

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

Selección y Escalamiento de Registros en Ambientes Subductivos

Proyecto de Investigación y Desarrollo

Braulio Mauricio Tituaña Shuguli

Pablo Andrés Torres Rodas, PhD
Director de Trabajo de Titulación

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito
para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Civil, Mención en Diseño y
Construcción de Estructuras Sismo Resistentes

Quito, 17 de septiembre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Selección y Escalamiento de Registros en Ambientes Subductivos

Braulio Mauricio Tituaña Shuguli

Nombre del Director del Programa:	Fabricio Yépez
Título académico:	PhD en Ingeniería Civil
Director del programa de:	Maestría en Ingeniería Civil

Nombre del Decano del colegio Académico:	Eduardo Alba
Título académico:	Doctor en Ciencias
Decano del Colegio:	Colegio de Ciencias e Ingenierías

Nombre del Decano del Colegio de Posgrados:	Hugo Burgos
Título académico:	Doctor of Philosophy

Quito, septiembre 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombre del estudiante: Braulio Mauricio Tituaña Shuguli

Código de estudiante: 00326718

C.I.: 1715428544

Lugar y fecha: Quito, 17 de septiembre de 2023.

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following graduation project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, a mi hermano, a mi sobrino, a mis amigos y a los loquitos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Pablo Torres, PhD y Pablo Quinde, PhD. Pablo Torres, mi tutor, siempre estuvo disponible para solventar cualquier duda sobre el tema en análisis, y a Pablo Quinde, quien me facilitó uno de sus estudios de peligro sísmico, del cual puedo obtener información necesaria para realizar la parte práctica de este trabajo de titulación.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo la aplicación de los conocimientos técnicos adquiridos para la selección y escalamiento de registros sísmicos en la costa del Ecuador (zona subductiva), para uso en análisis dinámicos no lineales (tiempo historia) en estructuras. En este documento se describen 4 alternativas para la selección de registros sísmicos, las primeras dos consisten en el uso de el: Espectro de Peligro Uniforme (Uniform Hazard Spectrum – UHS) y el Espectro de Media Condicional (Conditional Mean Spectrum – CMS), considerando la Suma de Errores Cuadrados (SSE). La tercera alternativa consiste en la selección de registros en base a EPSILON y la cuarta considera un criterio RANDOM. En base a esto, se realiza una primera selección de 11 pares de registros, para cada criterio. Estos registros son escalados para el periodo objetivo T^* y las respuestas son propagadas en base a la estratigrafía para considerar el efecto del suelo. Bajo estos cuatro criterios, se construyen espectros de sitio considerando la respuesta media de la primera selección, y se procede a la selección final de 11 registros en base al valor de SSE y escalados considerando el criterio establecido en la ASCE, en donde para los periodos comprendidos entre $0.2T^*$ y $1.5T^*$, la respuesta promedio de los registros debe ser superior a la del espectro objetivo. Finalmente los registros seleccionados son aplicados a una estructura con periodo fundamental T^* , y se evalúan los resultados.

Palabras clave: Registros sísmicos, Espectros, Espectro de Media Condicional, CMS, Espectro de Peligro Uniforme, UHS, Épsilon, Selección de registros sísmicos, Escalamiento de registros sísmicos.

ABSTRACT

The objective of written thesis is the application of the technical knowledge acquired for the selection and scaling of seismic records on the coast of Ecuador (subductive zone), for use in nonlinear dynamic analysis (time history) in structures. This document describes 4 alternatives for the selection of seismic records, the first two consist in the use of: the Uniform Hazard Spectrum (UHS) and the Conditional Mean Spectrum (CMS), considering the Sum of Squared Errors (SSE). The third alternative consists of the selection of records based on EPSILON and the fourth considers a RANDOM criterion. Based on this, a first selection of 11 pairs of records is made for each criterion. These records are scaled for the target period T^* and the responses are propagated based on stratigraphy to account for the effect of the soil. Under these four criteria, site spectra are built considering the mean response of the first selection, and the final selection of 11 records is made based on the SSE value and scaled considering the criteria established in the ASCE, where for periods between $0.2T^*$ and $1.5T^*$, the average response of the records should be higher than that of the target spectrum. Finally, the selected records are applied to a structure with fundamental period T^* , and the results are evaluated.

Key words: Seismic Records, Spectra, Conditional Mean Spectrum, CMS, Uniform Hazard Spectrum, UHS, Epsilon, Seismic Record Selection, Seismic Record Scaling.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	7
Abstract	8
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	12
Capítulo 1	14
1.1 Antecedentes y Motivación	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo General	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 Alcance	16
Capítulo 2 Desarrollo Teorico del Tema.....	17
2.1 Definición de Espectros Objetivo.....	17
2.1.1 Espectro de Peligro Uniforme (Uniform Hazard Spectrum - UHS)	17
2.1.2 Espectro de Media Condicional (Conditional Mean Spectrum - CMS).....	19
2.2 Comparación entre Espectros Objetivo	21
2.3 Métodos de Selección de Registros	22
2.4 Métodos de Escalamiento de Registros.....	24
2.4.1 Factores de Escala	24
Capítulo 3 Aplicación Práctica de la Temática	26
3.1 Información del Sitio.....	26
3.2 Construcción del Espectro de Media Condicional	28
3.3 Catalogo de Registros Sísmicos	30
3.4 Metodología para la Selección	30
3.4.1 CMS y UHS	30
3.4.2 EPSILON	33
3.4.3 RANDOM	34
3.5 Escalamiento de Registros	35
3.6 Efecto del Suelo.....	37
3.7 Espectros de Sitio	39
3.8 Selección y Escalamiento Final.....	40
3.9 Aplicación en un Modelo Estructural.....	44
Capítulo 4 Análisis de Resultados Obtenidos	47
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones	50

5.1 Conclusiones	50
5.2 Recomendaciones.....	51
Referencias	52
Índice de Anexos.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Estratigrafía de la zona en análisis.....	27
TABLA 2. Media y desviación estándar considerando Montalva et al. (2017).....	28
TABLA 3. Factor de correlación según Candia et al. (2020)	29
TABLA 4. CMS considerando GMPE Montalva et al. (2017).....	29
TABLA 5. Aceleración espectral para espectros CMS, UHS y RotD50	31
TABLA 6. Resultados de Suma de Errores Cuadrados (SSE) para CMS y UHS.....	32
TABLA 7. Resultados de selección en base a $\varepsilon(T^*)$	34
TABLA 8. Resultados de selección en base a criterio RANDOM	35
TABLA 9. Factores de escala (FST*) para CMS y UHS.....	35
TABLA 10. Resultados de SSE para CMS, UHS, ε y Random para espectros de sitio	41
TABLA 11. Factores de escala para CMS, UHS, ε y Random para espectros de sitio	43
TABLA 12. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso CMS	45
TABLA 13. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso UHS	46
TABLA 14. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso EPSILON	46
TABLA 15. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso RANDOM.....	46
TABLA 16. Resultados máximos en aceleraciones y derivas máximas	46

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Espectro de Peligro Uniforme para Guayaquil NEC Tr=475 años	19
FIGURA 2. Desagregación Probabilística para Samborondón del PSHA. Tr=475 años y T=2s.....	26
FIGURA 3. UHS para Samborondón del PSHA. Tr = 475 años	27
FIGURA 4. Espectros UHS y CMS para Samborondón.....	29
FIGURA 5. Acelerograma registro número 2 dirección 1 y 2	31
FIGURA 6. RotD50 y espectros de respuesta.....	31
FIGURA 7. Espectros de respuesta para selección considerando CMS	32
FIGURA 8. Espectros de respuesta para selección considerando UHS.....	33
FIGURA 9. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON	34
FIGURA 10. Espectros de respuesta para selección considerando RANDOM.....	35
FIGURA 11. Espectros de respuesta para selección considerando CMS – Registros Escalados.....	36
FIGURA 12. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados.....	36
FIGURA 13. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON – Registros Escalados.....	36
FIGURA 14. Espectros de respuesta para selección considerando RANDOM – Registros Escalados.....	37
FIGURA 15. Acelerograma registro número 2 dirección 1 y 2 – Escalado.....	37
FIGURA 16. Función de Transferencia para lugar en análisis	38
FIGURA 17. Acelerograma registro número 2 dirección 1 y 2 – Escalado y Propagado	38
FIGURA 18. Espectros de respuesta para selección considerando CMS – Registros Escalados y Propagados	38
FIGURA 19. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados y Propagados	39
FIGURA 20. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON – Registros Escalados y Propagados	39
FIGURA 21. Espectros de respuesta para selección considerando RANDOM – Registros Escalados y Propagados	39
FIGURA 22. Espectros de sitio (respuestas medias después de escalar y propagar registros)	40
FIGURA 23. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio - CMS ..	41
FIGURA 24. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio - UHS...	41
FIGURA 25. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio - EPSILON	42
FIGURA 26. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio-RANDOM	42

FIGURA 27. Espectros de respuesta para selección considerando CMS – Registros Escalados según ASCE	43
FIGURA 28. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados según ASCE	43
FIGURA 29. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON – Registros Escalados según ASCE	43
FIGURA 30. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados según ASCE	44
FIGURA 31. Vistas en planta y elevación del modelo estructural considerado (Torres-Rodas et al., 2021).....	45

CAPÍTULO 1

1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

Una de las fuentes principales de sismos en el Ecuador son los eventos de naturaleza subductiva, esto debido a que la costa ecuatoriana se encuentra ubicada entre las placas Sudamericana y de Nazca, región que presenta alta sismicidad y en la que, para el diseño de estructuras se considera especificaciones de diseño más estrictas con aceleraciones más altas. Es por esto que para la implementación de análisis dinámico de estructuras en esta zona, es necesaria la utilización de registros sísmicos que se apeguen a la realidad de la zona para de esta manera, obtenerse resultados realistas e imparciales. Considerando también que, un análisis dinámico tiene como objetivo predecir el comportamiento de una estructura la cual es sometida a cargas dinámicas (sismos) considerando una aceleración específica para un periodo de interés (Baker, 2011), se desprende la importancia que tiene una correcta selección de registros sísmicos, los cuales representen objetivamente la realidad, para así estimar la respuesta dinámica de una estructura de una manera más precisa. Esto se puede lograr con una definición adecuada de espectros objetivos mediante los cuales se seleccione registros reales o artificiales. En este contexto, este trabajo de titulación tiene como objetivo el estudio y determinación de diferentes maneras para la definición de espectros objetivos representativos de una zona subductiva y de la selección y escalamiento de registro sísmicos para la implementación en análisis dinámicos en base a métodos que se pueden encontrar en la literatura.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo de titulación es el de la aplicación de los conocimientos adquiridos para entender e identificar métodos para la selección y escalamiento de registros sísmicos para su posterior aplicación en análisis dinámicos en zonas de la costa ecuatoriana (zona subductiva).

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Los objetivos específicos de este trabajo de titulación son los siguientes:

- Analizar métodos para definición de espectros objetivos para aplicación en selección de registros sísmicos, considerando los espectros: Espectro de Peligro Uniforme (Uniform Hazard Spectrum - UHS) y Espectro de Media Condicional (Conditional Mean Spectrum - CMS)
- Construcción del CMS considerando leyes de atenuación disponibles en la literatura, desarrolladas para una zona subductiva
- Análisis de métodos de selección de registros sísmicos considerando cuatro criterios: utilizando el CMS, el UHS, Épsilon (ϵ) y un criterio Random.
- Escalamiento de registros sísmicos
- Desarrollo de un código en Matlab para la selección y escalamiento de registros considerando una base de datos, espectros objetivos y valores de épsilon
- Aplicación de funciones de transferencia para considerar efectos de sitio en la aplicación de registros seleccionados
- Construcción de espectros de sitio en base a cuatro criterios de selección de registros
- Aplicación práctica utilizando análisis dinámico

- Comparación de los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos utilizados para la selección de registros.

1.3 ALCANCE

En este documento se detallará el procedimiento para la construcción del CMS y para la selección y escalamiento de registros sísmicos en base a un código de Matlab para un periodo objetivo seleccionado. No obstante el código desarrollado puede ser utilizado para cualquier periodo estructural seleccionado. Así mismo, se utilizó el software DEGTRA para estimar la función de transferencia para considerar los efectos de sitio, y se construyeron espectros de sitio en base a la respuesta media de la primera selección. La comparación de resultados se la realizó en un modelo en OpenSees al que se le aplicaron los registros seleccionados y escalados.

Finalmente, el alcance de este trabajo se limita a la descripción y aplicación de los espectros Uniform Hazard Spectrum (UHS) y Conditional Mean Spectrum (CMS), y a la construcción de espectros de sitio en base al UHS, CMS, Épsilon y un criterio Random. Se consideró así mismo la ley de atenuación (GMPE) definida por Montalva et al. (2017) para la construcción del CMS, el criterio de la Suma de Errores Cuadrados (SSE) para la selección de registros y los métodos de escalamiento: Factor de escala en base a periodo objetivo (SFT*) y lo establecido en la norma ASCE/SEI 7-16.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO TEÓRICO DEL TEMA

2.1 DEFINICIÓN DE ESPECTROS OBJETIVO

La selección de registros sísmicos provee el enlace entre el riesgo sísmico y la respuesta estructural (Lin et al., 2013), por lo que para la aplicación de análisis no lineales y específicamente análisis tiempo historia, con el fin de analizar y evaluar el comportamiento no línea de una estructura, es necesaria la selección de un numero apropiado de registros sísmicos los cuales deben tener características adecuadas representativas del lugar. Debido a la naturaleza impredecible de las demandas sísmicas esperadas, la selección de registros puede realizarse considerando una variedad de parámetros sísmicos, como pueden ser magnitud, distancia a la ruptura, PGA, PGV, PGD, coordenadas espectrales específicas e intensidad, entre otros, para lo cual se requiere definir un espectro objetivo, el cual represente una de estas características, y el cual sirva como referencia para la selección y escalamiento de registros sísmicos. En esta sección se definen 2 tipos de espectros objetivo que son ampliamente utilizados para selección de registros.

2.1.1 ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME (UNIFORM HAZARD SPECTRUM - UHS)

El espectro de peligro uniforme (UHS) se define como un espectro de respuesta para un lugar específico, el cual tiene una misma probabilidad de excedencia de una aceleración espectral para todos los periodos de vibración. Los espectros UHS son determinados mediante la aplicación de un análisis probabilístico de peligro sísmico de sitio (PSHA) (Stamatovska et al., 2006), con el cual se determinan curvas representativas del lugar donde se determina la tasa anual de excedencias para aceleraciones espectrales en diferentes periodos estructurales.

Para la aplicación de un análisis de peligro sísmico, y por ende para la construcción de un espectro de peligro sísmico uniforme, el cual está asociado a un amortiguamiento específico, se requiere información del sitio en consideración como son las características sísmicas del lugar y la implementación de modelos matemáticos, y leyes de atenuación del suelo (Stamatovska et al., 2006). Es importante mencionar que, para obtener una misma probabilidad de excedencia para todos los periodos, el análisis PSHA se realiza independientemente para cada periodo, por lo que se puede concluir que el espectro de respuesta que resulta no puede ser considerado como un espectro correspondiente a un único evento sísmico, ya que la posibilidad de que exista una misma probabilidad de excedencia para todos los periodos en un mismo evento es prácticamente nula (Baker & Cornell, 2006), por lo cual la utilización del UHS se consideraría conservadora o sobreestimada. No obstante este método ha sido utilizado ampliamente por décadas (Whittaker et al., 2011) para definir espectros objetivos debido a su naturaleza probabilística, a pesar de no representar un movimiento sísmico real. Adicionalmente, se ha observado que, en un espectro UHS, las frecuencias bajas pueden ser atribuidas a sismos cercanos y de baja intensidad, mientras que las frecuencias altas están dominadas por sismos más grandes y distantes, y que no existe una correlación entre los valores espectrales con una magnitud o distancia hacia la fuente (Baker & Cornell, 2006). En la figura 1, que se presenta a continuación, se muestra la construcción del espectro UHS para la ciudad de Guayaquil, y un periodo de retorno de 475 años, considerando las curvas de peligro sísmico disponibles en la NEC-SE-DS:

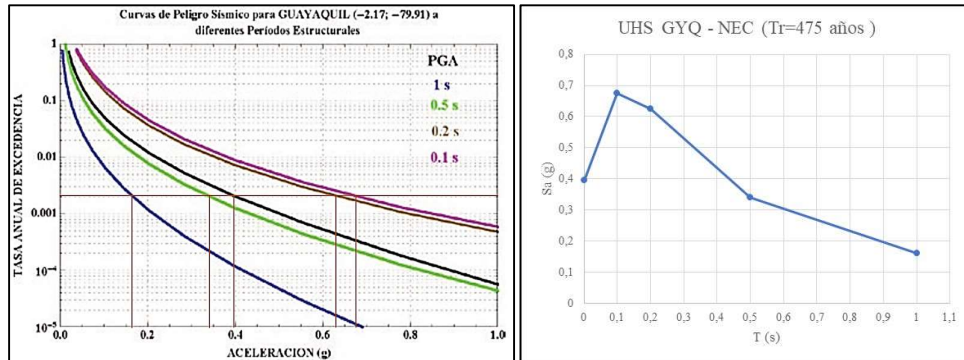


FIGURA 1. Espectro de Peligro Uniforme para Guayaquil NEC Tr=475 años

2.1.2 ESPECTRO DE MEDIA CONDICIONAL (CONDITIONAL MEAN SPECTRUM - CMS)

El espectro de media condicional es un espectro de respuesta el cual condiciona el cálculo del espectro para la ocurrencia de una aceleración espectral en un periodo específico de interés, para con esto calcular la aceleración espectral media para el resto de periodos (Whittaker et al., 2011). En otras palabras, según Baker y Lee (2018), el CMS cuantifica los valores logarítmicos medios de aceleración espectral de un movimiento sísmico condicionados en un valor espectral en un periodo y escenario de ruptura específico (Baker & Lee, 2017). Es por este condicionamiento que, al construir un CMS, se considera razonable que el espectro resultante si pudiera representar un evento real (Whittaker et al., 2011), por lo que utilizar un CMS como espectro objetivo para la selección de registros sísmicos resulta en un caso más acorde a la realidad. Para su construcción es necesaria información desagregada específica de un sitio, como son la magnitud, distancia hacia la ruptura y los valores épsilon ϵ (media condicional) de movimientos sísmicos, por lo que este espectro se consideraría específico para un sitio, de manera que su generalización en códigos de diseño no es posible (Baker & Cornell, 2006; Whittaker et al., 2011). Para la construcción de un espectro CMS, se selecciona un periodo de interés, el cual puede ser definido como el periodo fundamental de la estructura en análisis (T^*), en base a esto y a una curva de amenaza específica para el lugar que se obtiene

mediante un análisis PSHA, se estima la aceleración objetivo para el periodo de interés $Sa(T^*)$ y para un periodo de retorno seleccionado; con esto se construye un escenario de desagregación para magnitudes y distancias, para después obtener el valor de épsilon y obtener la correlación para todos los otros periodos (T_i). El procedimiento antes descrito se detalla en Baker (2011) y está comprendido de cuatro pasos:

1. Selección del periodo objetivo T^* , y su correspondiente aceleración objetivo $Sa(T^*)$ para un periodo de retorno seleccionado y para su asociada magnitud momento (M_w), distancia a la ruptura (R_{rup}) y épsilon (ϵ).
2. Mediante el uso de leyes de atenuación (GMPE), como la establecida en Montalva et al. (2017), o Idini et al. (2016), se estima la media y la desviación estándar para el logaritmo de la aceleración espectral en todos los periodos.

$$\mu_{\ln Sa}(M, R, T) \quad \sigma_{\ln Sa}(T)$$

Para este caso particular, debido a que no se han definido leyes de atenuación para la costa ecuatoriana, se consideró la ley de atenuación establecida en Montalva et al. (2017), para el cálculo de la media y la desviación estándar, por cuanto fue desarrolladas para la zona subductiva de Chile, la cual que al igual que la ecuatoriana, está comprendida por el roce entre las placas Sudamericana y de Nazca, evidenciando una similitud entre ambas regiones. Con esto se puede estimar el valor de épsilon para el periodo de interés ($\epsilon(T^*)$) como:

$$\epsilon(T^*) = \frac{\ln Sa(T^*) - \mu_{\ln Sa}(M, R, T^*)}{\sigma_{\ln Sa}(T^*)}$$

3. Se calculan los valores de ϵ para otros periodos, considerando la relación:

$$\mu_{\epsilon(T_i)|\epsilon(T^*)} = \rho(T_i, T^*)\epsilon(T^*)$$

En donde el factor de escala $\rho(T_i, T^*)$, se define según Baker (2011), como:

$$\rho(T_i, T^*) = 1 - \cos\left\{\frac{\pi}{2} - \left[0.359 + 0.163I_{(T_{min} < 0.189)} \ln \frac{T_{min}}{0.189}\right] \ln \frac{T_{max}}{T_{min}}\right\}$$

No obstante, en la investigación realizada por Candia et al. (2020), se puede evidenciar que para la zona subductiva de Chile, los valores obtenidos son generalmente mayores a los calculados mediante la correlación establecida por Baker, por lo que, se derivó la siguiente expresión más acorde a la zona sísmica en análisis:

$$\rho_{total}(T_i, T^*) = \frac{\tau(T_i)\tau(T^*)}{\sigma_{lnIM}(T_i)\sigma_{lnIM}(T^*)} \rho_B(T_i, T^*) + \frac{\phi(T_i)\phi(T^*)}{\sigma_{lnIM}(T_i)\sigma_{lnIM}(T^*)} \rho_W(T_i, T^*)$$

Expresión que toma en consideración la correlación entre los residuos entre eventos y dentro de eventos (Candia et al., 2020).

