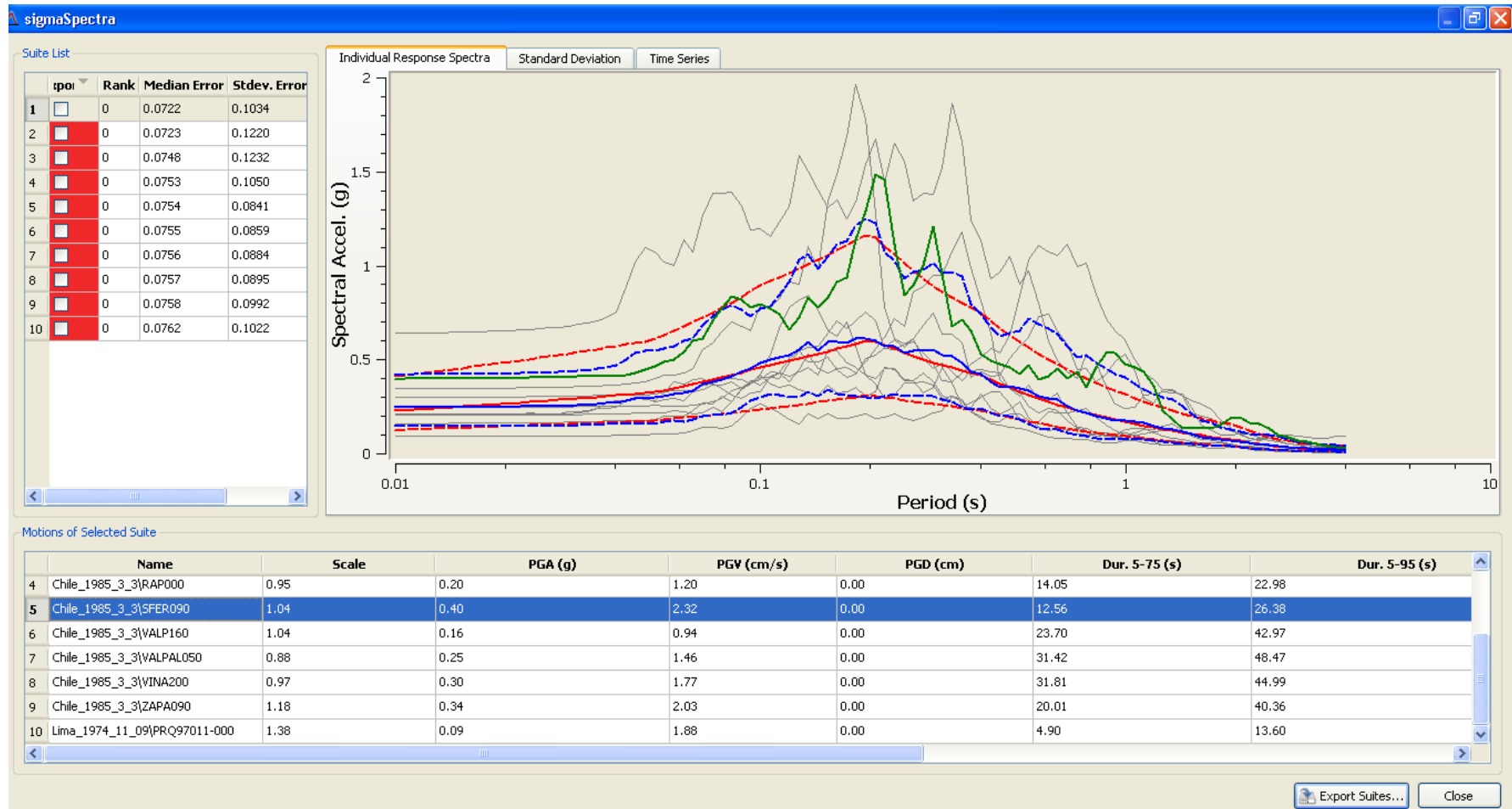


Figura 3.42 Selección de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico de la presa Yuracmayo de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007). En rojo: Espectro determinístico junto a desviaciones estándares asociadas, En azul: Espectro y desviaciones estándares ajustadas. En gris: Espectros de respuestas que conforman el set de movimientos sísmicos seleccionados. En verde: espectro de respuesta muestral de uno de los movimientos seleccionados. Fuente propia.

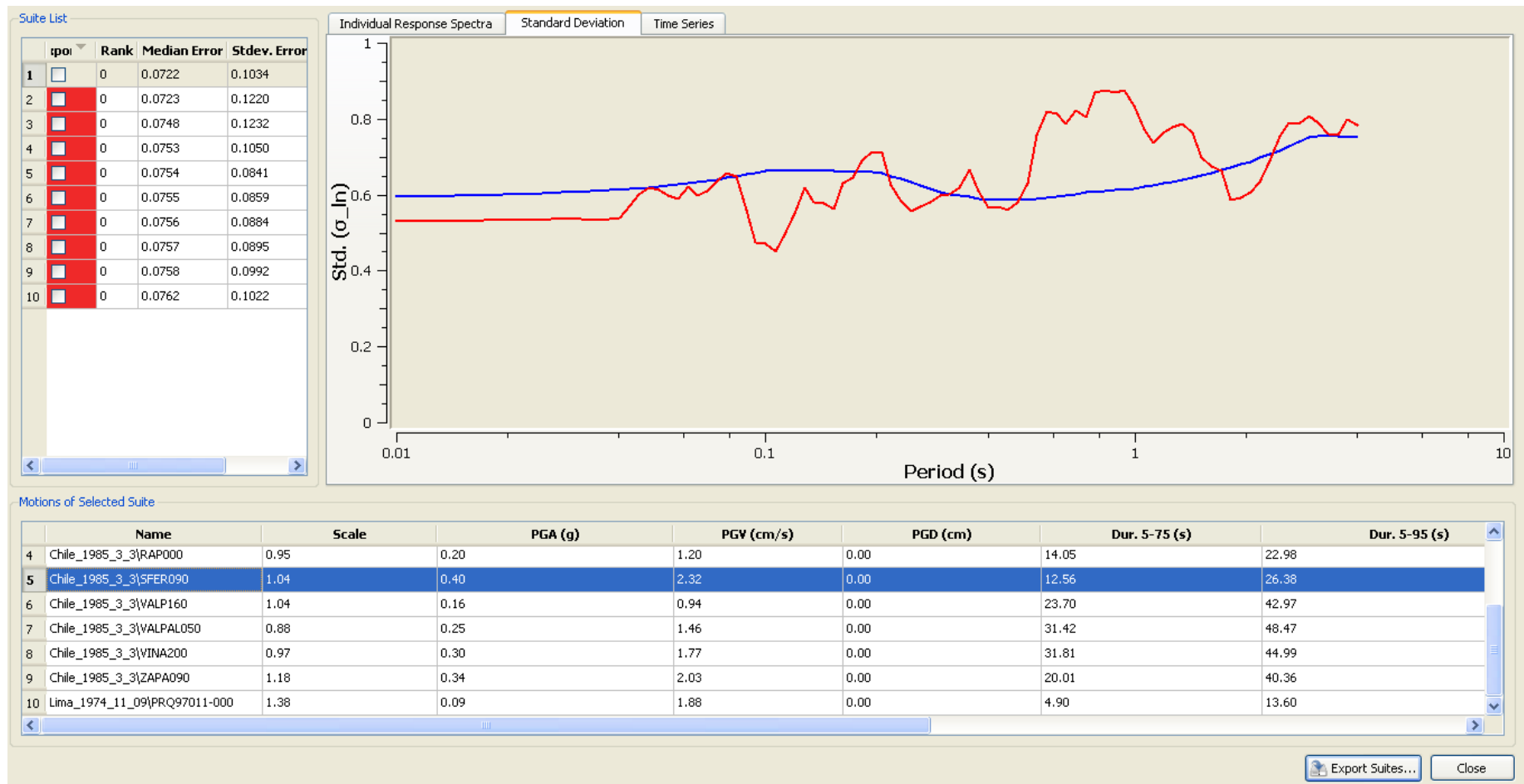


Figura 3.43 Comparación entre las desviaciones estándares del espectro objetivo (azul) y las desviación estándar de los movimientos sísmicos seleccionados (rojo). Selección de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico de la presa Yuracmayo de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007). Fuente propia.

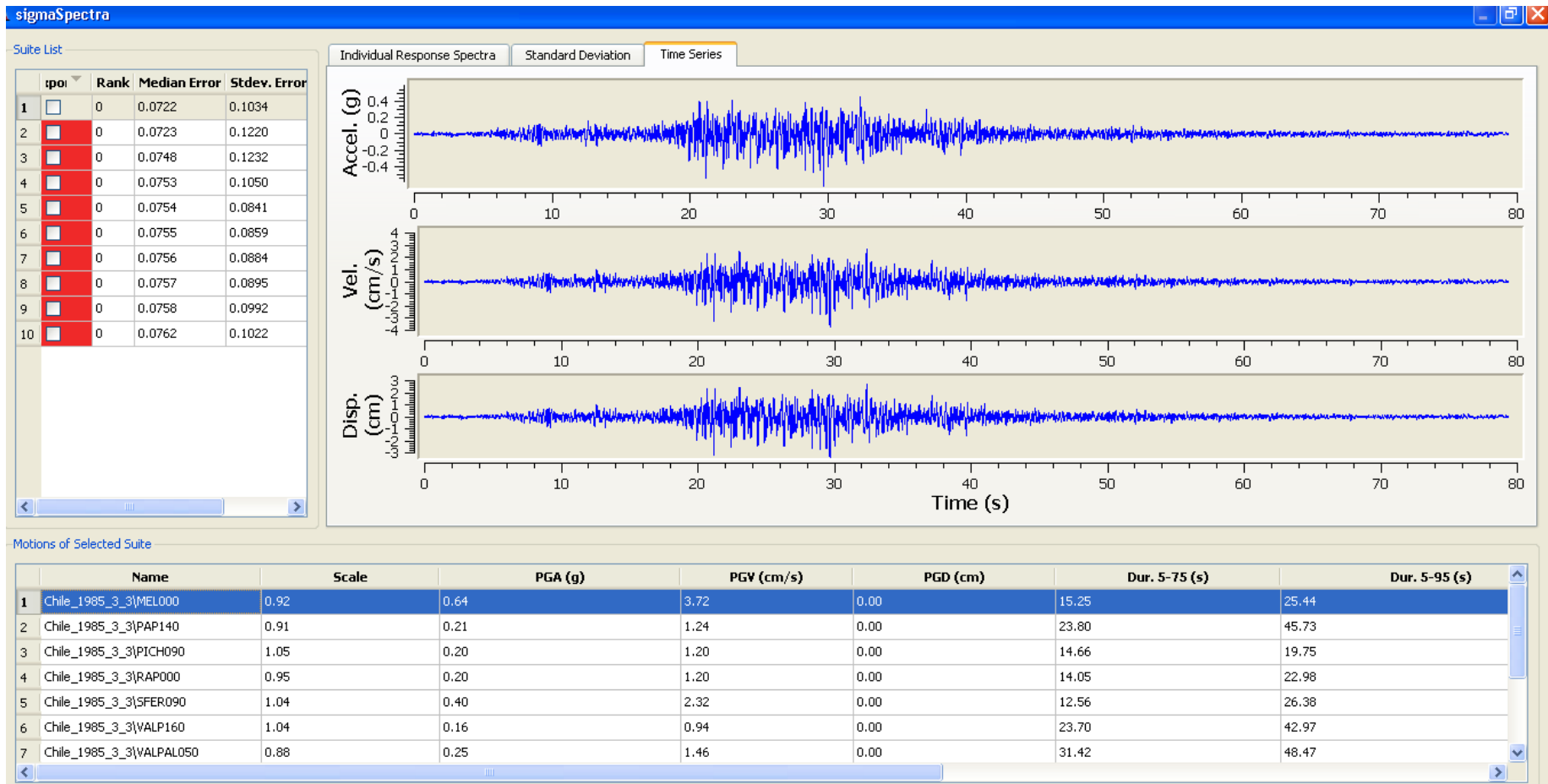


Figura 3.44 Tiempos Historia de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del movimiento sísmico generado compatible al espectro determinístico de la presa Yuracmayo de acuerdo a la metodología propuesta por Kottke y Rathje (2009, 2007). Fuente propia.

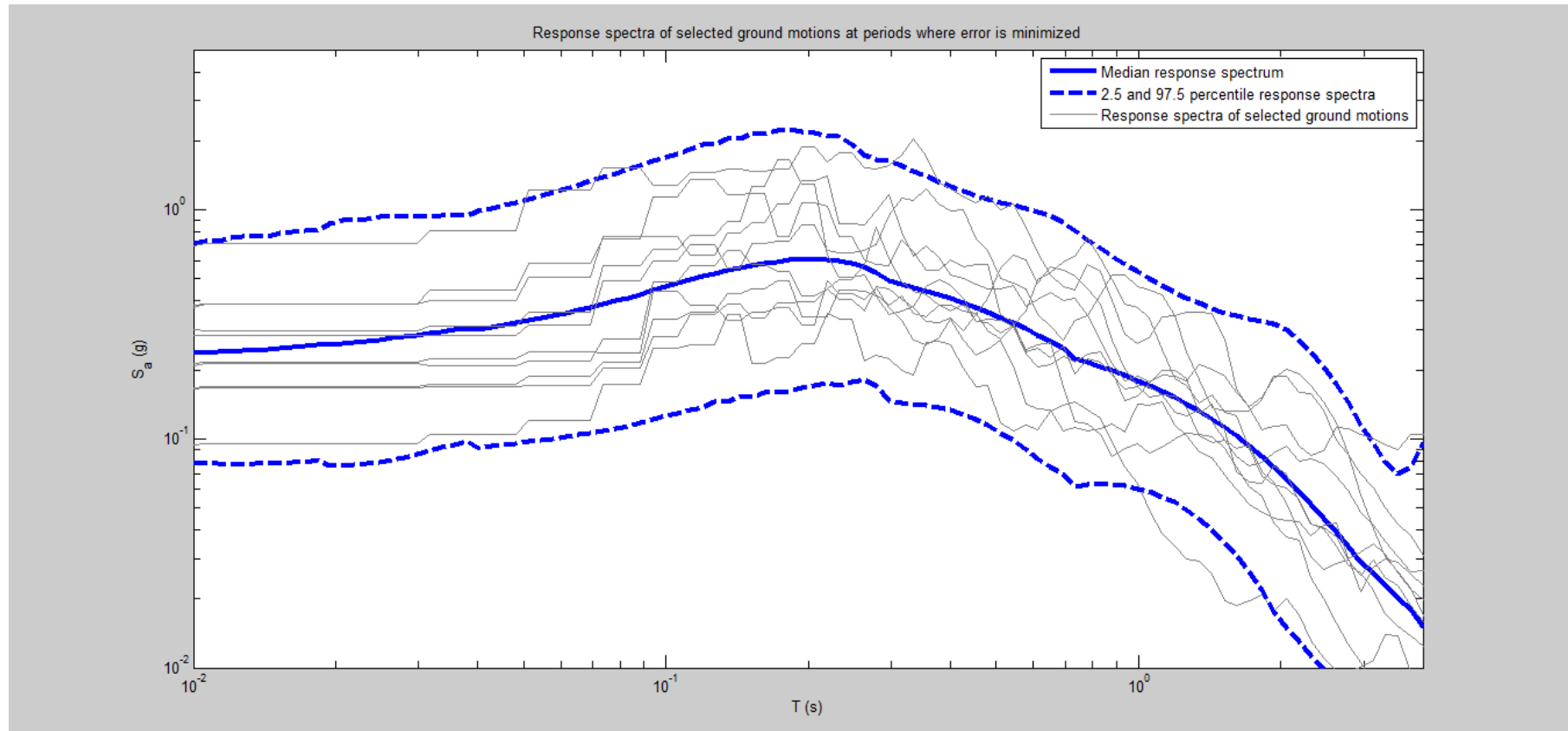


Figura 3.45 Comparación entre los espectros de respuesta de los movimientos seleccionados y los espectros de respuesta medio, percentil 2.5 y percentil 97.5 del sismo determinístico para la presa Yuracmayo. Generación de registros sísmicos compatibles al espectro determinístico de acuerdo a la metodología propuesta por Jarayam, Lin y Baker (2011). Fuente propia.

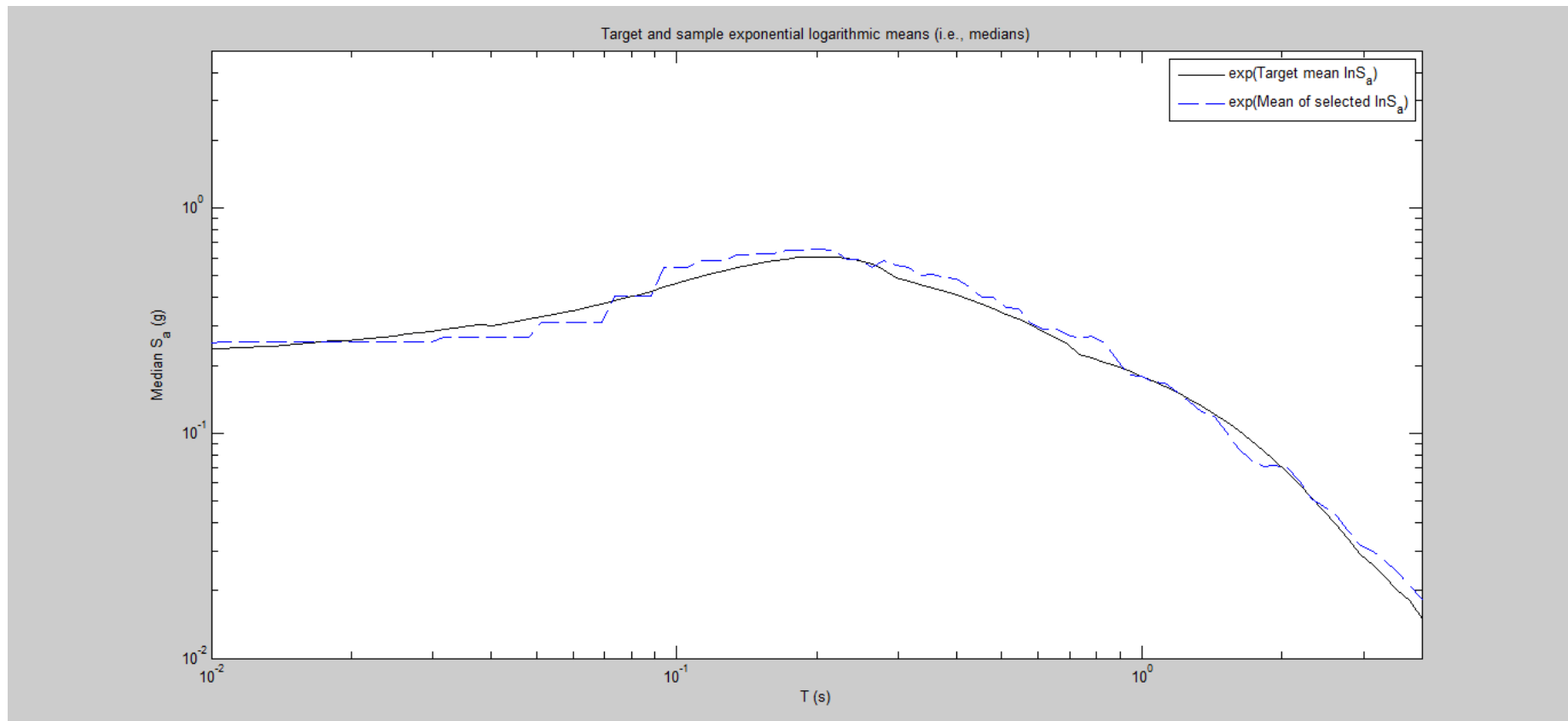


Figura 3.46 Comparación entre los espectros de respuesta del espectro medio determinístico para la presa Yuracmayo y el movimiento sísmico generado de acuerdo a la metodología propuesta por Jarayam, Lin y Baker (2011). Fuente propia.

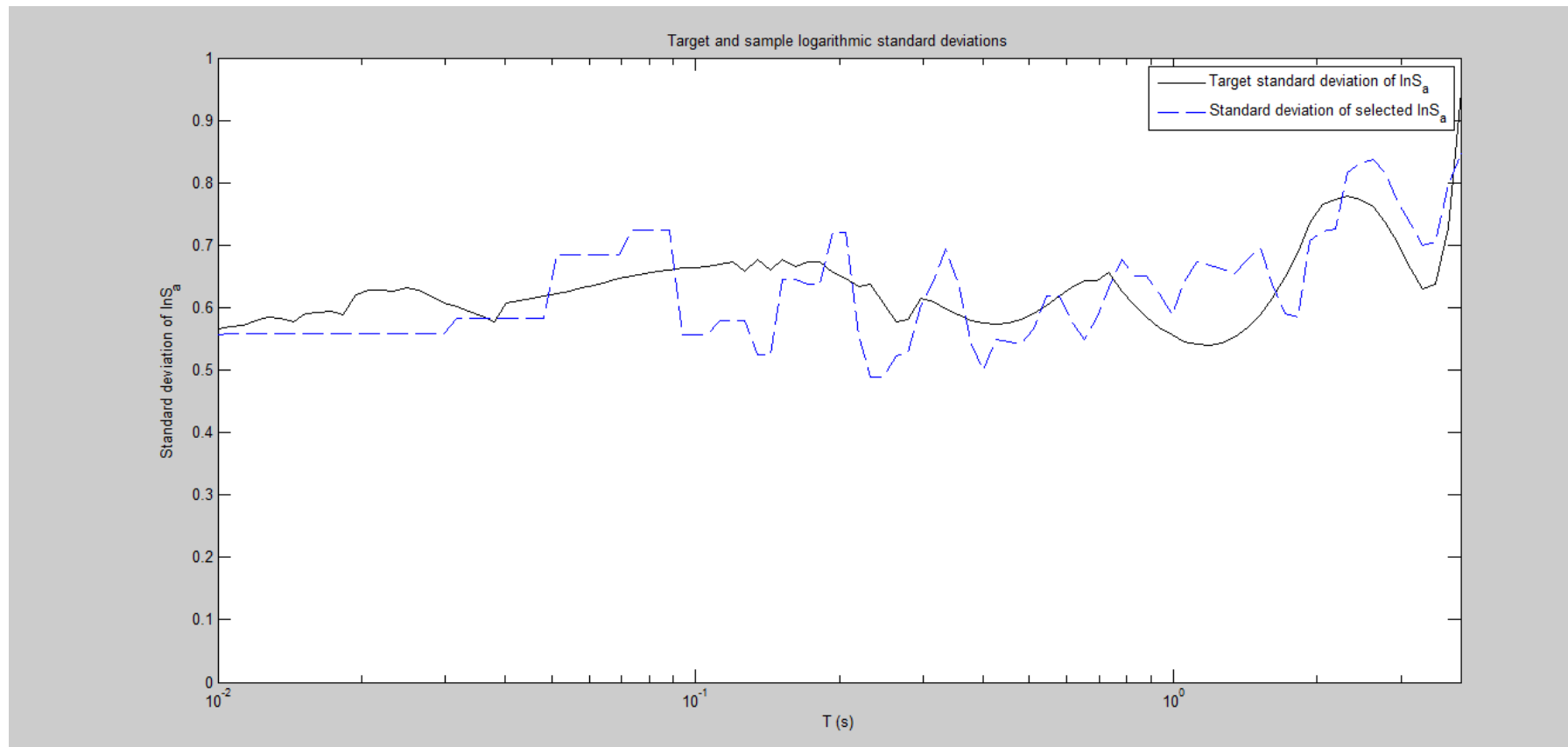


Figura 3.47 Comparación entre las desviaciones estándares del espectro determinístico para la presa Yuracmayo y las desviaciones estándares del movimiento sísmico generado de acuerdo a la metodología propuesta por Jarayam, Lin y Baker (2011). Fuente propia.

CAPÍTULO IV:

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA PRESA YURACMAYO PARA LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS COMPATIBLES A LOS ESPECTROS DE DISEÑO.

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se procede a evaluar el comportamiento sísmico dinámico de la presa Yuracmayo, considerando distintos escenarios de demanda sísmica, definidos por los espectros establecidos en el capítulo II. Para evaluar el comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo se considerarán los movimientos sísmicos generados en el capítulo III, compatibles a los espectros especificados para el sitio de la presa. Para la evaluación se considera la realización de modelos numéricos con técnicas de diferencias finitas, las cuales serán detalladas en este capítulo. Finalmente se realiza la comparación del comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo, en términos de respuestas estructurales (por ejemplo: desplazamientos) para los distintos espectros y escenarios considerados.

4.1.1 Antecedentes

En el año 2003 la empresa EDEGEL S.A. solicitó al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID-FIC-UNI) la instalación de un sistema de monitoreo sísmico en la Presa Yuracmayo. Este sistema consistió en dos estaciones acelerométricas para el registro de movimientos sísmicos, las cuales fueron ubicadas en la corona y en la base de la presa respectivamente.

Con base en la información proveniente del monitoreo de los acelerómetros, el uso de técnicas de modelamiento numérico 2D (elementos finitos), y ensayos geofísicos Macedo (2009,2010) realizó la calibración de un modelo dinámico para la presa Yuracmayo. La calibración permitió definir las propiedades dinámicas de la presa Yuracmayo en términos de módulos de corte, curvas de degradación del módulo cortante y curvas de degradación del amortiguamiento, la Figura 4.1 muestra los resultados de la calibración numérica, el Anexo I incluye detalles de la calibración numérica realizada por Macedo et al. (2010). Las propiedades usadas en este estudio serán aquellas definidas por el estudio realizado por Macedo et al. (2010).

4.2 ENFOQUE Y METODOLOGÍA

El adecuado comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo depende básicamente de los siguientes aspectos:

- 1) Estabilidad general del talud aguas abajo, lo cual es esencialmente controlado por la geometría del sistema y los desplazamientos que un determinado movimiento sísmico pueda generar en este talud.

- 2) Movimientos permanentes verticales de la corona de la presa, que puedan originar una pérdida de borde libre. Además de desplazamientos laterales del cuerpo controlados por el cuerpo de la presa en la zona de aguas abajo.

Como parte del desarrollo del análisis dinámico de la presa Yuracmayo se consideran los siguientes aspectos:

- 1) Caracterización de los materiales del cuerpo de la presa y los suelos de fundación en términos de las propiedades ingenieriles requeridas para el análisis dinámico.
- 2) Desarrollar un modelo 2D de diferencias finitas para representar el sistema presa-fundación (sobre la región que pueda influenciar la respuesta dinámica de la presa Yuracmayo).
- 3) Evaluación de la respuesta dinámica de la presa Yuracmayo considerando los movimientos sísmicos definidos en el capítulo III, los cuales son compatibles a los espectros especificados en el capítulo II.

La respuesta dinámica de la presa Yuracmayo será evaluada considerando tres (3) etapas. En la primera etapa se establecerán las condiciones previas a la aplicación del movimiento sísmico, esto incluye la definición de las presiones de poros (condiciones de flujo) y la definición de los esfuerzos estáticos efectivos previos al sismo. En la segunda etapa se realizarán los análisis sísmicos propiamente dichos en base a las condiciones iniciales definidas en la etapa anterior y considerando los tiempos historia de los movimientos sísmicos compatibles a los espectros definidos en el capítulo II. Finalmente en la tercera etapa se compararán las respuestas sísmicas de la presa Yuracmayo (típicamente en términos de desplazamientos) para los distintos espectros y movimientos sísmicos considerados.

Los análisis sísmicos o dinámicos de la presa Yuracmayo serán realizados para cada tiempo historia de aceleraciones considerando modelos numéricos que usan procedimientos explícitos de diferencias finitas, los cuales se detallarán a continuación.

4.3 PROCEDIMIENTO EXPLÍCITO DE DIFERENCIAS FINITAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS DE TIERRA

La solución de un problema esfuerzo deformación requiere que las condiciones de equilibrio y compatibilidad sean satisfechas por las condiciones de borde y las condiciones iniciales del problema en cuestión, considerando con este fin relaciones apropiadas de esfuerzo deformación. Como estado de la práctica, para abordar este tipo de problemas se suelen usar técnicas de elementos finitos o técnicas de diferencias finitas.

En este estudio los análisis numéricos fueron realizados considerando técnicas del método de diferencias finitas, implementadas en el software comercial FLAC 6.0 (ITASCA, 2011). FLAC es un software diseñado para evaluar problemas geotécnicos de toda índole, tiene una serie de modelos constitutivos incorporados para simular el comportamiento geotécnico de los materiales y también la posibilidad de implementar modelos constitutivos definidos por el usuario.

4.3.1 Procedimiento Explícito Implementado en Flac.

El software FLAC satisface las ecuaciones de equilibrio (considerando un equilibrio cuasi-estático), usando un procedimiento explícito paso a paso en el dominio del tiempo. El

dominio geométrico es discretizado en cuadriláteros, denominados zonas, donde cada zona está constituida por 4 triángulos (La Figura 4.2 muestra las zonas empleadas por FLAC para los cálculos explícitos). La contribución en términos de rigideces de cada zona es esencialmente equivalente a la proporcionada por cuatro triángulos de deformación constante (elementos finitos triangulares de 3 nodos). El método de equilibrio dinámico (cuasi – estático) implementado en FLAC tiene la ventaja de alcanzar una solución numérica estable incluso cuando el problema no es estáticamente estable permitiendo, por ejemplo, la examinación de deformaciones grandes y desplazamientos previos a una eventual condición de falla.

El procedimiento numérico implementado en Flac es tal que para cada elemento (denominado zona) en el dominio geométrico, los esfuerzos y fuerzas son usados en las ecuaciones de movimiento para obtener nuevas velocidades y desplazamientos dentro de un ciclo de cálculo. Con estos nuevos valores, la ecuación constitutiva o la relación de esfuerzo deformación es empleada para predecir nuevos esfuerzos, fuerzas y/o deformaciones, completando de esta manera un ciclo explícito de cálculos. El procedimiento para un ciclo de cálculo explícito en FLAC es mostrado en la Figura 4.3. Dentro del procedimiento, cuando los esfuerzos son actualizados se considera que las velocidades y otras variables dentro de un ciclo de cálculo no son afectadas por los nuevos esfuerzos y/o deformaciones, manteniéndose constantes. Además, dentro de cada ciclo, se considera que los cálculos en cada zona son independientes de las demás zonas. Bajo esta asunción el procedimiento explícito considera un tiempo por paso de cálculo (time step) lo suficientemente pequeño, de tal manera que la información no se propague físicamente de una zona a otra dentro de un determinado ciclo de cálculo. De esta forma los esfuerzos pueden ser evaluados en base a las deformaciones dentro de una zona sin necesitar de un proceso de iteración, incluso para leyes constitutivas altamente no lineales (Cundall, 1995). Después de cierta cantidad de ciclos de cálculo los cambios en los esfuerzos y deformaciones se propagan entre zonas de forma similar a la propagación física esperada, todo esto como resultado de la cantidad incremental de los ciclos de cálculos.

La metodología recién descrita puede ser usada bajo una formulación Lagrangiana o Euleriana. La formulación euleriana o de pequeñas deformaciones considera que los puntos nodales de las zonas mantienen una posición fija, es decir el grid o malla de zonas no se mueve durante los cálculos. Por otra parte la formulación Lagrangiana o de grandes deformaciones considera que los puntos nodales de las zonas pueden sufrir desplazamientos (Itasca 2011), actualizando sus coordenadas dentro de cada paso de cálculo (time step). En este estudio se ha considerado la formulación euleriana para los análisis de flujo y esfuerzo-deformación estáticos, mientras que para los análisis sísmicos propiamente dichos se ha considerado la formulación lagrangiana de grandes deformaciones.

4.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y MODELO NUMÉRICO.