4. Finalmente, el CMS se construye de la siguiente manera:

$$S a_{CMS} = \exp [\mu_{lnSa}(M, R, T_i) + \rho(T_i, T^*)\varepsilon(T^*) \sigma_{lnSa}(T_i)]$$

Es importante recordar también que al ser el CMS condicionado a un periodo de interés, usar este método se vuelve menos conservador para casos en los que el aporte de modos de vibración superiores es representativo, por lo que, en estos casos se consideraría armar espectros CMS para diferentes periodos, y utilizar la envolvente como espectro objetivo para la selección de registros sísmicos (Baker & Cornell, 2006).

2.2 COMPARACIÓN ENTRE ESPECTROS OBJETIVO

Se puede justificar que cada uno de los espectros objetivo antes descritos pueden ser utilizados en la selección de registros sísmicos para aplicación en análisis dinámicos. Una característica que comparten estos dos espectros es la utilización de un análisis PSHA para su definición, por cuanto los dos espectros son definidos de una manera probabilística, lo que se apega a la realidad de un diseño sísmico (Baker & Cornell, 2006). No obstante existen diferencias marcadas entre ellos, siendo la más grande que el espectro UHS no representaría un evento sísmico real (Baker & Cornell, 2006), ya que su característica principal es que, para todos los periodos de vibración, existe una misma probabilidad de excedencia. Esto lo convierte también en un espectro más conservador, y por ende siempre va a ser más grande que un

espectro individual CMS (Baker & Cornell, 2006). Así mismo, el espectro UHS es independiente del periodo considerado, por lo que se lo podría aplicar para cualquier tipo de estructura sin importar cual sea su periodo predominante (Baker, 2011), y se considera también que su construcción es más sencilla que la de un CMS (Baker, 2011), por lo que su uso se vio ampliamente difundido hasta aproximadamente el año 2006, cuando se comenzó a popularizar el uso del CMS, termino descrito por Baker y Cornell (2006) y Baker (2011). Ahora considerando el CMS, este se construye en base al condicionamiento de los periodos de vibración para un periodo específico, lo cual genera un espectro que se apega más a la realidad, pero se pierde lo conservador o sobredimensionado de un UHS. Así mismo, debido a que para construir el CMS, se utilizan los valores logarítmicos medios de aceleración espectral de un movimiento sísmico condicionados en un valor espectral en un periodo y escenario de ruptura específico (Baker & Lee, 2017), en el caso de que una estructura tenga aportes considerables de modos superiores, un espectro único CMS no representaría el escenario más optimo, por lo que es necesaria la construcción de múltiples espectros para diferentes periodos, incrementando el costo computacional y de cálculo (Baker, 2011), especialmente es el caso cuando se considera una estructura la cual aún no tiene un diseño estructural definido, por lo que no se desconoce el periodo fundamental de vibración de la misma.

2.3 MÉTODOS DE SELECCIÓN DE REGISTROS

El número de registros a ser considerado varía dependiendo de la norma considerada y el tipo de estructura. En el apartado *16.2.2 Ground Motion Selection* de la norma ASCE/SEI 7-16, se establece un mínimo de 11 pares de registros para cada espectro objetivo seleccionado (ASCE, 2017), mientras que en la norma AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 9TH EDITION, en el apartado *4.7.4.3.4b – Acceleration Time Histories*, se define un mínimo de 3 registros los cuales deben ser compatibles con el espectro de respuesta

para cada componente de movimiento (horizontal y vertical) y en el caso de tener un mínimo de 7 registros, se puede considerar la respuesta media (AASHTO, 2020), aunque el número a considerarse aún sigue siendo motivo de debate (Whittaker et al., 2011). La selección de registros se la puede realizar en base a información históricos de sismos/registros reales, o mediante el uso de registros artificiales, dependiendo de la disponibilidad de información (Whittaker et al., 2011). Existe una variedad de bases de datos para la obtención de registros reales, no obstante una de las herramientas más útiles es la base de datos de registros sísmicos del *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)*, desarrollado por la Universidad de California Berkeley, la cual presenta una base de datos de sismos corticales, NGA-West 2 para la costa oeste de los Estados unidos y NGA-East para la costa este. La selección de registros también se la hace considerando el origen del evento ya se de campo cercano o de campo lejano. Para campo lejano, la ASCE/SEI 7-16 establece que los registros deben provenir de una zona tectónicamente similar, con magnitudes, distancias a la falla y valores de épsilon consistentes de los que controlan el espectro objetivo definido y la curva de peligro para el periodo de interés (ASCE, 2017). Es importante considerar también que, utilizar la forma espectral del espectro objetivo como un factor de selección, reduce la necesidad de escalamiento de registros. Una consideración extra que se debe tomar para sismos de campo cercano, es la posibilidad de la presencia de pulsos de velocidad (Whittaker et al., 2011).

Una forma para determinar la similitud entre un espectro objetivo y registro sísmicos es mediante el uso de la Suma de Errores Cuadrados (Sum of Squared Errors - SSE) entre los logaritmos naturales de la aceleración espectral del espectro de respuesta correspondiente al registro sísmico y del espectro objetivo (Baker, 2011), donde se buscan los menores valores de SSE, según la siguiente expresión:

$$SSE = \sum_{j=1}^n [\ln Sa_{target}(T_j) - \ln Sa_{response}(T_j)]^2$$

El SSE se calcula para un rango de periodos definido el cual permita capturar de mejor manera la respuesta del registro, Baker (2011) recomienda considerar periodos comprendidos entre $0.2T_i$ y $2T_i$. Lo que busca el SSE es, seleccionar registros en base a la similitud de su forma espectral comparada con el espectro objetivo, por lo que también se conoce como Spectral Matching. Utilizar el criterio de SSE, reduce la necesidad de escalar los registros una vez seleccionados.

2.4 MÉTODOS DE ESCALAMIENTO DE REGISTROS

El escalamiento de registros sísmicos se realiza para modificar su forma espectral para que esta sea más representativa de una demanda sísmica esperada para una estructura, de esta manera se busca reducir la variabilidad de la respuesta no lineal (Amirzehni et al., 2015).

2.4.1 FACTORES DE ESCALA

Este método busca escalar registros reales, mediante la utilización de un factor de escalamiento, para que su aceleración espectral sea igual a la aceleración del espectro objetivo para el periodo de interés o periodo fundamental, T^* . El factor de escala, SFT^* que resulta de esta relación, se aplica a todos los valores de aceleración del registro original, de igual modo los espectros resultantes tienen un mismo valor de aceleración para el periodo de interés. No obstante condicionar el escalamiento al periodo de interés no representa un buen indicador para los contenidos de frecuencia y fuerza de los registros sísmicos (Amirzehni et al., 2015). Baker (2011), describe la forma más sencilla de definir el factor de escala, SFT^* , como la relación entre la aceleración espectral del espectro objetivo $Sa_{obj}(T^*)$ y la aceleración espectral del espectro de respuesta del registro $Sa_{resp.}(T^*)$ (Baker, 2011; Nguyen et al., 2023):

$$SFT^* = \frac{Sa_{obj}(T^*)}{Sa_{resp.}(T^*)}$$

Así mismo la ASCE define que, entre $0.2T_i$ y $1.5T_i$, donde T_i es el periodo fundamental de la estructura, la respuesta promedio de los registros deben tener una respuesta igual o superior a la respuesta del espectro objetivo, y este factor se debe aplicar de igual manera a los dos componentes horizontales del registro (Whittaker et al., 2011; ASCE, 2017).

CAPÍTULO 3

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA TEMÁTICA

En esta sección se detalla el procedimiento considerado para la construcción del CMS, y para la selección y escalamiento de registros sísmicos considerando cuatro criterios: utilizando el CMS, el UHS, los valores de Épsilon y considerando una selección Random. Se considera un periodo de retorno de $T_r = 475$ años y una estructura con un periodo fundamental de vibración de $T = 2s$, la cual se encuentra en la ciudad de Samborondón provincia del Guayas, ubicado en la zona subductiva del Ecuador. Se partió en base a la información disponible de una Análisis Probabilística de Peligro Sísmico (Probabilistic Seismic Hazard Assessment – PSHA), para Samborondón, elaborada y proporcionada por el Doctor Pablo Quinde Martínez.

3.1 INFORMACIÓN DEL SITIO

Como parte de la información proveniente del análisis PSHA, se utilizó la Desagregación Probabilística de Peligro Sísmico para Samborondón, en donde se puede identificar las diferentes combinaciones de magnitud momento (M_w), distancia a la ruptura (R_{rup}) y valores de épsilon (ϵ) para diferentes periodos de retorno (T_r) y periodos estructurales (T), la figura 2 representa los resultados de la desagregación para $T_r = 475$ años y $T = 2s$:

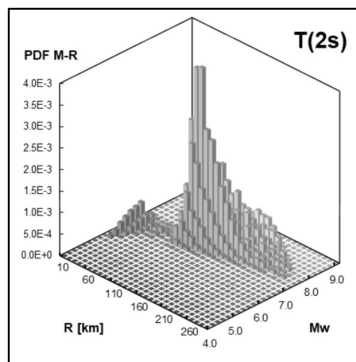


FIGURA 2. Desagregación probabilística para Samborondón del PSHA. $T_r=475$ años y $T=2s$

Los valores medios para este escenario de desagregación son los siguientes:

$$Tr = 475 \text{ años}; \quad T = 2.0s; \quad \overline{Mw} = 7.7; \quad \overline{Rrup} = 120km; \quad \bar{\epsilon} = 1.2$$

Así mismo, se obtuvo del análisis PSHA, el UHS para $Tr = 475$ años:

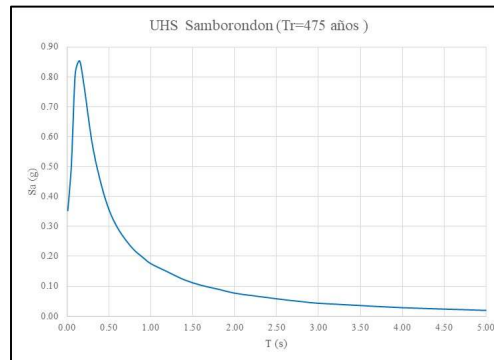


FIGURA 3. UHS para Samborondón del PSHA. $Tr = 475$ años

Para el periodo de interés $T = 2s$, la aceleración proveniente del UHS es:

$$T = 2.0s; \quad Sa(2s) = 0.077 \text{ g}$$

El periodo fundamental del suelo es de 1.25s, o 0.8hz y la estratigrafía del lugar, descrita en función de la velocidad de onda de corte según la norma NEC es la siguiente:

Capa	Profundidad (m)	Vs (m/s)	γ (g/cm ³)	ξ (%)	Tipo
1	17	99	1.36	5	E
2	18	343	1.36	5	D
3	14	160	1.36	5	E
4	9.2	301	1.36	5	D
5	9.2	477	1.36	5	C
	∞	1169	1.91	1	B

TABLA 1. Estratigrafía de la zona en análisis

Finalmente, la velocidad de onda de corte a 30 metros ($V_{s,30}$), se estimó como la velocidad promedio ponderada entre las dos primeras capas:

$$V_{s,30} = \frac{17m \times 99 \frac{m}{s} + 18m \times 343 \frac{m}{s}}{17m + 18m} = 224.5 \frac{m}{s}$$

3.2 CONSTRUCCIÓN DEL ESPECTRO DE MEDIA CONDICIONAL

Para la construcción del CMS, se aplicó el procedimiento establecido en Baker (2011), considerando la GMPE de Montalva et al. (2017), la correlación de Candia et al. (2020) para una magnitud de 7.7, una distancia a la ruptura de 120km, un periodo de retorno de 475 años ($S_a = 0.077g$), para un sismo de tipo interfaz y un periodo objetivo de $T = 2s$.

Ti	$\mu_{lns_a}(M,R,T)$	$\sigma_{lns_a}(T)$
0.050	-2.025	0.88409
0.075	-1.866	0.90867
0.100	-1.698	0.90944
0.150	-1.421	0.90171
0.200	-1.230	0.86853
0.250	-1.088	0.85654
0.300	-1.032	0.83713
0.400	-1.019	0.82982
0.500	-1.203	0.79737
0.550	-1.256	0.80001
0.600	-1.313	0.80265
0.650	-1.389	0.80554
0.700	-1.466	0.808443
0.750	-1.544	0.81134
0.800	-1.632	0.8109
0.850	-1.721	0.81046
0.900	-1.809	0.81002
0.950	-1.897	0.80958
1.000	-1.986	0.80914
1.500	-2.623	0.79168
2.000	-3.080	0.76249
2.500	-3.530	0.75605
3.000	-3.871	0.73593
4.000	-3.871	0.73593
5.000	-3.849	0.69351

TABLA 2. Media y desviación estándar considerando Montalva et al. (2017)

Una vez obtenida la media y la desviación estándar de la GMPE, se calcula el valor de $\varepsilon(T^*)$ para $T^* = 2s$:

$$\varepsilon(2) = \frac{\ln(0.077) - (-3.080)}{0.76249} = 0.68$$

La correlación ρ , se obtiene mediante el uso del código de Matlab, que se encuentra disponible como adjunto al paper de Candia et al. (2020), obteniéndose los siguientes resultados:

Ti	$\rho_{total,(Ti,T^*)}$	Ti	$\rho_{total,(Ti,T^*)}$
0.050	0.3620	0.750	0.7994
0.075	0.3332	0.800	0.8180
0.100	0.3468	0.850	0.8347
0.150	0.3923	0.900	0.8497
0.200	0.4787	0.950	0.8631
0.250	0.5643	1.000	0.8750
0.300	0.6394	1.500	0.9502
0.400	0.6962	2.000	1.0000
0.500	0.7198	2.500	0.9668
0.550	0.7302	3.000	0.9380
0.600	0.7426	4.000	0.9058
0.650	0.7594	5.000	0.8795
0.700	0.7792		

TABLA 3. Factor de correlación según Candia et al. (2020)

Finalmente, el CMS se calcula como:

$$S_{a_{CMS}} = \exp(\mu_{\ln Sa}(M, R, T_i) + \rho(T_i, T^*)\varepsilon(T^*)) \sigma_{\ln Sa}(T_i)$$

Ti [s]	Sa _{CMS} [g]	Ti [s]	Sa _{CMS} [g]
0.050	0.1642	0.750	0.3324
0.075	0.1903	0.800	0.3073
0.100	0.2271	0.850	0.2839
0.150	0.3075	0.900	0.2620
0.200	0.3883	0.950	0.2416
0.250	0.4683	1.000	0.2226
0.300	0.5134	1.500	0.1213
0.400	0.5353	2.000	0.0773
0.500	0.4444	2.500	0.0483
0.550	0.4242	3.000	0.0334
0.600	0.4042	4.000	0.0221
0.650	0.3785	5.000	0.0147
0.700	0.3548		

TABLA 4. CMS considerando GMPE Montalva et al. (2017)

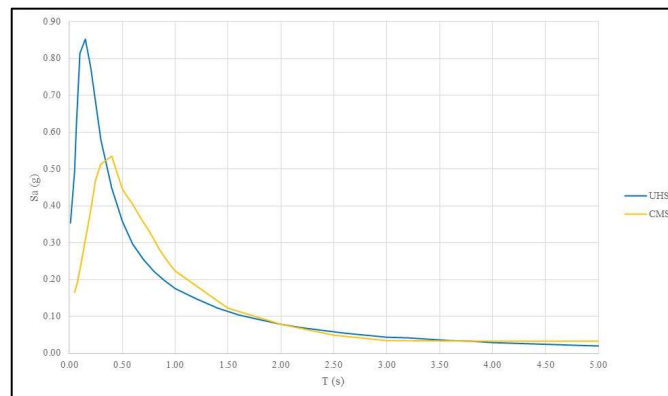


FIGURA 4. Espectros UHS y CMS para Samborondón

Se observa que, a pesar de que el CMS solo debería cruzarse con el UHS en el periodo objetivo de 2 segundos, los espectros se cruzan a partir de aproximadamente $T = 0.35s$, esto

puede ser debido a que, para el cálculo del UHS en el PSHA, se utilizaron una variedad de leyes de atenuación en diferentes proporciones, sin haberse considerado la establecida por Montalva, generando una discrepancia al calcular el CMS. Finalmente, los cálculos completos para obtener el CMS, se detalla en el código de Matlab que se presenta en el Anexo A.

3.3 CATALOGO DE REGISTROS SÍSMICOS

Debido a la poca disponibilidad de registros para la costa ecuatoriana, como base de datos de registros se utilizó el catálogo de eventos ocurridos en Chile obtenida por Castro et al., (2022), la cual está compuesto de 7899 registros en los ejes locales 1 y 2. Para este trabajo, se consideró como muestra los primeros la totalidad de los 7899 registros de la base de datos, y se tomó el criterio de la ASCE/SEI 7-16 para el numero de registros seleccionados (11 pares).

3.4 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN

Para la selección de los registros se tomó en consideración 4 casos. En el primer caso se tomó al CMS como espectro objetivo, en el segundo el UHS, el tercero considerando el valor de ε proveniente de la desagregación en el PSHA y como cuarta alternativa, un criterio el que se escogieron los 11 pares de registros al azar.

3.4.1 CMS Y UHS

Para los casos donde se utiliza el CMS y el UHS como espectros objetivo, se calculó el espectro de respuesta RotD50, para considerar el efecto de la dirección del equipo al momento de registrar el evento. El procedimiento consistió en calcular el espectro de respuesta para las componentes 1 y 2, para un amortiguamiento de 5%, y después calcular el RotD50 de la siguiente manera:

$$RotD50 = media(Sa1 \times \cos \theta + Sa2 \times \cos \theta) \text{ para } 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

Una vez obtenido el RotD50, la selección se la realiza considerando los 11 pares de registros los cuales tienen el menor valor de SSE, para el efecto se consideran los valores entre un rango de periodos comprendidos entre $0.1T$ y $2T$, donde T es el periodo objetivo de 2 segundos ($0.1 - 4$ segundos). El procedimiento para la selección se presenta a continuación con un ejemplo para el registro número 2 en la base de datos:

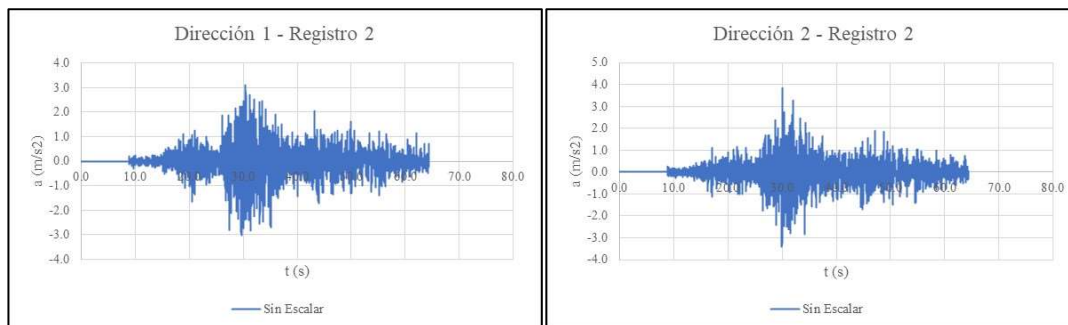


FIGURA 5. Acelerograma registro número 2 dirección 1 y 2

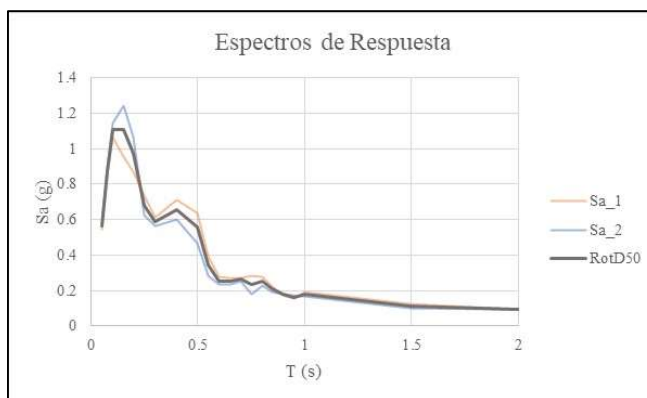


FIGURA 6. RotD50 y espectros de respuesta

Ti (s)	CMS (g)	UHS (g)	RotD50 (g)	Ti (s)	CMS (g)	UHS (g)	RotD50 (g)
0.050	0.1642	0.4910	0.2567	0.750	0.3324	0.2383	0.6109
0.075	0.1903	0.6575	0.3145	0.800	0.3073	0.2216	0.5874
0.100	0.2271	0.8142	0.3991	0.850	0.2839	0.2097	0.5259
0.150	0.3075	0.8530	0.4894	0.900	0.2620	0.1978	0.4612
0.200	0.3883	0.7763	0.4962	0.950	0.2416	0.1869	0.5022
0.250	0.4683	0.6773	0.5697	1.000	0.2226	0.1760	0.4937
0.300	0.5134	0.5783	0.7261	1.500	0.1213	0.1128	0.2479
0.400	0.5353	0.4490	0.4343	2.000	0.0773	0.0773	0.1048
0.500	0.4444	0.3566	0.4870	2.500	0.0483	0.0587	0.0688
0.550	0.4242	0.3268	0.5538	3.000	0.0334	0.0435	0.0441
0.600	0.4042	0.2970	0.6886	4.000	0.0221	0.0288	0.0260
0.650	0.3785	0.2760	0.6408	5.000	0.0147	0.0199	0.0210
0.700	0.3548	0.2551	0.6000				

TABLA 5. Aceleración espectral para espectros CMS, UHS y RotD50

Para este registro, el valor calculado de SSE es :

$$SSE_{CMS} = 4.67 \quad SSE_{UHS} = 8.99$$

Este procedimiento se llevó a cabo para la muestra de 7899 registros, obteniéndose los siguientes resultados para SSE:

CMS		UHS	
SSE	Numero de Registro	SSE	Numero de Registro
2.6875	2	0.6872	2
2.1191	14	1.8671	6
1.5904	37	1.8447	12
2.0473	162	1.4619	14
0.6817	334	1.1847	37
1.0732	350	1.6248	162
2.6468	351	2.0192	334
2.2694	352	2.0907	341
2.6337	484	1.8021	484
1.6049	4775	1.5306	2056
2.7043	4784	1.1340	4775

TABLA 6. Resultados de Suma de Errores Cuadrados (SSE) para CMS y UHS

Como se puede apreciar entre los registros seleccionados considerando el CMS y el UHS se repiten 7 de los 11 registros, específicamente los registros 2, 14, 37, 162, 334, 484, y 4775, mostrando que existe una relación entre los valores de SSE usando el CMS y el UHS.

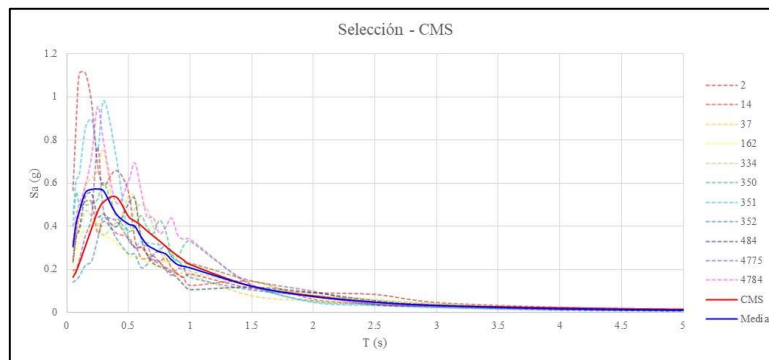


FIGURA 7. Espectros de respuesta para selección considerando CMS

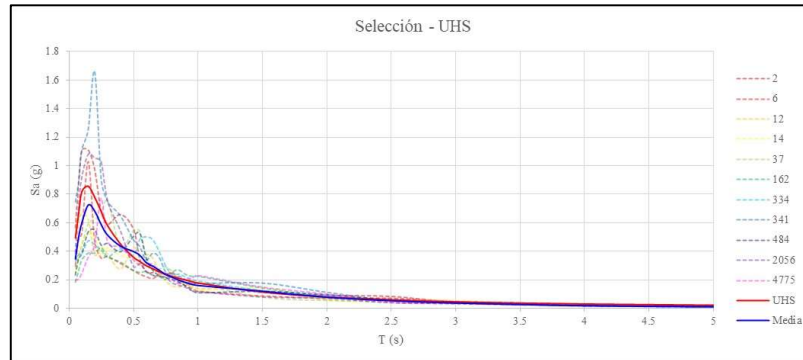


FIGURA 8. Espectros de respuesta para selección considerando UHS

Los 11 pares de registros, que corresponden a los espectros de respuesta graficados en las figuras 7 y 8 se presenta en el Anexo B y los cálculos completos para obtener el SSE, se detalla en el código de Matlab que se presenta en el Anexo C.

3.4.2 EPSILON

El tercer método para seleccionar registros fue en base al cálculo del valor de épsilon el cual se define como:

$$\varepsilon(T^*) = \frac{\ln Sa(T^*) - \mu_{\ln Sa}(M, R, T^*)}{\sigma_{\ln Sa}(T^*)}$$

En este caso, la comparación se la realiza entre el valor de épsilon obtenido mediante la desagregación probabilística ($\varepsilon=1.2$) y los valores de $\varepsilon(T^*)$ para los espectros RotD50 de la muestra de registros, para el periodo objetivo $T = 2s$. Para este caso, el procedimiento considerado fue, primero el computo del RotD50, y el cálculo de la media y desviación standard considerando Montalva et al. (2017), para el periodo de 2 segundos. Se presenta un ejemplo del cálculo realizado.

$$T^* = 2s; \quad \mu_{\ln Sa} = -3.0771; \quad \sigma_{\ln Sa}(T_i) = 0.7625; \quad Sa_{RotD50}(2s) = 1.0284$$

$$\varepsilon(2) = \frac{\ln 0.1048 - (-3.0771)}{0.7625} = 1.077$$

Este procedimiento se aplicó a la muestra de registros, obteniéndose los siguientes 11 registros, los cuales tienen el valor de $\varepsilon(T^*)$ más cercano a 1.2:

EPSILON	
$\epsilon(T^*)$	Numero de Registro
1.0777	1
1.0292	15
1.3401	18
1.0035	107
1.1189	116
1.3496	148
1.3489	152
1.2950	156
1.1393	341
1.3238	2053
0.9930	4775

TABLA 7. Resultados de selección en base a $\epsilon(T^*)$

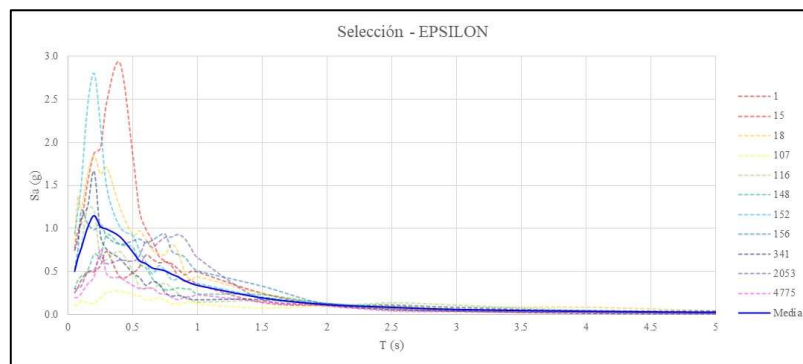


FIGURA 9. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON

De la figura 9 se aprecia que, todos los registros seleccionados tienen un valor de aceleración para un periodo de 2 segundos muy cercana a 0.077g, la cual es la aceleración obtenida del PSHA para 2 segundos. Los 11 pares de registros, que corresponden a los espectros de respuesta que están graficados en la figura 9 se presenta en el Anexo D y los cálculos completos para obtener los valores de ϵ se detalla en el código de Matlab que se presenta en el Anexo E.

3.4.3 RANDOM

Finalmente, se escogen 11 registros al azar, obteniéndose los siguientes resultados, los mismos que se presentan en el Anexo F:

Numero de Registro	
113	3458
1472	5479
2173	5585
2185	6032
2501	6708
3097	

TABLA 8. Resultados de selección en base a criterio RANDOM

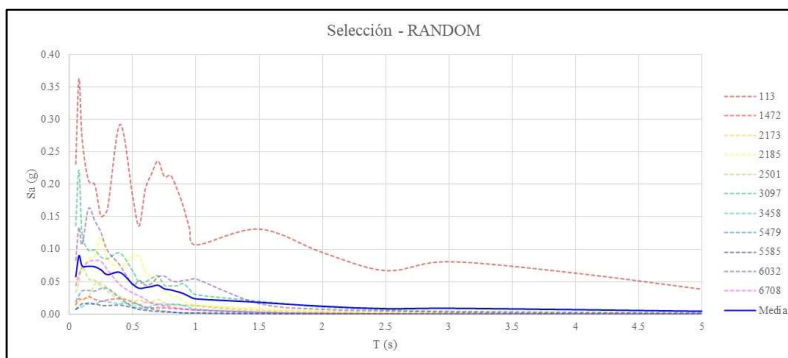


FIGURA 10. Espectros de respuesta para selección considerando RANDOM

3.5 ESCALAMIENTO DE REGISTROS

Del procedimiento establecido en la sección 3.4, obtuvieron 35 diferentes pares de registros. Los registros seleccionados por los 4 métodos son escalados en base al periodo objetivo (FST*) de 2 segundos, procedimiento descrito en la sección 2.4.1. El valor de $S_{a_{obj}}$ para todos los casos es igual a 0.077g, y el valor de la aceleración del espectro de respuesta $S_{a_{resp}}$ se obtiene del espectro RotD50. Con esto los factores de escala calculados son los siguientes:

CMS		UHS		EPSILON		RANDOM	
FST*	Numero de Registro	FST*	Numero de Registro	FST*	Numero de Registro	FST*	Numero de Registro
0.8277	2	0.8277	2	0.7373	1	0.8174	113
1.2774	14	1.1177	6	0.7651	15	48.3063	1472
1.3955	37	1.2629	12	0.6036	18	22.7324	2173
0.9286	162	1.2774	14	0.7802	107	22.7324	2185
0.9485	334	1.3955	37	0.7145	116	36.8048	2501
1.4848	350	0.9286	162	0.5992	148	6.9009	3097
1.6205	351	0.9485	334	0.5995	152	51.5267	3458
0.9988	352	0.7035	341	0.6247	156	137.3629	5479
0.8347	484	0.8347	484	0.7035	341	166.2079	5585
0.7865	4775	1.0850	2056	0.6111	2053	10.4446	6032
1.0804	4784	0.7865	4775	0.7865	4775	55.2071	6708

TABLA 9. Factores de escala (FST*) para cuatro métodos

Estos factores son aplicados a los registros en ambas direcciones, para visualizar el efecto del factores de escala, se grafica los espectros de respuesta RotD50 escalados, donde se observa que todos los espectros tienen el mismo valor para $S_a(2s)$.

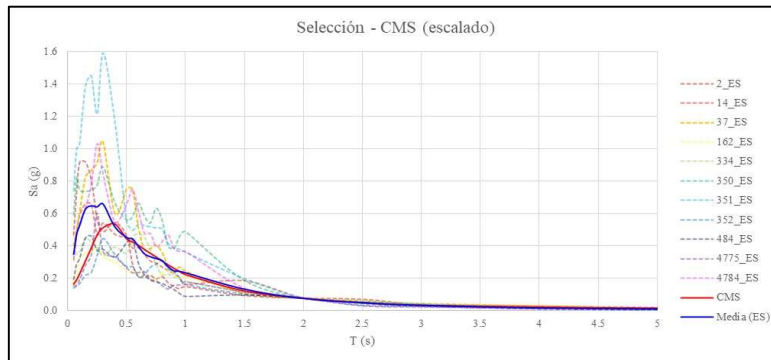


FIGURA 11. Espectros de respuesta para selección considerando CMS – Registros Escalados

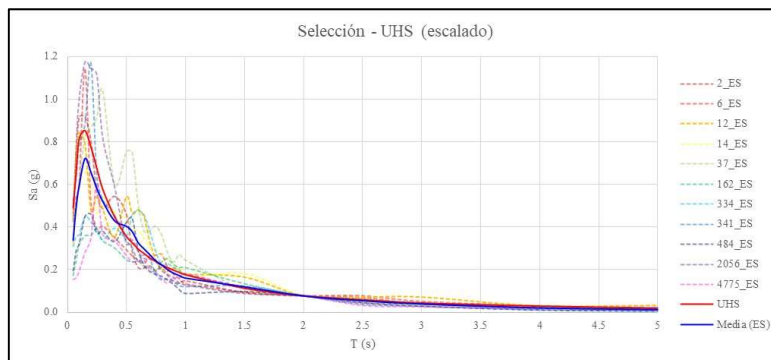


FIGURA 12. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados

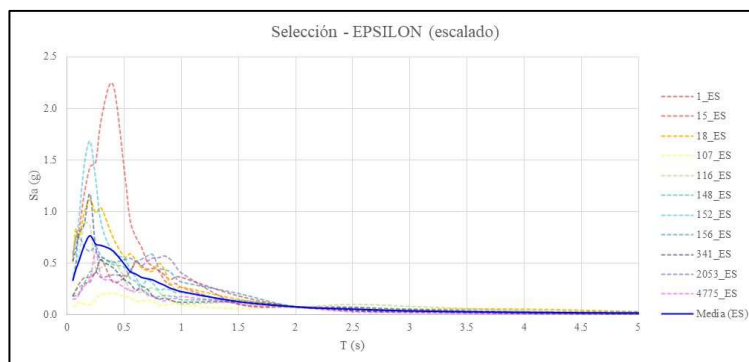


FIGURA 13. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON – Registros Escalados

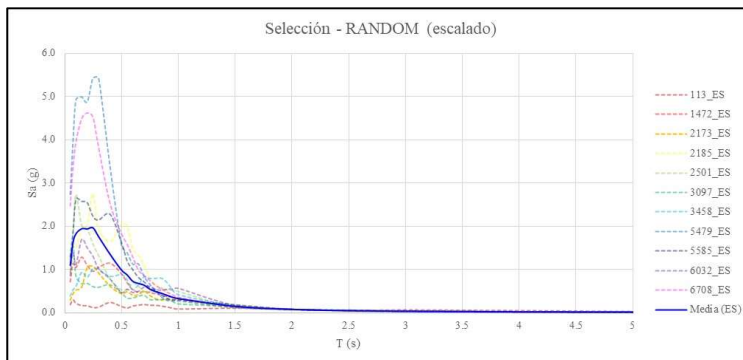


FIGURA 14. Espectros de respuesta para selección considerando RANDOM – Registros Escalados

Los registros escalados se encuentran en el Anexo G, no obstante se presenta un ejemplo del registro número 1, para sus dos direcciones, con un factor de escala de 0.828:

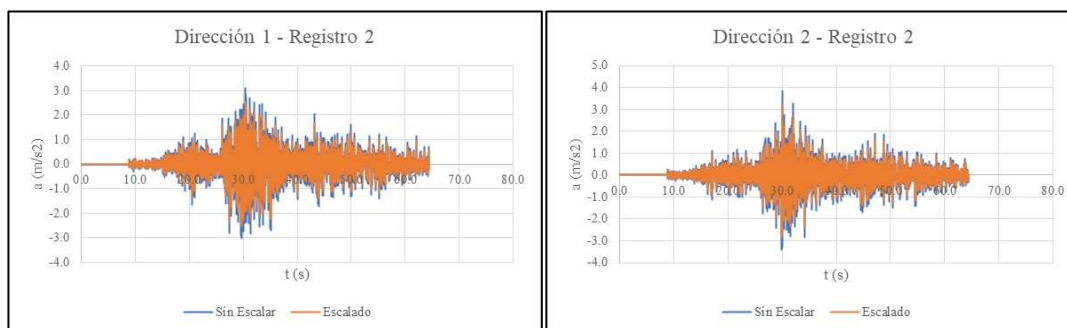


FIGURA 15. Acelerograma registro número 2 dirección 1 y 2 – Escalado

3.6 EFECTO DEL SUELO

Para considerar el efecto del suelo en los registros escalados, de la sección 3.5, se propaga las ondas sísmicas desde la roca hasta el nivel del suelo. En este caso, y debido a que la estratigrafía del suelo está compuesta de múltiples capas, se utiliza el software DEGTRA, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. DEGTRA se utilizó tanto para la definición de la Función de Transferencia (FT), como para el cálculo de la propagación en los registros. La FT fue calibrada de forma que, al variar el espesor de las capas de suelo, la frecuencia predominante de la función de transferencia sea igual a la frecuencia fundamental del suelo de aproximadamente 0.8hz. Con esto la FT obtenida es la siguiente:

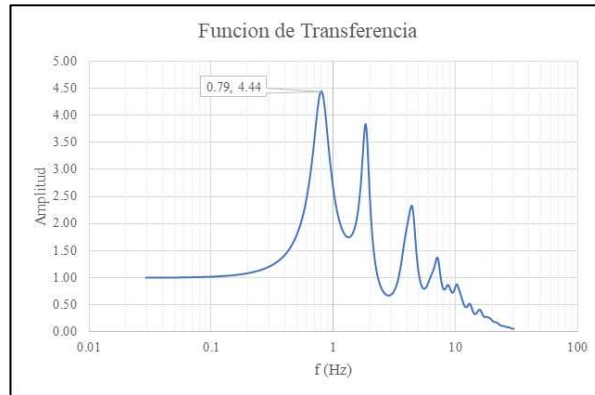


FIGURA 16. Función de Transferencia para lugar en análisis

Dependiendo del contenido de frecuencias de los registros seleccionados, la señal sísmica se vio incrementada o reducida. Un ejemplo del resultado de la propagación se presenta para el registros número 2.