4.4.1 Propiedades de los Materiales para Realizar los Análisis Sísmicos

Con fines de caracterizar los materiales de la cimentación en el lugar del emplazamiento de la presa fueron ejecutadas perforaciones diamantinas (Ver plano P-I del Anexo II) con un total de 988m, de los cuales 4 sondajes fueron ejecutados en la cimentación de la presa, en el estribo derecho y 2 sondajes ubicados en el eje y salida de la galería de descarga de fondo. Las demás perforaciones fueron ejecutadas en el eje del río (aguas arriba y aguas abajo de la presa) y en la morrena de la margen izquierda, así mismo durante la fase de

construcción se ejecutaron perforaciones complementarias. Por otra parte se realizaron ensayos de refracción sísmica, los cuales estuvieron a cargo del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 1993), los cuales fueron complementados por Macedo et al. (2010) con ensayos geofísicos adicionales (refracción sísmica y MASW). Estos ensayos y las perforaciones ejecutadas permitieron caracterizar los materiales de la cimentación así como al basamento rocoso.

En términos generales en el estribo izquierdo de la presa se tiene presencia de depósitos morrenicos (constituidos por materiales predominantemente gravosos y gravosos arcillosos), depósitos lagunares y por debajo el basamento rocoso. En la sección central de la presa se tiene presencia de depósitos fluvio-glaciares (predominantemente materiales gravosos), depósitos lagunares (arcillas rígidas, arenas con compacidad media adensa y gravas arenosas), y depósitos aluviales (con predominancia de gravas arenosas). De estos depósitos, en la sección central se tiene predominancia de los depósitos lagunares, tal como se muestra en la Figura 4.4, por debajo de estos depósitos se encuentra el basamento rocoso. Finalmente en el estribo derecho se tiene afloramiento del basamento rocoso, encontrándose para éste tres posibles grados de fracturamiento disminuyendo con la profundidad (To III, To II, To I).

Para la construcción del cuerpo de la presa se usaron canteras cercanas de material morrénico, considerándose tres posibles canteras dos de ellas situadas en las morrenas de la margen derecha y margen izquierda respectivamente, y la tercera una cantera de agregados situada a una distancia mayor aguas arriba del emplazamiento de la presa (Plano P-II Anexo II). El cuerpo de la presa Yuracmayo está constituido por un núcleo central impermeable (conformado con materiales morrenicos, típicamente gravas arcillosas) y dos espaldones aguas arriba y aguas abajo del núcleo impermeable, con materiales predominantemente gravosos. Se consideraron además filtros y drenes con materiales provenientes de la cantera de agregados.

En la Figura 4.4 se pueden observar los diversos materiales de la cimentación y el cuerpo de la presa, para la sección de análisis definida por la altura máxima de la presa, esta corresponde a la progresiva 180 (perfil E-E' en el plano P1). Por otra parte, durante las diversas fases del proyecto se realizaron ensayos de laboratorio para las muestras obtenidas de las calicatas, controles geotécnicos (QA/QC), sondajes adicionales y trincheras de los diversos componentes de la presa permitiendo obtener las propiedades físicas y parámetros geotécnicos de resistencia para los materiales de la presa Yuracmayo. Así mismo como fue mencionado anteriormente, para la caracterización de las propiedades dinámicas de los materiales de la presa Yuracmayo, Macedo et al. (2010) realizó ensayos geofísicos en la presa Yuracmayo, consistentes en 5 líneas de refracción sísmica con medición de velocidades de ondas P y 5 ensayos de medición de ondas de corte MASW.

Las propiedades geotécnicas de resistencia y propiedades dinámicas de los materiales de la presa Yuracmayo se muestran en la Tabla 4.1, mientras que la Figuras 4.5 muestra las curvas de degradación de módulo de corte y amortiguamiento calibrados para la presa Yuracmayo, de acuerdo al estudio realizado por Macedo et al. (2010). Una descripción detallada de los materiales de la presa Yuracmayo se presenta en Macedo (2009). Finalmente la Tabla 4.2 muestra las propiedades hidráulicas en términos de permeabilidades para los materiales de la presa Yuracmayo.

Tabla 4.1: Propiedades geotécnicas para los materiales de la presa Yuracmayo. (Macedo, 2009)

Material.	Clasificación ⁽¹⁾	Densidad (KN/m ³)	Cohesion (kpa)	Ángulo de fricción(°)	G ₀ ⁽²⁾ (Kpa)	σ' _m ^(3,4) (Kpa)	k _{2max} ⁽⁴⁾
Dep. Aluviales	GW-GC	20.0	0	35.0°	3.30E+05	-	-
Fluviolagunares	GP-GM	20.0	14.0	35.0°	2.10E+05	-	-
Lacustrinos	CL/CL-ML/SC/GC	19.0	21.0	28.0°	3.00E+05	-	-
Roca To-II	Riolita	23.0	115.0	38.0°	3.30E+06	-	-
Roca To-I	Riolita	24.0	115.0	34.0°	2.60E+06	-	-
E. Aguas arriba	GC-GM	21.0	0	40.0°	3.60E+05	150	110
E. Aguas abajo	GC-GM	21.0	0	40.0°	3.60E+05	150	110
Filtro	SW	21.0	0	36.0°	2.00E+05	100	90
Dren	GW,GP	21.0	0	36.0°	2.00E+05	100	90
Núcleo	GC	21.0	0	38.0°	4.80E+05	250	90
Aluviones	GW	22.0	0	36.0°	3.00E+05	-	-

Notas:

1. La clasificación es de acuerdo al sistema S.U.C.S.
2. G₀ indica el módulo de corte máximo para pequeñas deformaciones. Estos fueron definidos en base al estudio de Macedo (2010).
3. σ'_m: Esfuerzo efectivo medio.
4. El modulo de rigidez estático, para los materiales del cuerpo de la presa, a un esfuerzo σ'_m fue tomado como G = G₀/10, donde G₀ es la rigidez de corte bajo pequeñas deformaciones. Para los materiales del cuerpo de la presa se consideró la variación de el módulo de corte con el confinamiento de acuerdo a G₀ = 21.7(k₂)_{max} · Pa(σ'_m/Pa)^{0.5} (ver Seed & Idriss, 1970 y Seed et al., 1986). Los valores de (k₂)_{max} se consideraron de acuerdo a los ensayos geofísicos realizados por Macedo et al. (2010).
5. El modelo constitutivo UBCHYST (Byrne, 2010) es considerado para representar el comportamiento de corte no lineal de los materiales.

Tabla 4.2: Permeabilidades Para los Materieles de la Presa Yuracmayo. Macedo (2009).

Material.	Ksat(m/s)
Dep. Aluviales	1.00E-05
Fluvio lagunar	3.00E-04
Lagunar	1.20E-08
Roca (To -II)	2.00E-07
Roca Base (To -I)	2.00E-07
E.aguas arriba	1.00E-06
E.aguas abajo	1.00E-06
Filtro	1.00E-04
Dren	1.00E-04
Núcleo	1.00E-08
Materiales aluviales	1.00E-05

4.4.2 Modelo Numérico FLAC para la Presa Yuracmayo

La Presa Yuracmayo tiene una altura de aproximadamente 60 m, y un ancho en su sección transversal crítica de unos 300 m. La relación de la longitud de coronamiento y la altura de la presa es tal que un análisis bidimensional es considerado adecuado para analizar la propagación de los movimientos sísmicos, a lo largo del cuerpo de la Presa. Por lo tanto,

la sección de la presa es discretizada en una malla de diferencias finitas, considerando un modelo de deformación plana.

La geometría de la presa y la fundación fue discretizada usando una malla de diferencias finitas, considerando 52 zonas en dirección vertical y 280 zonas en dirección horizontal. El tamaño promedio de las zonas se basó en las consideraciones de Kulhemeyer y Lysmer (1973). De acuerdo a estos investigadores para la adecuada representación de la transmisión de las ondas a lo largo del modelo, la máxima dimensión considerada para cada elemento debe de ser menor que un décimo de la máxima longitud de onda. El modelo se extiende unos 200 metros desde la zona del pie aguas arriba de la presa, y unos 200 m desde la zona del pie aguas abajo de la presa Yuracmayo, con la finalidad de prevenir efectos de borde. En la Figura 4.6 se muestra el modelo de diferencias finitas junto con las diferentes zonas de los materiales considerados.

En este estudio se ha usado el software FLAC para todos los cálculos explícitos, considerándose, para los cálculos de flujo, la metodología definida por ITASCA (2011), el modelo constitutivo de Mohr Coulomb para los cálculos de esfuerzo deformación estáticos y finalmente el modelo definido por usuario, desarrollado en la Universidad British Columbia UBCHYST (Byrne, 2010; Puebla, 2012), fue utilizado para simular el comportamiento esfuerzo-deformación de corte no lineal de los materiales constituyentes de la presa Yuracmayo ante una carga sísmica. El modelo UBCHYST es un modelo histéretico simple no lineal, basado en el modelo Mohr Coulomb, el cual incorpora una relación esfuerzo deformación hiperbólica y las leyes de Masing (Beresnev y Wen, 1996) para modelar los procesos de carga y descarga. El modelo tiene la capacidad de representar el incremento del amortiguamiento en función del incremento de la deformación cortante. UBCHYST considera la degradación del módulo de corte en función a la distancia a la envolvente de falla en dirección a la carga. La Figura 4.7 muestra la lógica mediante la cual UBCHYST considera la variación del módulo de corte máximo en función de los esfuerzos de corte generados por la excitación sísmica.

4.5 Evaluación de la Respuesta Sísmica para los Sets de Movimientos Sísmicos.

4.5.1 Condiciones Iniciales

Como primer paso se definieron las condiciones iniciales previas al movimiento sísmico en concordancia con la secuencia establecida en la sección 4.2. Estas condiciones iniciales consideran la distribución de presiones de poros y esfuerzos obtenidos de los análisis de esfuerzo-deformación estáticos y cálculos de flujo.

El procedimiento numérico considerado como parte del análisis de esfuerzo deformación, para simular la secuencia constructiva de la presa Yuracmayo consideró la colocación de capas de elementos desde la base del modelo (en la zona que representa el cuerpo de la presa) hacía arriba con la finalidad de replicar de forma aproximada la secuencia constructiva de compactación capa por capa en campo. Una vez que una capa de elementos fue colocada y llevada a una condición de equilibrio por acción de la gravedad (peso propio), antes de colocar la siguiente capa de elementos la elevación de la última capa colocada fue reasignada a la elevación que se tendría durante el proceso constructivo y los desplazamientos en la superficie reiniciados a cero, Este procedimiento fue repetido iteradamente hasta conseguir la elevación final de la presa Yuracmayo. Los cálculos de flujo se realizaron para la elevación final de la presa Yuracmayo, considerándose como condiciones de borde cargas constantes correspondientes a la elevación del agua en la zona

de aguas arriba de la presa y consiguiendo posteriormente condiciones de flujo permanente. Finalmente el equilibrio estático incluyendo la distribución de presiones de poros fue reestablecido.

De acuerdo a los resultados obtenidos, La Figura 4.8 muestra la distribución de presiones de poros junto con los vectores de flujo evaluados en base a los análisis de flujo. En las Figuras 4.9 y 4.10 se muestran las deformaciones verticales y horizontales obtenidas del análisis estático de esfuerzo deformación obteniéndose deformaciones verticales de 35 a 50 cm en la zona del núcleo de la presa en contacto con el espaldón aguas arriba y deformaciones horizontales del orden de 20 cm en el talud de aguas debajo de la presa. Así mismo, Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran los vectores de desplazamientos y la geometría deformada. Finalmente las Figuras 4.13 y 4.14 muestran la distribución de los esfuerzos efectivos verticales y esfuerzos efectivos medios para la presa Yuracmayo obtenidos de los análisis estáticos de esfuerzo deformación. Se nota una disminución de esfuerzos en la zona del núcleo hacia aguas arriba de la presa causada por influencia del agua embalsada.

4.5.2 Análisis Sísmico de la Presa Yuracmayo

Los análisis sísmicos de la presa Yuracmayo fueron realizados para los espectros definidos en el capítulo II, considerando los tiempos historia de los movimientos de diseño definidos en el capítulo III. Los puntos seleccionados para monitorear la respuesta sísmica de la presa Yuracmayo se muestran en la Figura 4.15. Las aceleraciones de diseño especificadas se aplicaron como tiempos historia de velocidades en la base del modelo numérico, de acuerdo a los procedimientos descritos por Mejia y Dawson (2006) para representar de manera adecuada la aplicación de movimientos sísmicos de diseño en presas de tierra. Como parte de los análisis se desarrollaron en total 20 análisis sísmicos tiempo historia. Los desplazamientos horizontales y verticales obtenidos de los análisis tiempo historia para los puntos de control seleccionados, y cada uno de los espectros y movimientos sísmicos de diseño (obtenidos mediante el proceso de ajuste espectral) son mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Desplazamientos (en metros) Obtenidos de los Análisis Sísmicos Realizados Para la Presa Yuracmayo. Fuente propia.

Descripción	Punto de Control	Espectro Norma E – 030				Espectro Determinístico (SMC)				Espectro Código IBC 2009				Espectro de peligro uniforme (TR=475 Años)				Espectro medio condicionado (CMS)			
		Chile 2010	Lima 1974	Moquegua a 2001	Tarapaca a 2005	Chile 2010	Lima 1974	Moquegua a 2001	Tarapaca a 2005	Chile 2010	Lima 1974	Moquegua a 2001	Tarapaca a 2005	Chile 2010	Lima 1974	Moquegua a 2001	Tarapaca 2005	Chile 2010	Lima 1974	Moquegua a 2001	Tarapaca 2005
Desplaz. Horizontal Aguas Arriba	1	-0.41	-0.70	-0.41	-0.24	-0.31	-0.19	-0.27	-0.08	-0.25	-0.11	-0.17	-0.07	-0.17	-0.07	-0.18	-0.04	-0.10	0.00	-0.14	-0.02
	2	-0.38	-0.68	-0.38	-0.22	-0.30	-0.18	-0.29	-0.08	-0.24	-0.12	-0.18	-0.06	-0.16	-0.10	-0.15	-0.04	-0.10	-0.01	-0.13	-0.03
	3	0.24	0.08	0.41	0.10	0.06	0.18	0.15	0.09	0.12	0.10	0.15	0.04	0.09	0.07	0.13	0.04	0.05	0.07	0.09	0.03
	4	0.10	-0.10	0.24	0.05	-0.04	0.10	0.04	0.06	0.04	0.06	0.08	0.02	0.04	0.03	0.06	0.02	0.02	0.06	0.03	0.02
	5	0.07	-0.10	0.19	0.03	0.04	0.09	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.05	0.02	0.01
Desplaz. Horizontal Aguas Abajo	4	0.10	-0.10	0.27	0.03	-0.03	0.10	0.04	0.06	0.04	0.06	0.08	0.02	0.04	0.03	0.06	0.02	0.02	0.06	0.03	0.02
	6	0.85	0.75	0.98	0.40	0.49	0.48	0.54	0.22	0.32	0.30	0.37	0.18	0.30	0.20	0.30	-0.16	0.20	0.13	0.21	0.13
	7	0.75	0.68	0.82	0.35	0.44	0.38	0.41	0.17	0.27	0.22	0.30	0.15	0.25	0.15	0.22	0.13	0.16	0.10	0.16	0.08
	8	0.85	0.70	0.86	0.38	0.53	0.38	0.41	0.18	0.31	0.23	0.29	0.16	0.28	0.14	0.23	0.14	0.18	0.09	0.15	0.09
	9	0.70	0.59	0.82	0.34	0.37	0.38	0.41	0.17	0.25	0.23	0.28	0.15	0.23	0.16	0.24	0.13	0.14	0.11	0.16	0.08
Desplaz. Vertical Aguas Arriba	10	-0.14	-0.14	-0.13	-0.14	-0.14	-0.23	-0.22	-0.13	-0.10	-0.16	-0.15	-0.10	-0.08	-0.16	-0.12	-0.10	0.08	-0.12	-0.14	-0.10
	11	-0.27	-0.21	-0.21	-0.22	-0.28	-0.35	-0.24	-0.18	-0.20	-0.23	-0.22	-0.15	-0.15	-0.23	-0.18	-0.14	-0.14	-0.15	-0.20	-0.14
	12	-1.00	-0.78	-0.84	-0.81	-0.80	-0.65	-0.65	-0.40	-0.67	-0.50	-0.64	-0.42	-0.60	-0.41	-0.60	-0.36	-0.53	-0.28	-0.54	-0.32
	13	-0.75	-0.56	-0.55	-0.50	-0.67	-0.50	-0.50	-0.30	-0.52	-0.37	-0.46	-0.27	-0.44	-0.31	-0.42	-0.25	-0.40	-0.21	-0.40	-0.23
	14	-0.75	-0.59	-0.61	-0.59	-0.58	-0.50	-0.53	-0.34	-0.48	-0.38	-0.48	-0.31	-0.42	-0.34	-0.45	-0.28	-0.38	-0.24	-0.41	-0.26
Desplaz. Vertical Aguas Abajo	13	-0.75	-0.56	-0.79	-0.50	-0.67	-0.50	-0.50	-0.30	-0.52	-0.37	-0.46	-0.27	-0.44	-0.31	-0.42	-0.25	-0.40	-0.21	-0.40	-0.23
	15	-0.20	-0.33	-0.25	-0.17	-0.22	-0.25	-0.23	-0.15	-0.15	-0.20	-0.15	-0.11	-0.12	-0.18	-0.13	-0.09	-0.08	-0.13	-0.12	-0.08
	16	-0.08	-0.17	-0.11	-0.10	-0.12	-0.16	-0.15	-0.09	-0.06	-0.13	-0.08	-0.06	-0.05	-0.13	-0.06	-0.05	-0.04	-0.09	-0.07	-0.05
	17	0.01	0.01	-0.03	-0.01	-0.01	-0.08	-0.04	-0.03	0.02	-0.06	-0.02	-0.02	0.02	-0.05	-0.02	-0.02	0.01	-0.04	-0.02	-0.02
	18	-0.22	-0.34	-0.28	-0.18	-0.20	-0.25	-0.24	-0.15	-0.15	-0.19	-0.14	-0.11	-0.12	-0.18	-0.14	-0.09	-0.09	-0.13	-0.13	-0.08

Notas:

- Los espectros considerados fueron definidos en el capítulo II.
- Los movimientos sísmicos de diseño son los definidos mediante el procedimiento de ajuste espectral en el capítulo III.
- Los desplazamientos horizontales negativos implican desplazamientos hacia la izquierda. Los desplazamientos verticales negativos implican desplazamientos hacia abajo.

Las geometrías deformadas y distribución dentro del modelo numérico de los desplazamientos horizontales/verticales representativos obtenidos para los espectros de norma técnica peruana E030, espectro determinístico, espectro del código IBC, espectro de peligro uniforme con 475 años de periodo de retorno y finalmente el espectro medio condicionado son mostrados en las Figuras de la 4.16 a la 4.30. El Anexo III muestra los tiempos historia de los desplazamientos en los puntos de control aguas arriba y aguas abajo de la presa, obtenidos como parte de los análisis sísmicos, cuando un sismo en particular es considerado. Así mismo el Anexo IV muestra las comparaciones de los resultados obtenidos mediante el uso de los distintos sismos considerados en cada punto de control.

4.6 COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN FUNCIÓN DE LOS ESPECTROS ESPECIFICADOS PARA EL SITIO DE LA PRESA YURACMAYO.

Para evaluar la variabilidad de la respuesta sísmica de la presa Yuracmayo en términos de los espectros especificados, se consideraron los puntos de control de desplazamientos horizontales 114 y 121 (Figura 4.15), aguas arriba y aguas abajo de la presa respectivamente. Así mismo se consideraron los puntos de control de desplazamientos verticales 120 y 124, representativos de los taludes aguas arriba y aguas abajo de la presa

La comparación de la respuesta de la presa Yuracmayo en términos de desplazamientos para los sismos ajustados a los espectros especificados para el sitio de la presa Yuracmayo son mostrados en las Figuras de la 4.31 a la 4.46 (por ejemplo las Figuras 4.31 a 4.34 muestran las comparaciones en términos de desplazamientos para el sismo de Chile del 2010 ajustado a los espectros considerados).

Finalmente en las Figuras 4.47 a la 4.50 se muestran las comparaciones entre los desplazamientos ponderados obtenidos de los análisis sísmicos de la presa Yuracmayo, para los espectros especificados (Para cada espectro, los desplazamientos ponderados se obtuvieron en base a los tiempos historia de desplazamientos generados por los sismos individuales – Figuras 4.31 a 4.46 - considerándose el promedio de los mismos). Además en estas figuras se muestran, con fines comparativos, los desplazamientos obtenidos al aplicar los tiempos historia de aceleraciones ajustadas al espectro determinístico especificado para la presa Yuracmayo cuando las metodologías de selección y ajuste de la Universidad de Texas y la Universidad de Stanford son utilizadas

4.6.1 Discusión de Resultados

Los resultados muestran que el espectro que ofrece mayor demanda sísmica en términos del comportamiento estructural del sistema presa (taludes aguas arriba y aguas abajo), fundación de la presa Yuracmayo, es el espectro de la norma peruana E030, este resultado está asociado al concepto mediante el cual se divide al Perú en tres (3) zonas macrosísmicas. Teniendo en cuenta que la presa Yuracmayo se encuentra en la zona de mayor demanda sísmica (zona 3), el uso de este espectro, (definido estrictamente para evaluar la respuesta sísmica de estructuras convencionales), en una presa de tierra genera un conservadurismo en cuanto a la respuesta de la presa, cuando es comparado con otros espectros. El espectro determinístico (percentil 84) muestra demandas sísmicas mayores en relación a los espectros restantes, el uso de este espectro podría justificarse si se desea evaluar la respuesta de la presa ante el sismo máximo que puede ser generado bajo un

contexto sismotectónico dado. Así mismo en términos de la respuesta estructural de la presa Yuracmayo las demandas sísmicas para los espectros del código IBC y el espectro de peligro uniforme se muestran comparables, además la respuesta estructural obtenida en la presa al considerar el espectro medio determinístico (percentil 50) es también comparable a estos espectros. Finalmente la demanda asociada al espectro medio condicionado en términos de respuestas estructurales en la presa Yuracmayo es menor que la demanda impuesta por el espectro de peligro uniforme, esto refleja el hecho de que el espectro de peligro uniforme es una envolvente de los espectros de respuesta de combinaciones de eventos sísmicos, mientras el espectro medio condicionado es elaborado para el periodo fundamental de la estructura y representa la demanda de un evento sísmico asociado a una combinación específica de magnitud y distancia en dicho periodo

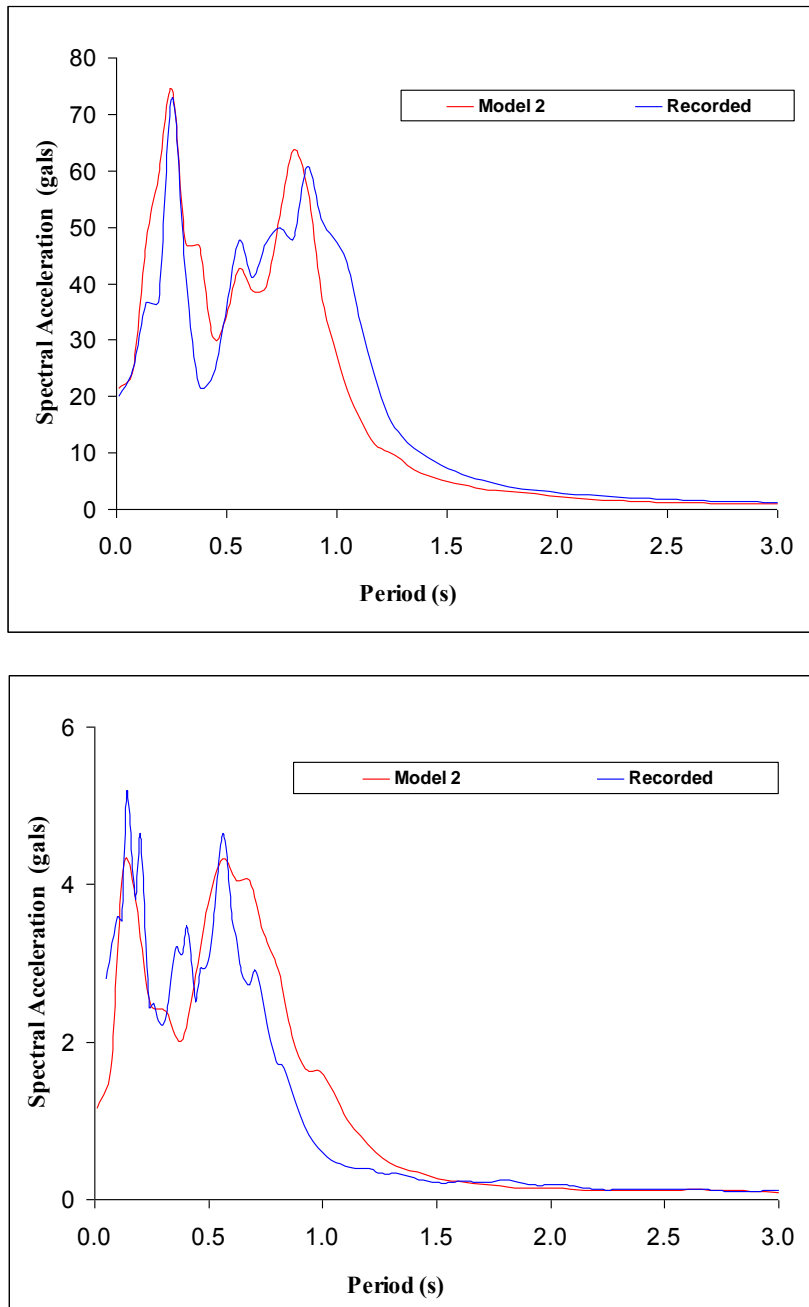


Figura 4.1 Resultados de la calibración numérica de un modelo dinámico para la presa Yuracmayo en base al estudio de Macedo et al. (2010). Arriba, la comparación entre el espectro numérico y el espectro registrado para el sismo del 29/03/2008. Abajo, la comparación para el evento sísmico del 16/02/2005.

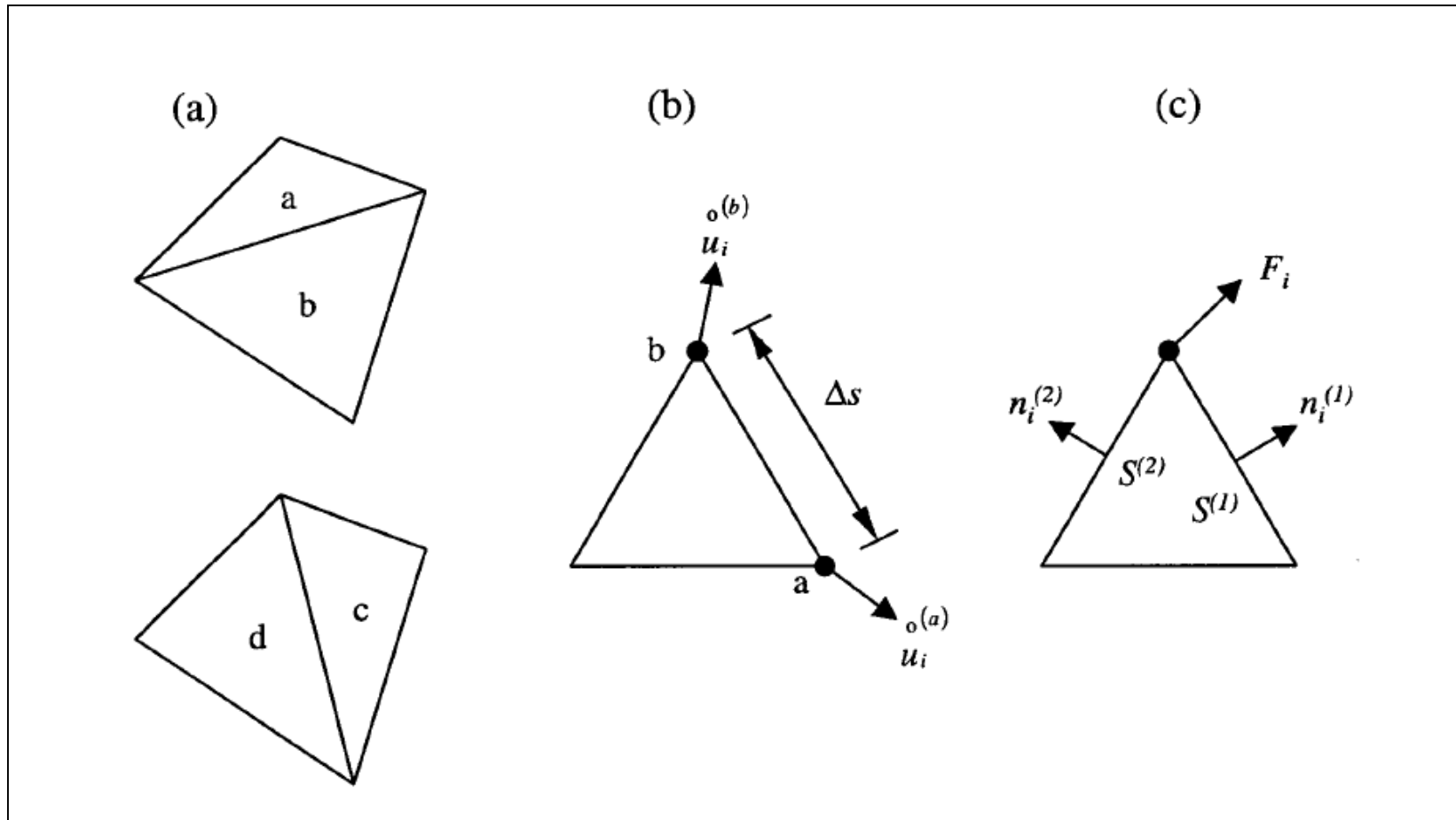


Figura 4.2 Elementos básicos usados en el FLAC (Cundall, 1976). a) Zonas cuadrilaterales superpuestas b) Elementos triangulares típicos con vectores de velocidad c) Vectores de fuerzas nodales.

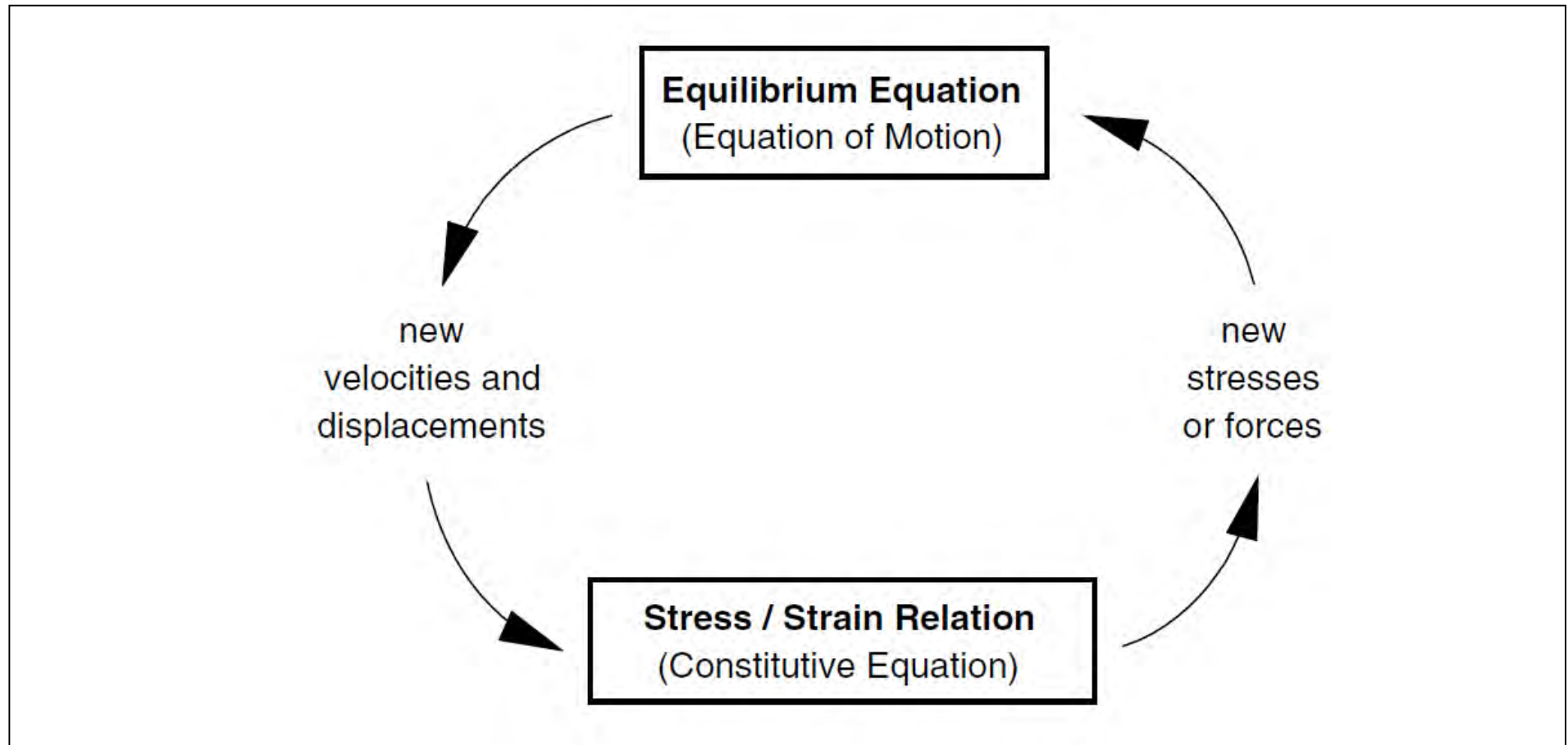


Figura 4.3 Ciclo básico de cálculos explícitos en el FLAC (Cundall, 1976).