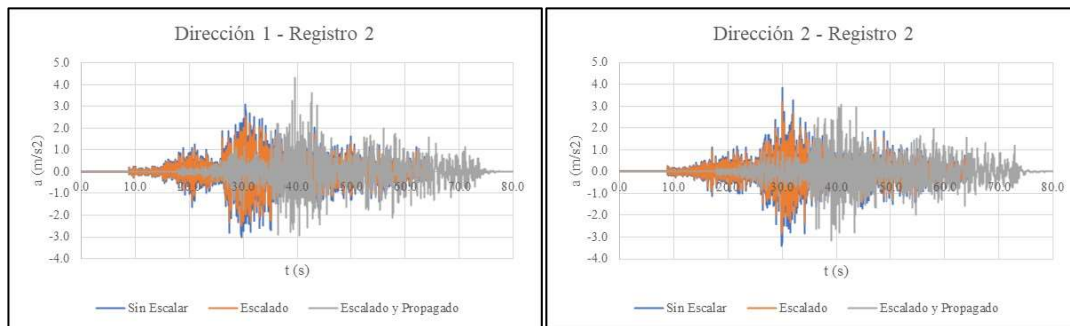


FIGURA 17. Acelerograma registro número 2 dirección 1 y 2 – Escalado y Propagado

Todos los registros seleccionados fueron propagados para considerar el efecto del suelo y se encuentran en el Anexo H. Los espectros de respuesta RotD50 para los registros escalados y propagados son los siguientes:

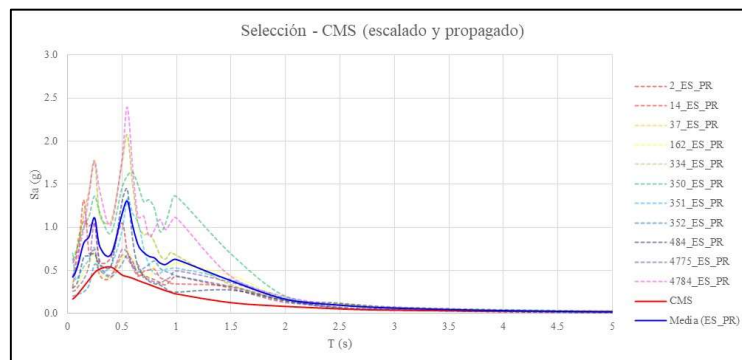


FIGURA 18. Espectros de respuesta para selección considerando CMS – Registros Escalados y Propagados

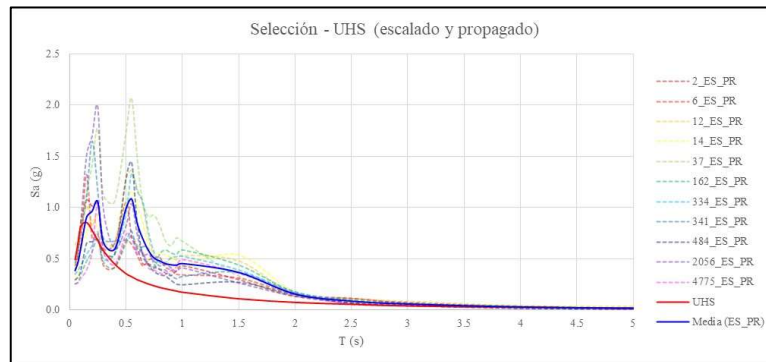


FIGURA 19. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados y Propagados

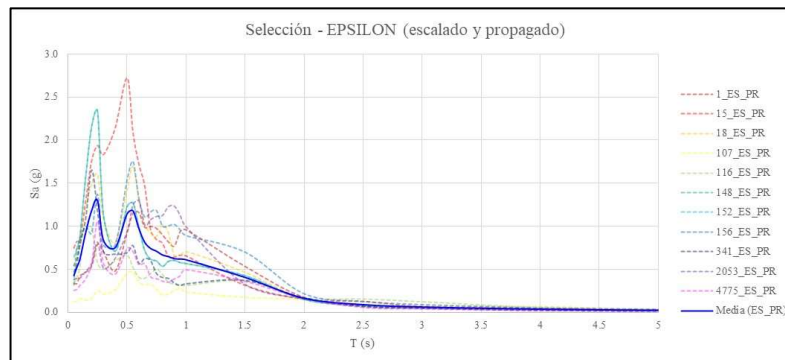


FIGURA 20. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON – Registros Escalados y Propagados

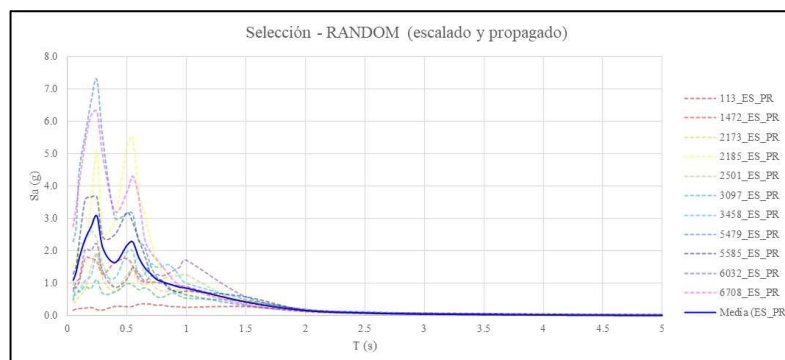


FIGURA 21. Espectros de respuesta para selección considerando RANDOM – Registros Escalados y Propagados

3.7 ESPECTROS DE SITIO

Del procedimiento aplicado en las secciones anteriores se obtienen los valores medios de los espectros RotD50, para los registros seleccionados en base los 4 criterios antes descritos,

los cuales fueron escalados a un periodo de 2 segundos y propagados en base a la información del sitio. Con esto, se obtiene los “*espectros de sitio*”, los cuales son espectros que representan las características de 4 métodos de selección antes descritos (UHS, CMS, ϵ y Random), y los que se utilizaran para la selección final de los 11 pares de registros y el escalado en base los establecido en la norma ASCE. En la figura 22 se presentan los 4 espectros de sitio considerados, observándose que, los 4 espectros tienen un forma espectral muy parecida, con valores de aceleración a 2 segundos iguales, esto se debe al escalamiento realizado en la sección 3.5. Así mismo, se observa un valle aproximadamente a un periodo de 0.4s, la cual ocurre una vez que se propaga la onda por efectos del suelo. Se observa también que los espectros obtenidos mediante el criterio UHS, CMS y ϵ , son muy parecidos entre sí, siendo el mayor obtenido considerando épsilon. No se observa que el espectro en base al UHS es mayor que el del CMS, esto puede ser debido a que, el espectro UHS se definió en roca.

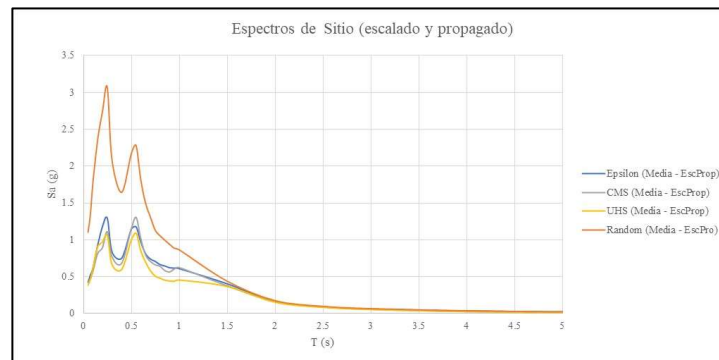


FIGURA 22. Espectros de sitio (respuestas medias después de escalar y propagar registros)

3.8 SELECCIÓN Y ESCALAMIENTO FINAL

Para la selección final, se volvió a utilizar el criterio SSE, no obstante esta vez se definieron los límites del error en base a los límites establecidos en la ASCE ($0.2T - 1.5T$). Los resultados obtenidos de la base de datos 7899 registros es la siguiente:

CMS		UHS		EPSILON		RANDOM	
SSE	Numero de Registro	SSE	Numero de Registro	SSE	Numero de Registro	SSE	Numero de Registro
1.7112	4	0.8693	1	0.7070	4	3.0688	4
2.0650	7	1.0349	4	0.8019	7	3.1153	7
2.1578	13	2.0067	7	1.9317	13	5.3157	18
1.5509	18	1.3057	18	1.1708	18	6.0969	101
2.1125	101	1.7617	101	1.6210	101	3.2566	149
0.7052	149	1.6807	150	1.5192	149	6.1441	153
1.3159	150	1.5528	152	1.5075	150	1.8590	154
1.3020	156	0.9115	155	0.6849	156	4.4778	156
1.6903	159	1.8358	156	1.8669	159	2.8937	159
2.3487	160	1.9631	158	1.9210	160	6.0933	160
2.3330	161	2.1601	160	1.7775	161	3.2160	161

TABLA 10. Resultados de SSE para CMS, UHS, ϵ y Random para espectros de sitio

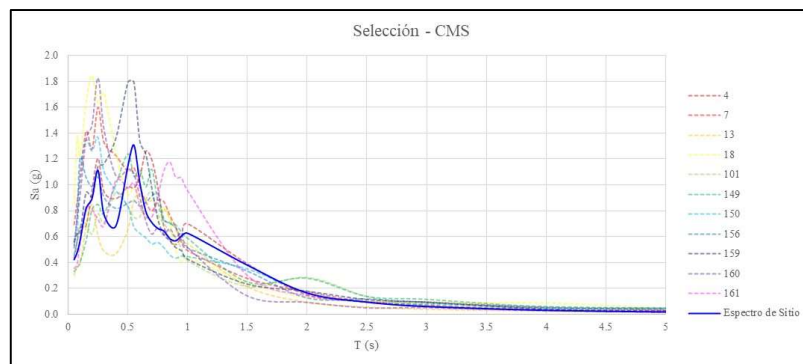


FIGURA 23. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio - CMS

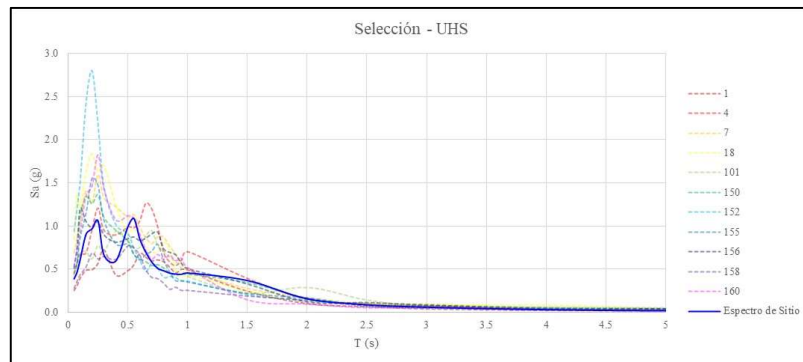


FIGURA 24. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio - UHS

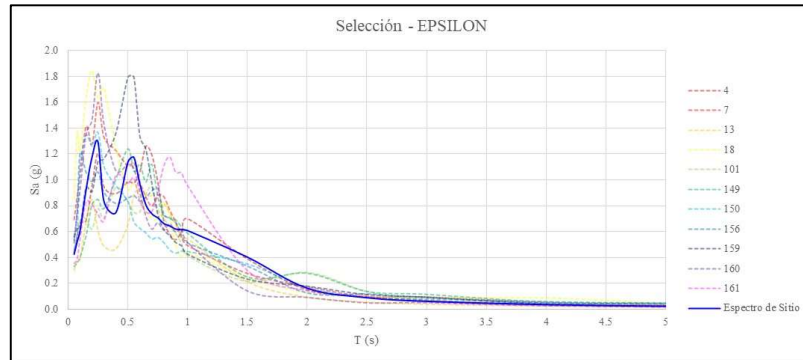


FIGURA 25. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio - EPSILON

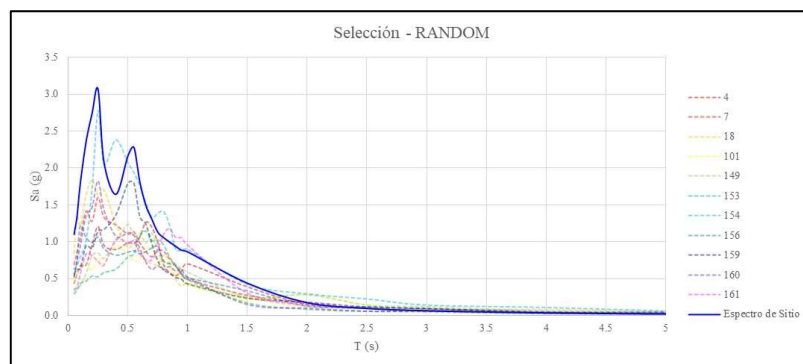


FIGURA 26. Espectros de respuesta para selección considerando Espectro de sitio - RANDOM

Los registros están disponibles en el Anexo I. Debido a la que la forma espectral de los espectros de sitio es parecida para los cuatro criterios, varios de los registros se repiten. Específicamente se obtuvieron 17 registros diferentes, y los 11 registros obtenidos para el caso CMS y EPSILON, son los mismos. Finalmente los registros seleccionados son escalados en base a lo establecido en la ASCE, en donde para el rango de periodos entre 0.2 y $1.5T$, el espectro RotD50 debe ser mayor al espectro de sitio. Los valores de escala son los siguientes, los cuales se aplicaron a cada uno de los 11 registros en sus dos direcciones; los espectros de respuesta escalados también se presentan a continuación:

CMS		UHS		EPSILON		RANDOM	
SF	Numero de Registro	SF	Numero de Registro	SF	Numero de Registro	SF	Numero de Registro
1.3376	4	2.0362	1	1.2047	4	2.3345	4
1.3744	7	1.1140	4	1.4625	7	2.0143	7
1.7874	13	1.3354	7	1.9020	13	2.3365	18
1.5693	18	1.5248	18	1.6699	18	3.0414	101
1.7625	101	1.7125	101	1.8755	101	2.1411	149
1.5118	149	1.6115	150	1.6087	149	2.7414	153
1.9349	150	1.8362	152	1.7428	150	1.1775	154
1.4890	156	1.7109	155	1.3412	156	2.5989	156
1.6391	159	1.2720	156	1.7442	159	2.0330	159
2.6480	160	1.9727	158	2.8178	160	3.0578	160
1.2849	161	2.5729	160	1.3532	161	2.2427	161

TABLA 11. Factores de escala para CMS, UHS, ϵ y Random para espectros de sitio

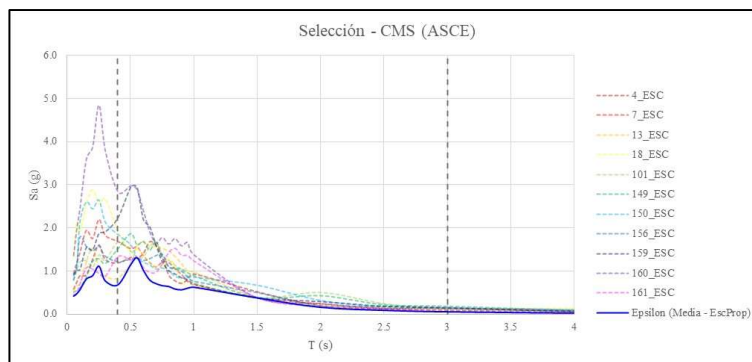


FIGURA 27. Espectros de respuesta para selección considerando CMS – Registros Escalados según ASCE

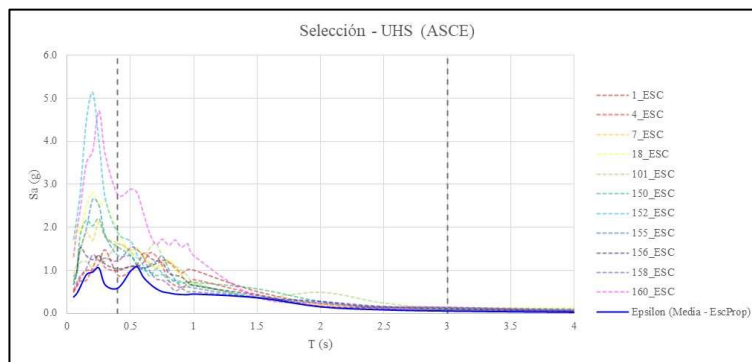


FIGURA 28. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados según ASCE

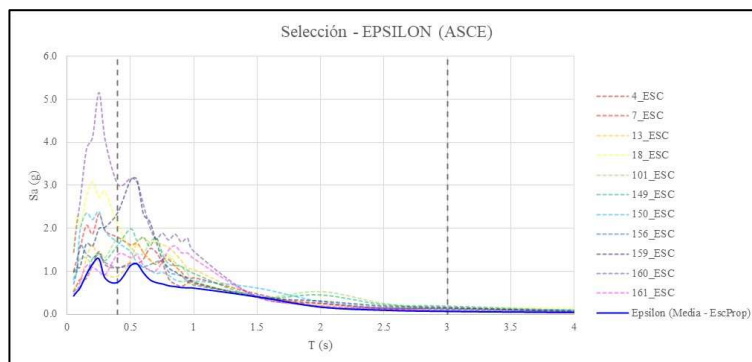


FIGURA 29. Espectros de respuesta para selección considerando EPSILON – Registros Escalados según ASCE

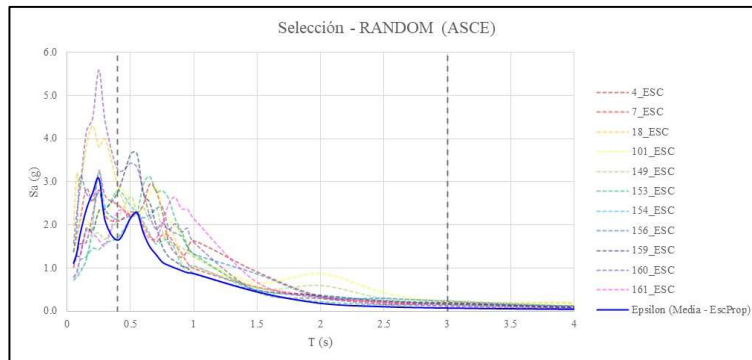


FIGURA 30. Espectros de respuesta para selección considerando UHS – Registros Escalados según ASCE

Los factores de escala obtenidos están entre 1.1 y 3.05. Se observa que, para el caso EPSILON se obtienen los menores factores de escala, y para el caso RANDOM, los mayores, esto es ocasionado debido a que la forma espectral del CMS se apega más a los espectro de respuesta de los 11 registros, esto también se puede apreciar en los resultados del SSE de la tabla 10, donde los mayores valores de SSE ocurren en el caso RANDOM. Los registros están disponibles en el Anexo J.

3.9 APLICACIÓN EN UN MODELO ESTRUCTURAL

Para considerar el efector de los registros seleccionados, se aplican en un modelo de una estructura existente, el cual tiene un periodo fundamta de $T=2$. El modelo considerado se basó en uno de los modelos estructural desarrollado en OpenSees, para la investigación de Torres-Rodas et al. (2021), en donde se describe una estructura de acero de 8 pisos, compuesta de pórticos resistentes a momento. La estructura, con todos sus detalles, se encuentra en el artículo científico antes mencionado, no obstante en esta sección se toman las vistas en planta y elevación para facilitar la visualización del modelo:

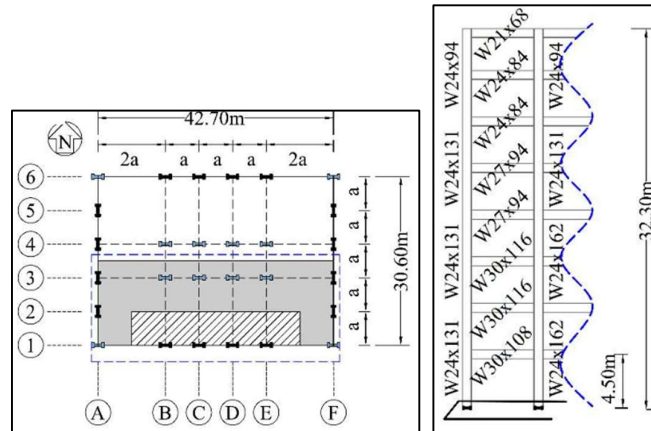


FIGURA 31. Vistas en planta y elevación del modelo estructural considerado (Torres-Rodas et al., 2021)

A esta estructura, se le aplicaron los 11 pare de registros, para cada uno de los casos en análisis, y se realizó un análisis no lineal tiempo historia. Los resultados obtenidos fueron los valores máximos absolutos de aceleración y deriva para cada uno de los pisos, y para cada uno de los registros. La totalidad de los resultados están disponibles en el Anexo K, en esta sección se presentan los valores máximos para cada piso.