SECCIÓN DE ANÁLISIS

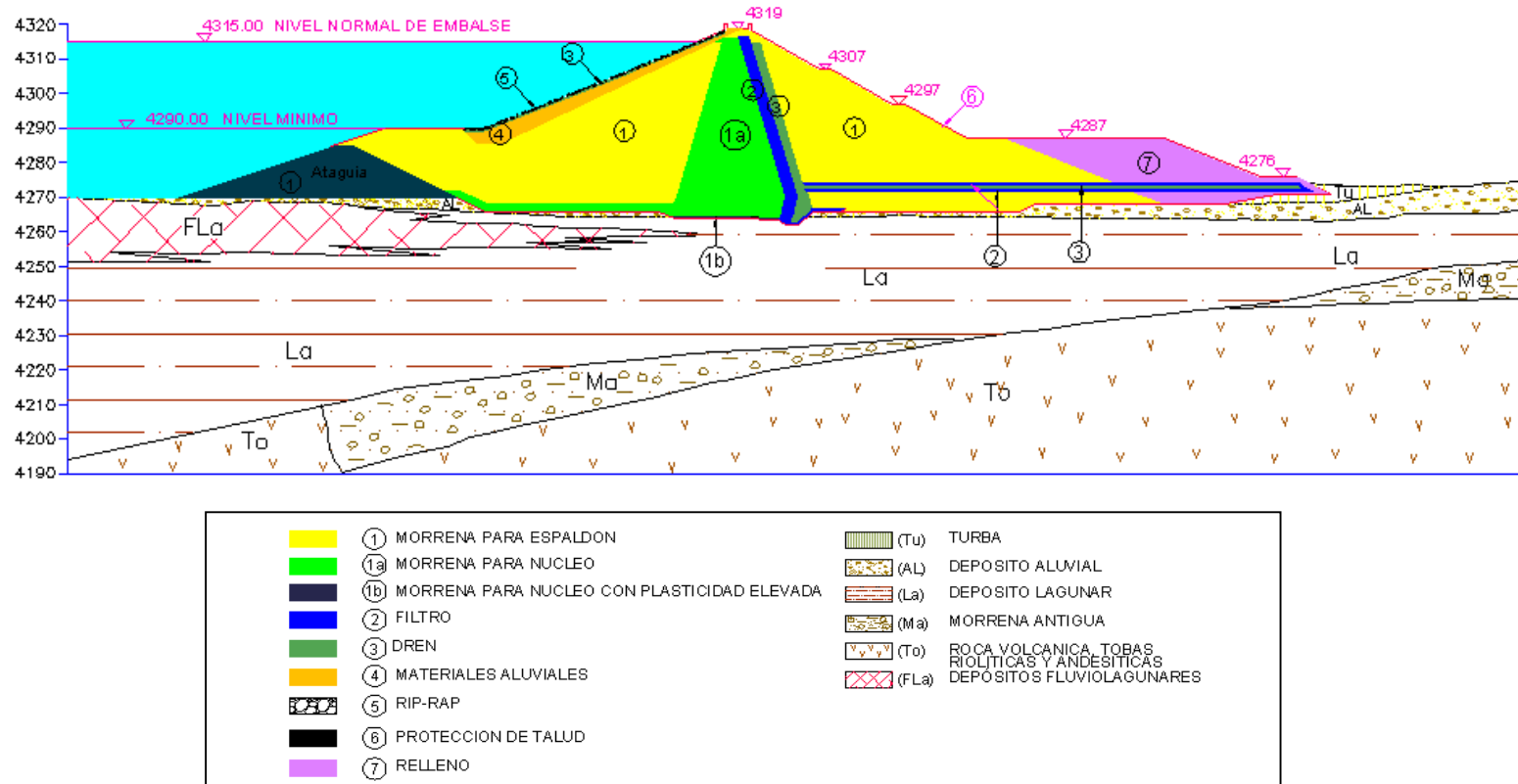


Figura 4.4 Sección de análisis para la presa Yuracmayo. (Macedo, 2009)

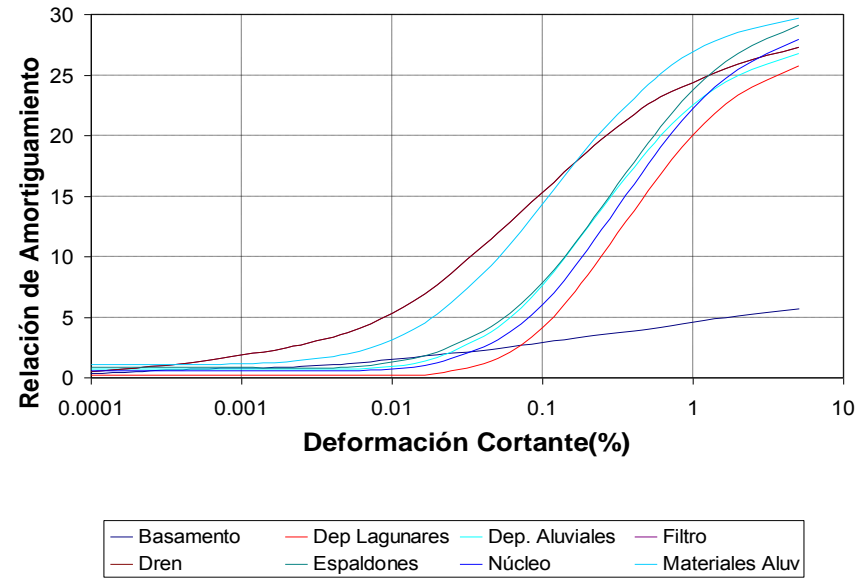
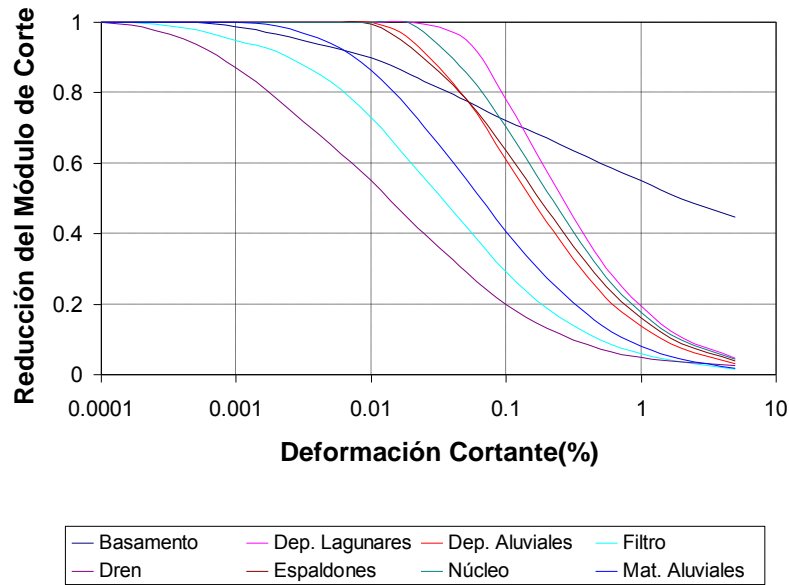


Fig. 4.5: Curvas de degradación para los materiales de la presa Yuracmayo (Macedo, 2009; Macedo et al., 2010) - Izquierda: Curvas de degradación del módulo de corte. Derecha: Curvas de degradación del amortiguamiento.

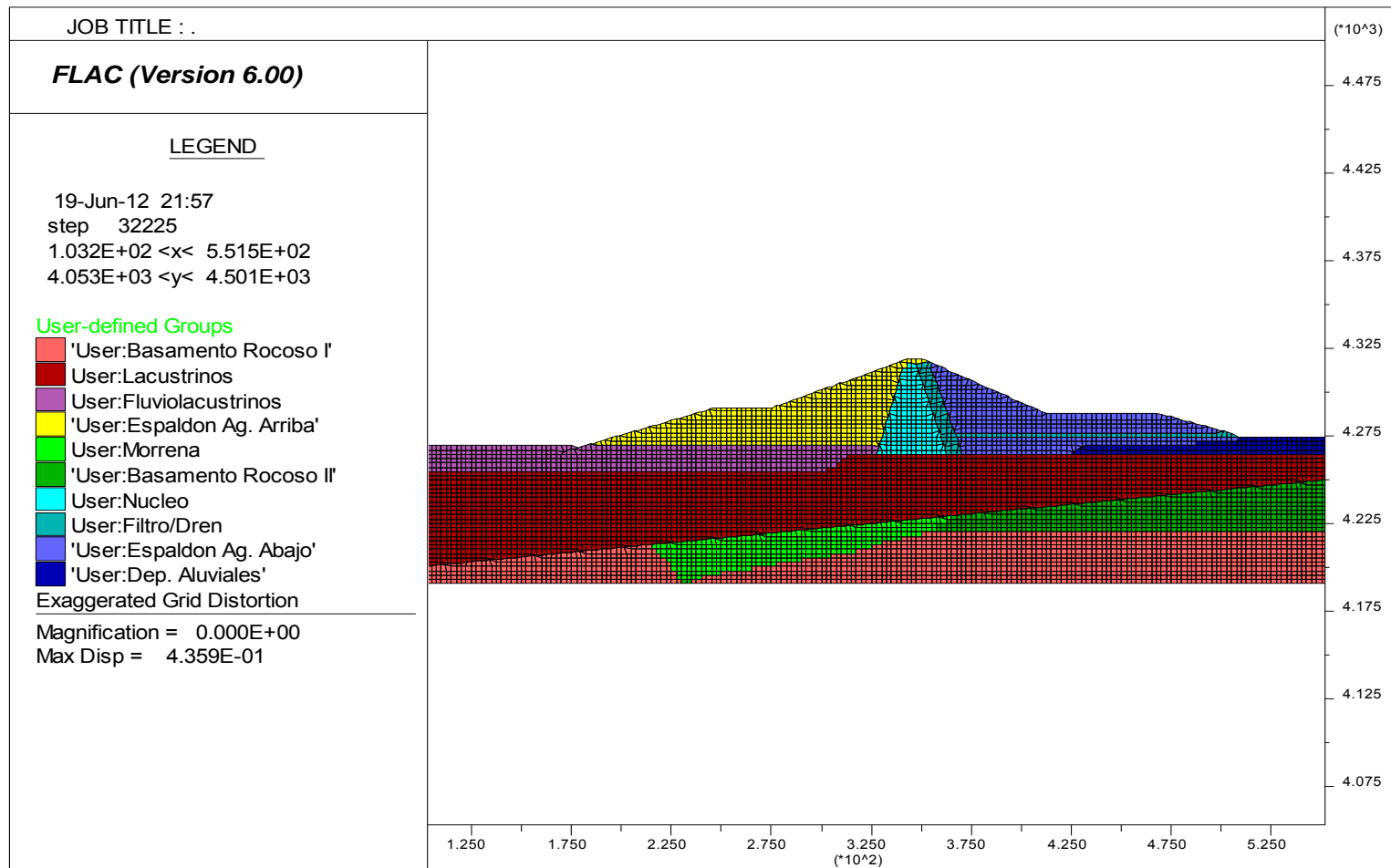


Figura 4.6 Modelo numérico de diferencias finitas FLAC para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

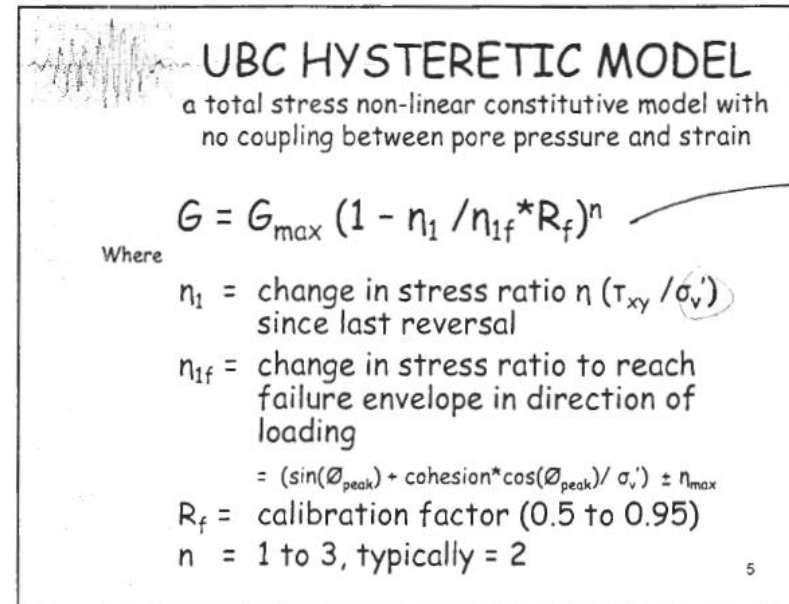
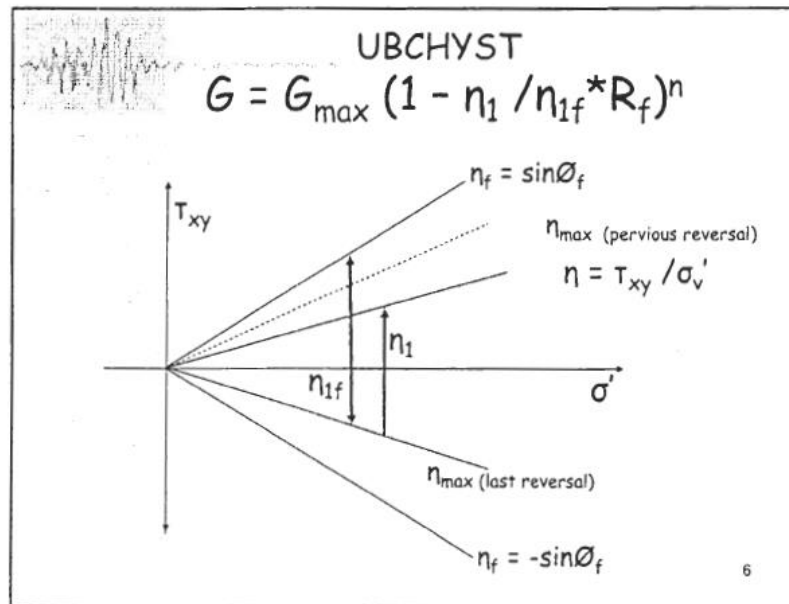


Figura 4.7 Variación del módulo de corte máximo de acuerdo al modelo histeretico UBCHYST (Byrne, 2010; Puebla, 2012).

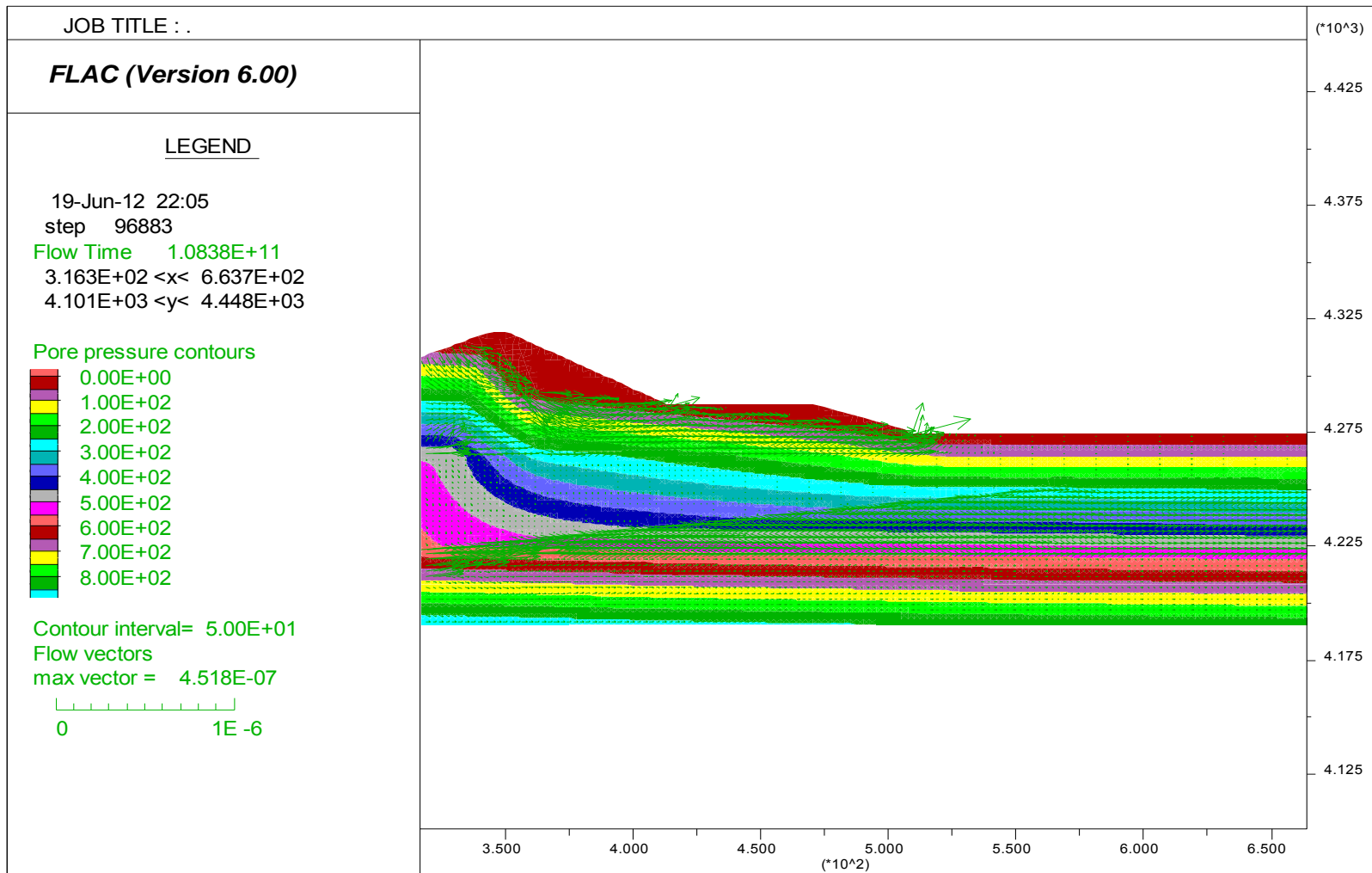


Figura 4.8 Distribución de presiones de poros como resultado del análisis de filtraciones para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

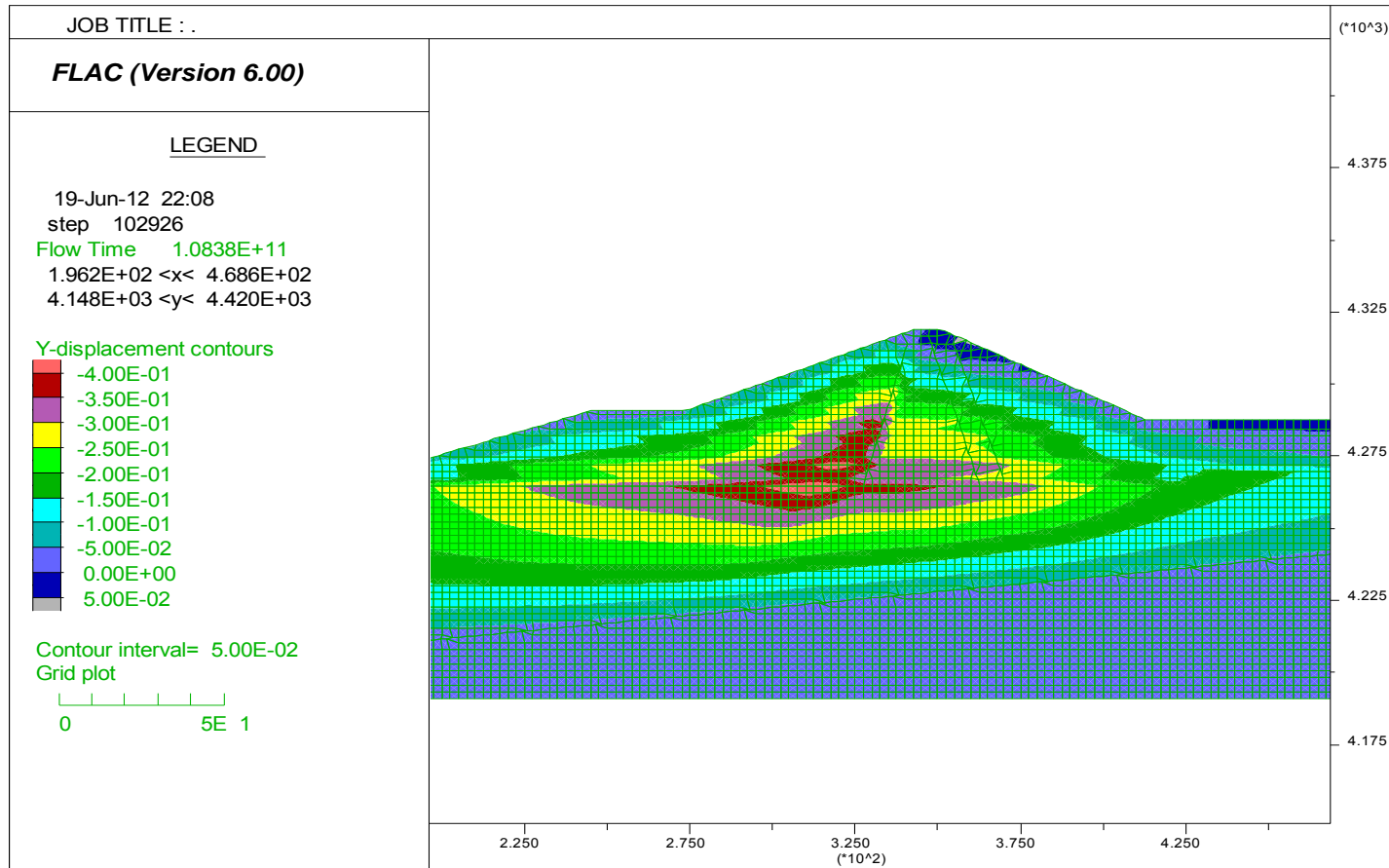


Figura 4.9 Distribución de desplazamientos verticales obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

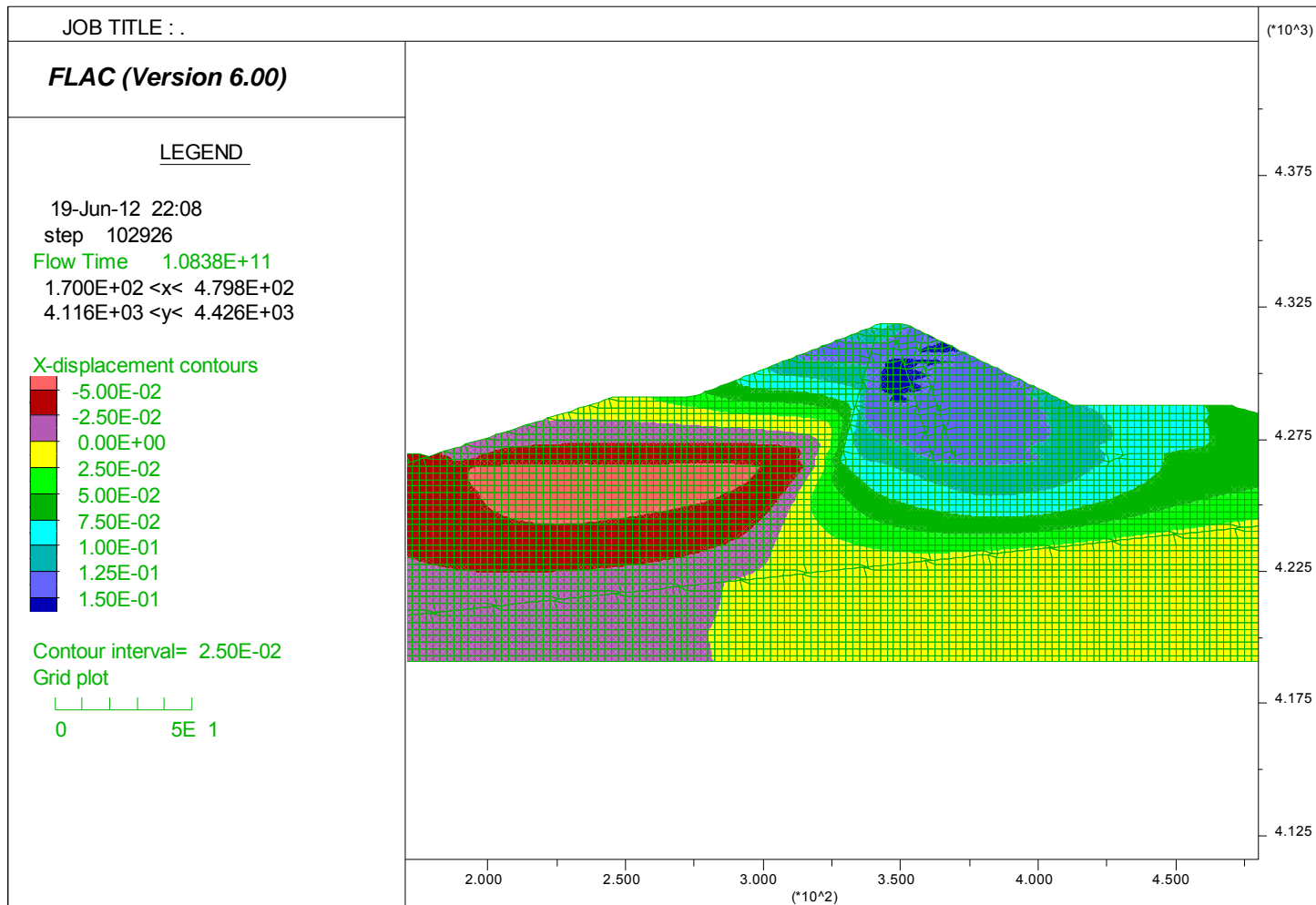


Figura 4.10 Distribución de desplazamientos horizontales obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia

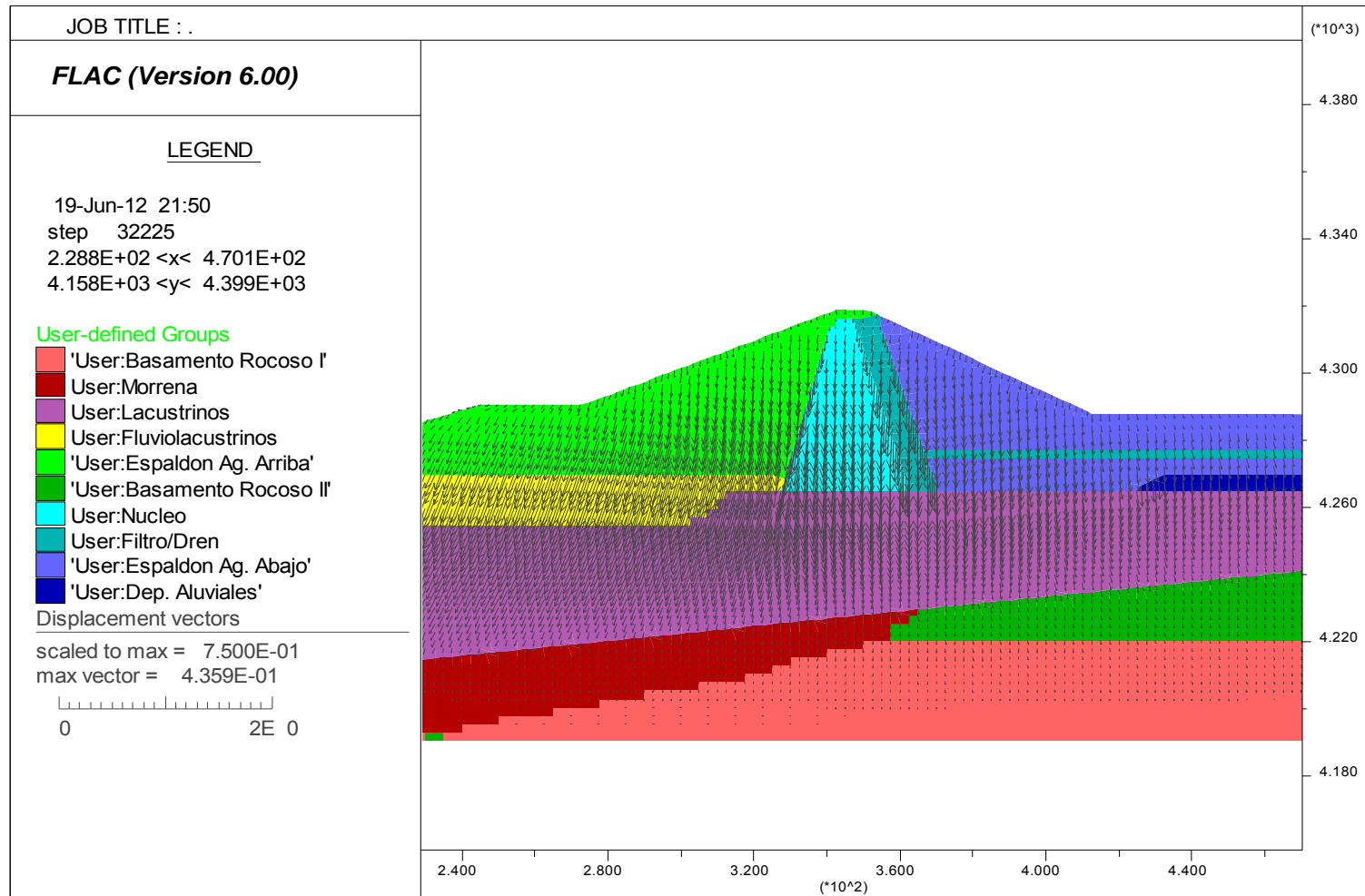


Figura 4.11 Vectores de desplazamientos obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