CMS									
Dirección 1					Dirección 2				
Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro	Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro
1	1.88	150	2.50	101	1	1.82	160	2.02	13
2	1.64	7	2.14	101	2	2.16	160	1.48	13
3	1.52	18	1.77	101	3	2.29	160	1.45	160
4	1.57	18	1.70	101	4	2.17	160	1.69	160
5	1.54	7	1.74	7	5	1.93	160	1.54	13
6	1.61	150	1.72	149	6	1.99	160	2.06	101
7	1.94	18	2.33	149	7	2.42	160	2.32	101
8	1.70	18	2.54	149	8	1.69	160	2.29	159

TABLA 12. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso CMS

UHS									
Dirección 1					Dirección 2				
Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro	Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro
1	1.90	150	13.77	155	1	1.77	150	14.28	155
2	1.59	7	11.28	155	2	1.85	152	11.98	155
3	1.98	152	7.10	155	3	2.06	152	8.19	155
4	1.56	18	3.48	155	4	1.58	150	4.46	155
5	1.55	7	2.64	155	5	1.71	150	2.62	155
6	1.67	152	2.00	155	6	2.08	150	2.23	155
7	2.21	152	1.72	155	7	2.15	152	2.04	101
8	1.68	18	2.11	7	8	1.68	152	2.22	101

TABLA 13. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso UHS

EPSILON									
Dirección 1					Dirección 2				
Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro	Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro
1	1.70	150	2.62	101	1	1.92	160	3.10	160
2	2.10	160	2.24	101	2	2.27	160	2.32	160
3	1.75	18	1.84	10	3	2.43	160	1.85	160
4	1.59	160	1.75	160	4	2.24	160	1.69	160
5	1.83	160	1.83	160	5	1.88	160	1.67	101
6	1.71	160	2.18	160	6	2.10	160	2.17	101
7	2.01	18	2.41	149	7	2.45	160	2.40	101
8	1.78	160	3.00	160	8	1.88	160	2.50	159

TABLA 14. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso EPSILON

RANDOM									
Dirección 1					Dirección 2				
Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro	Piso	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Deriva Máxima (%)	Numero de Registro
1	2.02	18	2.83	153	1	1.68	18	36.59	156
2	1.92	18	2.21	153	2	2.03	18	32.76	156
3	1.65	156	1.85	149	3	2.20	18	25.73	156
4	1.81	154	1.97	156	4	1.74	18	13.95	156
5	1.69	149	2.18	153	5	2.12	156	5.65	156
6	1.77	156	2.29	153	6	1.81	18	4.16	156
7	2.40	18	2.48	149	7	1.80	18	3.60	156
8	1.91	18	2.63	156	8	1.76	156	3.01	156

TABLA 15. Resultados modelo estructural en aceleraciones y derivas máximas – Caso RANDOM

De los resultados obtenidos, los valores máximos para cada caso son los siguientes:

CASO	Aceleración Máxima (g)	Numero de Registro	Piso	Deriva (%)	Numero de Registro	Piso
CMS	2.42	160	7	2.54	149	8
UHS	2.21	152	7	14.28	155	1
EPSILON	2.45	160	7	3.10	160	1
RANDOM	2.40	18	7	36.59	156	1

TABLA 16. Resultados máximos en aceleraciones y derivas máximas

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Para el análisis y comparación de los resultados obtenidos del modelo estructural, se compararon los resultados de deriva máxima para cada uno de los casos. Se definió una deriva de 5%, como el límite para el que se consideraría una estructura ha sufrido colapso. Como se puede observar, de los valores máximos presentados en la tabla 16, la deriva máxima obtenida mediante el uso del CMS y EPSILON, son parecidas e inferiores a 5%. En el caso del CMS, se observa una deriva máxima de 2.54%, la cual ocurre en el piso 6, con la estructura sujeta al registro 149; para el caso EPSILON, la deriva máxima es de 3.1%, la cual ocurre en el piso 1 con el registro 160. En ambos casos, bajo el criterio de 5%, resultaría en un estructura sin colapso. En general, los resultados obtenido por estos dos métodos son parecido, esto debido a que existe una correlación entre la construcción del espectro objetivo CMS y la selección de registros mediante el cálculo de épsilon, en ambos casos épsilon es el parámetro fundamental considerado, esto también se ve reflejado en la selección de registros, ya que para los dos casos resultaron en los mismos. Así mismo, se observan que las aceleraciones máximas para el CMS y EPSILON los las mismas (2.4g), y ocurren en el mismos piso (piso 7) y bajo el mismo registro (registro numero 160).

Considerando ahora los resultaos obtenidos para los casos UHS y RANDOM, se observan derivas muy superiores al límite de 5%. En el caso UHS, la deriva máxima calculada fue de 14.28%, la cual ocurre en el piso 8 con el registro 149. Debido a la naturaleza del UHS, se esperaba resultados mayores a los obtenido mediante el criterio UHS y EPSILON, esto debido a que por definición el espectro UHS es mayor al espectro CMS y por la relación que existe entre el CMS y EPSILON, es también mayor a los resultados obtenidos de EPSILON. Finalmente, para el caso random, la deriva es aún mayor, 36.59%, la cual ocurre en el piso 1 en

el registro 156. Este valor puede ser resultado de la gran diferencia que existe entre los registros seleccionados al azar los cuales fueron utilizados para construir el espectro de sitio RANDOM, por lo que se requirieron factores de escala altos para cumplir con lo establecido en la ASCE, por lo que los registros seleccionados para RANDOM, fueron escalados por valor que incluso llegaron a 3. Tanto en el criterio UHS como RANDOM, la estructura resultaría en colapso. Es interesante observar también que las aceleraciones máximas para UHS y RANDOM, son similares a las obtenidas para CMS y EPSILON, evidenciado que no existe una clara correlación entre las aceleraciones y las derivas máximas obtenidas.

De los resultados obtenidos, se aprecia que, para la estructura modelada, en una revisión estructural en base a un análisis tiempo historia, considerar los criterios CMS y EPSILON, resultarían en una estructura sin colapso, mientras que realizar la revisión con registros seleccionados considerando el UHS o con un criterio al azar, resultarían en una estructura con colapso. Así mismo, lo variable de los resultados obtenidos del caso RANDOM pueden ser atribuidos a que, escoger registros de esta manera no produce un escenario representativo del riesgo sísmico de la ciudad de Samborondón, ya no considera las características del lugar, por lo que no es consistente con el riesgo obtenido del PSHA, a diferencia de los otros 3 métodos, los cuales se basan en los resultados del análisis probabilístico.

Se observa también que, tanto utilizando el UHS como el caso RANDOM existe una mayor variabilidad en los resultados, esto se puede apreciar mejor al obtener la desviación standard (SD) considerando las derivas máximas para todos los pisos en ambas direcciones.

CMS		UHS		EPSILON		RANDOM	
Dir. 1	Dir.2	Dir. 1	Dir.2	Dir. 1	Dir.2	Dir. 1	Dir.2
2.5	2.02	13.77	14.28	2.62	3.1	2.83	36.59
2.14	1.48	11.28	11.98	2.24	2.32	2.21	32.76
1.77	1.45	7.1	8.19	1.84	1.85	1.85	25.73
1.7	1.69	3.48	4.46	1.75	1.69	1.97	13.95
1.74	1.54	2.64	2.62	1.83	1.67	2.18	5.65
1.72	2.06	2	2.23	2.18	2.17	2.29	4.16
2.33	2.32	1.72	2.04	2.41	2.4	2.48	3.6
2.54	2.29	2.11	2.22	3	2.5	2.63	3.01
Media	1.956	5.758		2.223		8.993	
Desviación Estándar	0.365	4.638		0.443		11.802	

TABLA 17. Media y desviación estándar de los resultados máximos para los cuatro casos

La SD obtenida para UHS y RANDOM es mucho mayor a la de los casos CMS y EPSILON, estas dos últimas son muy parecidas entre sí. Esto evidencia que existe mayor variabilidad en los datos obtenidos para UHS y RANDOM. Así mismo, la media es mucho mayor en estos mismos casos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Del procedimiento antes descrito se puede concluir que, los resultados más altos, y que producirían colapso de la estructura en análisis, se originan de la selección de registros en base a un criterio RANDOM. Esto evidencia que, al seleccionar registros sin ningún criterio ingenieril, los valores que resultan son extremadamente altos, irreales y no se apegarían a la realidad del peligro sísmicos de la ciudad de Samborondón, descrito en el análisis PSHA, ocasionando colapso de la estructura. Esto también se ve reflejado en los factores de escala que se aplicaron en los registros, los cuales son mucho mayores a los de los otros criterios y lo que hacen que los espectros de respuestas tengan aceleraciones espectrales muy altas.

La selección de registros en base al CMS y UHS, se la realiza en base a la forma espectral de los registros, por lo que los factores de escala son mucho menores, y, debido a que para la selección de EPSILON, se tomó como referencia el valor para $T=2s$, los factores de escala también resultaron inferiores. Se observó también que los valores obtenidos del criterio UHS producirían colapso de la estructura, por lo que no sería un criterio aceptable para la selección de registros. Los resultados obtenidos para el UHS son mayores a los del CMS y EPSILON, debido a que, primero existe una correlación entre el CMS y el criterio EPSILON, ya que ambos utilizan el valor de ϵ , y que por definición el UHS es mayor que el CMS. Se observa también que, se obtiene una menor variabilidad en los datos al utilizar el CMS o EPSILON, ya que la desviación estándar de ambos es baja, mientras que en los criterios UHS y RANDOM, la desviación estándar es muy alta. Se puede concluir que, las mejores alternativas son las de seleccionar registros en base al criterio CMS y EPSILON. En ambos casos la deriva máxima se encuentra por debajo del 5%, por lo que no se presentaría colapso y en ambos casos,

la selección de los registros es consistente con la realidad sísmica de Samborondón, en base al PSHA considerado. Esto también se aprecia en los resultados obtenidos para la media y desviación estándar de los cuatro casos para deriva máxima. Los valores más bajos de media, 1.956, 2.223, y de desviación estándar, 0.365, 0.443, se producen para los casos CMS y EPSILON, respectivamente, los cuales son similares entre sí. Esto nos indica que, los resultados de CMS y EPSILON, son más consistentes entre sí, con menor variabilidad, algo esperado debido a la relación en la definición de CMS y EPSILON y el uso de un PSHA. Por otra parte, observando los resultados de la media y desviación estándar para UHS, 5.758 y 4.638 y para Random, 8.993 y 11.802, respectivamente, los valores más altos y una variabilidad más marcada ocurren para el caso RANDOM, con una desviación estándar de 11.802, algo esperado debido a que, como antes se mencionó, la selección de registros se la hace sin considerar un criterio físico o de sitio como es el uso de la información del riesgo sísmico contenido en el análisis PSHA.

Finalmente, es importante reconocer que, existe aún incertidumbre en cuanto a criterios para la selección de registros. De este trabajo se obtuvo que, considerando 4 criterios, en 2 la estructura colapsaría, por lo que es importante conocer las alternativas para la selección ya que todas son válidas, no obstante siempre se debe incluir en el análisis criterios que sean representativos del riesgo sísmico de la región o lugar en análisis.

5.2 RECOMENDACIONES

Una vez terminado este trabajo de titulación, se recomienda que, para futuras aplicaciones, se utilice, de ser disponible, un análisis PSHA, el cual considere modelos de atenuación similares a los considerados para la construcción del CMS. Así mismo, se recomienda que, si la información está disponible, utilizar una base de datos propia de la región de análisis, y dependiendo del tamaño de la base de datos se recomienda utilizar una

computadora de alta gama para correr los códigos de Matlab, ya que en una computadora regular, el procedimiento de selección, para cada criterio puede tardarse más de un día.

Debido a los resultados obtenidos, se recomienda que para una futura aplicación en la que se requiera seleccionar registros, se utilice el criterio CMS o EPSILON, no obstante, si se tiene la opción, el criterio EPSILON sería el seleccionado, debido a que para su aplicación, no se requiere la construcción de un espectro para realizar el *Spectral Matching*. Finalmente, debido a que en la actualidad no existe un criterio unificado para la selección de registros, se recomienda no considerar un criterio al azar para la selección de registros, ya que es muy probable que los registros seleccionados no representen la realidad del peligro sísmico del lugar.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *AASHTO LRFD bridge design specifications 9th edition*. American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://store.transportation.org/item/collectiondetail/202#:~:text=The%20AASHTO%20LRFD%20Bridge%20Design,of%20loads%20and%20structural%20performance.>
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures* (ASCE/SEI 7-16). American Society of Civil Engineers. <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784414248>
- Amirzehni E., Taiebat M., Finn L., & DeVall R. H. (2015) *Ground motion scaling/matching for nonlinear dynamic analysis of basement walls* [Conference paper]. 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Victoria, BC, Canada. https://www.researchgate.net/publication/281626792_GROUND_MOTION_SCALING_MATCHING_FOR_NONLINEAR_DYNAMIC_ANALYSIS_OF_BASEMENT_WALLS/citations
- Baker, J. W. (2011). Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 322–331. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000215](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000215)
- Baker, J. W., & Cornell, C. A. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9), 1077–1095. <https://doi.org/10.1002/eqe.571>
- Baker, J. W., & Lee, C. (2017). An Improved Algorithm for Selecting Ground Motions to Match a Conditional Spectrum. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(4), 708–723. <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1264334>
- Candia, G., Poulos, A., de la Llera, J. C., Crempien, J. G., & Macedo, J. (2020). Correlations of spectral accelerations in the Chilean subduction zone. *Earthquake Spectra*, 36(2), 788–805. <https://doi.org/10.1177/8755293019891723>
- Castro, S., Benavente, R., Crempien, J. G. F., Candia, G., & De la Llera, J. C. (2022). A Consistently Processed Strong-Motion Database for Chilean Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 93(5), 2700–2718. <https://doi.org/10.1785/0220200336>
- Challagulla, S. P., Bhavani, B. D., Suluguru, A. K., Jameel, M. & Vicencio, F. (2023). Influence of ground motion scaling on floor response spectra. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124(25), 928-937. <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/124/08/0928.pdf>
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2016). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5), 1853–1880. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0050-1>

- Lin, T., Haselton, C. B., & Baker, J. W. (2013). Conditional spectrum-based ground motion selection. Part I: Hazard consistency for risk-based assessments. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(12), 1847–1865. <https://doi.org/10.1002/eqe.2301>
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 901–911. <https://doi.org/10.1785/0120160221>
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Erratum to Ground-Motion Prediction Equation for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2541–2541. <https://doi.org/10.1785/0120170189>
- Nguyen, X. D., Nguyen, V., & Duc, V. (2023). IMPROVED PROCEDURE FOR SPECTRAL ACCELERATION MATCHING IN DIFFERENT EARTHQUAKE SCENARIOS. *Journal of Science and Technique*, 5(2). <https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v3.n02.546>
- Stamatovska, S., Nastev, M. & Petrovski, D. (2006). *Uniform Hazard Spectra* [Conference paper]. First European Conference of Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper No. 235. https://www.researchgate.net/publication/314066177_UNIFORM_HAZARD_SPECTRA
- Torres-Rodas, P., Flores, F. X., Pozo, S. P., & Astudillo, X. B. (2021). Seismic performance of steel moment frames considering the effects of column-base hysteretic behavior and gravity framing system. *Structural Safety*, 144, 106654. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106654>
- Whittaker, A., Atkinson, G., Baker, J., Bray, J., Grant, D., Hamburger, R., Haselton, C., Somerville, P. (2011). *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses*. Grant/Contract Reports (NISTGCR)-11-917-15, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. MATLAB script para el cálculo del espectro de media condicional	55
ANEXO B. Registros sísmicos seleccionados utilizando el CMS y UHS como espectro objetivo.....	66
ANEXO C. MATLAB script para el cálculo del Suma de Errores Cuadrados (SSE) y selección de registros	71
ANEXO D. Registros sísmicos seleccionados utilizando EPSILON	78
ANEXO E. MATLAB script para el cálculo y selección en base a epsilon	81
ANEXO F. Registros sísmicos seleccionados utilizando RANDOM.....	84
ANEXO G. Registros sísmicos seleccionados escalados considerando criterios CMS, UHS. EPSILON y RANDOM.....	87
ANEXO H. Registros sísmicos seleccionados escalados y propagados considerando criterios CMS, UHS. EPSILON y RANDOM	97
ANEXO I. Registros sísmicos seleccionados considerando espectros de sitio para CMS, UHS. EPSILON y RANDOM.....	107
ANEXO J. Registros sísmicos escalados considerando ASCE para CMS, UHS. EPSILON y RANDOM	117
ANEXO K. Resultados del modelo en OpenSees, para CMS, UHS. EPSILON y RANDOM	127

ANEXO A: MATLAB SCRIPT PARA EL CÁLCULO DEL ESPECTRO DE MEDIA CONDICIONAL

Código para el computo del CMS. Como se observa se puede elegir entre la GMPE de Montalva o de Idini.

```

clc;clear;close all;format short
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Datos de Entrada

```

%% Periodo Condicional (T_select)
%% Periodo condicional alrededor del que se va a construir el CMS

T_select=2; %[s]

%% Información del lugar y del evento
Mw=7.7;      % Momento Magnitud
R_rup=120;   % Distancia a la ruptura [km]
epsilon=1.2; % Número de desviaciones estándar sobre/debajo de la media
del
                % movimiento sísmico predichi (dado por Mw y Rrup)
H=50;        % Distancia al hipocentro [km]
Vs30=224.5;  % Velocidad de onda de corte [m/s]
T_site=1.25; % Periodo predominante del sitio [s], si no se conoce T_site=0
F_FABA=0;    % Fore-arc-to-back-ark model scalin: 1 = back-ark
                %                                0 = fore-arc or unknown

sites
Feve=0;      % Tipo de sismo 0 = interface
                %                                1 = intraslab
GMPE='M';    % Modelos de atenuacion (GMPE): M = Montalva et al. 2017
                %                                I = Idini et al. 2017
RHO='C';     % Correlacion para epsilon: B = Baker, 2011
                %                                C = Candia et al., 2020

%% Spectro de Peligro Uniforme (UHS)
% Datos del UHS, se requiere ingresar tanto los periodos con sus
correspondientes aceleraciones espectrales Sa

TUHS=[0.01 0.05 0.07 0.10 0.15 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00
1.20 1.40 1.60 1.80 2.00 2.20 2.40 2.60 2.80 3.00 3.20 3.40 3.60 3.80 4.00
4.20 4.40 4.60 4.80 5.00]'; %[s]

SaUHS=[0.35305 0.49098 0.62611 0.81424 0.85296 0.77629 0.57828 0.449 0.35659
0.29702 0.25508 0.22157 0.19777 0.176 0.14855 0.12191 0.10367 0.090872 0.07729

```



```
legend({'CMS', 'UHS'}, "Location", "bestoutside");
```

Se presentan también las funciones utilizadas, en la función CMS, se puede considerar el tipo de Factor de correlación :

```
function
[ Sa_CMS_idini, Sa_CMS_montalva ] = CMS(T_selec, T, TUHS, Sa_UHS, Mw, R_rup, H, Vs30, T_site, F_FABA, Feve, RHO)
% Step 1: Determine the target Sa at a given T and the associate M, R and
% epsilon
for i=1:1:size(TUHS,1)
    if T_selec==TUHS(i,1)
        index_UHS=i;
        break
    else
        end
end
Sa_T_selec=Sa_UHS(index_UHS,1); %[g]

%Step 2: Compute de Mean and Standar Deviation of the response spectrum,
%given M and R
[mean_lnSa_MRT_idini, SD_lnSa_MRT_idini]=Idini_GMPE(T, Mw, R_rup, H, Vs30, T_site, F_FABA, Feve);
[mean_lnSa_MRT_montalva, SD_lnSa_MRT_montalva]=Montalva_GMPE(T, Mw, R_rup, H, Vs30, Feve, F_FABA);

% Estimate Epsilon
for i=1:1:size(T,1)
    if T_selec==T(i,1)
        index_epsilon=i;
        break
    else
        end
end
epsilon_idini=(log(Sa_T_selec)-
mean_lnSa_MRT_idini(index_epsilon,1))/SD_lnSa_MRT_idini(index_epsilon,1);
epsilon_montalva=(log(Sa_T_selec)-
mean_lnSa_MRT_montalva(index_epsilon,1))/SD_lnSa_MRT_montalva(index_epsilon,1)
;

%Step 3: Compute epsilon at other periods, given epsilon*
Ti=T;
T_=T_selec;
rho_TiT_=zeros([size(T,1),1]);
if RHO=='B'
    for i=1:1:size(T,1)
```

```

    T_min=min(Ti(i,1),T_);
    T_max=max(Ti(i,1),T_);
    if T_min<0.189
        I=1;
    else
        I=0;
    end
    rho_TiT_(i,1)=1-cos(pi/2-
(0.359+0.163*I*log(T_min/0.189))*log(T_max/T_min));
    end
else
    % Candia 2019
    rho_TiT_ = corr_Candia2019(T_,Ti,Feve);
end

%Step 4: Compute CMS
Sa_CMS_idini=zeros([size(T,1),1]);
Sa_CMS_montalva=zeros([size(T,1),1]);
for i=1:1:size(T,1)
    Sa_CMS_idini(i,1)=exp(mean_lnSa_MRT_idini(i,1)+
rho_TiT_(i,1)*epsilon_idini*SD_lnSa_MRT_idini(i,1));
    Sa_CMS_montalva(i,1)=exp(mean_lnSa_MRT_montalva(i,1)+
rho_TiT_(i,1)*epsilon_montalva*SD_lnSa_MRT_montalva(i,1));
end
end

```

```

function
[mean_lnSa_MRT,SD_lnSa_MRT]=Idini_GMPE(T,Mw,R_rup,H,Vs30,T_site,Feve)

ho=50; %[m]
Mr=5; %[grados]
Vref=1530; %[m/s]

if T_site>0&&T_site<=0.2
    index=1;
else
    if T_site>0.2&&T_site<=0.4
        index=2;
    else
        if T_site>0.4&&T_site<=0.8
            index=3;
        else
            if T_site>0.8
                index=4;
            else
                index=5;
            end
        end
    end
end

```