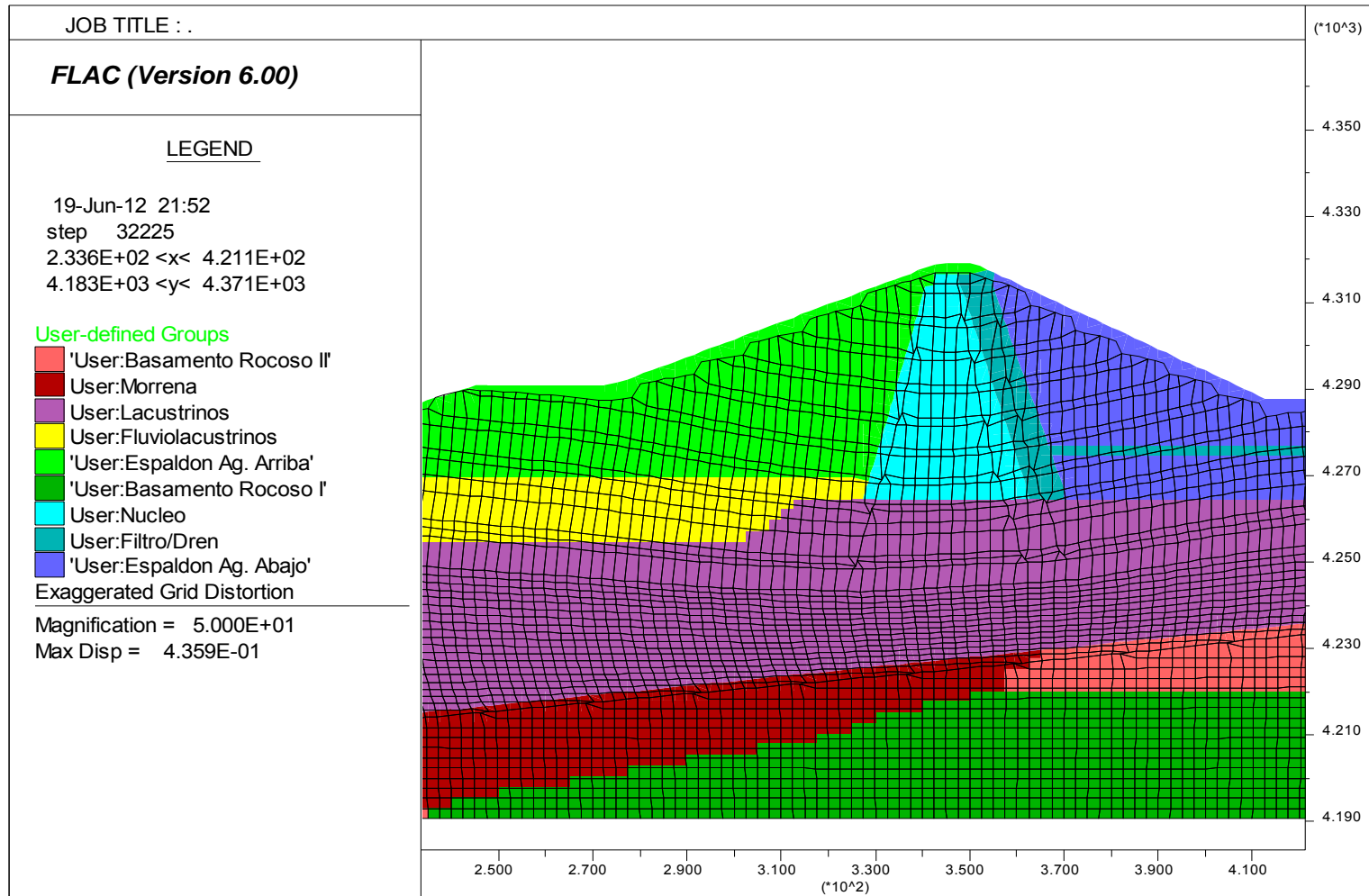


Figura 4.12 Geometría deformada obtenida del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

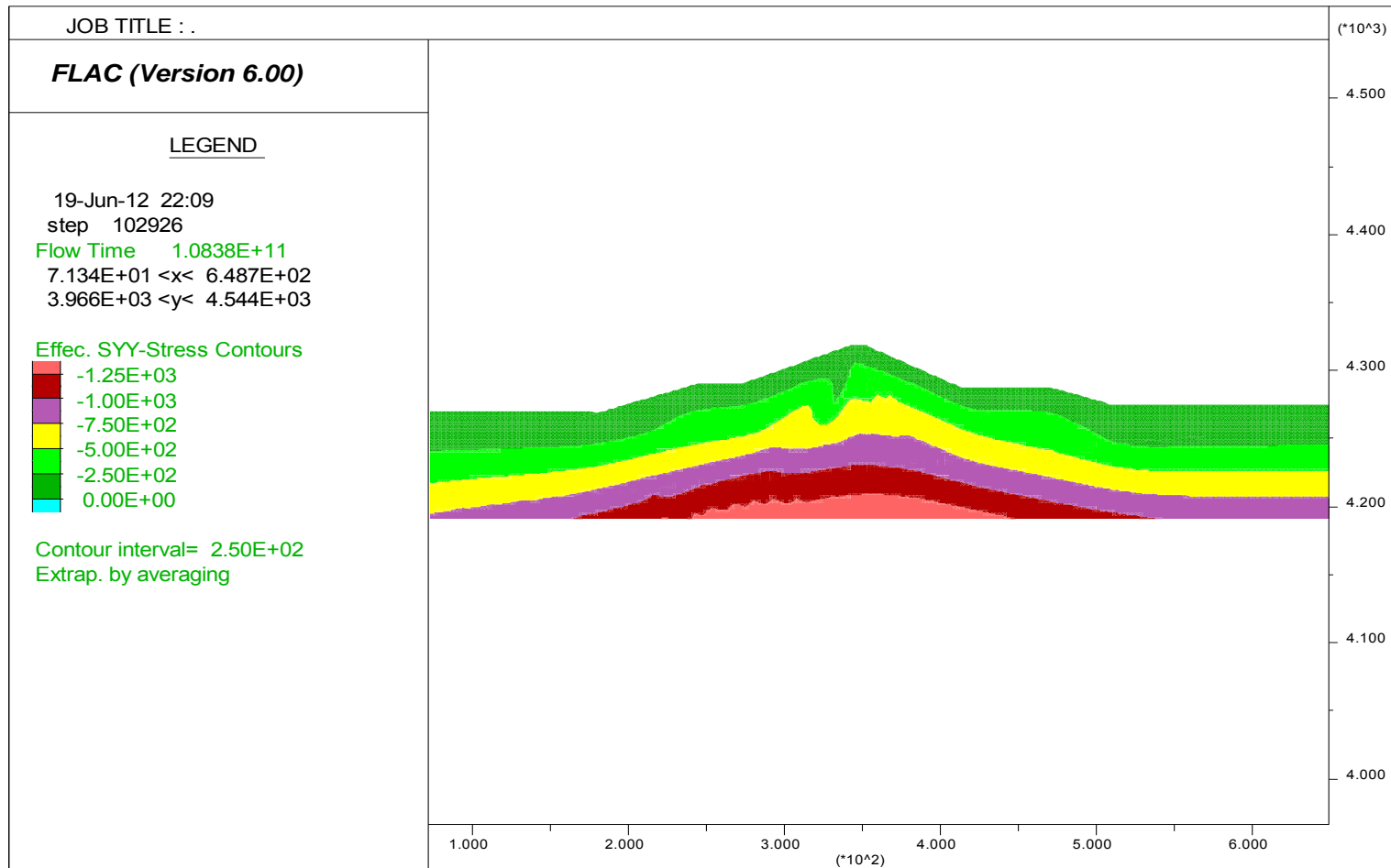


Figura 4.13 Distribución de los esfuerzos efectivos verticales obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo.
 Fuente propia.

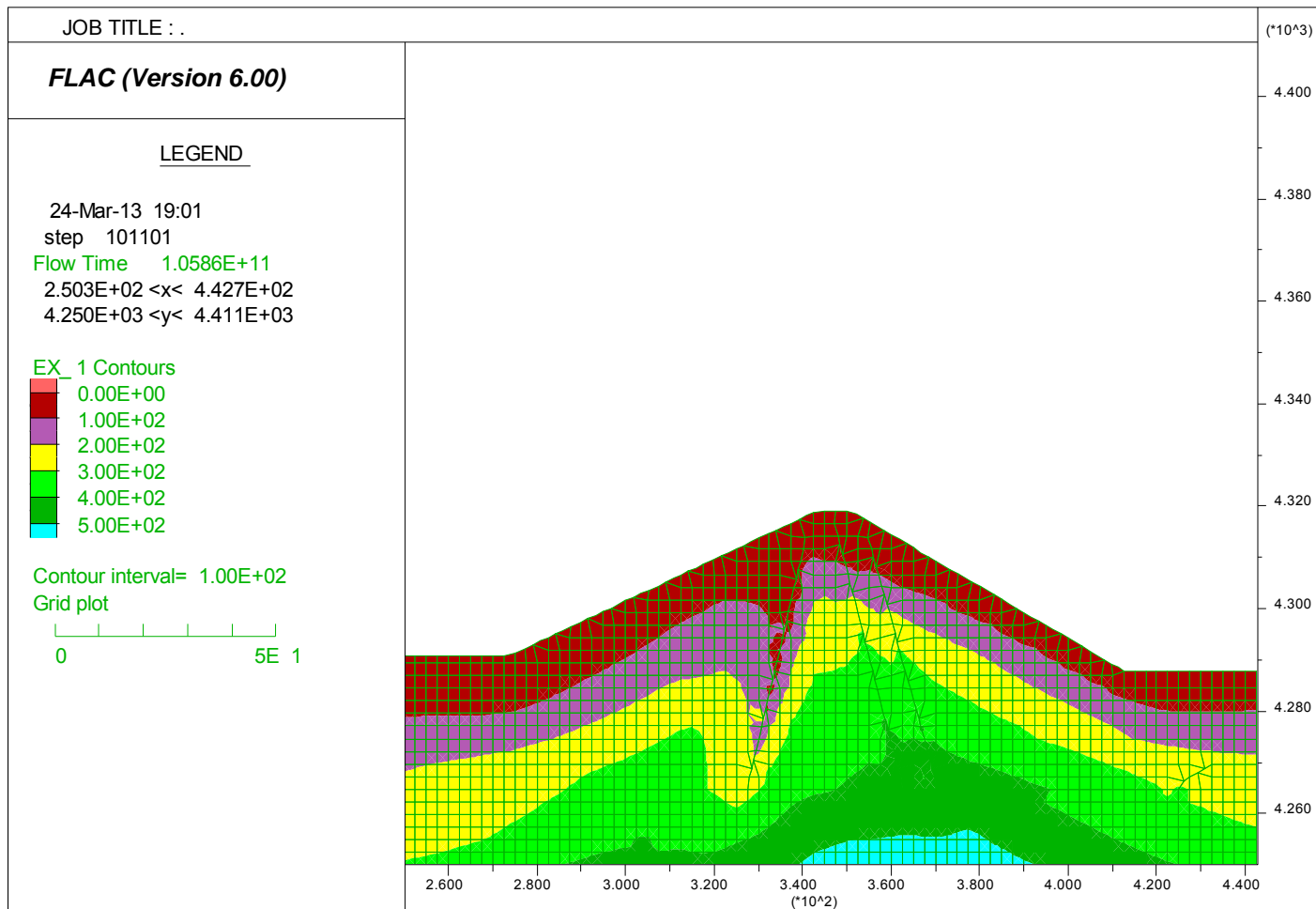


Figura 4.14 Distribución de los esfuerzos efectivos medios obtenidos del análisis esfuerzo deformación estático para la presa Yuracmayo. Fuente propia

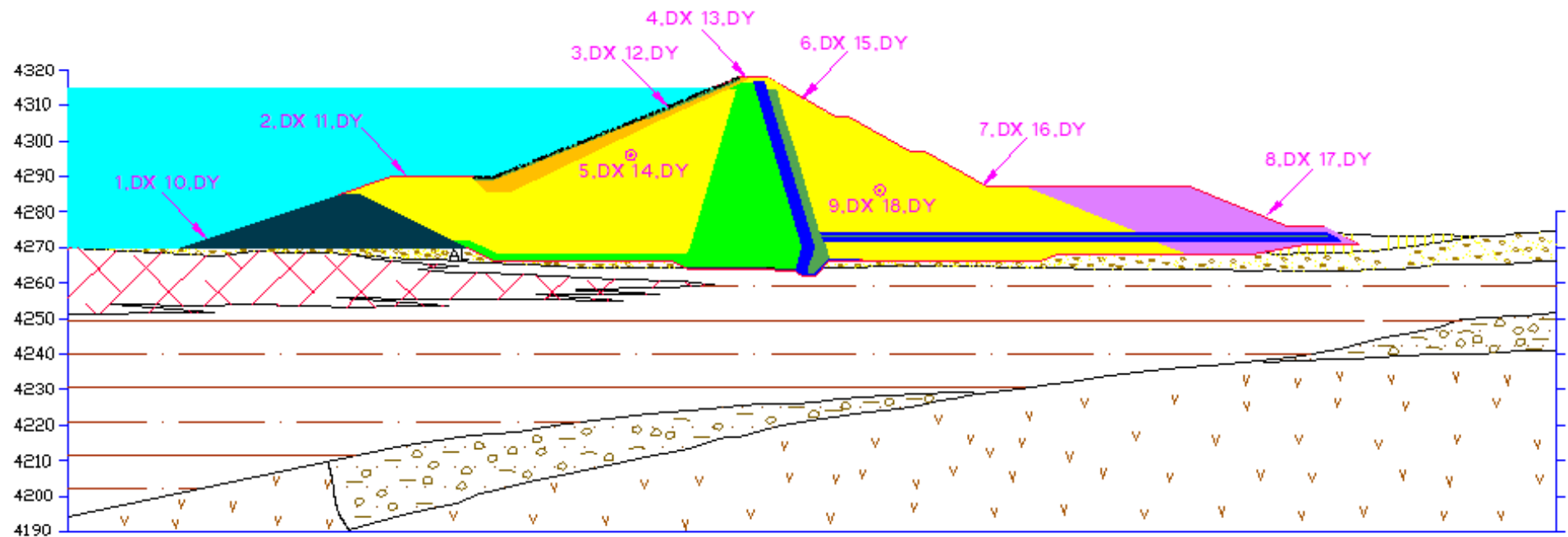


Figura 4.15 Puntos seleccionados para monitorear el comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo. DX: Puntos de monitoreo para desplazamientos horizontales, DY: Puntos de monitoreo para desplazamientos verticales. Fuente propia.

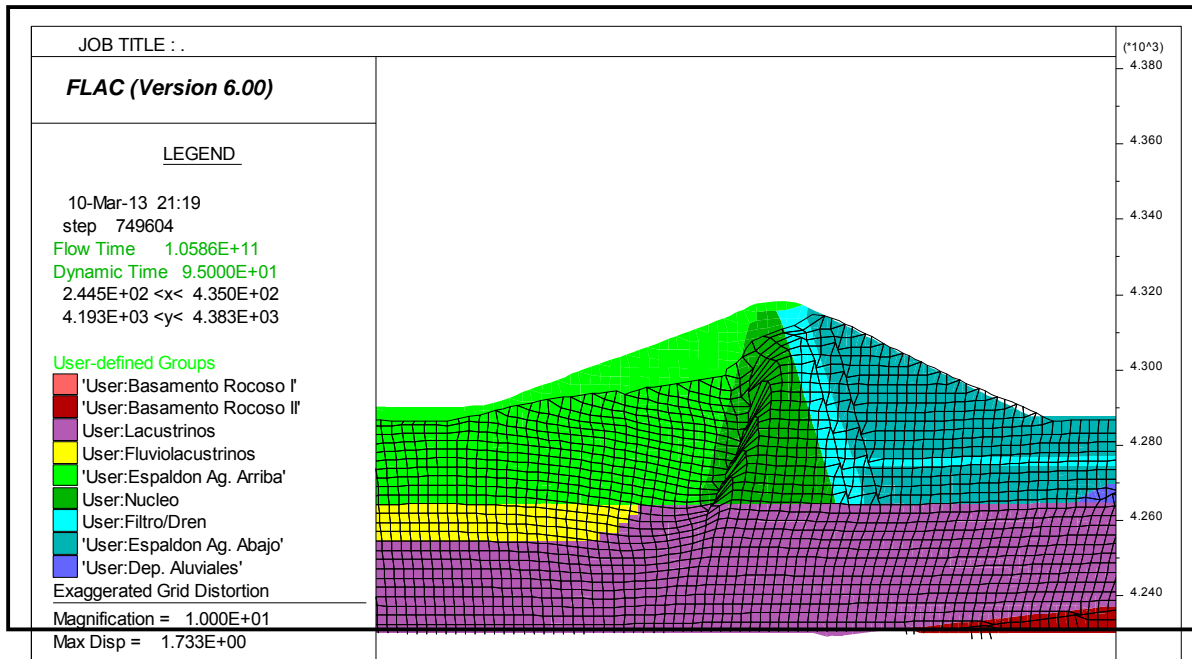


Figura 4.16 Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de la norma peruana E030. Fuente propia.

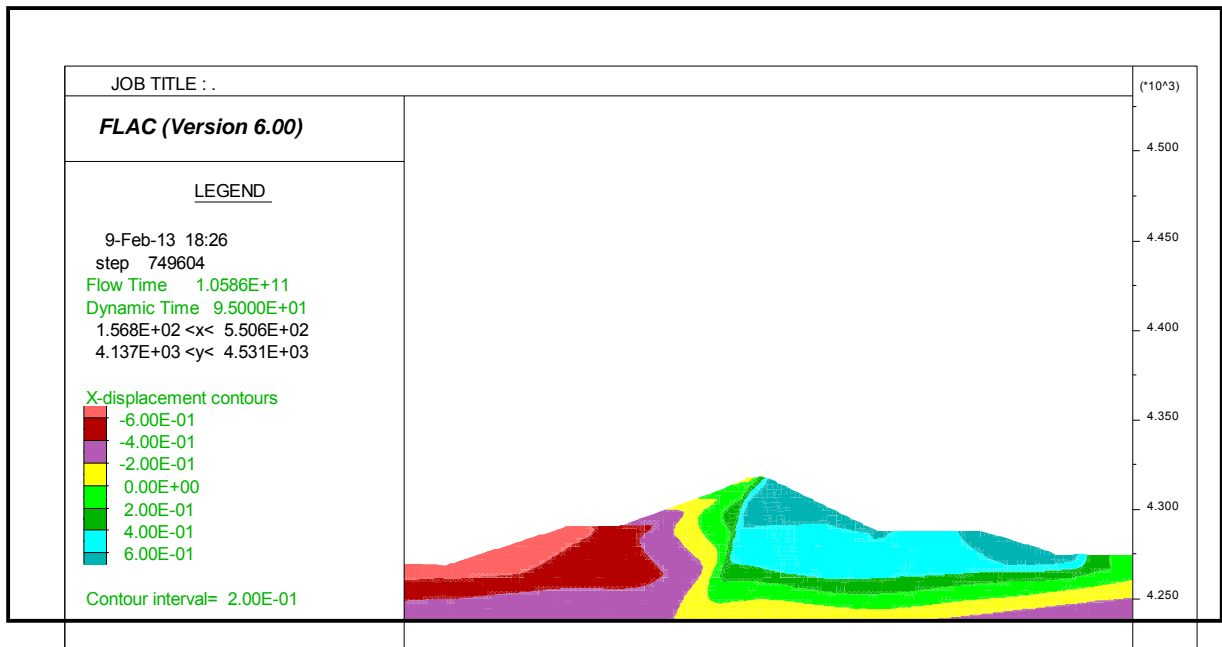


Figura 4.17 Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de la norma peruana E030. Fuente propia.

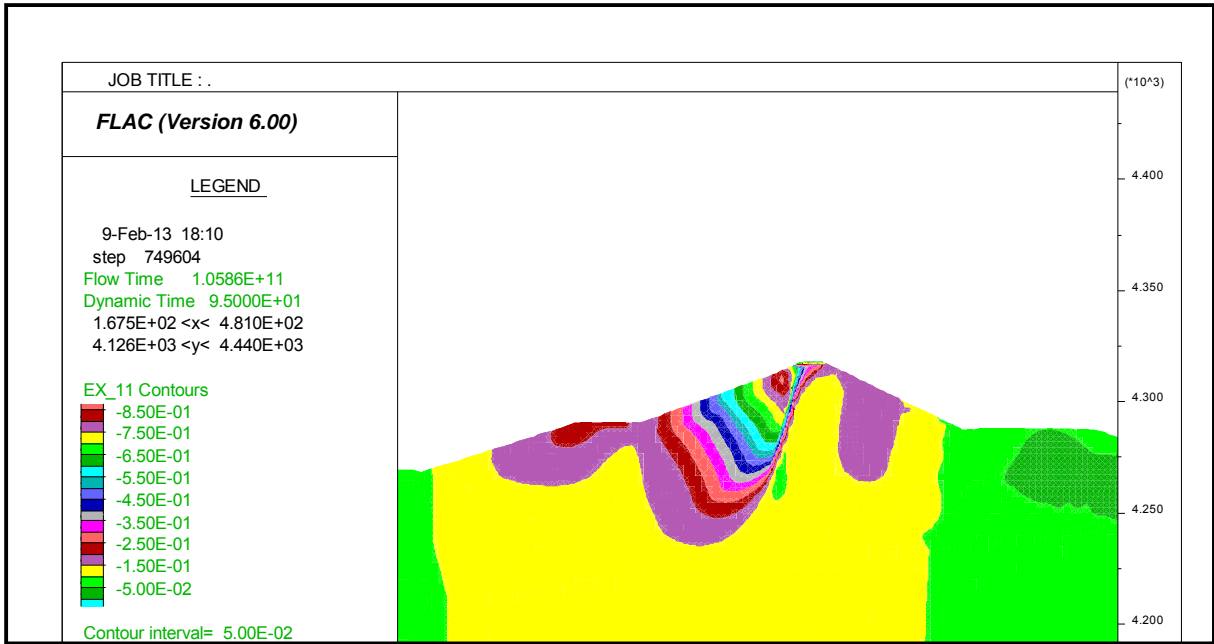


Figura 4.18 Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de la norma peruana E030. Fuente propia

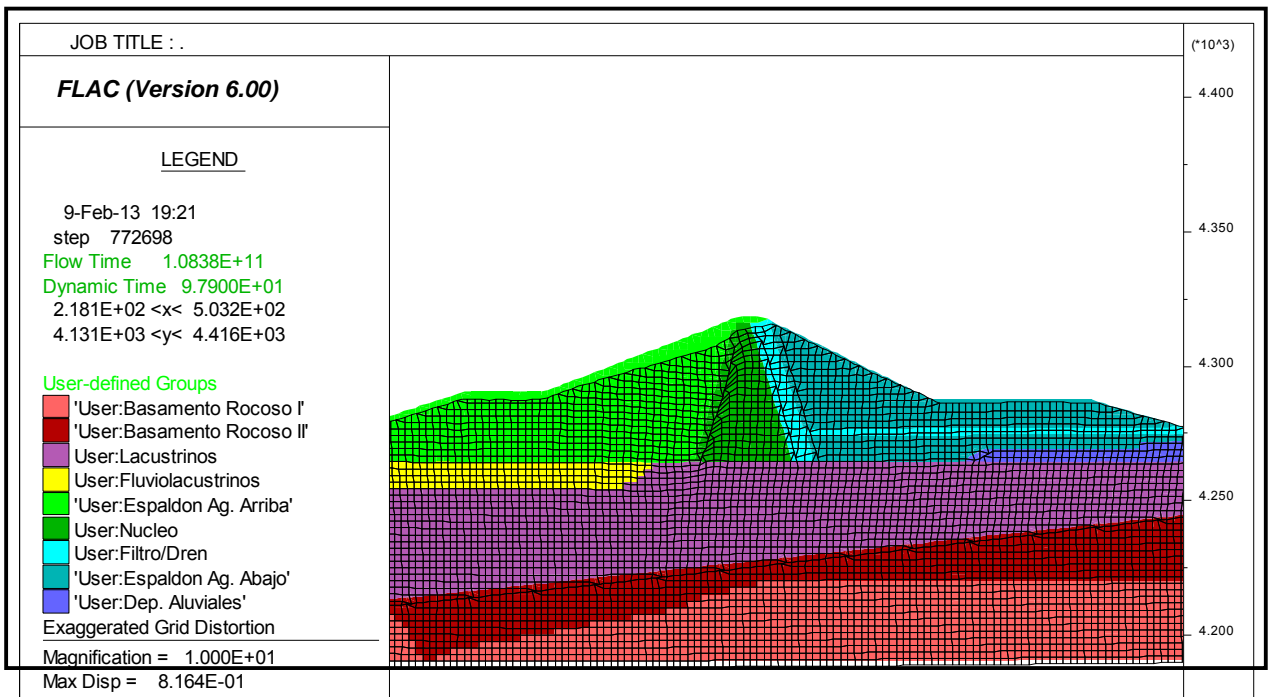


Figura 4.19 Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro determinístico SMC. Fuente propia.

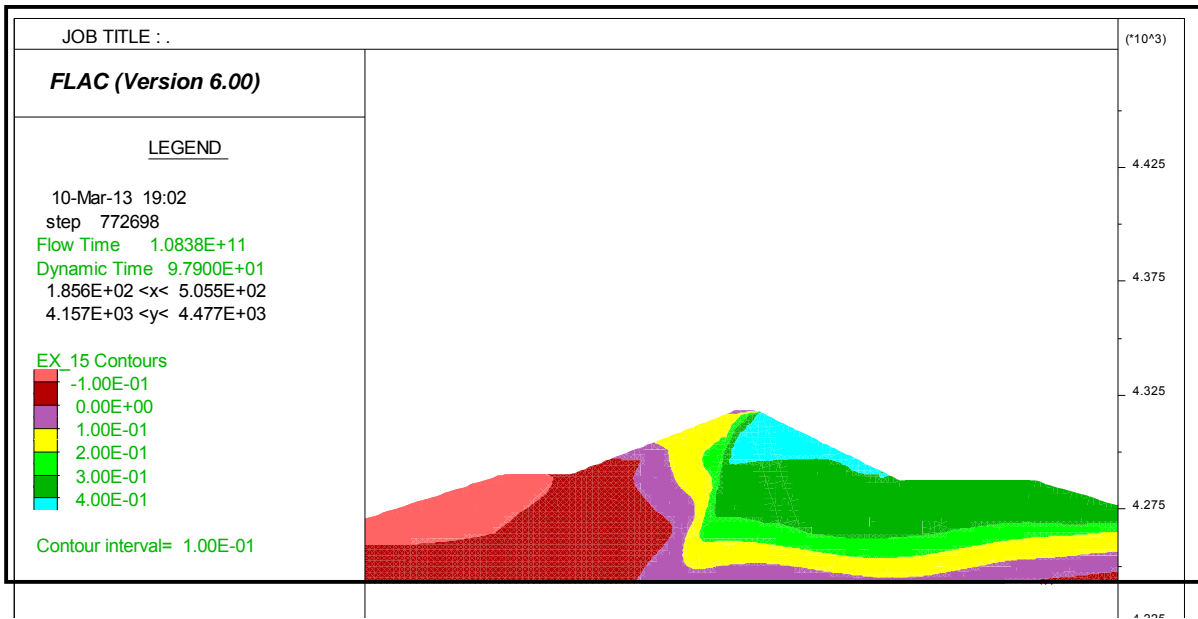


Figura 4.20 Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro determinístico SMC. Fuente propia

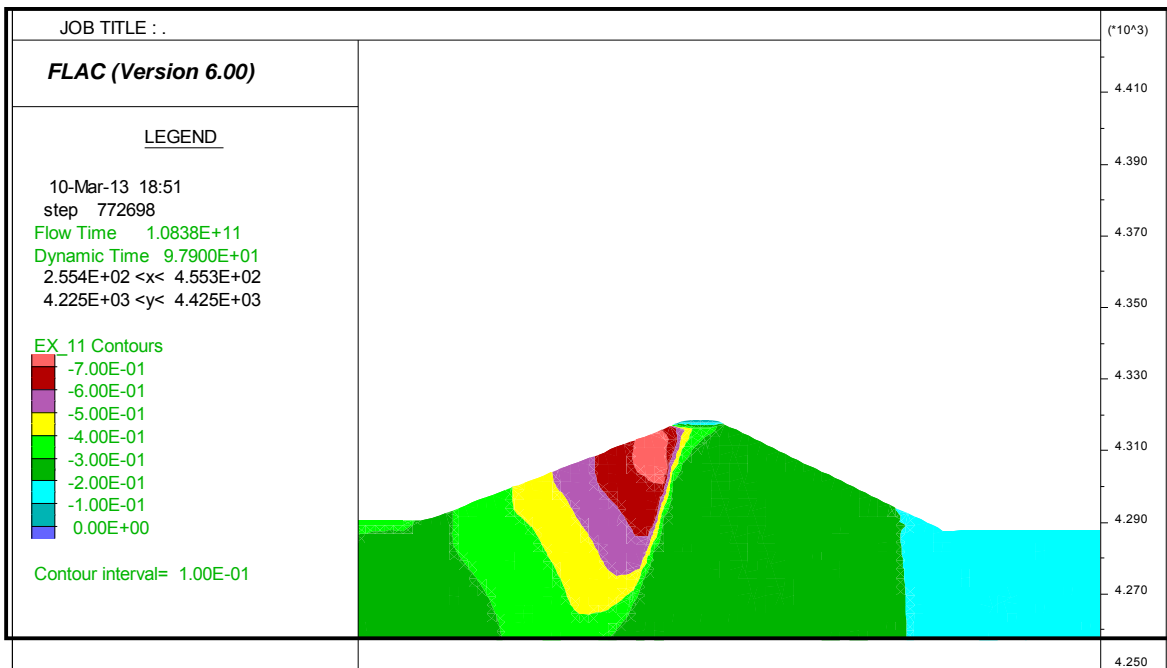


Figura 4.21 Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro determinístico SMC. Fuente propia.