```

end
end
end
end

T_GMPE=[0 0.01 0.02 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.4 0.5 0.75 1 1.5 2
3 4 5 7.5 10]';
c1=[-2.8548 -2.8424 -2.8337 -2.8235 -2.7358 -2.6004 -2.4891 -2.6505 -3.0096 -
3.3321 -3.5422 -3.3985 -2.8041 -4.4588 -5.3391 -6.1204 -7.0334 -8.2507 -8.7433
-8.9927 -9.8245 -9.8671]';
c2=[0.7741 0.8052 0.8383 0.8838 0.9539 0.9808 0.9544 0.9232 0.9426 0.9578
0.9441 0.7773 0.5069 0.8691 1.0167 1.1005 1.2501 1.4652 1.4827 1.463 1.6383
1.5877]';
c3=[-0.97558 -1.02993 -1.08567 -1.15951 -1.2864 -1.34644 -1.32353 -1.17687 -
1.04508 -0.94363 -0.84814 -0.69278 -0.57899 -0.56887 -0.53282 -0.46263 -
0.40594 -0.33957 -0.26479 -0.22333 -0.30346 -0.33771]';
c_4=0.1;
c5=[-0.00174 -0.00175 -0.00176 -0.00176 -0.00178 -0.00181 -0.00182 -0.00183 -
0.00182 -0.00178 -0.00173 -0.00166 -0.00161 -0.00158 -0.00154 -0.00145 -
0.00139 -0.00137 -0.00137 -0.00137 -0.00131 -0.00117]';
c_6=5;
c_7=0.35;
c8=[0.00586      0.00584      0.00583      0.00586      0.00621      0.00603
      0.00571      0.0056 0.00573 0.00507 0.00428 0.00308 0.00257 0.00135
0.00045 0.00068 0.00051 0.00066 0.00063 0.00067 0.00108 0.00014]';
c9=[-0.03958 -0.04135 -0.04325 -0.04595 -0.05033 -0.05225 -0.0506 -0.04879 -
0.05034 -0.05143 -0.05052 -0.03885 -0.01973 -0.04179 -0.04999 -0.05426 -
0.06356 -0.07797 -0.07863 -0.07638 -0.0862 -0.08168]';
dc1=[2.5699 2.737 2.9087 3.0735 3.2147 3.0851 2.8091 2.626 2.6063 2.3654
2.2017      1.6367 0.7621 2.1003 2.561 2.8923 3.3941 4.0033 3.9337 3.7576
4.3948 4.3875]';
dc2=[-0.4761 -0.5191 -0.564 -0.6227 -0.7079 -0.7425 -0.7055 -0.627 -0.5976 -
0.582 -0.5412 -0.3448 -0.0617 -0.4349 -0.5678 -0.5898 -0.7009 -0.8465 -0.8134
-0.7642 -0.9313 -0.8892]';
dc3=[-0.52745 -0.50466 -0.48043 -0.4249 -0.31239 -0.17995 -0.13208 -0.26451 -
0.39105 -0.34348 -0.36695 -0.46301 -0.54098 -0.46266 -0.42314 -0.58519 -
0.65999 -0.79004 -0.86545 -0.88735 -0.91259 -0.96363]';
%sigmae=[0.172 0.173 0.176 0.178 0.19 0.213 0.195 0.16 0.157 0.142 0.141
0.157 0.152 0.146 0.153 0.152 0.157 0.155 0.16 0.167 0.164 0.176]';
%sigmar=[0.232 0.231 0.233 0.235 0.241 0.251 0.255 0.255 0.268 0.264 0.26
0.263 0.261 0.252 0.247 0.246 0.245 0.231 0.228 0.232 0.231 0.204]';
sigmat=[0.289 0.288 0.292 0.295 0.307 0.329 0.321 0.302 0.31 0.299 0.296
0.306 0.302 0.291 0.29 0.289 0.291 0.279 0.279 0.286 0.283 0.27]';

st=[-0.584 -0.523 -0.459 -0.39 -0.306 -0.351 -0.524 -0.691 -0.671 -0.584 -
0.506 -0.386 -0.3 -0.276 -0.275 -0.249 -0.218 -0.18 -0.171 -0.168 -0.168 -
0.168,

```

```

    -0.322 -0.262 -0.208 -0.16 -0.088 -0.056 -0.087 -0.336 -0.547 -0.674 -
    0.73 -0.718 -0.635 -0.395 -0.254 -0.238 -0.231 -0.219 -0.218 -0.218 -
    0.218,
    -0.109 -0.1 -0.092 -0.085 -0.075 -0.069 -0.07 -0.095 -0.127 -0.178 -0.258
    -0.423 -0.537 -0.575 -0.462 -0.3 -0.22 -0.21 -0.212 -0.203 -0.153 -0.125,
    -0.095 -0.092 -0.089 -0.088 -0.09 -0.096 -0.113 -0.166 -0.209 -0.235 -
    0.234 -0.164 -0.11 -0.358 -0.67 -0.801 -0.746 -0.628 -0.531 -0.438 -0.256 -
    0.231,
    -0.212 -0.193 -0.177 -0.164 -0.146 -0.141 -0.156 -0.245 -0.359 -0.444 -
    0.491 -0.535 -0.557 -0.599 -0.584 -0.522 -0.479 -0.461 -0.448 -0.439 -0.435 -
    0.435]';

c_1=fact_vect(T,T_GMPE,c1);
c_2=fact_vect(T,T_GMPE,c2);
c_3=fact_vect(T,T_GMPE,c3);
c_5=fact_vect(T,T_GMPE,c5);
c_8=fact_vect(T,T_GMPE,c8);
c_9=fact_vect(T,T_GMPE,c9);
dc_1=fact_vect(T,T_GMPE,dc1);
dc_2=fact_vect(T,T_GMPE,dc2);
dc_3=fact_vect(T,T_GMPE,dc3);
%sigma_e=fact_vect(T,T_GMPE,sigmae);
%sigma_r=fact_vect(T,T_GMPE,sigmar);
sigma_t=fact_vect(T,T_GMPE,sigmat);
St=fact_vect(T,T_GMPE,st(:,index));

mean_lnSa_MRT=zeros(size(T,1),1);
SD_lnSa_MRT=zeros(size(T,1),1);

for i=1:1:size(T,1)
    if Feve==0
        dfm=c_9(i,1)*Mw^2;
    else
        dfm=dc_1(i,1)+dc_2(i,1)*Mw;
    end
    FF_MwHFeve=c_1(i,1)+c_2(i,1)*Mw+c_8(i,1)*(H-ho)*Feve+dfm;
    Ro=(1-Feve)*c_6*10^(c_7*(Mw-Mr));
    g=c_3(i,1)+c_4*(Mw-Mr)+dc_3(i,1)*Feve;
    FD_RMwFeve=g*log10(R_rup+Ro)+c_5(i,1)*R_rup;
    Fs=St(i,1)*log10(Vs30/Vref);

    Sa=zeros(size(T,1));
    Sa(i,1)=10^(FF_MwHFeve+FD_RMwFeve+Fs);
    mean_lnSa_MRT(i,1)=log(Sa(i,1));
    SD_lnSa_MRT(i,1)=sigma_t(i,1);
end
end

```

```

function [mean_lnSa_MRT,SD_lnSa_MRT]=
Montalva_GMPE(T,Mw,R_rup,H,Vs30,Feve,F_FABA)

T_GMPE=[0.00 0.02 0.05 0.075 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.40 0.50 0.60 0.75
1.00 1.50 2.00 2.50 3.00 4.00 5.00 6.00 7.50 10.00]';
theta1=[5.87504 5.97631 7.45297 8.04760 7.76085 6.17192
4.83403 4.42688 4.57009 3.98311 4.86034 4.67510
4.30862 3.57339 2.92216 2.39780 1.64148 1.66483
0.90565 0.61234 0.32672 -0.24140 -0.96314]';
theta4=[0.80277 0.84132 1.03131 1.03437 1.07565 1.17061
1.20531 1.37607 1.34991 1.37954 1.51950 1.66663
1.85625 1.81217 2.03469 2.04340 1.88987 1.90504
1.71178 1.59359 1.69184 1.71126 1.6716]';
theta5=[-0.33487 -0.28055 -0.03954 -0.01295 0.00758 0.10491
0.17968 0.22912 0.15593 0.11671 0.18348 0.21968
0.29783 0.24372 0.22521 0.27383 0.18740 0.13268
0.01380 0.06465 0.32368 0.60252 0.77621]';
theta2=[-1.75360 -1.77011 -2.03336 -2.10610 -1.99371 -1.58654
-1.29711 -1.18774 -1.24896 -1.13377 -1.38020 -1.35362
-1.30800 -1.23082 -1.18750 -1.16319 -1.06544 -1.12678
-1.07620 -1.13080 -1.15734 -1.14070 -1.09295]';
theta3=[0.13125 0.12246 0.08332 0.08013 0.07303 0.05482
0.05250 0.02995 0.03866 0.04683 0.03822 0.02524
0.00995 0.03605 0.02769 0.04011 0.08310 0.09404
0.13838 0.15259 0.12421 0.10951 0.11344]';
theta6=[-0.00039 -0.00039 0.00000 -0.00010 -0.00079 -0.00268
-0.00338 -0.00355 -0.00245 -0.00208 -0.00002 0.00000
0.00000 0.00000 -0.00010 -0.00033 -0.00121 -0.00088
-0.00062 0.00000 0.00000 0.00000 0]';
theta14=[-0.73080 -0.73869 -0.69849 -0.65336 -0.55051 -
0.42997 -0.53088 -0.58086 -0.66281 -0.72244 -0.79644 -
0.90120 -0.89829 -0.87331 -0.94686 -0.90845 -0.80518 -
0.81689 -0.87331 -0.87800 -0.88436 -0.98803 -1.05008]';
theta10=[4.53143 4.57416 4.56071 4.36639 3.90923 3.06236
3.50113 3.62816 3.87634 4.03388 4.31418 4.75197
4.70452 4.56020 4.83343 4.59029 4.13415 4.18978
4.50907 4.56386 4.55837 5.08282 5.49692]';
theta11=[0.00567 0.00565 0.00848 0.00922 0.00630 0.00559
0.00320 0.00182 0.00213 0.00069 0.00065 0.00087
-0.00031 -0.00101 0.00010 0.00109 0.00035 0.00073
0.00084 0.00068 0.00137 0.00167 -0.00070]';
theta12=[1.01495 1.03738 1.31034 1.48158 1.65619 1.93944
2.08901 2.25003 2.28339 2.31409 2.33333 2.23422
2.05217 1.63506 0.69338 -0.09762 -0.34932 -0.33270
-0.41321 -0.42395 -0.38760 -0.32638 -0.25811]';

```

```

%tau=[0.47462  0.47632  0.53776  0.56188  0.52707  0.50642
      0.44619  0.45040  0.42549  0.42945  0.43334  0.44599
      0.46723  0.50143  0.51633  0.50688  0.51465  0.50365
      0.45311  0.43900  0.42084  0.41701  0.38872]';
%phis2s=[0.56436 0.57188  0.57850  0.59937  0.63410  0.63022
          0.61699  0.58609  0.57014  0.54796  0.49113  0.49078
          0.48213  0.45955  0.42573  0.40179  0.39825  0.38493
          0.35579  0.34991  0.32048  0.29895  0.28454]';
%phis=[0.39903 0.40261  0.39720  0.38824  0.38365  0.39930
        0.41782  0.43277  0.44123  0.45157  0.45476  0.45219
        0.45553  0.43828  0.42297  0.40377  0.38489  0.37384
        0.37020  0.37674  0.37173  0.36349  0.36173]';
sigma=[0.83845 0.84618  0.88409  0.90867  0.90944  0.90171
        0.86853  0.85654  0.83713  0.82982  0.79737  0.80265
        0.81134  0.80914  0.79168  0.76249  0.75605  0.73593
        0.68480  0.67609  0.64653  0.62881  0.60243]';
theta7=[1.09880 1.09880  1.25360  1.41750  1.39970  1.35820
        1.16480  0.99400  0.88210  0.70460  0.57990  0.50210
        0.36870  0.17460  -0.0820  -0.2821  -0.4108  -0.4466
        -0.4344  -0.4368  -0.4586  -0.4433  -0.4828]';
theta8=[-1.420 -1.420-1.650-1.800-1.800-1.690-1.490-1.300-1.180-0.980-
0.820 -0.700-0.540-0.340-0.0500.12000  0.25000  0.30000  0.30000
        0.30000  0.30000  0.30000  0.3]';
theta15=[0.99690 0.99690  1.10300  1.27320  1.30420  1.26000
         1.22300  1.16000  1.05000  0.80000  0.66200  0.58000
         0.48000  0.33000  0.31000  0.30000  0.30000  0.30000
         0.30000  0.30000  0.30000  0.30000  0.3]';
theta16=[-1.000 -1.000-1.180-1.360-1.360-1.300-1.250-1.170-1.060-0.780-
0.620 -0.500-0.340-0.1400  0 0 0 0 0 0 0]';
theta9=[0.40000 0.40000  0.40000  0.40000  0.40000  0.40000
        0.40000  0.40000  0.40000  0.40000  0.40000  0.40000
        0.40000  0.40000  0.40000  0.40000  0.40000  0.40000
        0.40000  0.40000  0.40000  0.40000  0.4]';
dC1interface=[0.20000 0.20000  0.20000  0.20000  0.20000
              0.20000  0.20000  0.20000  0.20000  0.14400  0.10000
              0.07400  0.04200  0.00000  -0.058-0.100-0.155-0.200-0.200-
0.200 -0.200-0.200-0.200]';
dC1inslab=[-0.300 -0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-
0.300 -0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-0.300-
0.300 -0.300]';
Vlin=[865.10000 865.10000  1053.50000  1085.70000  1032.50000  877.60000
      748.20000  654.30000  587.10000  503.00000  456.60000  430.30000
      410.50000  400.00000  400.00000  400.00000  400.00000  400.00000
      400.00000  400.00000  400.00000  400.00000  400]';
b=[-1.186 -1.186-1.346-1.471-1.624-1.931-2.188-2.381-2.518-2.657-2.669-
2.599 -2.401-1.955-1.025-0.2990  0 0 0.00000  0.00000
      0.00000  0]';

```

```

n=[1.18000 1.18000      1.18000      1.18000      1.18000      1.18000
    1.18000      1.18000      1.18000      1.18000      1.18000      1.18000
    1.18000      1.18000      1.18000      1.18000      1.18000      1.18000
    1.18000      1.18000      1.18000      1.18000      1.18]';
c=[1.88000 1.88000      1.88000      1.88000      1.88000      1.88000
    1.88000      1.88000      1.88000      1.88000      1.88000      1.88000
    1.88000      1.88000      1.88000      1.88000      1.88000      1.88000
    1.88000      1.88000      1.88000      1.88000      1.88]';
C4=[10.00000 10.00000 10.00000 10.00000 10.00000 10.00000
    10.00000 10.00000 10.00000 10.00000 10.00000 10.00000
    10.00000 10.00000 10.00000 10.00000 10.00000 10.00000
    10.00000 10.00000 10.00000 10.00000 10]';
C1=[7.20000 7.20000 7.20000 7.20000 7.20000 7.20000
    7.20000 7.20000 7.20000 7.20000 7.20000 7.20000
    7.20000 7.20000 7.20000 7.20000 7.20000 7.20000
    7.20000 7.20000 7.20000 7.20000 7.2]';

theta_1=fact_vect(T,T_GMPE,theta1);
theta_4=fact_vect(T,T_GMPE,theta4);
theta_5=fact_vect(T,T_GMPE,theta5);
theta_2=fact_vect(T,T_GMPE,theta2);
theta_3=fact_vect(T,T_GMPE,theta3);
theta_6=fact_vect(T,T_GMPE,theta6);
theta_14=fact_vect(T,T_GMPE,theta14);
theta_10=fact_vect(T,T_GMPE,theta10);
theta_11=fact_vect(T,T_GMPE,theta11);
theta_12=fact_vect(T,T_GMPE,theta12);
%tau_=fact_vect(T,T_GMPE,tau);
%phi_s2s=fact_vect(T,T_GMPE,phis2s);
%phi_ss=fact_vect(T,T_GMPE,phiss);
sigma_=fact_vect(T,T_GMPE,sigma);
theta_7=fact_vect(T,T_GMPE,theta7);
theta_8=fact_vect(T,T_GMPE,theta8);
theta_15=fact_vect(T,T_GMPE,theta15);
theta_16=fact_vect(T,T_GMPE,theta16);
theta_9=fact_vect(T,T_GMPE,theta9);
dC1_interface=fact_vect(T,T_GMPE,dC1interface);
dC1_inslab=fact_vect(T,T_GMPE,dC1inslab);
V_lin=fact_vect(T,T_GMPE,Vlin);
b_=fact_vect(T,T_GMPE,b);
n_=fact_vect(T,T_GMPE,n);
c_=fact_vect(T,T_GMPE,c);
C_4=fact_vect(T,T_GMPE,C4);
C_1=fact_vect(T,T_GMPE,C1);

if Feve==1
    fFABA=(theta7(1,1)+theta8(1,1)*log(max(R_rup,85)/40))*F_FABA;
    dC1=dC1_inslab(1,1);

```



```

else
    fFABA=(theta15(1,1)+theta16(1,1)*log(max(R_rup,100)/40))*F_FABA;
    dC1=dC1_interface(1,1);
end

if Mw<=C1(1,1)+dC1(1,1)
    fmagMw=theta4(1,1)*(Mw-(C1(1,1)+dC1(1,1)));
else
    fmagMw=theta5(1,1)*(Mw-(C1(1,1)+dC1(1,1)));
end

fsource=(theta4(1,1)*dC1(1,1)+fmagMw);
fpath=((theta2(1,1)+theta14(1,1)*Feve+theta3(1,1)*(Mw-
7.2))*log(R_rup+C4(1,1)*exp(theta9(1,1)*(Mw-6)))+theta6(1,1)*R_rup);
fevent_depth=((theta10(1,1)+theta11(1,1)*min(H,120)-60)*Feve);
PGA1000=exp(theta1(1,1)+fsource+fpath+fevent_depth+fFABA+theta12(1,1)*log(100
0/Vlin(1,1))+b(1,1)*n(1,1)*log(1000/Vlin(1,1)));

dC_1=zeros(size(T,1));
for i=1:1:size(T,1)
    if Feve==0
        dC_1(i,1)=dC1_interface(i,1);
    else
        dC_1(i,1)=dC1_inslab(i,1);
    end
end

if Vs30>1000
    V_s=1000;
else
    V_s=Vs30;
end

Sa=zeros(size(T,1));
mean_lnSa_MRT=zeros(size(T,1),1);
SD_lnSa_MRT=zeros(size(T,1),1);
for i=1:1:size(T,1)
    if Mw<=C_1(i,1)+dC_1(i,1)
        fmag_Mw=theta_4(i,1)*(Mw-(C_1(i,1)+dC_1(i,1)));
    else
        fmag_Mw=theta_5(i,1)*(Mw-(C_1(i,1)+dC_1(i,1)));
    end

    f_source=theta_4(i,1)*dC_1(i,1)+fmag_Mw;
    f_path=(theta_2(i,1)+theta_14(i,1)*Feve+theta_3(i,1)*(Mw-
7.2))*log(R_rup+C_4(i,1)*exp(theta_9(i,1)*(Mw-6)))+theta_6(i,1)*R_rup;
    f_event_depth=(theta_10(i,1)+theta_11(i,1)*min(H,120)-60)*Feve;
    if Feve==1

```

```

    f_FABA=(theta_7(i,1)+theta_8(i,1)*log(max(R_rup,85)/40))*F_FABA;
else
    f_FABA=(theta_15(i,1)+theta_16(i,1)*log(max(R_rup,100)/40))*F_FABA;
end

if Vs30<V_lin(i,1)
    fsite=theta_12(i,1)*log(V_s/V_lin(i,1))-
b_(i,1)*log(PGA1000+c_(i,1))+b_(i,1)*log(PGA1000+c_(i,1)*(V_s/V_lin(i,1))^n_(i
,1));
else
fsite=theta_12(i,1)*log(V_s/V_lin(i,1))+b_(i,1)*n_(i,1)*log(V_s/V_lin(i,1));
end

Sa(i,1)=exp(theta_1(i,1)+f_source+f_path+f_event_depth+fsite+f_FABA);
mean_lnSa_MRT(i,1)=log(Sa(i,1));
SD_lnSa_MRT(i,1)=sigma_(i,1);
end
end

```