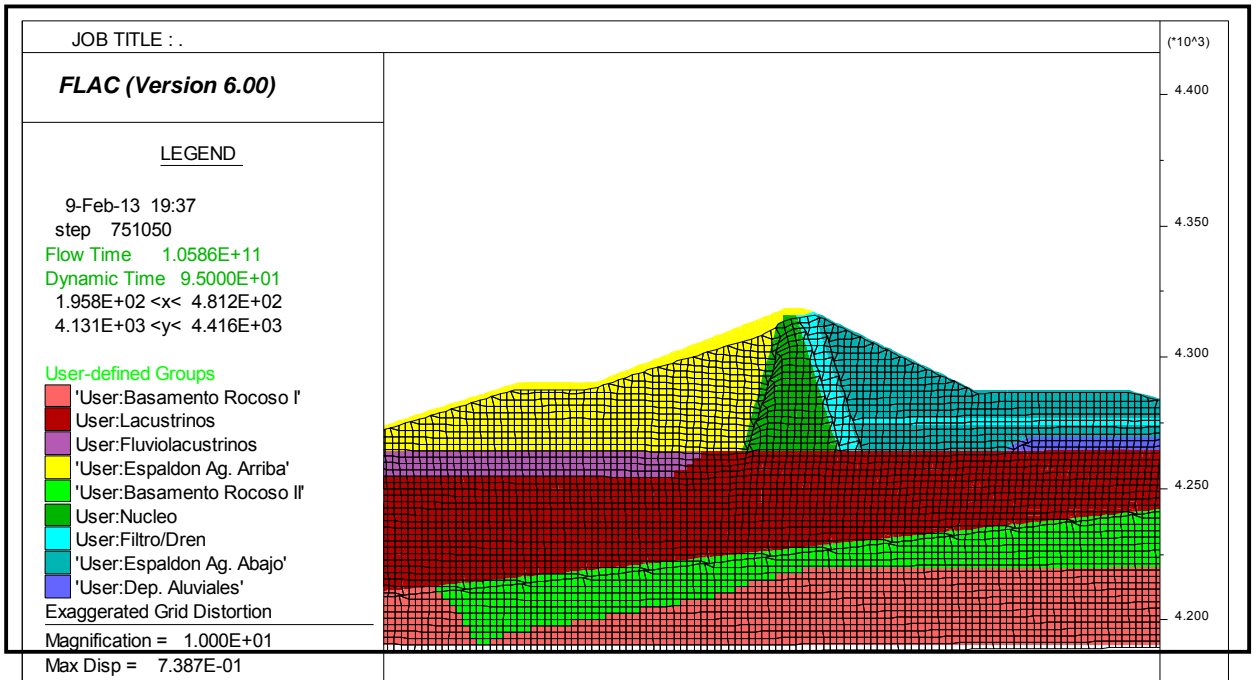


Figura 4.22 Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

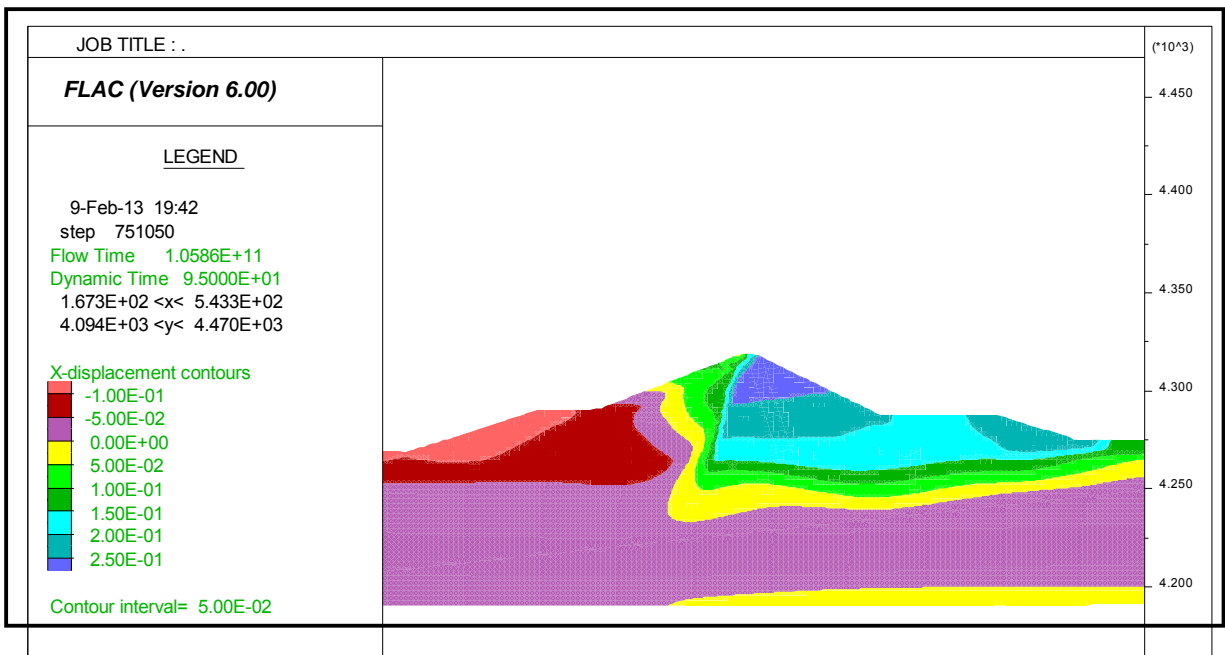


Figura 4.23 Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

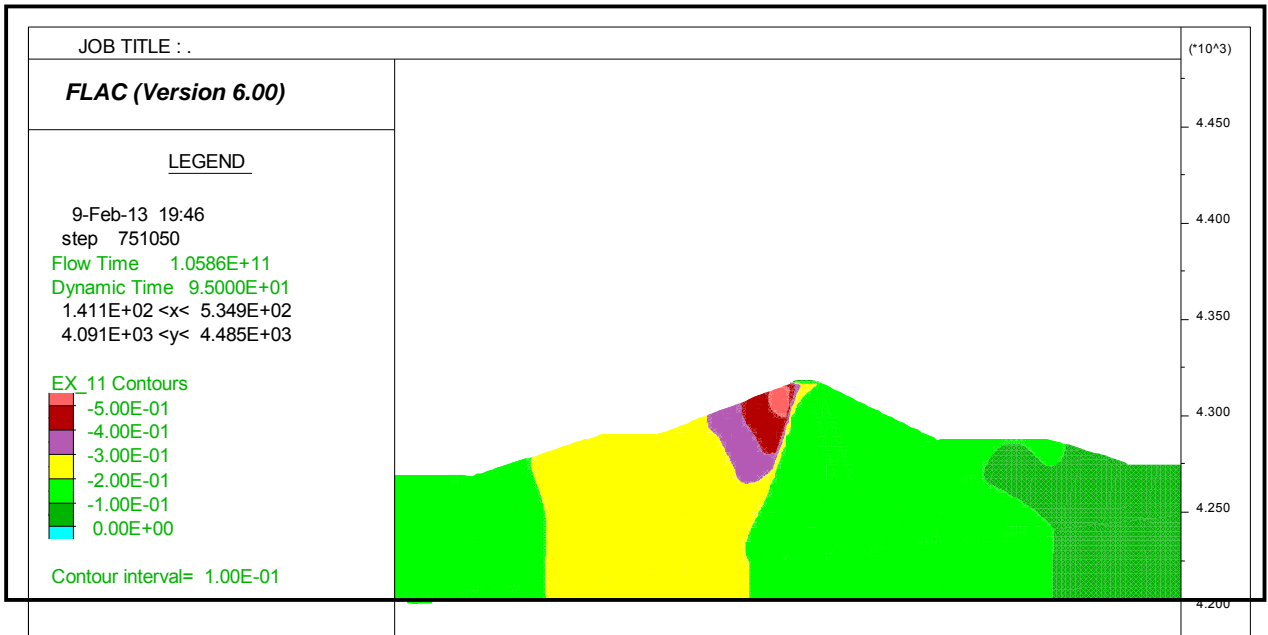


Figura 4.24 Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro del código IBC. Fuente propia.

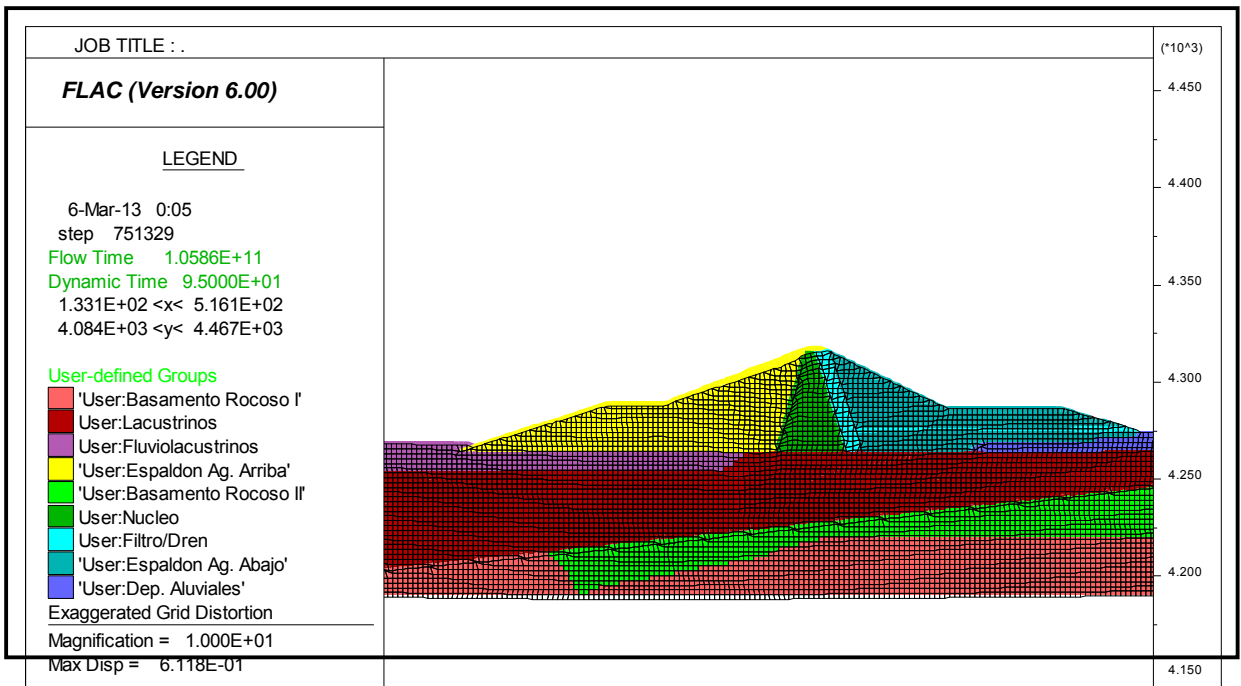


Figura 4.25 Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme (EPU-475 Años). Fuente propia.

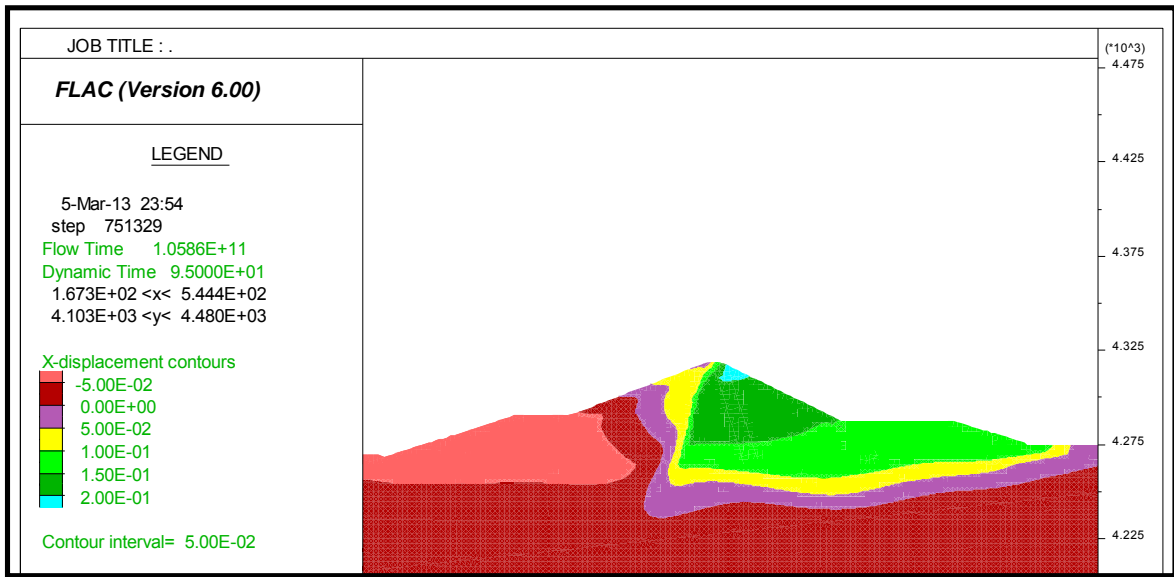


Figura 4.26 Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme (EPU-475 Años). Fuente propia.

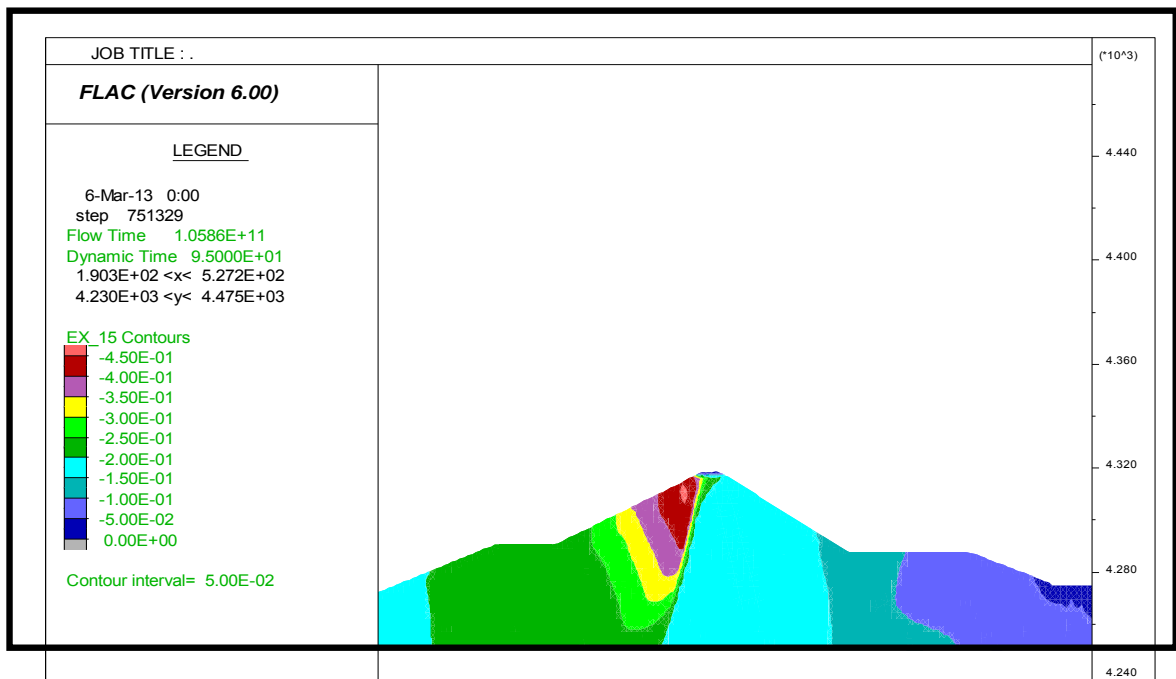


Figura 4.27 Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro de peligro uniforme (EPU-475 Años). Fuente propia.

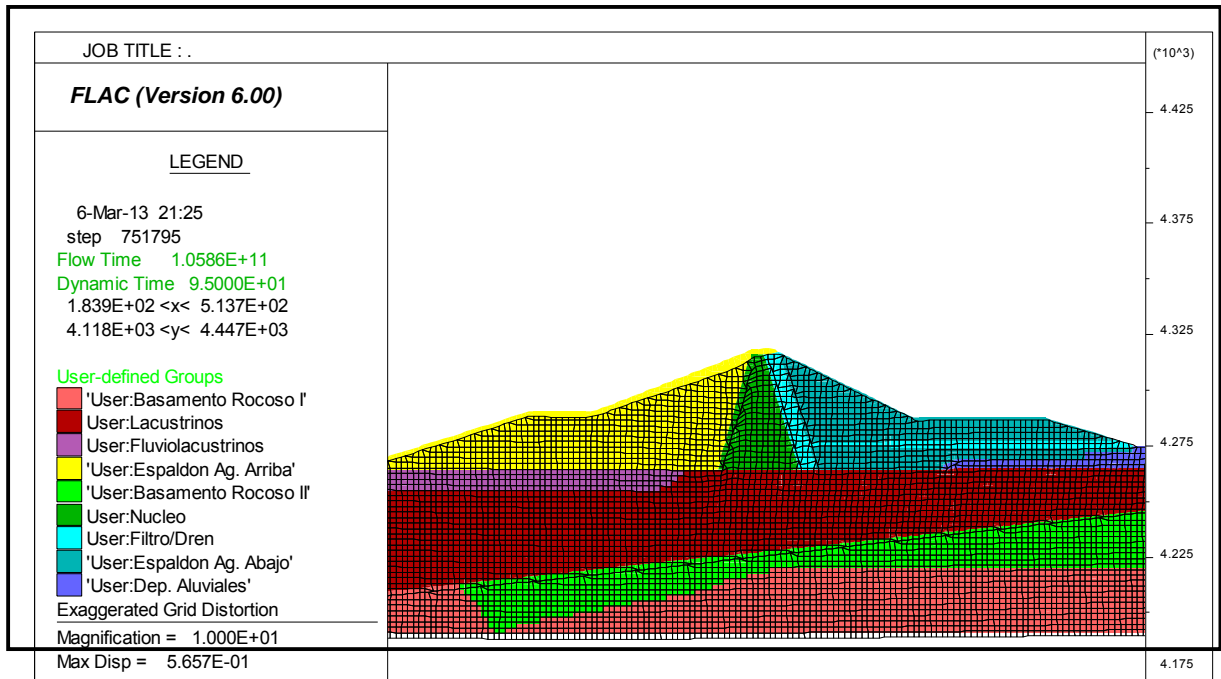


Figura 4.28 Geometría deformada de la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

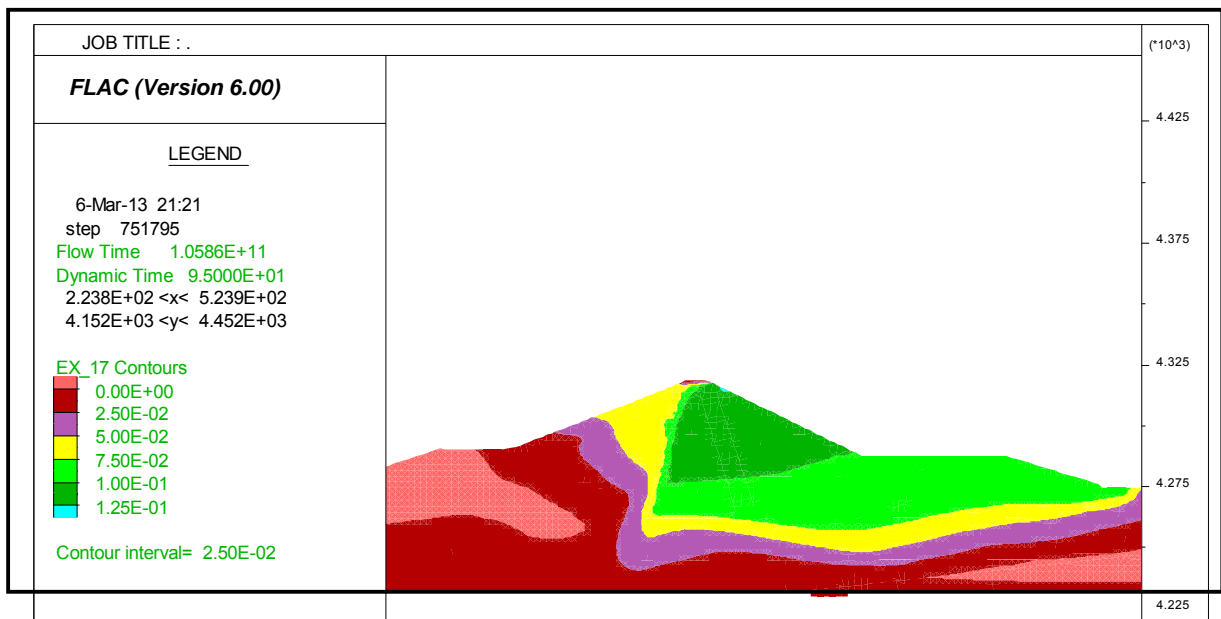


Figura 4.29 Desplazamientos horizontales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

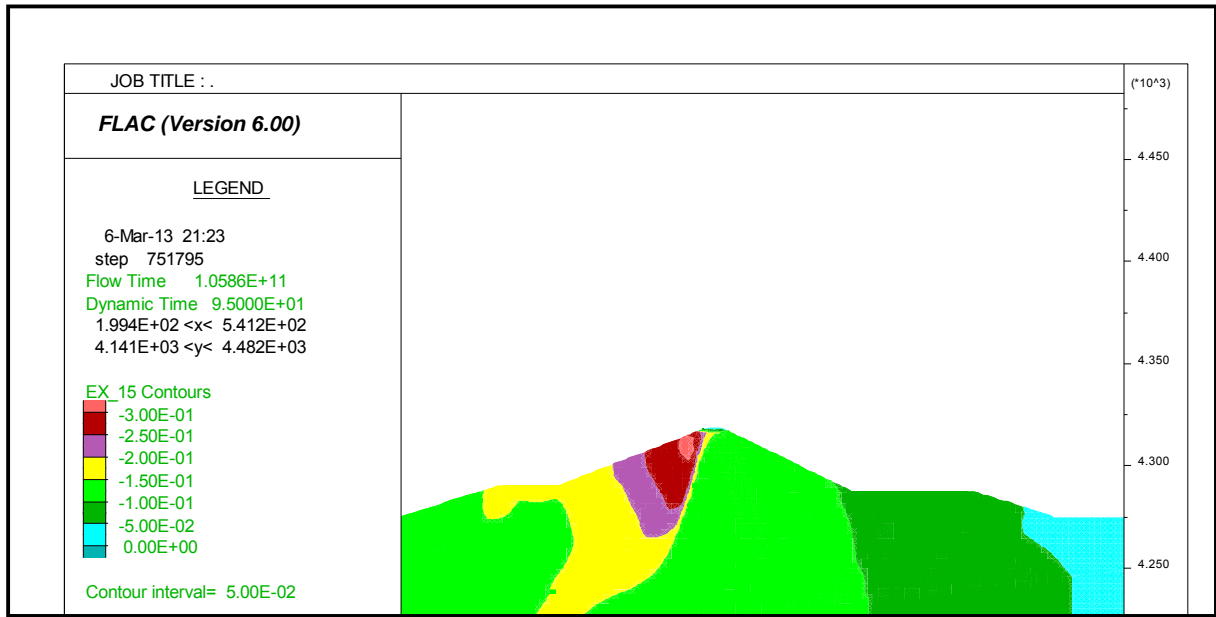


Figura 4.30 Desplazamientos verticales en la presa Yuracmayo al finalizar el movimiento sísmico. Ajuste espectral al espectro medio condicionado (CMS). Fuente propia.

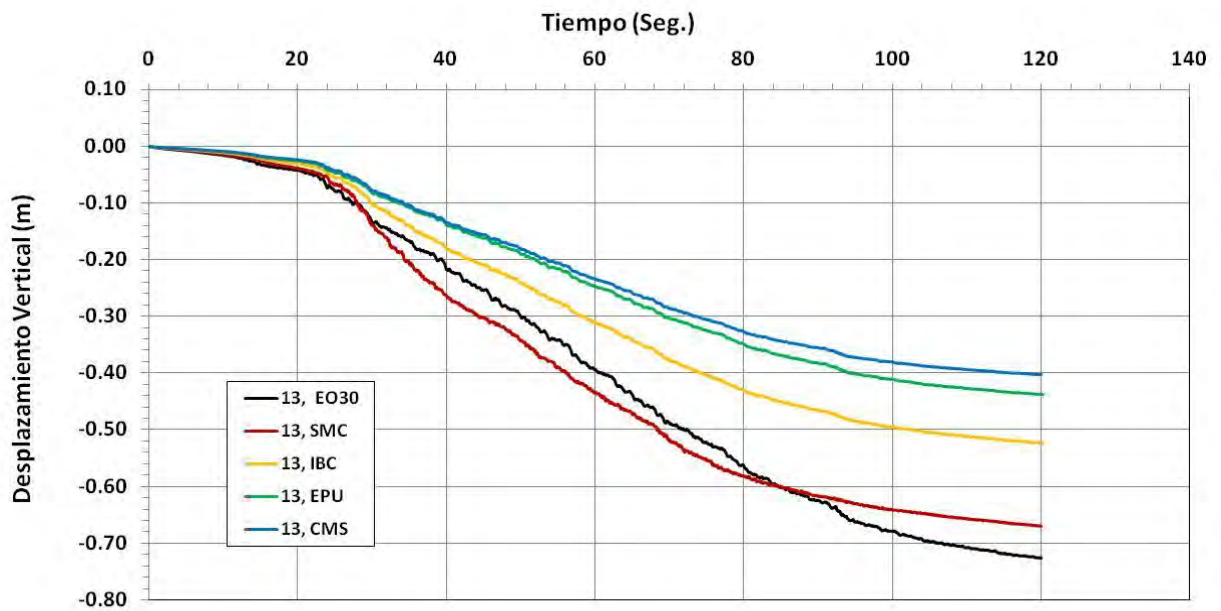


Figura 4.31 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Chile ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

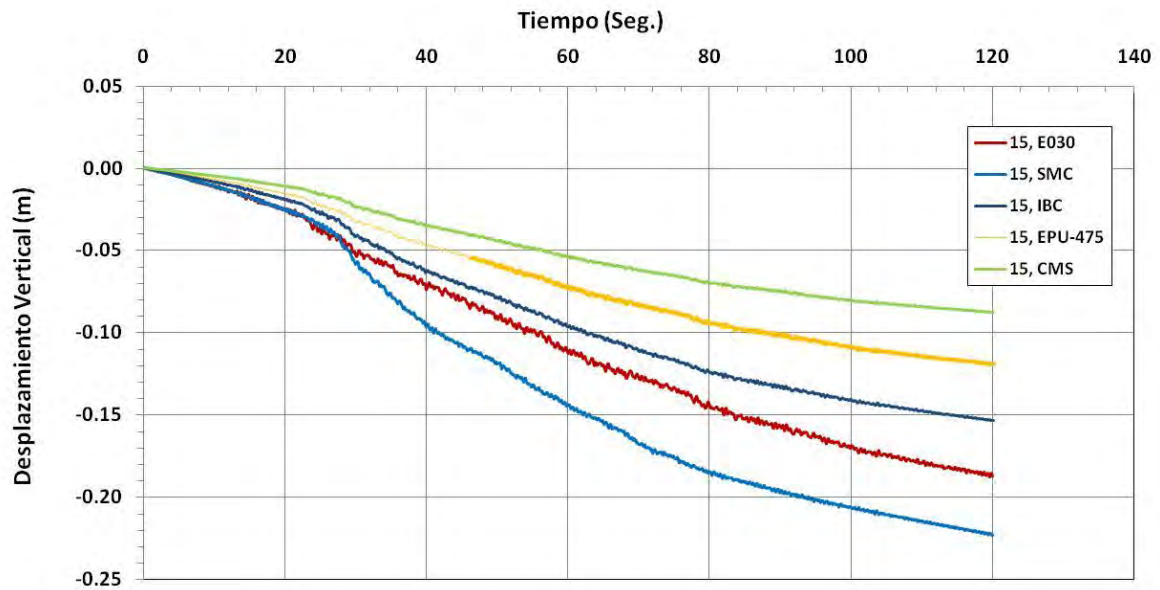


Figura 4.32 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Chile.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

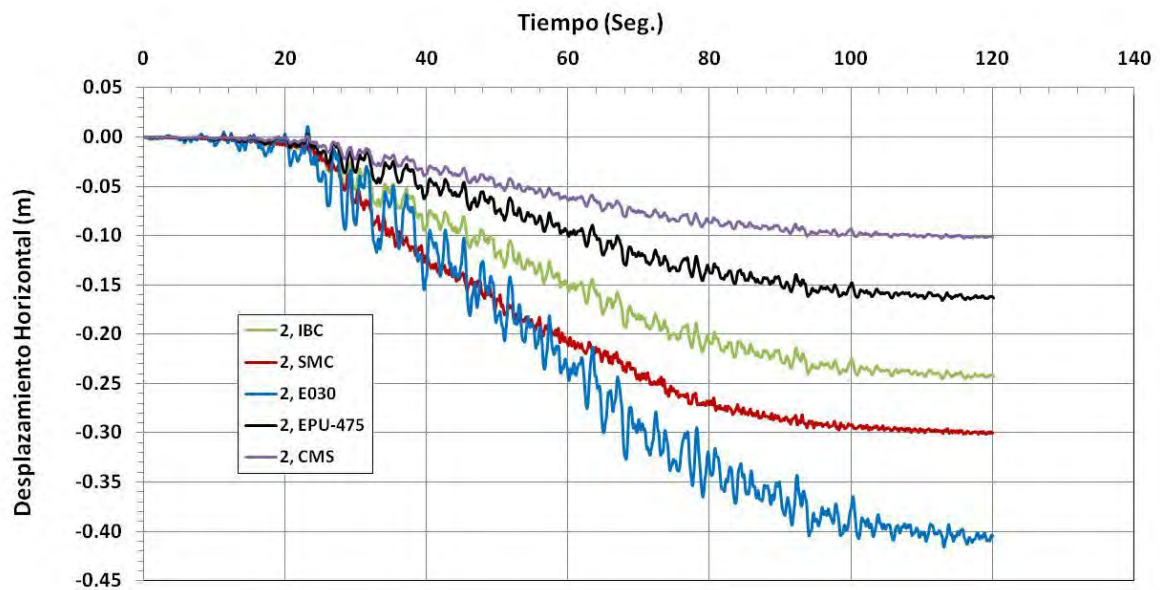


Figura 4.33 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Chile.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

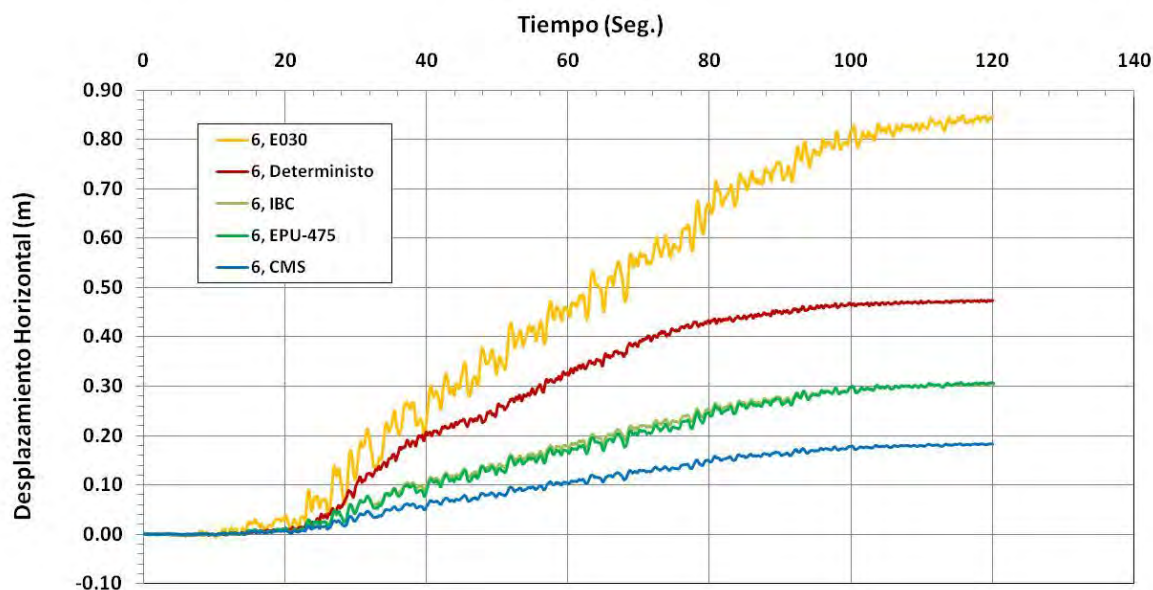


Figura 4.34 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Chile.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

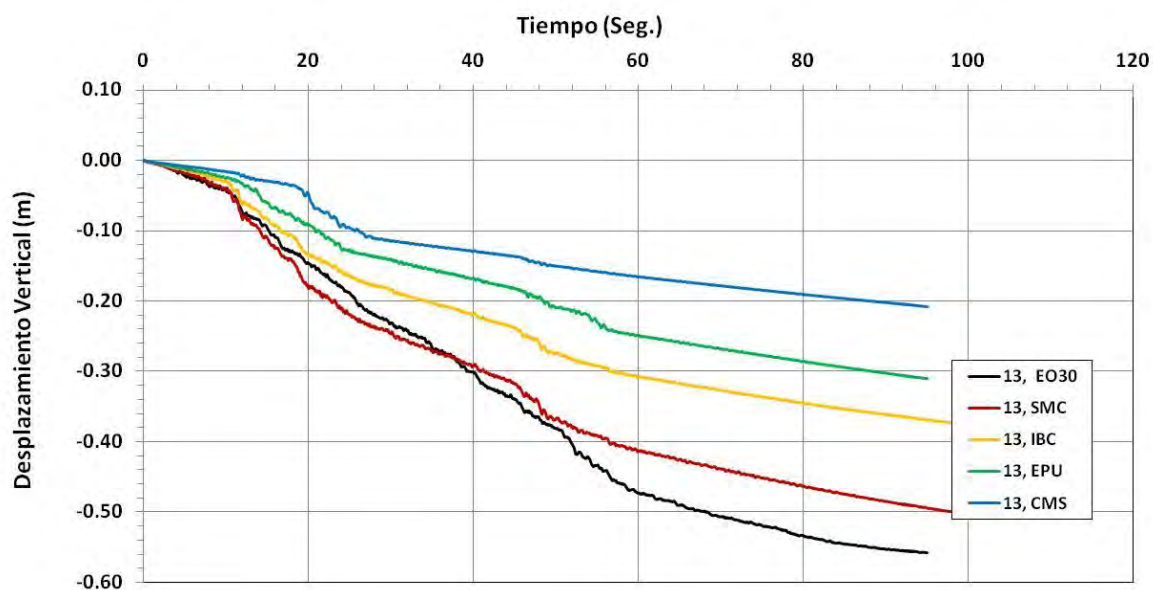


Figura 4.35 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

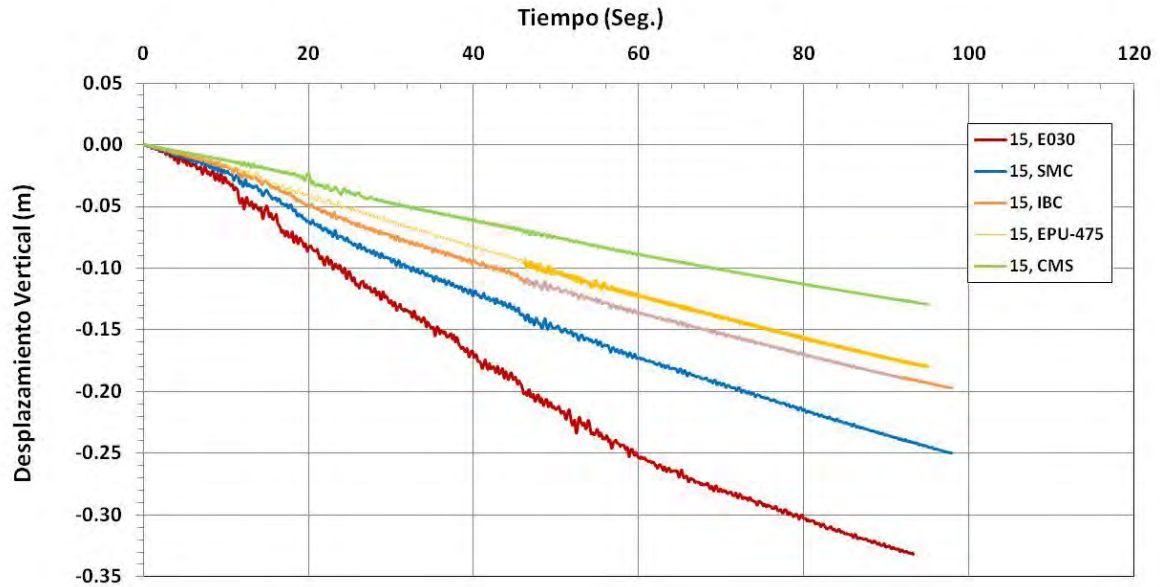


Figura 4.36 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

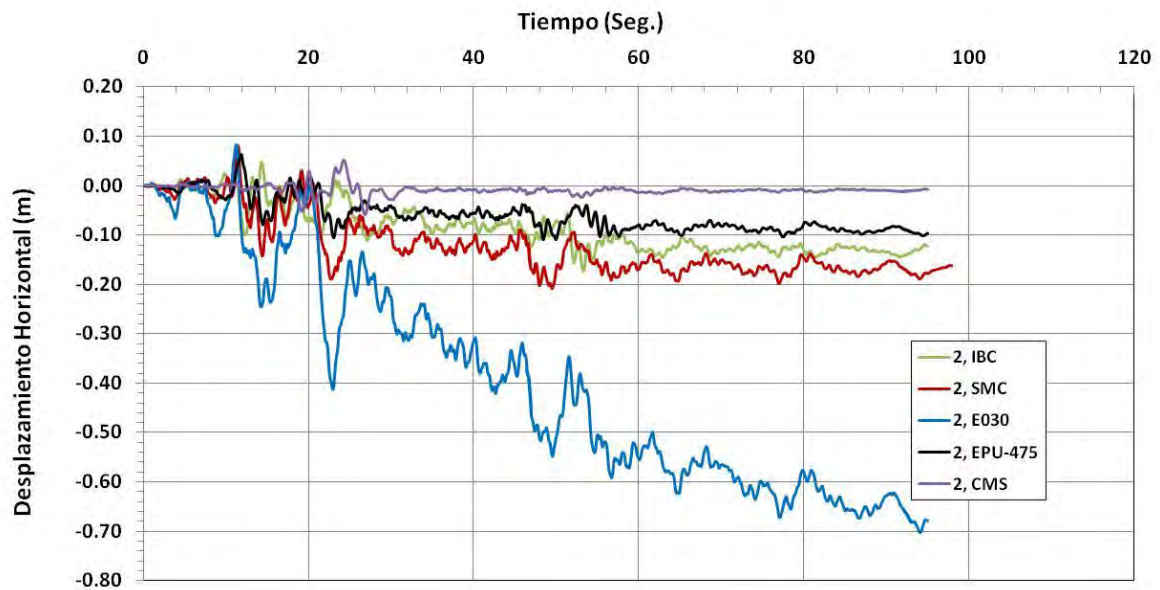


Figura 4.37 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

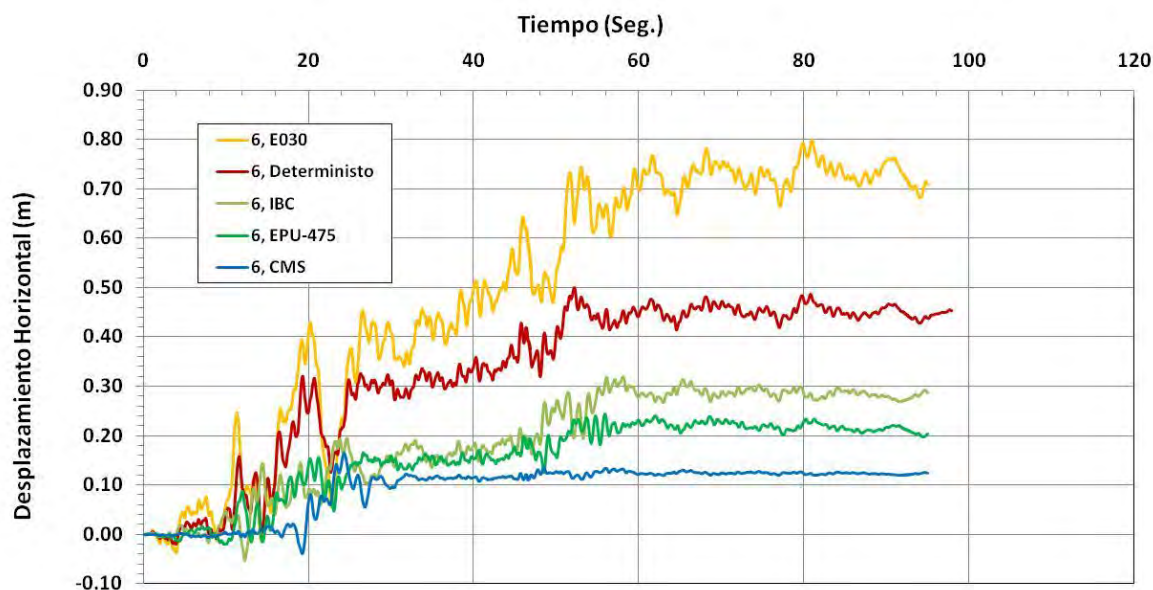


Figura 4.38 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Lima.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

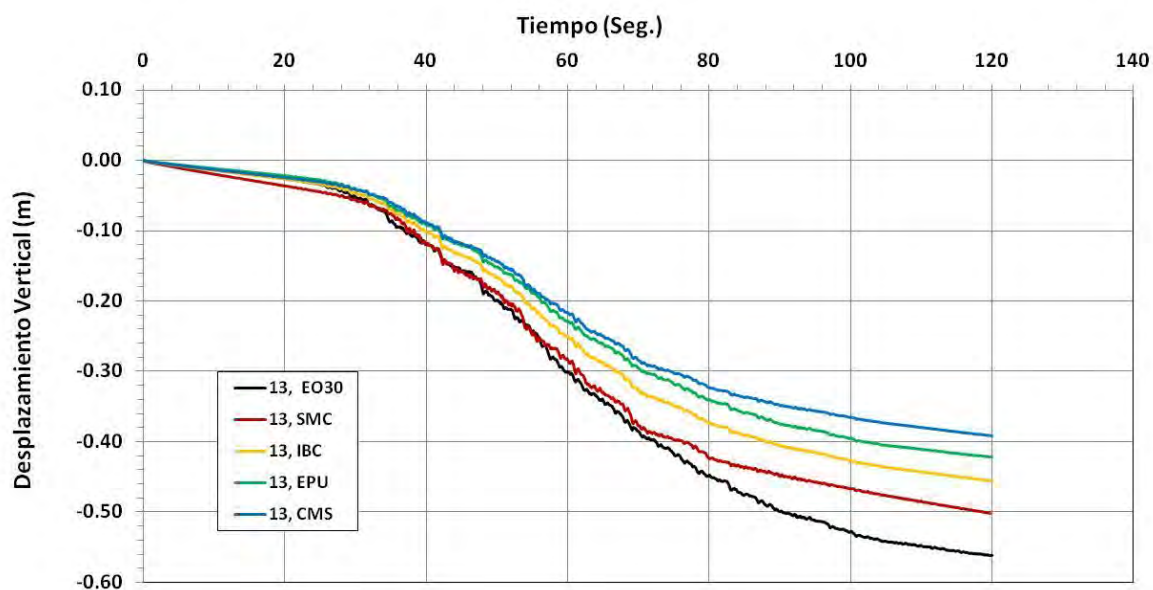


Figura 4.39 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

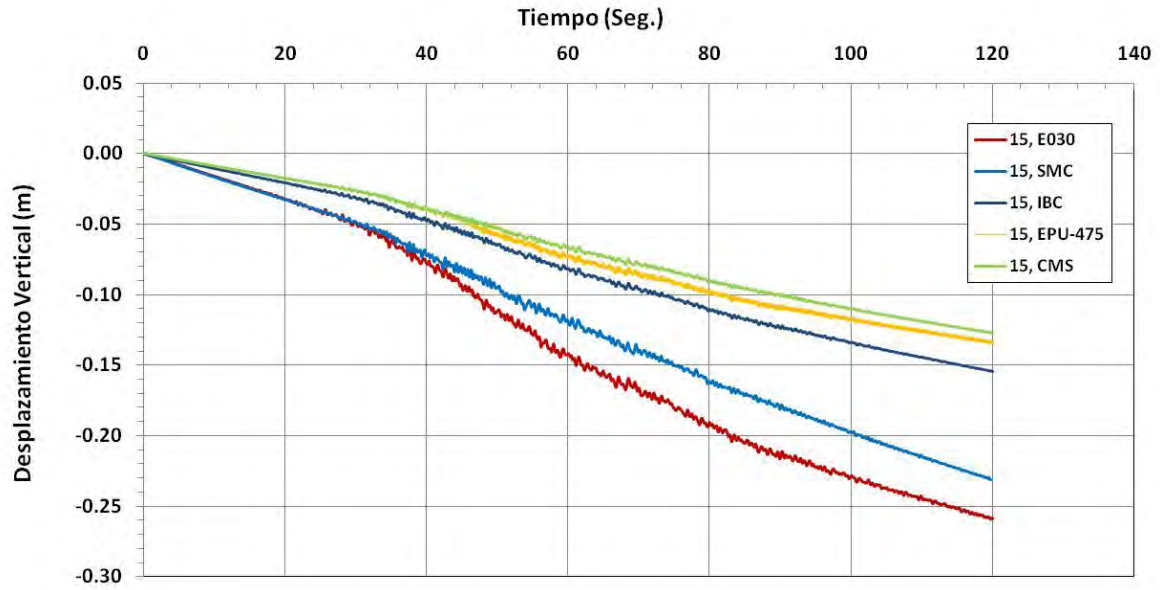


Figura 4.40 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia..

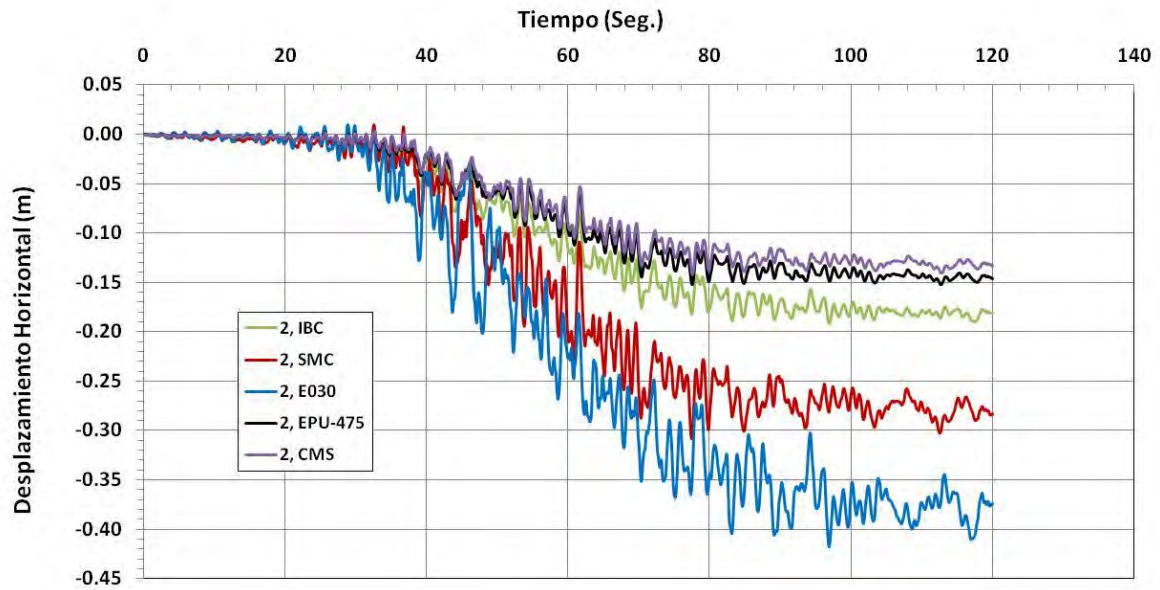


Figura 4.41 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

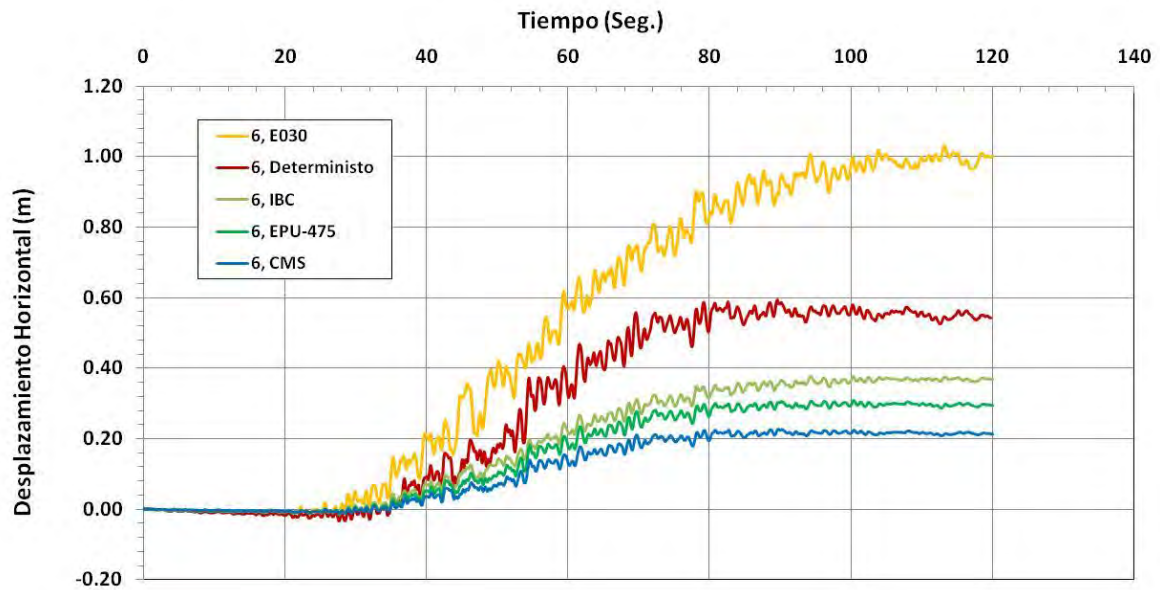


Figura 4.42 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Moquegua.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

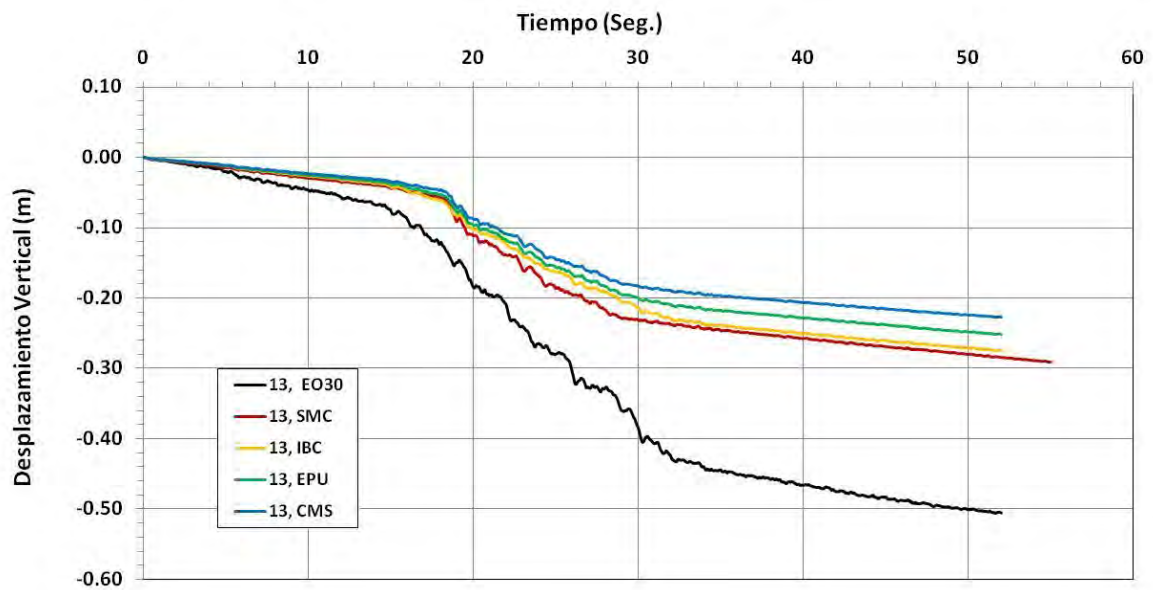


Figura 4.43 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 13. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

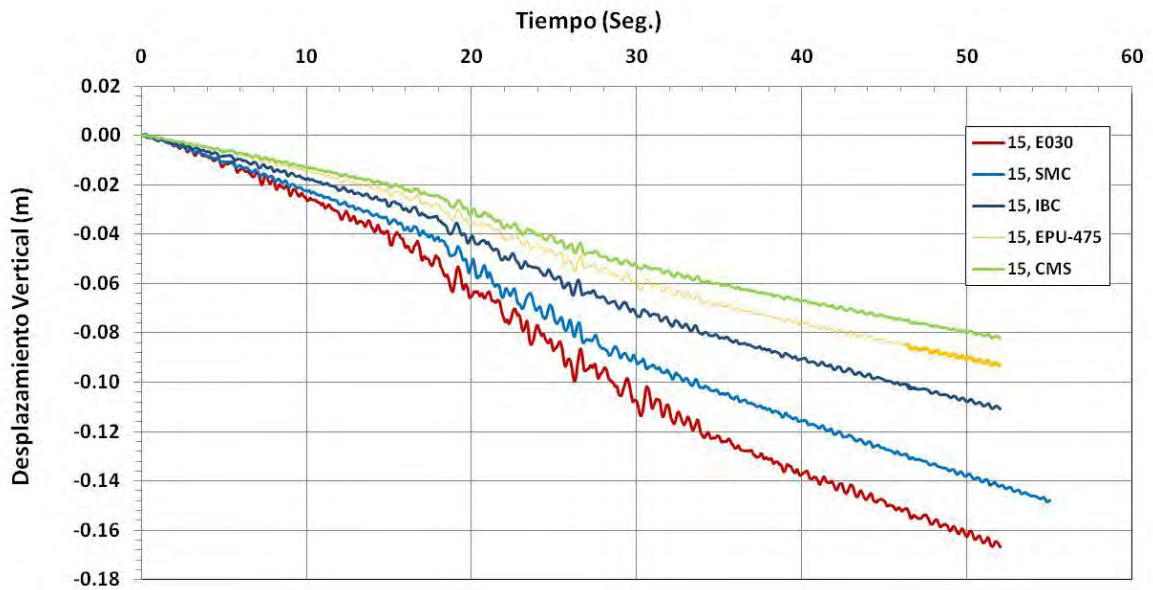


Figura 4.44 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales para el punto de control 15. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

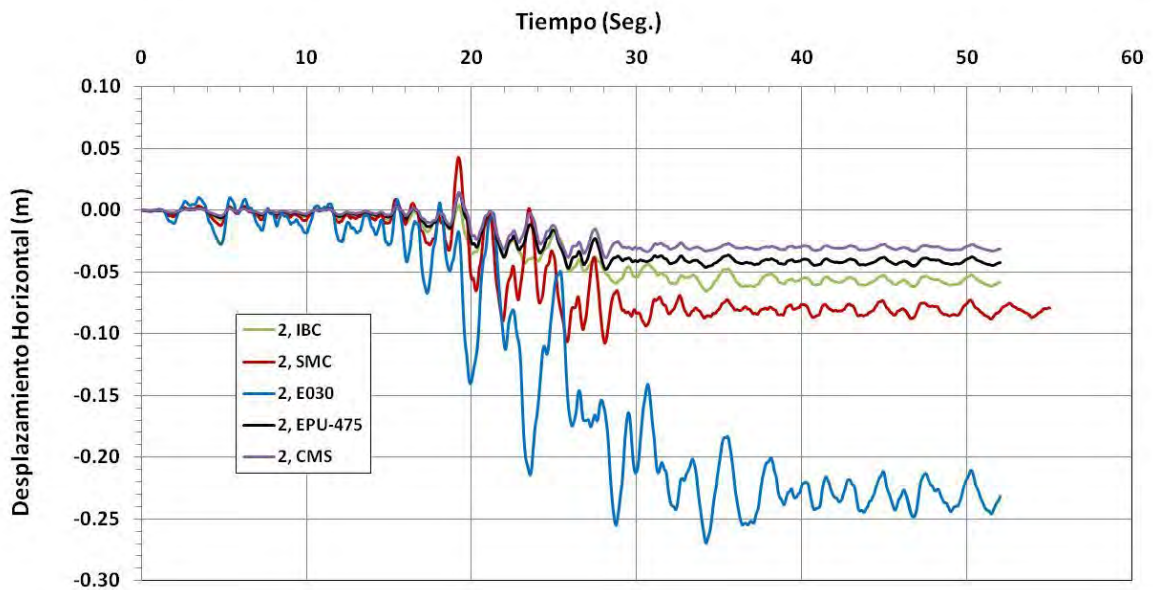


Figura 4.45 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 2. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

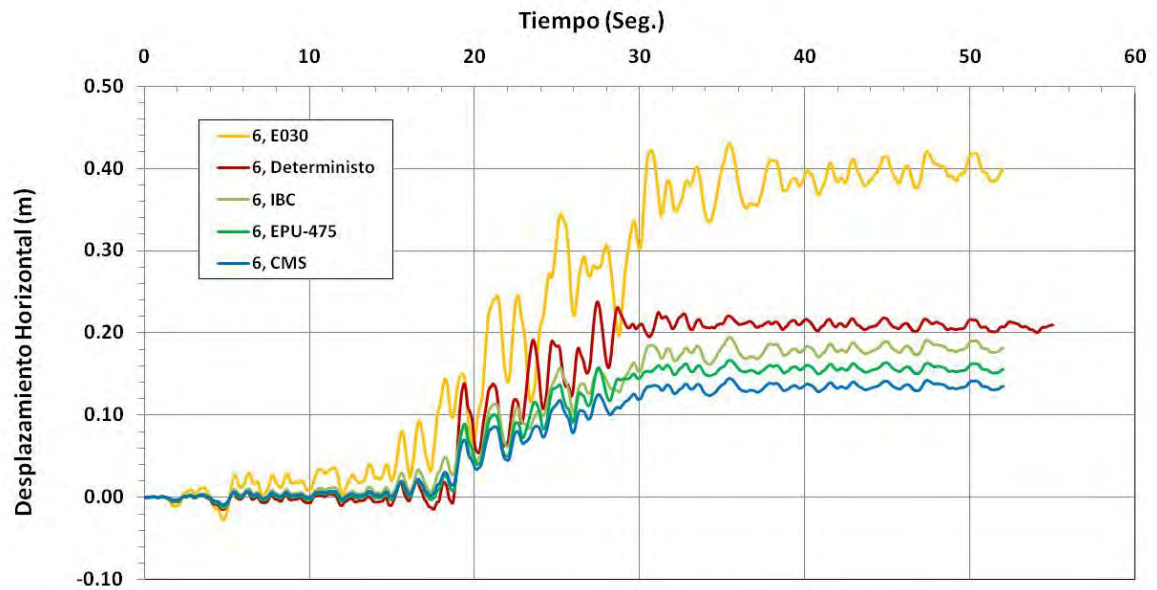


Figura 4.46 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales para el punto de control 6. Sismo de Tarapaca.ajustado a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

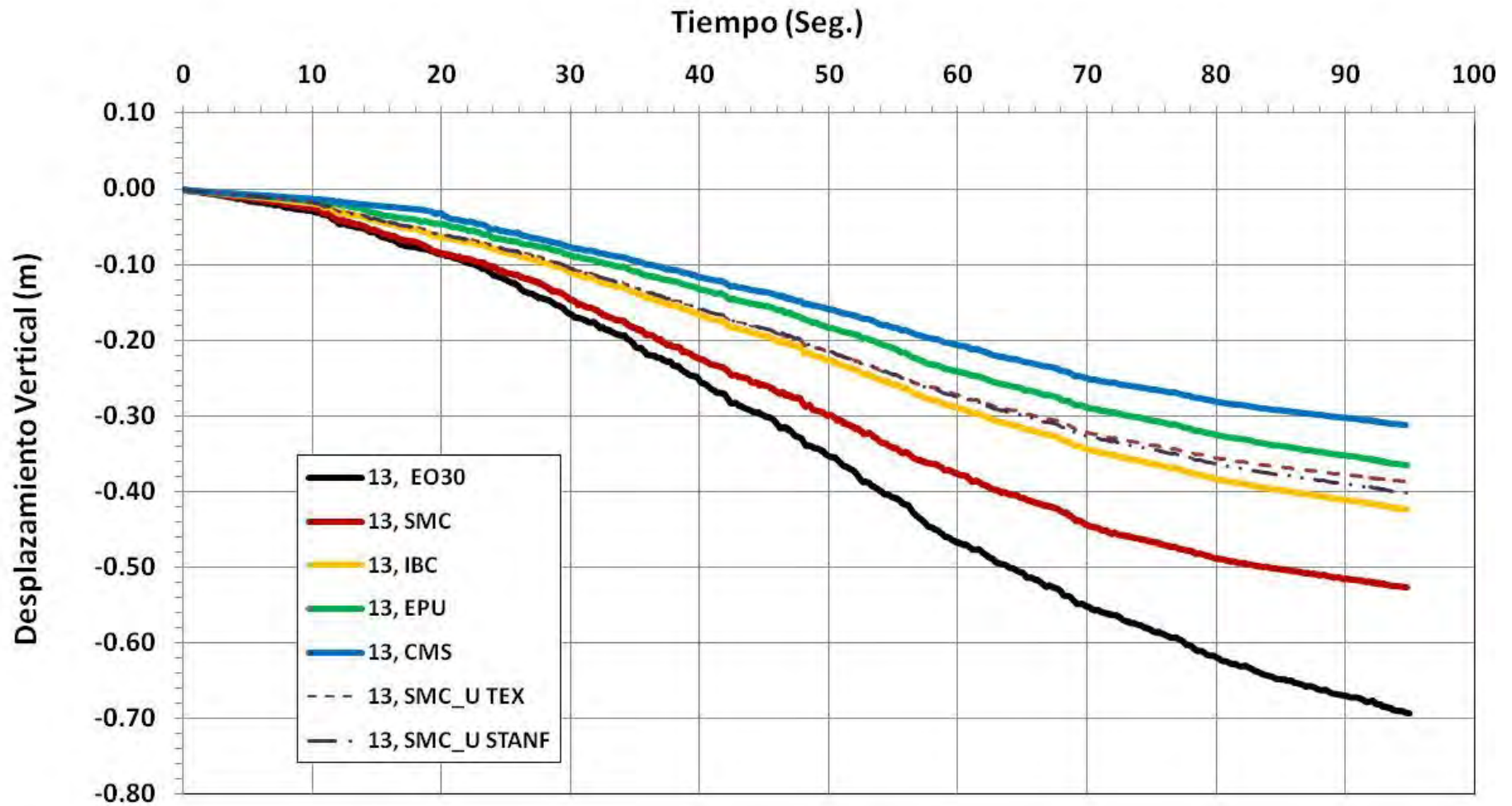


Figura 4.47 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales ponderados para el punto de control 13, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

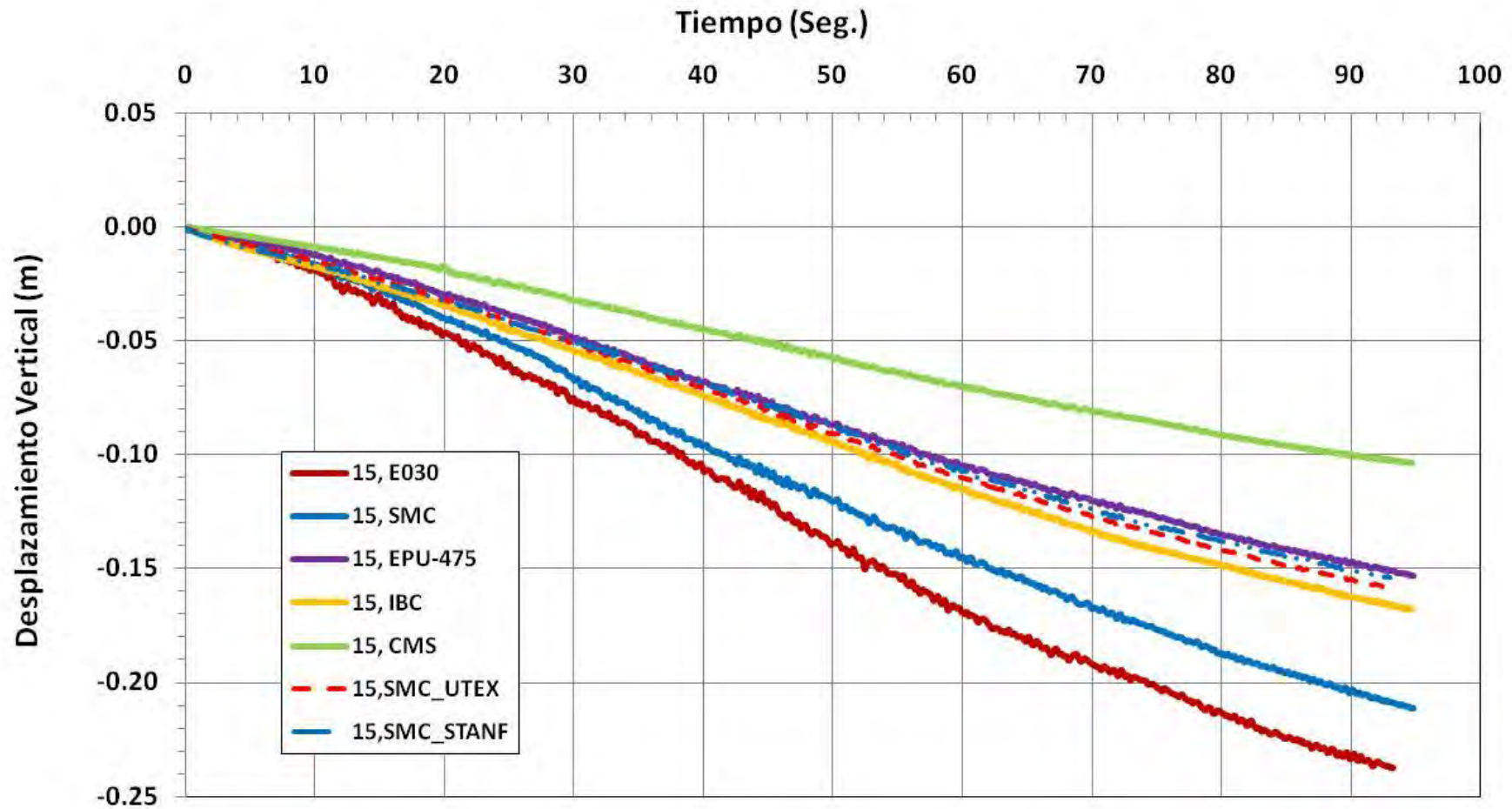


Figura 4.48 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos verticales ponderados para el punto de control 15, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