```

function [factor]=fact_vect(T,T_GMPE,input_factor)

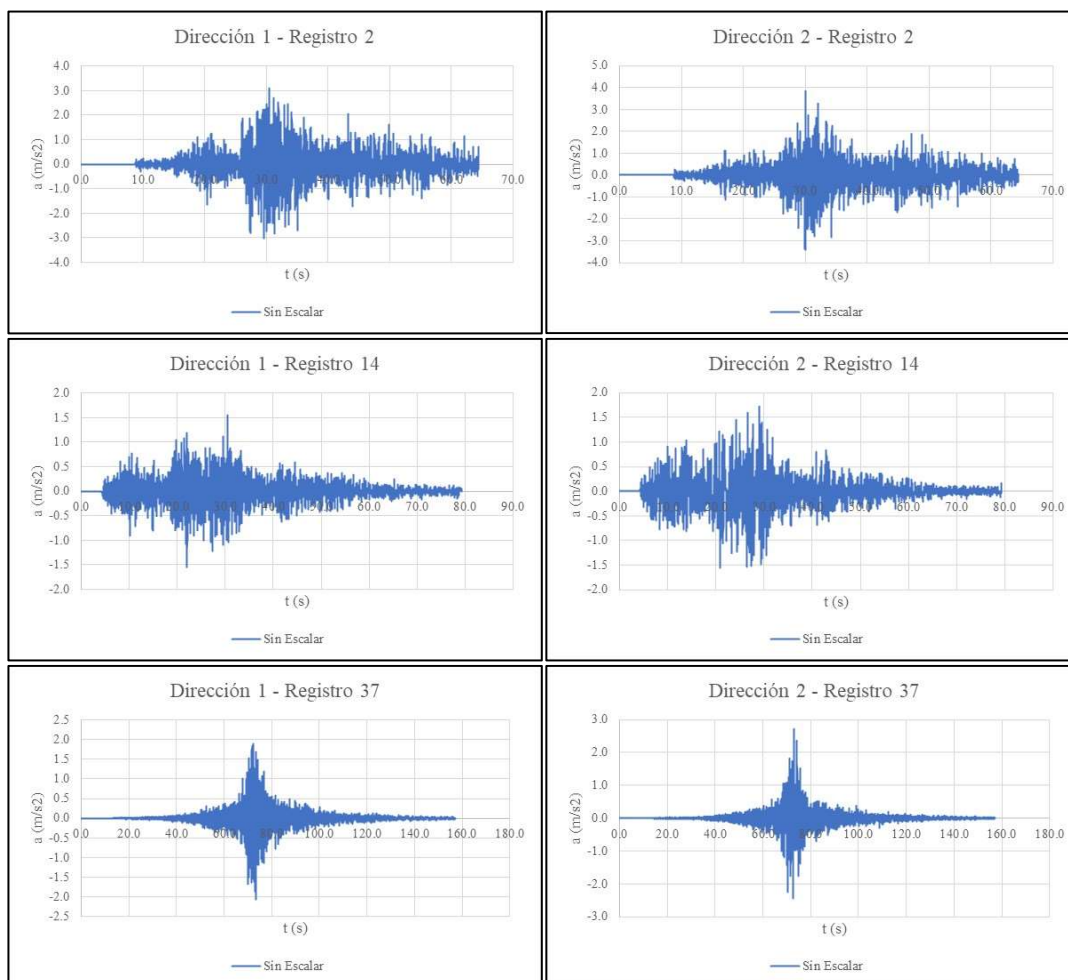
factor=zeros(size(T,1),1);
for i=1:1:size(T,1)
    for j=1:1:size(T_GMPE,1)
        if T(i,1)<=T_GMPE(j,1)
            if T(i,1)==T_GMPE(j,1)
                factor(i,1)=input_factor(j,1);
                break
            else
                m=((input_factor(j,1)-input_factor(j-1,1))/(T_GMPE(j,1)-
T_GMPE(j-1,1)));
                factor(i,1)=m*(T(i,1)-T_GMPE(j-1,1))+input_factor(j-1,1);
                break
            end
        end
    end
end
end
end
end

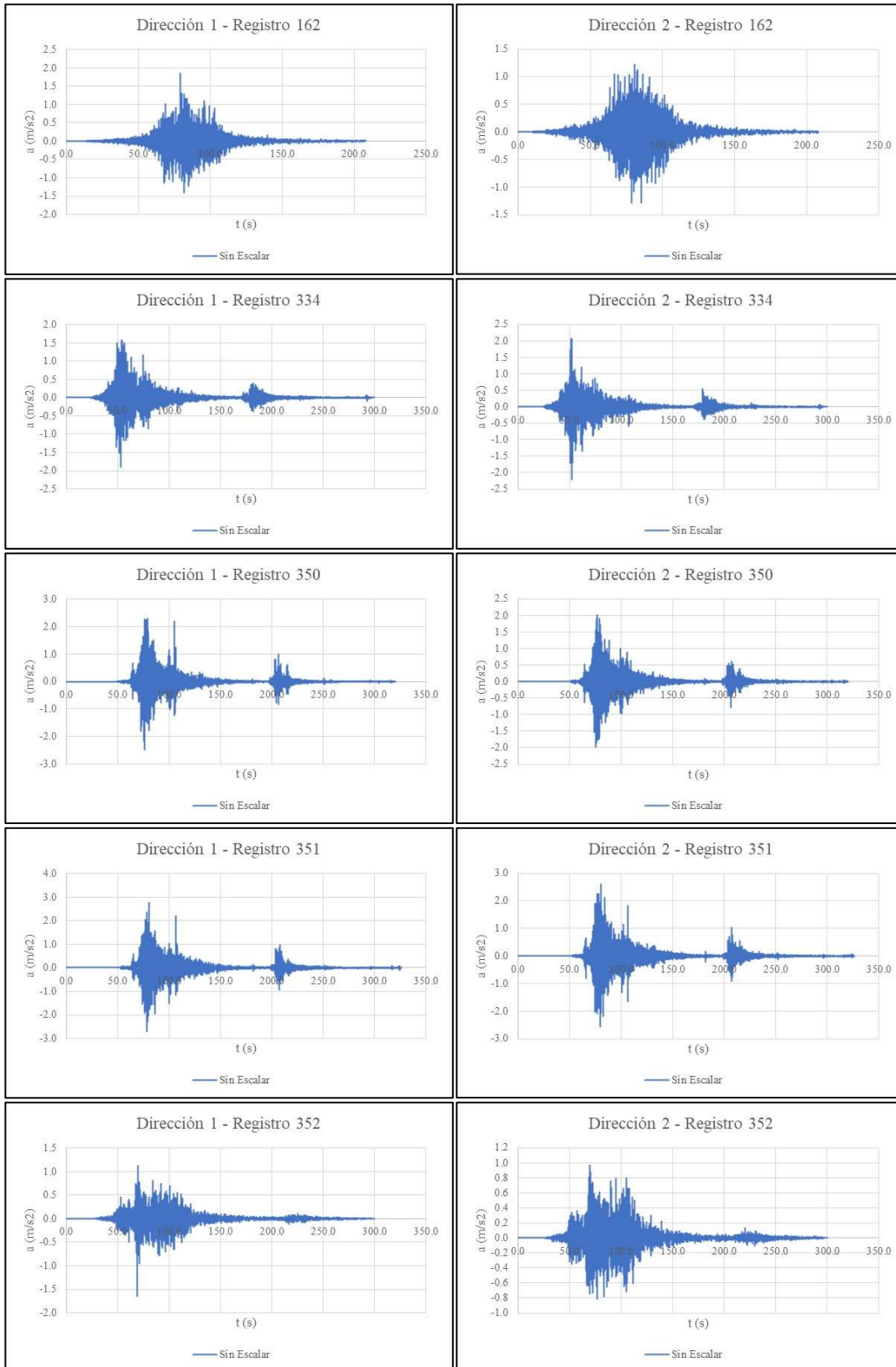
```

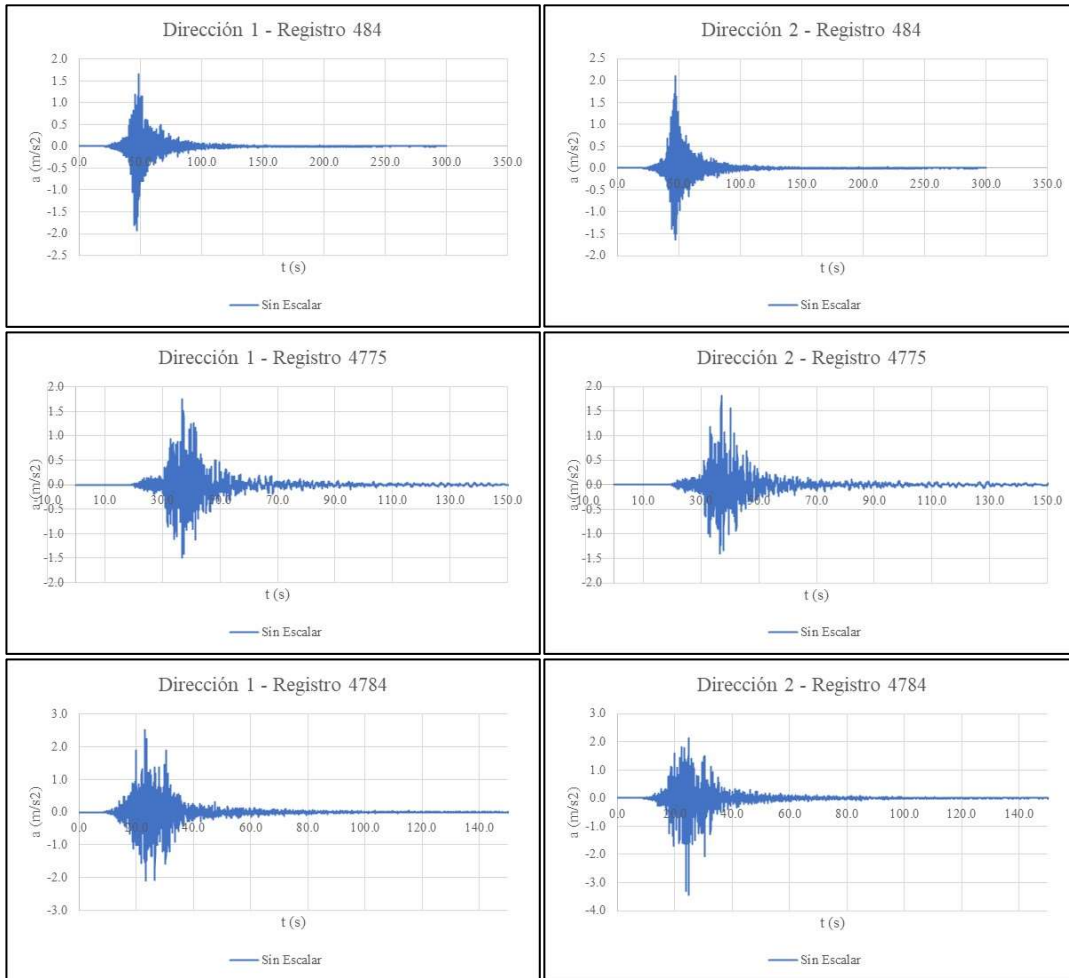
ANEXO B: REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS UTILIZANDO EL CMS Y UHS COMO ESPECTRO OBJETIVO

Se presentan los 11 pares de registros seleccionados considerando el SSE para el CMS y el UHS.

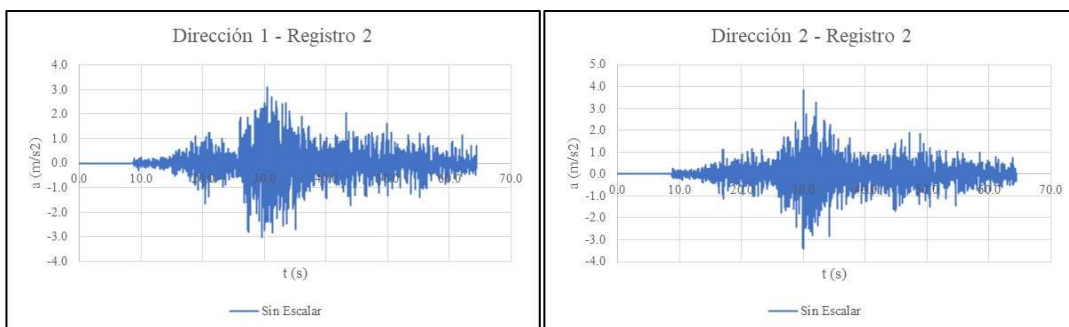
Selección CMS:

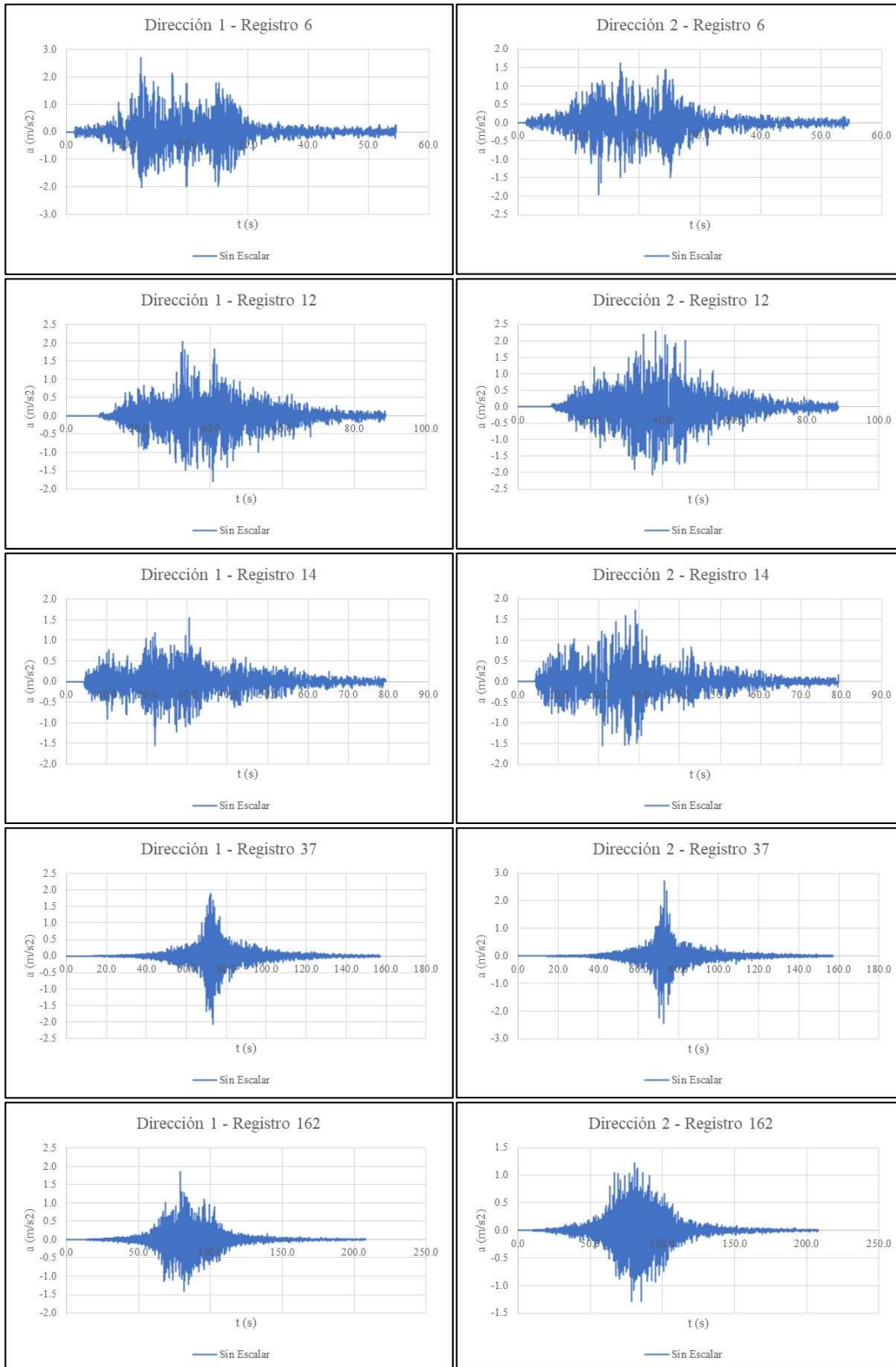


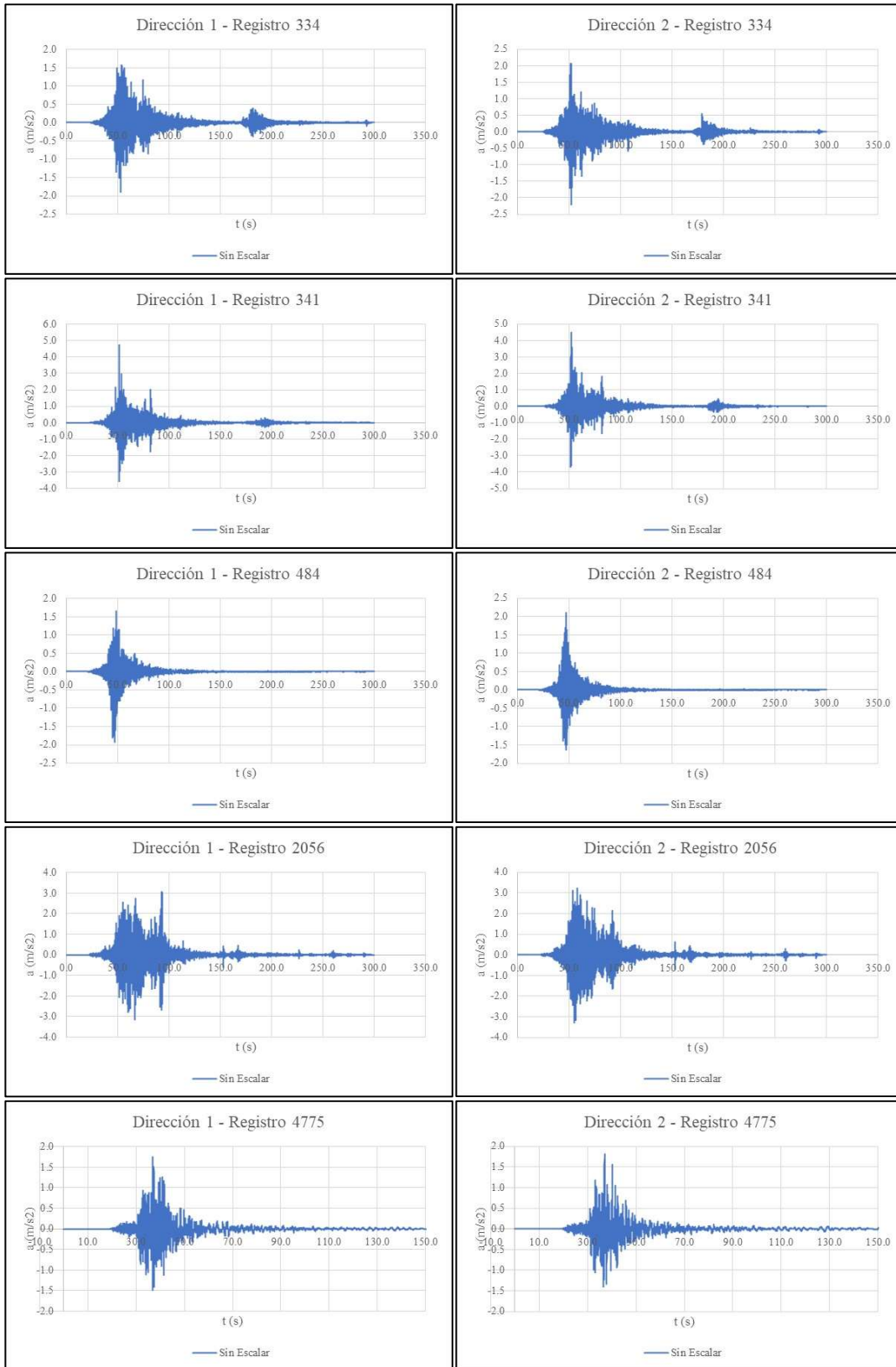




Selección UHS:







ANEXO C: MATLAB SCRIPT PARA EL CÁLCULO DEL SUMA DE ERRORES CUADRADOS (SSE) Y SELECCIÓN DE REGISTROS

Código para el cálculo del SSE y, en base a este valor, seleccionar 11 registros de la base de datos. La base de datos se encuentra en el archivo Chilean Records.mat. El código considera una variable “*n_registros*”, la cual define el número de registros a ser seleccionados, en este caso 11. También se define una variable “*n*”, la cual define el tamaño de la muestra de registros, en el caso de que no se quiera considerar la totalidad de la base de datos.