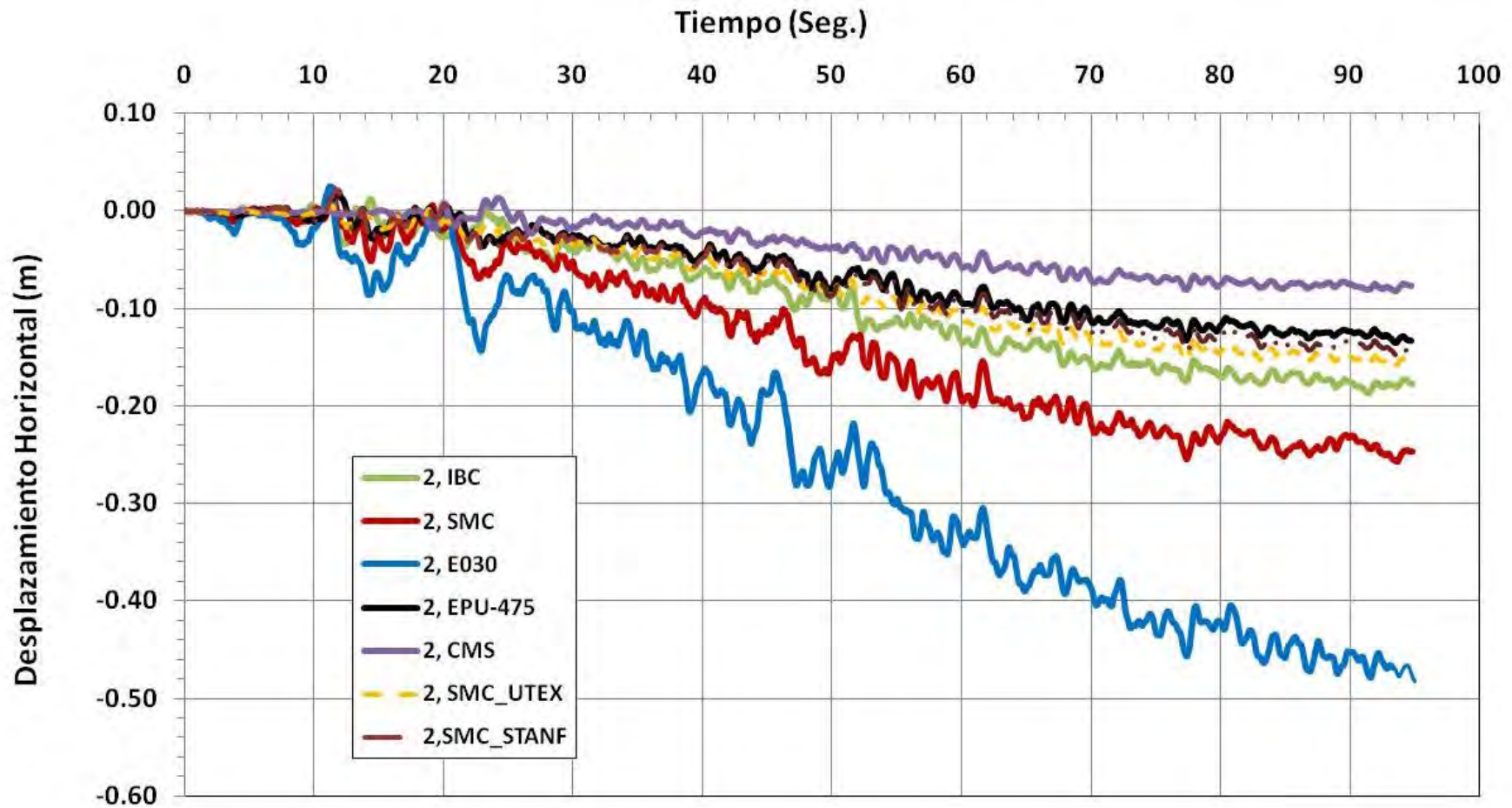


Figura 4.49 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales ponderados para el punto de control 2, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

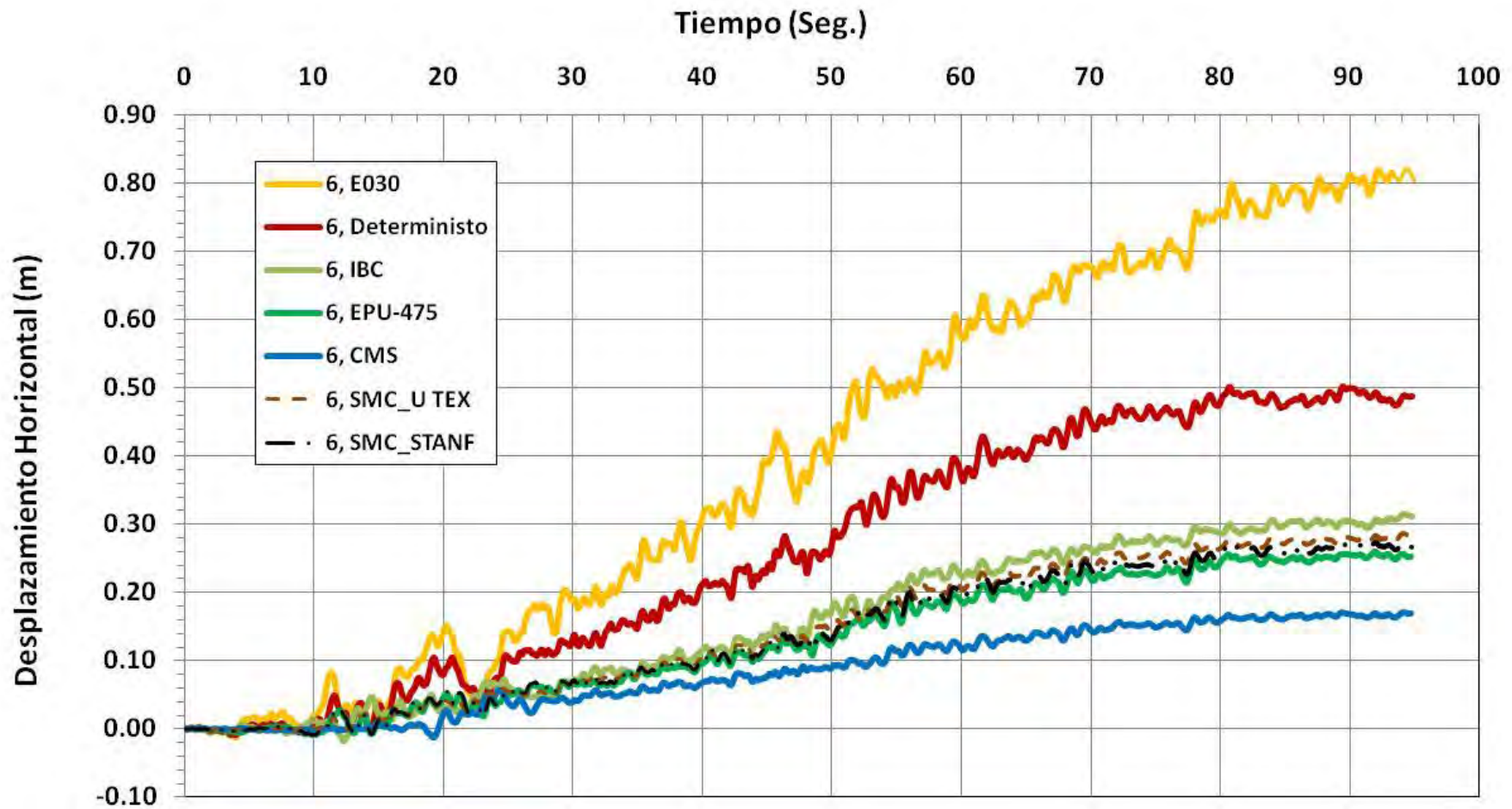


Figura 4.50 Comparación entre los tiempos historia de desplazamientos horizontales ponderados para el punto de control 6, evaluados en base a los espectros especificados para la presa Yuracmayo. Fuente propia.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En la presente Tesis se desarrolló una metodología para la evaluación de la respuesta sísmica de presas de tierra en términos de la variabilidad de los espectros de diseño usados comúnmente en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica en el Perú y a nivel internacional. La metodología considera, un esquema secuencial, por etapas y ha sido aplicada a la presa Yuracmayo.
- La metodología implementada en esta Tesis consta de tres (3) etapas:
 - ❖ En la primera etapa se evalúa la demanda sísmica en el sitio de emplazamiento de la presa, mediante un estudio de peligro sísmico considerando metodologías probabilísticas y determinísticas, y cuantificando la demanda mediante la determinación de los espectros de diseño para el sitio de la estructura.
 - ❖ En la segunda etapa se considera la generación de movimientos sísmicos de diseño compatibles a los espectros de diseño cuantificados en la primera etapa.
 - ❖ En la tercera etapa se evalúa la respuesta sísmica de la presa mediante procedimientos tiempo-historia (técnicas de diferencias finitas y modelos constitutivos avanzados), considerando para esto los movimientos de diseño generados en la etapa 2. Finalmente se procede a evaluar la respuesta sísmica de la presa en términos de la variabilidad de los espectros de diseño. Evaluando además su comportamiento sísmico. Se consideran como parámetros de evaluación los desplazamientos permanentes y la generación de mecanismos de falla.
- Como parte de la aplicación de la primera etapa de la metodología implementada en esta Tesis al caso de estudio (presa Yuracmayo) se cuantificó la demanda sísmica en el sitio de la presa considerando metodologías probabilísticas y determinísticas. Para la cuantificación de la demanda sísmica, en esta Tesis, se consideraron los siguientes espectros de diseño, usados comúnmente en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica en el Perú y a nivel internacional :
 - ❖ Espectro de la norma técnica peruana E-030.
 - ❖ Espectro determinístico asociado al sismo máximo creíble(SMC)
 - ❖ Espectro del código internacional IBC.
 - ❖ Espectro de peligro uniforme con periodo de retorno de 475 años.
 - ❖ Espectro medio condicionado al periodo fundamental de la presa Yuracmayo.
- En base al estudio de peligro sísmico desarrollado como parte de la aplicación de la primera etapa de la metodología planteada al caso de estudio se concluye que la presa Yuracmayo se encuentra emplazada en una región de los Andes Peruanos cuya sismicidad se encuentra principalmente controlada por las fuentes sismogénicas asociadas el proceso de subducción de placas tectónicas (interacción de la placa de Nazca y la placa Sudamerica), así como por su posición relativa respecto de la fosa Perú-Chile. Dicha fosa oceánica es el lugar donde la placa de Nazca converge y subduce con dirección este por debajo de la placa Sudamericana, a una tasa relativa de desplazamiento promedio de aproximadamente 60-75 mm/año. La historia sísmica asociada a la tectónica de contacto interplaca (o interfaz) revela la ocurrencia de grandes sismos con magnitudes de entre Mw 8,0 y Mw 9,0 ±0,5 en la zona Central del

Perú. Además, la fuente sismogénica asociada a la intraplaca superior e inferior de Nazca, ha sido el lugar donde se han producido sismos con magnitudes de hasta $M_w 7,8 \pm 0,2$.

- La cuantificación de la demanda sísmica en el sitio de la presa Yuracmayo, involucró el desarrollo de un análisis probabilístico (PSHA, de sus siglas en inglés) y determinístico (DSHA, de sus siglas en inglés) específico de sitio. Con esta finalidad, se ha desarrollado un modelo sismotectónico específico para el sitio de la presa Yuracmayo que se enmarca en un radio de 500 km del sitio de la presa. Este modelo está basado en información sísmica histórica, la geometría de subducción de la placa de Nazca y fallas sísmicas con capacidad sismogénica identificadas. El peligro sísmico en el sitio de la presa Yuracmayo se caracterizó a través de aceleraciones máximas de terreno (PGA), aceleraciones espectrales (S_a) con 5% de amortiguamiento y la definición de espectros de diseño. El modelo sismotectónico contiene tres (3) fuentes sísmicas de subducción, tres (3) fallas sísmicas superficiales con capacidad sismogénicas y dos (2) fuentes de corteza de área (que representan fallas sísmicas superficiales no identificadas en este estudio). Todas las aceleraciones espectrales se calcularon para un afloramiento rocoso, suelo Clase B (IBC, 2009) o S1 (según el Código Sísmico Peruano E-030, 2003). Cada fuente sismogénica ha sido debidamente identificada, caracterizada, posee su propia tasa de desplazamiento y magnitud máxima asociada, con base en la actividad sísmica histórica o en estimaciones geológicas.
- Los sismos que más contribuyen a la aceleración máxima en el sitio de la presa Yuracmayo (PGA) son eventos que ocurren en la zona de subducción de intraplaca superior e inferior de la placa de Nazca con $M_w 7,5$ a $M_w 8,0$ alrededor de 100 a 150 km del sitio de la presa. Las aceleraciones espectrales correspondientes a periodos de vibración largos (1,0 segundos) están además controladas por grandes eventos de interface con magnitudes entre $M_w 8,5$ y $M_w 9,5$ y a distancias del sitio de la presa mayores a 150 km, en la región de interface de la placa de Nazca.
- Concluimos en base al estudio de peligro sísmico desarrollado para el caso de estudio (presa Yuracmayo) que la contribución al peligro sísmico por fallas sísmicas con capacidad sismogénica es mucho menor en comparación con la contribución brindada por las fuentes de subducción. Por lo tanto, los niveles de movimientos sísmicos o sacudimientos en el sitio de la presa Yuracmayo producidos por fallas sísmicas con capacidad sismogénica identificadas y no identificadas son pequeños, con aceleraciones menores a 0.05g (para los niveles de recurrencia sísmica analizados).
- Para la aplicación de la segunda etapa de la metodología planteada, como parte de esta Tesis se ha implementado la aplicación de herramientas de computo diseñadas originalmente para bases de datos de sismos de Estados Unidos (típicamente sismos de corteza), para ser aplicados a sismos típicos del Perú y Sudamérica (típicamente sismos con mecanismo de subducción). La implementación consideró las herramientas de computo “Sigma Spectra” (Universidad de Austin Texas- Kottke y Rathje, 2009) y “Ground Motion Selection”(Universidad de Stanford - Jarayam, Lin y Baker, 2011).
- En la segunda etapa de aplicación de la metodología implementada en esta Tesis al caso de estudio (presa Yuracmayo) se realizó la generación de registros sísmicos compatibles a los espectros de diseño definidos para el sitio de la presa Yuracmayo.

Con esta finalidad se consideraron los procedimientos que forman parte del estado del arte en el ámbito de la ingeniería geotécnica sísmica, tomando en cuenta aquellos que trabajan con la modificación de sismos de forma individual (procedimiento de mayor uso en la práctica) y aquellos que incluyen la selección y combinación de sets de eventos sísmicos. Los procedimientos considerados fueron:

- ❖ Procedimiento de ajuste espectral mediante fragmentos de onda en el dominio del tiempo (Attik y Abrahamson, 2009).
 - ❖ Procedimiento Semi - Automatizado para la Selección de Sismos de Diseño - Universidad de Texas Austin (Kottke y Rathje 2009).
 - ❖ Procedimiento automatizado para la selección de sismos de diseño - Universidad de Stanford (Jarayam, Lin y Baker, 2011).
-
- Como parte de la aplicación de la segunda etapa de la metodología implementada en esta Tesis se creó una base de datos conformada por sismos de subducción de Perú y Chile. Esta base de datos podrá ser usada para la rápida selección de registros instrumentales con mecanismos tipo subducción con fines de generación de registros sísmicos de diseño en el Perú, considerando procedimientos que incluyen la selección y combinación de sets de eventos sísmicos como los planteados por Kottke y Rathje (2009) y Jarayam, Lin y Baker (2011). En este sentido esta Tesis pretende aportar con la implementación de estas metodologías en el estado de la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica en el Perú con fines de generación de sismos de diseño. En esta Tesis esta base de datos se usó para la generación de registros sísmicos compatibles a la demanda sísmica existente en el sitio de la presa Yuracmayo

 - En términos de la aplicación de la tercera etapa de la metodología implementada en esta Tesis al caso de estudio (presa Yuracmayo), los análisis sísmicos desarrollados considerando los distintos espectros y movimientos sísmicos de diseño muestran desplazamientos permanentes horizontales en los taludes aguas arriba y aguas abajo menores a 1.0 m y desplazamientos permanentes verticales menores a 0.75 m, menores al borde libre de la presa (3.0m). Así mismo en base al modelo numérico FLAC desarrollado, al cual se aplicaron las cargas sísmicas expresadas por los sismos de diseño, no se observan desplazamientos permanentes que generen mecanismos de falla que puedan comprometer la estabilidad de la presa Yuracmayo. En base a los resultados obtenidos de los análisis sísmicos para la presa Yuracmayo, citados líneas arriba, y las recomendaciones dadas por Hynes y Gryfin (1984), ICOLD (1989) y el CDA (2007), se concluye que el comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo es adecuado para todos los espectros y registros sísmicos considerados en esta Tesis.

 - Los resultados de los análisis sísmicos muestran que el espectro que causa la mayor sollicitación sísmica en términos del comportamiento estructural del sistema presa (taludes aguas arriba y aguas abajo), fundación de la presa Yuracmayo, es el espectro de la norma peruana E030, (con desplazamientos horizontales del orden de 0.90 m y verticales en el orden de 0.75 m) este resultado está asociado al concepto mediante el cual se divide al Perú en tres (3) zonas macrosísmicas. Teniendo en cuenta que la presa Yuracmayo se encuentra en la zona de mayor demanda sísmica (zona 3), el uso de este espectro, (definido estrictamente para evaluar la respuesta sísmica de estructuras convencionales), en una presa de tierra genera un conservadurismo en cuanto a la respuesta de la presa, cuando es comparado con otros espectros. En relación a los espectros restantes considerados en esta Tesis, el espectro determinístico (percentil 84) muestra las mayores sollicitaciones sísmicas (con desplazamientos

horizontales del orden de 0.50 cm y verticales del orden de 0.55 cm). El uso de este espectro podría justificarse si se desea evaluar la respuesta de la presa ante el sismo máximo que puede ser generado bajo un contexto sismotectónico dado, lo cual es consistente con las recomendaciones del ICOLD (1989).

- Las respuestas estructurales de la presa Yuracmayo al ser sometida a las solicitaciones sísmicas impuestas por los espectros del código IBC y el espectro de peligro uniforme con 475 años de periodo retorno se muestran comparables (con desplazamientos permanentes horizontales del orden de 0.30 m y verticales del orden de 0.35, para ambas solicitaciones sísmicas). Además la respuesta estructural obtenida en la presa al considerar el espectro medio determinístico (percentil 50) es también comparable (es decir con desplazamientos permanentes horizontales del orden de 0.30 m y verticales del orden de 0.35) a las respuestas considerando los espectros del código IBC y el espectro de peligro uniforme con 475 años de periodo de retorno, estos resultados son válidos para las metodologías de ajuste de las Universidades de Texas y Stanford.
- La solicitación sísmica asociada al espectro medio condicionado en términos de respuestas estructurales en la presa Yuracmayo (con desplazamientos permanentes horizontales del orden de 0.20 m y verticales del orden de 0.25) es menor que la solicitación sísmica impuesta por el espectro de peligro uniforme (con desplazamientos permanentes horizontales del orden de 0.30 m y verticales del orden de 0.35), esto refleja el hecho de que el espectro de peligro uniforme es una envolvente de los espectros de respuesta de combinaciones de eventos sísmicos, mientras el espectro medio condicionado es elaborado para el periodo fundamental de la estructura y representa la demanda de un evento sísmico asociado a una combinación específica de magnitud y distancia en dicho periodo.
- Como resultado de la aplicación de la metodología establecida en esta Tesis al caso de estudio (presa Yuracmayo), teniendo en cuenta los espectros de diseño considerados en esta Tesis, y considerando válida la extrapolación de resultados, se estima recomendable el uso del espectro de peligro uniforme con 475 años de periodo de retorno para evaluar el comportamiento sísmico bajo condiciones de operación de presas de tierra con configuraciones similares a la presa Yuracmayo, es decir presas con núcleos zonificados y con espaldones rígidos, situadas en la zona sísmica 3 (de acuerdo a la norma peruana E030) hacia el norte de los 15° de Latitud Sur (donde el mecanismo de subducción en el Perú se modifica), sin presencia de materiales con capacidad de generar excesos de presiones de poros. Este espectro, muestra respuestas estructurales comparables a las del espectro del código IBC y a las del espectro determinístico medio (percentil 50) por lo que consideramos el periodo de retorno de 475 años adecuado, además el espectro de peligro uniforme está conformado como una envolvente de la respuesta de combinaciones de distintos eventos sísmicos, por lo que adquiere inherentemente un grado de conservadurismo, lo cual se considera adecuado en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica. Así mismo se recomienda el uso del espectro determinístico considerando la media más una desviación estándar (percentil 84) cuando se necesite evaluar la respuesta sísmica ante el sismo máximo que puede ser generado bajo un contexto sismotectónico dado.

- Se recomienda como parte de un futuro estudio la implementación de herramientas informáticas en la web, utilizando la base de datos de sismos de subducción creada en esta Tesis, para la selección de registros instrumentales con fines de generación de sismos de diseño en el Perú. Se recomienda que esta herramienta incluya opciones de ingreso de espectros de diseño así como los acelerogramas de la base de datos de este estudio y opciones de comparaciones espectrales en términos de espectros candidatos y espectros objetivos, de esta forma esta información será de acceso público permitiendo de esta manera el desarrollo de la profesión en el ámbito de la ingeniería geotécnica sísmica en el Perú. Se recomienda para esta implementación seguir los lineamientos de la base de datos del proyecto NGA (Chiou, et al., 2008) para sismos de corteza en Estados Unidos (http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database)
- Se recomienda como parte de un futuro estudio la implementación de la metodología planteada en esta Tesis para el escenario en el cual existen materiales geotécnicos con capacidad de generación de excesos de presiones de poros, esta nueva implementación podrá ser aplicable por ejemplo a presas conformadas con arenas de relaves cuyo diseño sismoresistente es un reto, en especial en un país sísmico como el Perú.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abrahamson, N. A. (1992). "Non-stationary spectral matching," *Seismological Research Letters*, 63(1),30.

Abrahamson, N.A. (2006). "Seismic Hazard Assessment: Problems with Current Practice And Future Developments," *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*.

Abrahamson, N. A. y Silva, W. J. (2008). "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations," *Earthquake Spectra*, Vol, 24, No, 1, p, 67-97.

Arango, M. (2010). "An Evaluation of the Applicability of Current Ground-Motion Models to the South and Central American Subduction Zones," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 102, No. 1, pp. 143–168.

ASCE 7-05, (2005). "Minimum Design Loads for Buildings and other Structures", published by the American Society of Civil Engineers.

Attik, L.A. y Abrahamson N. A. (2009). "An Improved Method for Non-Stationary Spectral Matching", MEERI.

Baker, J.W. (2011). "Conditional Mean Spectrum: Tool for ground motion selection," *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 322-331.

Baker, J.W. y Cornell, C.A. (2006). "Spectral Shape, Epsilon and Record Selection," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35 (9) 1077-1095.

Baker, J.W. y Jayaram, N. (2008). "Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models," *Earthquake Spectra*, 24 (1), 299-317.

Beresnev, I. A. y Wen, K.L. (1996). "Nonlinear soil response - a reality?," *Bulletin of the Seismological Society of America* 86, 1964-1978.

Beyer, K. y Bommer, J. J. (2007). "Selection and scaling of real accelerograms for bi-directional loading: A review of current practice and code provisions," *Journal of earthquake Engineering* 11, 13–45.

Bilek, S.L. (2009). "Seismicity along the South American subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity," *Tectonophysics*. TECTO-124532; No of Pages 13.

Bommer, J.J. (2012). "Challenges of Building Logic Trees for Probabilistic Seismic Hazard Analysis," *Earthquake Spectra*, 2012, Vol:28, Pages:1723-1735, ISSN:8755-2930.

Bommer, J.J. y Acevedo, A.B. (2004). "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis," *Journal of Earthquake Engineering*, Vol:8, Pages:43-92, ISSN:1363-2469.

Boore, D.M. y Joyner, W.B. (1982). "The empirical prediction of ground motion,"
Bulletin of the Seismological Society of America, v. 72, p. S43-S60.

Boore, D.M. y Atkinson, G.M. (2008). "Ground-motion prediction equations for the
average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods
between 0,01 s and 10,0 s," Earthquake Spectra, Vol, 24, No,1, p, 99–138.

Byrne, P.M. (2006). "Analysis and design of earth structures to resist seismic soil
liquefaction", Canadian Association of Geotechnical Engineering.

Byrne, P.M. (2010). "UBCHYST Model," University of British Columbia.

Cahill, T. y Isacks, B.L. (1992). "Seismicity and Shape of the Subducted Nazca Plate,"
Journal of Geophysical Research, 97 (B12): 17,503-17,529.

Campbell, K. W. y Bozorgnia, Y. (2008). "NGA Ground Motion Model for the
Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% damped Linear
Elastic Response Spectra for Periods ranging from 0,01 to 10 s," Earthquake Spectra,
Vol, 24, No, 1, p, 139-171.

Carrión, M. (2001). "Análisis de Estructuras Geotécnicas Asistido por Computadora,"
Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima
Perú.

Castillo, J. y Alva, J. (1993). "Peligro Sísmico en el Perú," VII Congreso Nacional de
Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Lima, Perú.

CDA (2007) "Dam Safety Guidelines". Canadian Dam Association.

Chiou, B. S. J., Darragh, R. B., Gregor, N. J., y Silva, W. J. (2008). "NGA project
strongmotion
database," Earthquake Spectra 24, 23–44.

Cornell, C.A. (1968). "Engineering Seismic Risk Analysis," Bulletin of Seismological
Society of America, Vol, 58, N0 5, pp 1583-1606.

Cundall, P.A. (1976). "Explicit finite difference methods in geomechanics. Proceedings
2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Blacksburg,
Virginia 1:132-150.

Dorbath, L., Cisternas, A., y Dorbath, C. (1990). "Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol, 80, No, 3 pp, 551-576.

Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. S., y Mabry P. (1980). "Geotechnical Engineering, Strength, Stress-strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses," Department of Civil Engineering, University of California-Berkeley.

Earthquake Engineering Research Institute, (1989). "Reducing Earthquake Hazards: Lessons Learned from the 1985 Mexico Earthquake". Oakland, CA: EERI.

Engdahl, E. y Villaseñor, A. (2002). "Global seismicity: 1900-1999," *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Volume 81A.

Gamarra, C.A. (2010). "Nuevas Fuentes Sismogénicas Para La Evaluación Del Peligro Sísmico Y Generación De Espectros De Peligro Uniforme En El Perú". Tesis de Grado. UNI.

Gardner, J.K. y Knopoff, L. (1974). "Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, With Aftershock Removal, Poissonian?," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 64, No. 5 pp. 1363-1367.

Gutenberg, B. y Richter, C.F. (1954). "Seismicity of the Earth and Related Phenomena", Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 310 pp.

Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., McCoy, E. y Mendis, R. (2006). "An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets," *J. of Earthquake Eng.*, 10 (Special Issue 1), 67-89.

Haselton, C. B., Baker, J. W., Bozorgnia, Y., Goulet, C. A., Kalkan, E., Luco, N., Shantz, T. J., Shome, N., Stewart, J. P., Tothong, P., Watson-Lamprey, J. A., y Zareian, F. (2009). "Evaluation of ground motion selection and modification methods: Predicting median interstory drift response of buildings," Technical report, Report 2009/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

Herraiz, M. (1997). "Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros," Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres – CISMID – FIC - UNI, Lima Perú.

Hynes-Griffin, M.E., Franklin, A.G., (1984). "Rationalizing the Seismic Coefficient Method". Miscellaneous Paper GL-84-13, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

ICOLD, (1989). "Selecting seismic parameters for large dams," ICOLD Bulletin 72, 73pp.

ICOLD, (2001). "Design Features of Dams to Effectively Resist Seismic Ground Motion".

Bulletin 120, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris

Idriss, I. M. y Seed, H. B. (1974). "Seismic Response by Variable Damping Finite Elements," Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE.

Infantes, M. (1999). "Análisis Sísmico de Estructuras de Tierra," Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima Perú.

INGEMMET (1993). "Estudio Geofísico de Refracción Sísmica, Presa Yuracmayo".

International Seismological Centre (ISC), (2007). "Seismicity parameters for Engineering Applications Help," www.isc.ac.uk/help/engineer/mc.html.

Ishibashi, I. y Zhang. (1993). "Unified Dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay," Soils and Foundations, Vol3.

Itasca, (2011). "Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC)," Version 6, User's Guide. Itasca Consulting Group, Inc.

Jayaram, N. y Baker, J.W. (2008). "Statistical tests of the joint distribution of spectral acceleration values," Bulletin of the Seismological Society of America, 98 (5), 2231-2243.

Jayaram, N., Lin, T., y Baker, J. W. (2011). "A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance." Earthquake Spectra, 27(3), 797-815.

Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., y Ando, C.J. (1983), "Andean Tectonics Related to Geometry of the Subducted Nazca Plate," Geological Society of America Bulletin, v, 94, p, 341-361.

Katsanos, E. I. (2010). "Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, 157–169.

Kottke, A. y Rathje, E. (2007). "Semi-automated selection and scaling of earthquake ground Motions," 4th International Confrence on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper 1248. Thessaloniki, Greece, June (CD-ROM).

Kottke, A. y Rathje, E. (2009). "A Semi-Automated Procedure for Selecting and Scaling Recorded Earthquake Motions for Dynamic Analysis," *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 4. pages 911 932.

Kramer, S. L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall.

Kuhlmeyer, R. L. y Lysmer, J. (1973). "Finite element method accuracy for wave propagation problems," *J. Soil Mech. Foundations Div.*, 99, 421-42.

Langer, C. J. y Spence, W. (1995). "The 1974 Peru Earthquake Series, Bull, of the Seismological Society of America," Vol, 85, No, 3 pp 665-687.

Lilhanand, K. y Tseng, W. S. (1988). "Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra," Ninth World Conf. Earth. Engin.,Tokyo, Japan, Vol 2, 819-824.

Macedo, J.L. (2009). "Análisis Dinámico de la Presa Yuracmayo,". Tesis de Grado. Universidad Nacional de Ingeniería.

Macedo J., Aguilar Z., y Zuta J. (2009). "Calibration de un modelo dinámico para la presa Yuracmayo". Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Libro de conferencias. Perú, Chiclayo.

Macedo J., Aguilar Z., y Zuta J. (2010). "Calibration of A Dynamic Model For Yuracmayo Earth Dam,"14th European Conference On Earthquake Engineering, September. Ohrid, Republic of Macedonia.

Macharé, J., Fenton, C., Machette, M., Lavenu, A., Costa C, y Dart, R. (2003). "Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Peru and its Offshore Region," U,S, Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-451/OFR-03-451-text.htm>.

McGuire, R. (2004). "Seismic Hazard and Risk Analysis," Earthquake Engineering Research Institute, MNO-10.

McVerry, G., Zhao, J., Abrahamson, N., Somerville, P. (2006). "New Zealand Acceleration Response Spectrum Attenuation Relations for Crustal and Subduction Zone Earthquakes," Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol, 39, No, 1.

Mejia, L. H. y Dawson, E. M. (2006), "Earthquake deconvolution for FLAC," In Proc, 4th Internat.FLAC Symp. Num. Mod. In Geotechnics, Madrid, Spain, May 2006, 10 pp.

MEM (1997). "Guías Ambientales Para el Diseño de Depósitos de Relaves," Ministerio de Energía y Minas del Perú.

Monroy, M., Bolaños, A., Muñoz, A., Blondet, M. (2006). "Uniform Hazard Spectra Estimation in Peru," 8th U,S, National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute

Newmark, N.M. y Hall, W.J. (1982). "Earthquake Spectra and Design", EERI Monograph, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 103 p, San Francisco, CA, EUA.

Naeim, F., Alimoradi, A., y Pezeshk, S. (2004). "Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms," Earthquake Spectra 20, 413–426.

NGDC(2012). "National Geophysical Data Center, seismic catalog", 2012.

Parra, D. (1996) "Modelagem Numerica do Comportamento Estatico e Sismico de Barragens de Terra," Departamento de Engenharia Civil, Pontificia Universidad Católica do Rio de Janeiro, Brasil.

Puebla, (2012). "Comunicaciones Personales, UBCHYST model".

Reasenberg, P. (1985). "Second order moment of central California seismicity, 1969-1982," Journal of Geophysical Research 90; 5479-5495.

Reiter, L. (1991), "Earthquake Hazard Analysis, Issues and Insights," Columbia University Press, New York, NY.

Risk Engineering (2011). "User's Manual for EZ-FRISK Version 7,62, Software for Earthquake Ground Motion Estimation".

Sadigh, K., Chang, C., Egan, J., Makdisi, F. y Youngs, R.R. (1997). "Attenuation Relationship for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data," *Seismological Research Letters*, Volume 68, Number 1, January/February.

Schwartz, D. P (1988). "Paleoseismicity and neotectonics of the Cordillera Blanca Fault Zone, northern Peruvian Andes," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012).

Schwartz, D. P. y Coppersmith (1984). "Fault behaviour and characteristic earthquakes: examples from Wasatch and San Andreas faults," *J. Geophys. Res.* 89, 5681–5698.

Scordilis, E. (2006). "Empirical global relations converting M_s and m_b to Moment Magnitude," *J. Seismol.*, 10, 225-236.

Seed, H. B. e Idriss, I. M. (1969). "Influence of Soil Conditions on Ground Motions during Earthquakes," *JSMFD, ASCE*, vol. 95, No SM1, pp 99-137.

Seed, H. B. y Idriss, I. M. (1970). "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses," Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Un., Calif., Berkeley.

Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. y Tokimatsu, K. (1986). "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils," *ASCE Journal of the Geotechnical Eng.*, V. 112(GT11), pp. 1016-1032.

Shantz, T. J. (2006). "Selection and scaling of earthquake records for nonlinear dynamic analysis of first model dominated bridge structures," in *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, CA.

Slemmons, D. (1982). "Magnitude of Active Faults," U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, USA.

Stepp, J. C. (1972). "Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard," *Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application*, 2, p, 897-909.

Stewart, J.P., Bray, J.D., McMahon, D.J., Smith P.M. y Kropp A.L. (2001). "Seismic performance of hillside fills," *J. Geotech. & Geoenv. Engrg., ASCE*, 127 (11), 905-919.

Watson-Lamprey, J. A. y Abrahamson, N. A. (2006). "Selection of ground motion time series and limits on scaling," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26, 477–482.

Wells, D. y Coppersmith, K. (1994). "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement," *Bulletin of the Seismological Society of America* 84, p, 974-1002.

Youngs, R.R. y Coppersmith, K.J.. (1985). "Implications of Fault Slip Rates and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Estimates," *Bull. of the Seismological Society of America*, Vol, 75, No, 4 pp 939-964.

Youngs, R. R., Chiou, S.J., Silva, W.J. y Humphrey, J. R. (1997). "Strong Ground Motion Attenuation Relationship for Subduction Zone Earthquakes," *Seismological Research Letters*, Vol, 68, Number 1.

Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y. y Fukushima, Y. (2006). "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period"; *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96 898–913.

ANEXO I

**CALIBRACIÓN DE UN MODELO DINÁMICO PARA LA PRESA
YURACMAYO (MACEDO et al., 2009; MACEDO et al., 2010).**

CALIBRACIÓN DE UN MODELO DINÁMICO PARA LA PRESA YURACMAYO

Macedo Jorge, Ing. Civil

Universidad Nacional de Ingeniería – Facultad de Ingeniería Civil – CISMID

Zuta José, Msc. Ing. Civil

Universidad Nacional de Ingeniería – Facultad de Ingeniería Civil – CISMID

Aguilar Zenón Dr. Ing. Civil

Universidad Nacional de Ingeniería – Facultad de Ingeniería Civil – CISMID

RESUMEN

En este artículo se presenta la calibración de un modelo dinámico para la presa Yuracmayo, la cual es una presa de tierra de 56 m de altura y 567 m de largo. La presa fue instrumentada con dos acelerómetros, uno de ellos localizado en un túnel de inspección a nivel del basamento rocoso y el segundo ubicado en la corona de la presa. Esta disposición de los acelerómetros permite analizar la propagación de las ondas sísmicas al pasar por el cuerpo de la presa. Durante el periodo de monitoreo algunos eventos de importancia fueron registrados, los cuales fueron usados para calibrar un modelo dinámico de la presa. La calibración fue realizada comparando los espectro de respuesta analíticos obtenidos en la cresta mediante la propagación de los eventos registrados en el acelerómetro de la base, con los espectros de respuesta reales correspondientes a los mismos eventos sísmicos registrados en el acelerómetro de la corona. Para la calibración, fueron propuestos diferentes tipos de modelos, los cuales toman en cuenta las condiciones de contorno y la variación del módulo de corte máximo. Se usaron los dos eventos más representativos registrados durante el periodo de monitoreo y dos modelos constitutivos para representar el comportamiento del suelo, el modelo equivalente lineal y el modelo no lineal en términos de esfuerzos efectivos, ambos incorporados en el software de dominio público Geostudio 2007.

La calibración fue realizada en dos etapas. En la primera, el modelo equivalente lineal fue usado, como resultado uno de los modelos propuestos fue escogido como el más representativo. En la segunda etapa el modelo escogido en la primera etapa fue usado, pero en este caso se consideró el modelo no lineal para el comportamiento de los materiales. Como resultado del análisis, para periodos cortos, los espectros de respuesta obtenidos usando el modelo equivalente lineal mostraron una buena concordancia respecto a los espectros reales de los sismos registrados sin embargo se observaron excesivas amplificaciones para periodos largos. Por otra parte los espectros de respuesta obtenidos mediante el modelo no lineal mostraron concordancia con los espectros de respuesta registrados tanto para periodos cortos y largos. Por lo tanto se concluye que el

comportamiento dinámico de la presa es representado de manera adecuada por el modelo calibrado, en especial si se considera un modelo no lineal para el comportamiento de los materiales.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto Yuracmayo consistió en la construcción de una presa en un sector de estrechamiento del valle del río blanco (afluente del río Rímac), a una altitud de 4300msnm. La presa Yuracmayo es una presa de tierra ubicada en la provincia de Junín aproximadamente en la latitud 11.84S y la longitud 76.15W, cuenta con un talud aguas arriba de 2.5H:1V y un talud aguas abajo de 1.72H:1V, con una altura sobre la fundación de 56.0m. En el año 2003 la empresa EDEGEL S.A. solicitó al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID-FIC-UNI) la instalación de un sistema de monitoreo sísmico en la Presa Yuracmayo. Este sistema consiste en dos estaciones acelerométricas para el registro de movimientos sísmicos, las cuales están ubicadas en la corona y en la base de la estructura. Con el monitoreo de los acelerómetros, el cual es realizado hasta la fecha, se han obtenido algunos registros de sismos de importancia en la zona, con los cuales se puede calibrar un modelo dinámico para la presa.

2. INSTRUMENTACIÓN Y EVENTOS REGISTRADOS

Como ha sido mencionado, se instalaron dos acelerómetros en la presa uno de ellos localizado en un túnel de inspección a nivel del basamento rocoso y el segundo ubicado en la corona de la presa. Los acelerómetros instalados se muestran en la Figura 1.



(a)



(b)

Figura 1. Acelerómetros instalados a) acelerómetro instalado en la corona b) acelerómetro instalado en el túnel

Durante el periodo de monitoreo entre Febrero del 2004 y Noviembre del 2008, se registraron 6 eventos de importancia. En la Tabla 1 se muestran los eventos sísmicos más representativos registrados por los acelerómetros instalados en la presa durante el periodo de monitoreo sísmico.

Tabla 1. Eventos sísmicos registrados durante el monitoreo de la presa Yuracmayo

Fecha	Hora (GMT)	Latitud(S)	Longitud(W)	Prof. (Km)	Magnitud (ML)
2 de Abril del 2004	11:55	12.98	77.13	37	4.5
4 de Abril del 2004	19:52	12.23	76.40	74	4.0
16 de Febrero del 2005	22:12	11.30	76.32	121	5.2
2 de Marzo del 2005	08:48	11.83	76.15	132	5.0
18 de Abril del 2005	19:53	12.61	76.70	57	4.1
29 de Marzo del 2008	07:51	12.25	77.25	51	5.3

3. MATERIALES Y DISCRETIZACIÓN

La sección crítica de la presa Yuracmayo fue elegida para la calibración, la mayor parte del cuerpo de la presa está constituida por material morrenico clasificado como gravas limo arcillosas. La Figura 2 muestra la sección principal de la presa y su cimentación. Los taludes aguas arriba y aguas abajo son 2.5H: 1V y 1.72H: 1V respectivamente, se modeló 75 metros en profundidad de la cimentación, así mismo se consideró una distancia de 250 metros entre los bordes izquierdo y derecho a los pies del talud aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

La relación de la longitud de coronamiento y la altura de la presa es tal que un análisis bidimensional es suficiente para analizar la propagación de las señales sísmicas registradas en el acelerómetro de la base, a lo largo del cuerpo de la. Presa. Por lo tanto la sección de la presa es discretizada en una malla de elementos finitos, considerando un modelo de deformación plana. La Figura 2 muestra la malla preparada basada en los estudios de

kuhlemeyer y Lysmer (Ref. 1), para la adecuada representación de la transmisión de las ondas a lo largo del modelo, de acuerdo a estos investigadores la máxima dimensión considerada para cada elemento debe de ser menor que un décimo de la máxima longitud de onda.

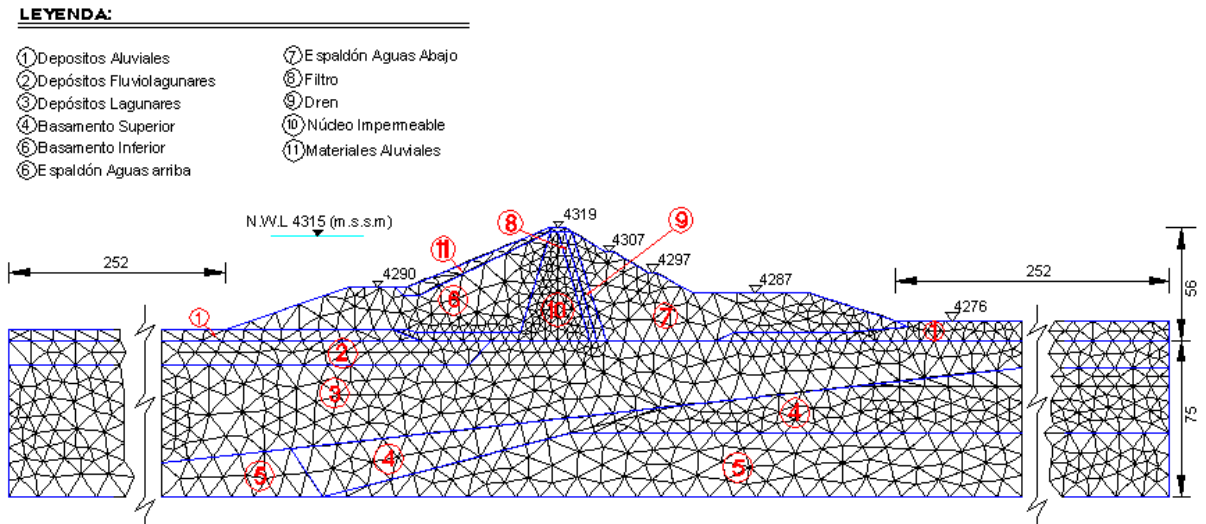


Figura 2. Dimensiones y discretización del modelo de elementos finitos para la presa Yuracmayo.

Las propiedades de los materiales de la cimentación fueron definidos mediante la revisión de los estudios geotécnicos realizados antes de la construcción de la presa, estos estudios comprendieron perforaciones diamantinas, líneas de refracción sísmica complementados con ensayos de mecánica de suelos.

La información disponible indica la presencia de una capa superficial poco potente de depósitos aluviales, depósitos lagunares (los cuales pueden ser clasificados como arcillas de baja comprensibilidad) y depósitos fluviolagunares sobre el basamento rocoso (riolita), De acuerdo a las perforaciones los depósitos lagunares tienen mayor potencia en la zona aguas arriba, comparada con la zona de agua abajo. El cuerpo de la presa es en su mayoría constituido por materiales morrenicos, los cuales conforman los espaldones y un núcleo impermeable Las propiedades físicas de los materiales del cuerpo de la presa y la cimentación son resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades Físicas de los materiales de la presa Yuracmayo

Material.	Clasificación	Densidad (KN/m3)	Cohesion (kN/m2)	Ángulo de fricción(°)	Índice de plásticidad (IP)
1	GW-GC	21.58	0	35.00°	12.10
2	GP-GM	21.58	13.70	35.00°	12.50
3	CL/CL-ML	19.62	20.60	28.00°	13.00
4	Riolita	22.56	114.80	37.87°	---
5	Riolita	23.54	113.80	34.02°	---
6	GC-GM	21.58	0	40.00°	6.10
7	GC-GM	21.48	0	40.00°	6.70
8	SW	20.60	0	36.50°	---
9	GW , GP	20.60	0	36.50°	---
10	GC	21.28	0	40.00°	8.30
11	GW	22.36	0	36.50°	6.80

Para la calibración, fueron propuestos diferentes tipos de modelos, los cuales toman en cuenta las condiciones de contorno y la variación del módulo de corte máximo. Para la variación del módulo de corte las correlaciones recopiladas por Benz (Ref. 2) fueron usadas. Para estas correlaciones la evaluación del módulo de corte máximo es basada en la relación propuesta por Hardin y Black (Ref. 3).

$$G_{\max} = Af_{(e)} OCR^k \left(\frac{p'}{P_{\text{ref}}} \right)^m \quad (1)$$

Donde G_{\max} es el módulo de corte máximo en MPa, p' es el esfuerzo efectivo promedio en KPa, $P_{\text{ref}}=100$ KPa es una presión de referencia igual a la presión atmosférica, OCR es el grado de sobreconsolidación, $f_{(e)}$ es una función del índice de vacíos y A, k y m son parámetros de correlación.

Para las diferentes correlaciones el módulo de corte máximo fue evaluado, calculando valores máximos, mínimos y promedios para cada material. El módulo de corte para la roca se mantuvo constante e igual a los valores reportados por los ensayos geofísicos realizados antes de la construcción de la presa. Adicionalmente para determinar las propiedades dinámicas de la presa, como parte de la investigación se realizaron ensayos geofísicos en la presa. Estos ensayos incluyeron líneas de refracción sísmica y ensayos MASW (multichannel array surface wave analysis). Los resultados obtenidos por el uso de las correlaciones y los ensayos geofísicos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores obtenidos para el módulo de corte máximo (KPa)

Material.	Ensayos Geofísicos	Mínimo	Promedio	Máximo
1	3.26E+05	8.28E+04	1.42E+05	2.02E+05
2	-	1.18E+05	2.10E+05	3.05E+05
3	2.96E+05	1.63E+05	2.34E+05	2.97E+05
4	3.30E+06			
5	2.54E+06			
6	3.56E+05	1.01E+05	1.74E+05	2.43E+05
7	3.54E+05	1.01E+05	1.74E+05	2.43E+05
8	-	1.26E+05	1.88E+05	2.70E+05
9	-	1.26E+05	1.88E+05	2.70E+05
10	4.75E+05	1.26E+05	1.88E+05	2.70E+05
11	2.95E+05	2.45E+04	7.83E+04	7.84E+04

Los modelos propuestos se describen a continuación:

- Modelo 1, el cual considera los módulos de corte máximos obtenidos por los ensayos geofísicos. Respecto a las condiciones de contorno, los bordes laterales no están sujetos a restricciones y el borde inferior se encuentra restringido al movimiento en la dirección vertical y horizontal.
- Modelo 2, el cual considera los módulos de corte máximos obtenidos por los ensayos geofísicos, pero en este caso los bordes son considerados de acuerdo a los estudios de Lysmer-Kuhlemeyer (Ref. 4) para evitar la reflexión irreal de las ondas en los bordes del modelo.

- Modelo 3, considerando los valores más bajos de los módulos de corte obtenido de las diversas correlaciones. Las condiciones de contorno son similares a las del modelo 2.
- Modelo 4, considerando los valores promedio para los módulos de corte obtenido de las diversas correlaciones. Las condiciones de contorno son similares a las del modelo 2.
- Modelo 5, considerando los valores más altos de los módulos de corte obtenido de las diversas correlaciones. Las condiciones de contorno son similares a las del modelo 2.

4. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para efectos de la calibración se usaron los eventos registrados en el acelerometro de la base correspondientes al 16 de Febrero del 2005 y al 26 de Marzo del 2008, estos eventos tienen magnitudes de 5.2 ML y 5.3 ML respectivamente. Los tiempo-historia de estos eventos son mostrados en la Figura 3.

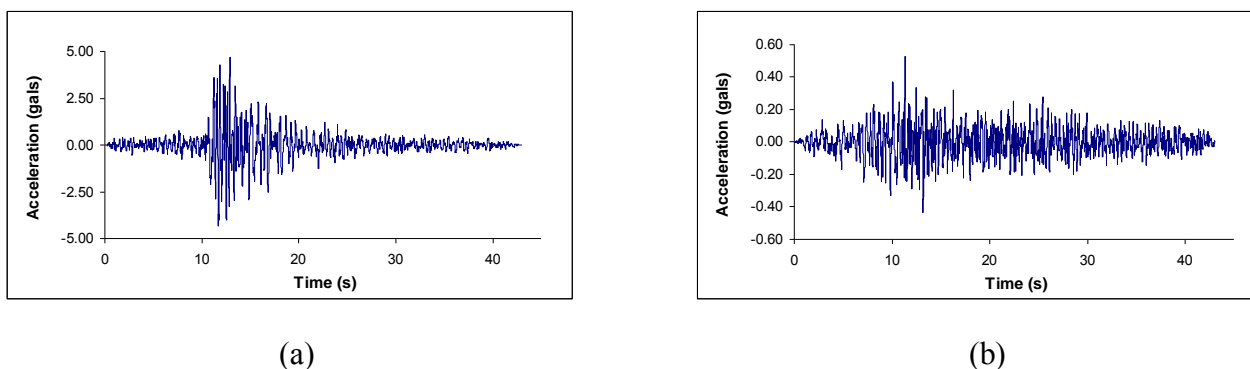


Figura 3. Eventos Sísmicos usados en la calibración a) Tiempo-historia del evento sísmico registrado el 29 de Marzo del 2008 b) Tiempo-historia del evento sísmico registrado el 16 de Febrero del 2005.

Se consideraron dos tipos diferentes de modelos constitutivos para el comportamiento del suelo, el modelo equivalente lineal y el modelo no lineal en términos de esfuerzos efectivos, ambos incorporados dentro del software Geostudio 2007. Estos modelos son descritos a continuación.

4.1. MODELO EQUIVALENTE LINEAL

El modelo equivalente lineal (Ref. 5) toma en cuenta las curvas de degradación del módulo de corte y el amortiguamiento con el incremento de la deformación de corte. El módulo de corte y el amortiguamiento son evaluados a partir de estas curvas a través de un algoritmo iterativo. En cada iteración la deformación cortante efectiva es determinada redefiniendo los valores del módulo de corte y el amortiguamiento. Este proceso se realiza hasta que un límite de convergencia es alcanzado entre las deformaciones cortantes efectivas en dos iteraciones consecutivas.

La degradación del módulo de corte y el incremento del amortiguamiento con el incremento de la deformación cortante efectiva para la roca, el filtro y el dren se basaron en los estudios de Seed e Idriss (Ref. 5) y Seed et al. (Ref. 6). Para los materiales restantes estas curvas fueron evaluadas tomando en cuenta las relaciones propuestas por Ishibashi y Shang (Ref. 7). Las curvas de degradación para los diversos materiales son mostradas en la Figura 4.

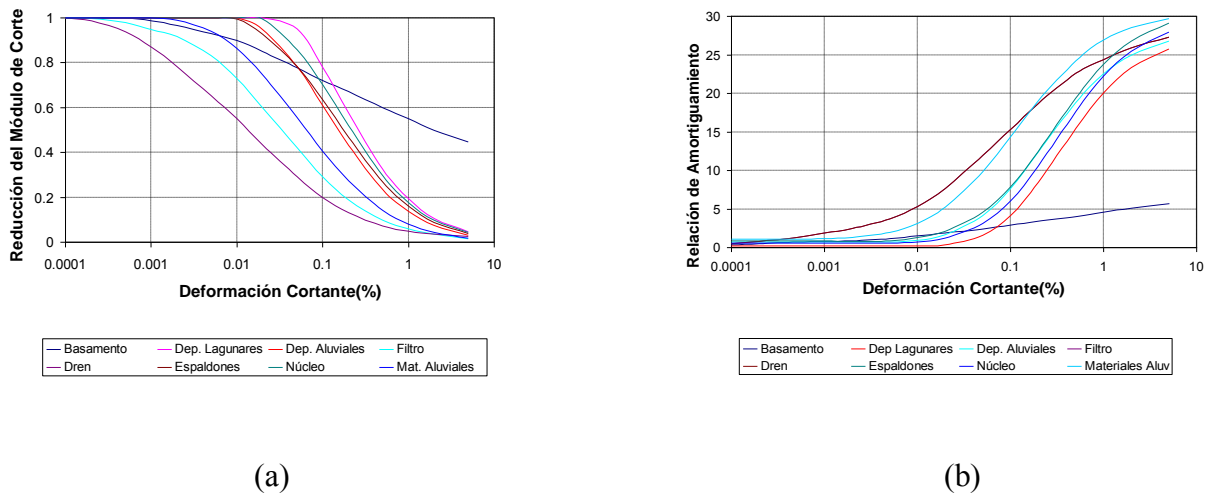


Figura 4 Curvas de degradación para los materiales de la presa Yuracmayo a) Curvas de degradación para el módulo de corte b) Curvas de la relación de amortiguamiento.

4.2. MODELO NO LINEAL EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS EFECTIVOS

Este modelo considera el hecho de que las relaciones esfuerzo-deformación de los suelos, particularmente de los suelos arenosos, puede ser aproximada mediante una curva hiperbólica. La curva puede ser definida por dos parámetros los cuales son la pendiente para deformación de corte nula y la asíntota a la curva para deformaciones cortantes considerables. En términos de las propiedades del suelo la pendiente inicial es el módulo de corte máximo G_{max} y la asíntota es la Resistencia cortante del suelo.

Cuando la curva hiperbólica es dibujada para esfuerzos y deformaciones de corte positivas y negativas, la curva hiperbólica en un modelo no lineal cíclico es conocida como la curva esqueleto. Una componente clave del modelo es que cuando existe una inversión de esfuerzos, la forma de la curva de descarga es similar a la curva esqueleto, con la excepción de que el origen se mueve al punto de inversión de esfuerzos. Adicionalmente la curva cumple con las reglas de Masing (Ref. 8).

El modelo es expresado en términos de esfuerzos efectivos, la naturaleza histerética del amortiguamiento y la dependencia del módulo de corte y el amortiguamiento con la deformación de corte se encuentran inherentemente incorporados dentro del modelo (Ref. 9).

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para empezar el análisis se definieron las condiciones iniciales en cuanto a esfuerzos existentes y distribución de presiones de poros, los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 5. La calibración fue realizada en dos etapas, en la primera el modelo equivalente-lineal fue usado, los resultados obtenidos considerando los modelos propuestos y el sismo del 29 de Marzo del 2008 son mostrados en la Figura 6. Como resultado de estos análisis, el modelo 2 fue elegido como el más representativo. Un análisis equivalente lineal adicional fue realizado considerando el evento sísmico del 16 de Febrero del 2005 fue realizado, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.

Para la siguiente etapa, el modelo escogido en la primera etapa (modelo 2) fue usado, en este caso se consideró un modelo no lineal para representar el comportamiento de los materiales de la presa. El resultado obtenido para el sismo del 29 de Marzo del 2008 es mostrado en la Figura 8a, finalmente la Figura 8b muestra el resultado obtenido considerando el sismo del 16 de Febrero del 2005.

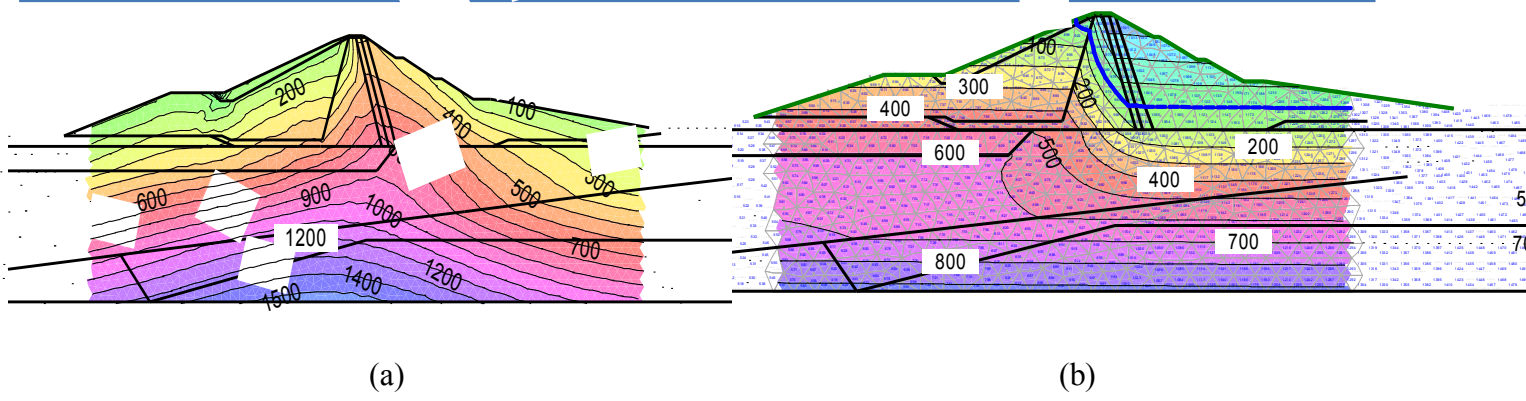
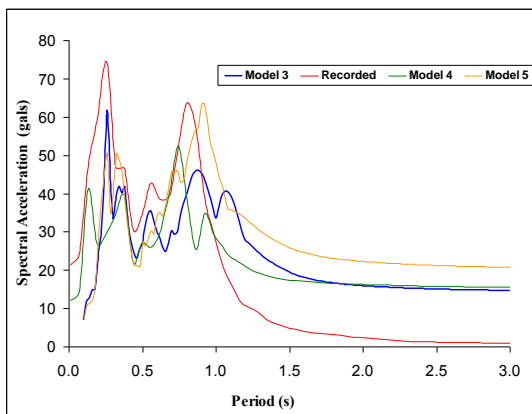
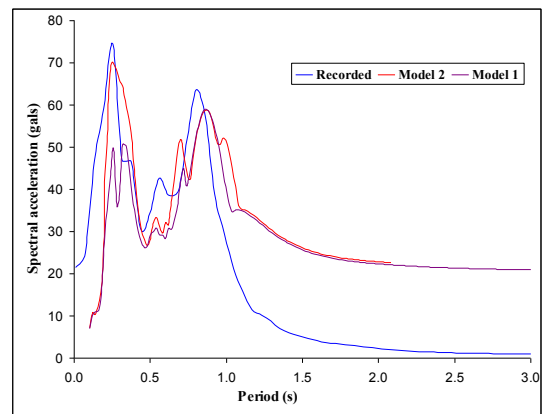


Figura 5. Condiciones iniciales para el análisis. a) Contornos de distribución de los esfuerzos estáticos efectivos iniciales (KPa). b) Distribución inicial de presiones de poros.(KPa).



(a)



(b)

Figura 6. Resultados obtenidos para la primera etapa de la calibración, usando el modelo equivalente lineal (Evento sísmico del 29 de Marzo del 2008),

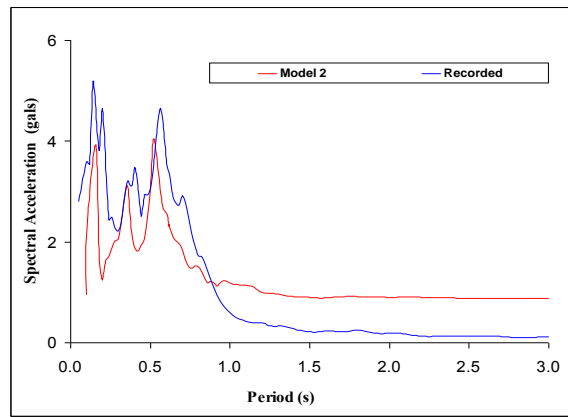
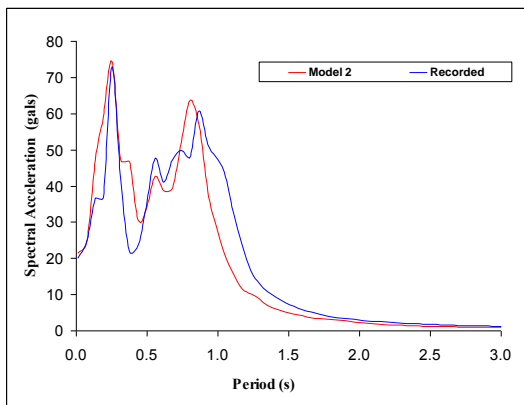
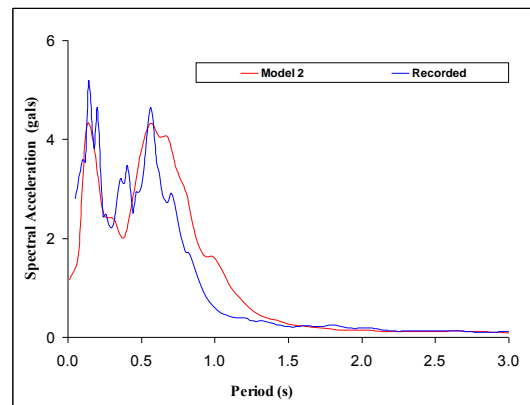


Figura 7. Resultados obtenidos para la primera etapa de la calibración, usando el modelo equivalente lineal (Evento sísmico del 16 de Febrero del 2005)



(a)



(b)

Figura 8. Resultados obtenidos para la segunda etapa de la calibración, usando el modelo no lineal a) Evento sísmico del 29 de Marzo del 2008 b) Evento sísmico del 16 de Febrero del 2005.

6. CONCLUSIONES

Este Estudio fue centrado en la calibración de un modelo dinámico para la presa Yuracmayo, usando los eventos sísmicos registrados en los acelerómetros instalados. El espectro de respuesta obtenido usando el modelo equivalente lineal (considerando el modelo propuesto 2) mostró una buena aproximación respecto al espectro real registrado, para periodos cortos; sin embargo este espectro mostró una excesiva amplificación para

periodos largos. Este comportamiento podría ser asociado a la reducción excesiva de la rigidez causada por las curvas de degradación del módulo de corte lo cual causaría amplificaciones para periodos largos. Por otra parte el espectro de respuesta obtenido en la segunda etapa de la calibración, donde se usó el modelo no lineal mostró una buena aproximación respecto al espectro real, tanto para periodos cortos como largos. Por lo tanto se concluye que el comportamiento dinámico de la presa es representado de manera adecuada por el modelo calibrado, en especial si se considera un modelo no lineal para el comportamiento de los materiales.

7. REFERENCIAS

- (1) Kuhlemeyer, R.L. y J. Lysmer. "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 99, No. SM5, pp. 421-427, 1973.
- (2) Benz, T. "Small-Strain stiffness of soils and its numerical consequences," Ph.D. Tesis, Universidad de Stuttgart, pp. 9-59, 2006.
- (3) Hardin, B.O. "The nature of stress-strain behavior of soils". In *Proc. Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, volumen 1, pag. 3-90, Pasadena, CA, 1978. ASCE, New York, State of the art report, 1978.
- (4) Lysmer J. y R. L. Kuhlemeyer. "Finite dynamic model for infinite media," *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, 95 (EM4), pp. 859-877, 1969.
- (5) Seed, H.B. y I.M. Idriss. "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Universidad de California, Berkeley, 1970.
- (6) Seed, H.B., R.T. Wong, I.M. Idriss, and K. Tokimatsu. "Module and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils," *J. Geotech. Eng., ASCE*, 112(11), pp.1016-1032, 1986.
- (7) Ishibashi, I. y X. Zhang. "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay," *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1; pp. 182-191, 1993.
- (8) Masing, G. "Eigenspannungen und Verfertigung beim Messing," *Proceedings, 2nd International Congress on Applied Mechanics*, Zurich, 1926.
- (9) Kramer, S.L. "Dynamic soil properties," *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, pp.184-254, 1996.

ANEXO II

PLANOS DE REFERENCIA