```
clc;clear;close all;format short
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Datos de Entrada

```
%% Periodo Condicional (T_select)
%% Periodo condicional alrededor del que se va a construir el CMS

T_select=2; %[s]

%% Información del lugar y del evento
Mw=7.7;      % Momento Magnitud
R_rup=120;   % Distancia a la ruptura [km]
epsilon=1.2; % Número de desviaciones estándar sobre/debajo de la media
              % movimiento sísmico predichi (dado por Mw y Rrup)
H=50;        % Distancia al hipocentro [km]
Vs30=224.5; % Velocidad de onda de corte [m/s]
T_site=1.25; % Periodo predominante del sitio [s], si no se conoce T_site=0
F_FABA=0;    % Fore-arc-to-back-ark model scalin: 1 = back-ark
              %
              % 0 = fore-arc or unknown

sites
Feve=0;      % Tipo de sismo 0 = interface
              %
              % 1 = intraslab
GMPE='M';    % Modelos de atenuacion (GMPE): M = Montalva et al. 2017
              %
              % I = Idini et al. 2017
RHO='C';     % Correlacion para epsilon: B = Baker, 2011
              %
              % C = Candia et al., 2020

%% Spectro de Peligro Uniforme (UHS)
% Datos del UHS, se requiere ingresar tanto los periodos con sus
correspondientes aceleraciones espectrales Sa
```



```

TUHS=[0.01 0.05 0.07 0.10 0.15 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00
1.20 1.40 1.60 1.80 2.00 2.20 2.40 2.60 2.80 3.00 3.20 3.40 3.60 3.80 4.00
4.20 4.40 4.60 4.80 5.00]'; %[s]
SaUHS=[0.35305 0.49098 0.62611 0.81424 0.85296 0.77629 0.57828 0.449 0.35659
0.29702 0.25508 0.22157 0.19777 0.176 0.14855 0.12191 0.10367 0.090872 0.07729
0.069552 0.062216 0.055149 0.04916 0.043534 0.040658 0.037466 0.034456
0.031595 0.028841 0.027025 0.025118 0.023301 0.021562 0.019878]'; %[g]

%% Rango de periodos
% T inicial = 0.05s y T final = 5s, considerando la definicion del CMS
establecida en Baker 2011.
% Este rango de periodos se utilizará para:
% - Construir el CMS
% - Construir los "n" espectros de respuesta

T=[0.05 0.075 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.4 0.5 0.55 0.6 0.65 0.7 0.75 0.8 0.85
0.9 0.95 1 1.5 2 2.5 3 4 5]'; % [s]

%% Datos para espectros de respuesta, seleccion de registros y escalamiento
% Los registros SÍSMICOS considerados provienen del archivo Chilean
Records.mat
% - a_1 para compomente en la dirección 1 [g]
% - a_2 para compomente en la dirección 2 [g]
% - dt para intervalo de tiempo del registro (delta t [s])

damp=0.05; % Amortiguamiento del sistema
g=9.81; % Gravedad: 1, Sa en [g]
% 981, Sa en [cm/s2]
% 9.81, Sa en [m/s2]
n_registros=11; % Numero de registros seleccionados, en base a SSE
n=7899; % Tamaño de la muestra de registros (entre 11 y 7899)

```

Construccion del CMS

```

% Se consideraron 2 modelos de atenuacion (GMPE) (Montalva et al. 2017 e
Idini et al. 2017)
% Ver: función CMS

[Sa_CMS_idini,Sa_CMS_montalva]=CMS(T_select,T,TUHS,SaUHS,Mw,R_rup,H,Vs30,T_si
te,F_FABA,Feve,RHO);

if GMPE=='M'
    SaCMS=Sa_CMS_montalva;
else
    SaCMS=Sa_CMS_idini;
end

```



```
indexes_UHS(1,1:11)'
```

```
ans = 11x1
      2
     4775
      37
      14
    2056
     162
     484
      12
       6
     334
     341
```

```
[sortedVals_CMS,indexes_CMS]=sort(SSE_CMS);
sortedVals_CMS(1,1:11)'
```

```
ans = 11x1
    0.6817
    1.0732
    1.5904
    1.6049
    2.0473
    2.1191
    2.2694
    2.6337
    2.6468
    2.6875
    2.7043
```

```
indexes_CMS(1,1:11)'
```

```
ans = 11x1
     334
     350
      37
     4775
     162
      14
     352
     484
     351
       2
    4784
```

Funciones utilizadas:

```
function [RotD00,RotD100,RotD50]=RotD(acc_NS,acc_EW,Tp)
for j=1:1:size(acc_NS,2)
```

```

for i=1:size(Tp,1) % loop over periods
    Rot_rd1 = acc_NS(i,j);
    Rot_rd2 = acc_EW(i,j);
    for theta=1:180
        RS1 = Rot_rd1*cos(theta/180*pi) + Rot_rd2*sin(theta/180*pi);
        RotD180(theta, i) = max(abs(RS1));
    end
end
RotD00(:,j)=min(RotD180)';
RotD100(:,j)=max(RotD180)';
RotD50(:,j)=median(RotD180)';
end
end

```

```

function [acc]=Spect_CentrDiff(Tp,GMs,dt,damp,g)
for i=1:size(GMs,2) %n, n es el numero de registros
    T{i}=Tp; %Period
    TI(i)=dt; %time interval (dt)
    acce{i}=GMs(1:end,i)/g; %acceleration

    for j=1:length(T{i})
        for dd=1:length(damp)

            wn{i}(j,dd)=2*pi/T{i}(j);
            wd{i}(j,dd)=wn{i}(j)*sqrt(1-damp(dd)^2);
            A{i}(j,dd)=exp(-damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*((damp(dd)/sqrt(1-
damp(dd)^2))*sin(TI(i)*wd{i}(j))+cos(TI(i)*wd{i}(j)));
            Ap{i}(j,dd)=-exp(-damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*wn{i}(j)*(1/sqrt(1-
damp(dd)^2))*sin(wd{i}(j)*TI(i));
            B{i}(j,dd)=exp(-
damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*sin(wd{i}(j)*TI(i))/wd{i}(j);
            Bp{i}(j,dd)=exp(-damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*(-(damp(dd)/sqrt(1-
damp(dd)^2))*sin(TI(i)*wd{i}(j))+cos(TI(i)*wd{i}(j)));

            C{i}(j,dd)=T{i}(j)^2*(1/(4*pi^2))*((2*damp(dd))/(wn{i}(j)*TI(i))+exp(-
damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*(((1-2*damp(dd)^2)/(wd{i}(j)*TI(i))-(damp(dd)/sqrt(1-
damp(dd)^2)))*sin(TI(i)*wd{i}(j))-
(1+(2*damp(dd))/(wn{i}(j)*TI(i)))*cos(TI(i)*wd{i}(j))));
            Cp{i}(j,dd)=T{i}(j)^2*(1/(4*pi^2))*(-1/TI(i)+exp(-
damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*(((1/sqrt(1-damp(dd)^2))*wn{i}(j)+(damp(dd)/sqrt(1-
damp(dd)^2))/TI(i))*sin(TI(i)*wd{i}(j))+cos(TI(i)*wd{i}(j))/TI(i));
            D{i}(j,dd)=T{i}(j)^2*(1/(4*pi^2))*(1-
(2*damp(dd))/(wn{i}(j)*TI(i))+exp(-damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*(-(1-
2*damp(dd)^2)*sin(TI(i)*wd{i}(j))/(wd{i}(j)*TI(i))+(2*damp(dd))*cos(TI(i)*wd{i}
j))/(wn{i}(j)*TI(i)));

```

```

        Dp{i}(j,dd)=T{i}(j)^2*(1/(4*pi^2))*(1/TI(i))*(1-exp(-
damp(dd)*wn{i}(j)*TI(i))*((damp(dd)/sqrt(1-
damp(dd)^2))*sin(TI(i)*wd{i}(j))+cos(TI(i)*wd{i}(j))));

        u{i,j}(1,dd)=0;
        up{i,j}(1,dd)=0;

        for k=1:length(acce{i})-1

u{i,j}(k+1,dd)=A{i}(j,dd)*u{i,j}(k,dd)+B{i}(j,dd)*up{i,j}(k,dd)+C{i}(j,dd)*acc
e{i}(k)+D{i}(j,dd)*acce{i}(k+1);

up{i,j}(k+1,dd)=Ap{i}(j,dd)*u{i,j}(k,dd)+Bp{i}(j,dd)*up{i,j}(k,dd)+Cp{i}(j,dd)
*acce{i}(k)+Dp{i}(j,dd)*acce{i}(k+1);
        end

        IM{dd}(j,i)=max(abs(u{i,j}(:,dd)))*4*pi^2/(T{i}(j)^2);

        end
    end
    acc=IM{1};
end

```

```

function [SSE]=sum_squared_errors(T,Ti,Lim_inf,Lim_sup,Sa_1,SaCMS)
T1=period_vect(T,Ti);
T1=period_vect(T1,Lim_inf);
T1=period_vect(T1,Lim_sup);
Sa1=fact_vect(T1,T,Sa_1);
Sa_CMS=fact_vect(T1,T,SaCMS);

for i=1:1:size(T,1)
    if Lim_inf<=T(i,1)
        index_inf=i;
        break
    end
end
for i=1:1:size(T,1)
    if Lim_sup<=T(i,1)
        index_sup=i;
        break
    end
end

SSE=0;

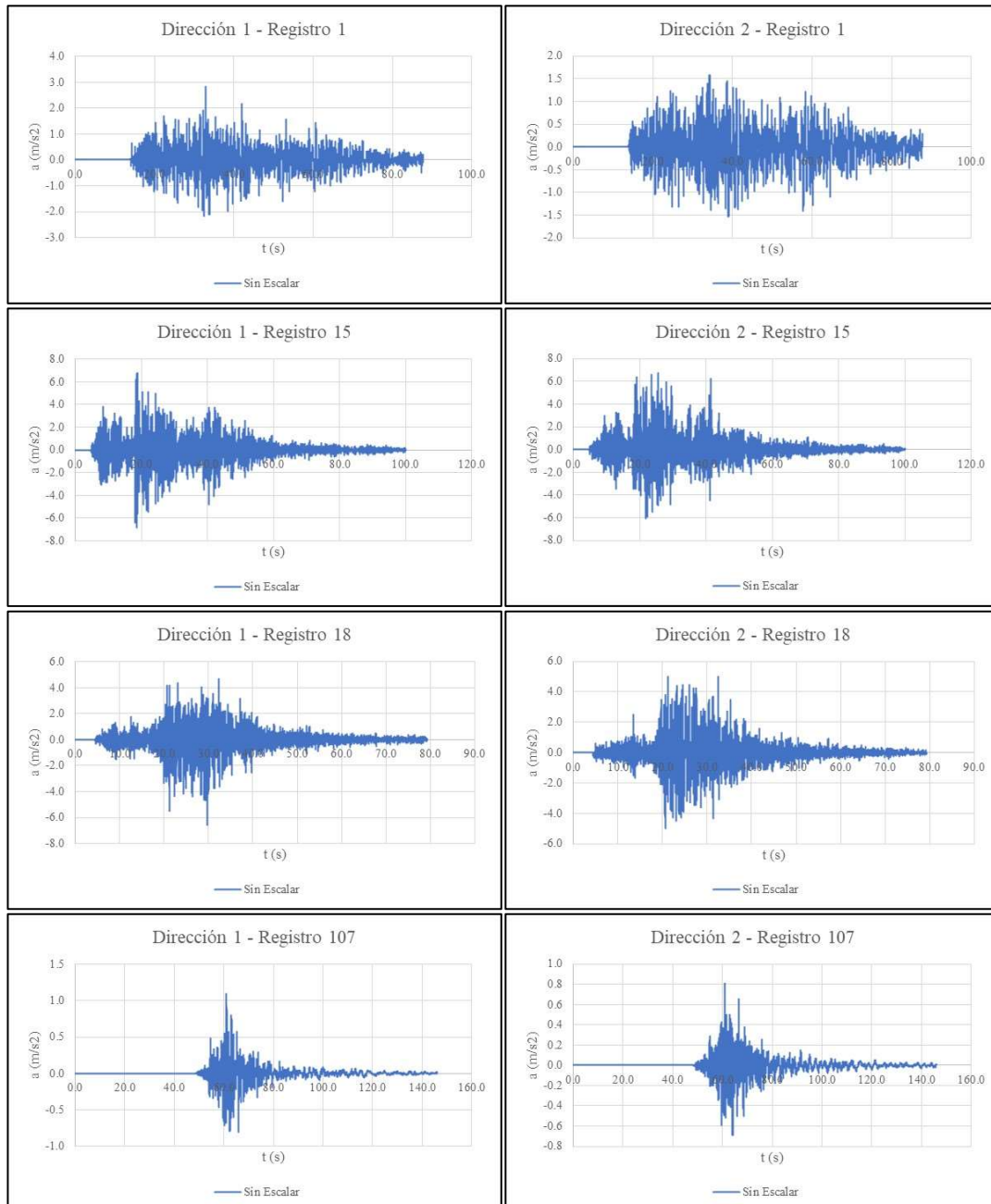
```

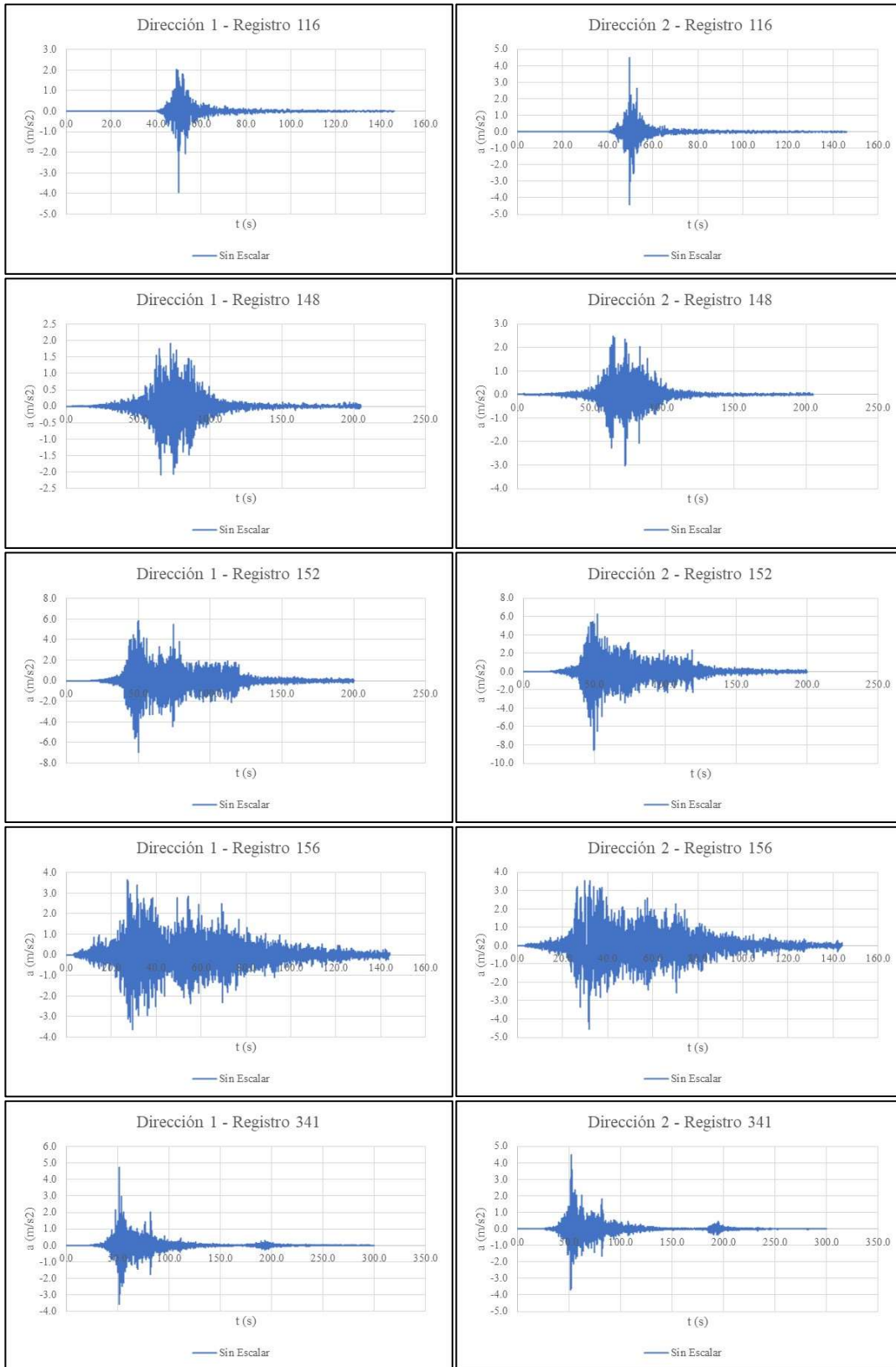
```
for i=index_inf:1:index_sup
    SSE_=(log(Sa_CMS(i,1))-log(Sa1(i,1)))^2;
    SSE=SSE_+SSE;
end
end
```

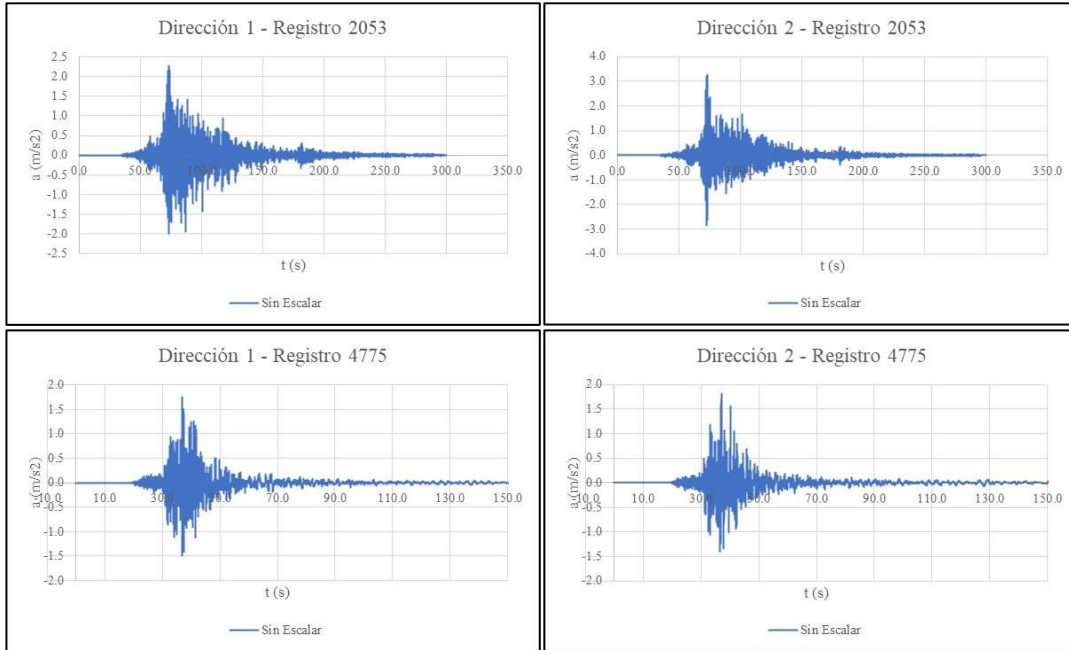
ANEXO D: REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS UTILIZANDO EPSILON

Se presentan los 11 pares de registros seleccionados considerando EPSILON

Selección EPSILON:







ANEXO E: MATLAB SCRIPT PARA EL CÁLCULO Y SELECCIÓN EN BASE A EPSILON

Código para el cálculo de EPSILON y para la selección de 11 registros

```

clc;clear;close all;format short
tic
T_select=2; %[s]

%% Información del lugar y del evento
Mw=7.7;      % Momento Magnitud
R_rup=120;   % Distancia a la ruptura [km]
epsilon=1.2; % Número de desviaciones estándar sobre/debajo de la media
del
% movimiento sísmico predichi (dado por Mw y Rrup)
H=50;       % Distancia al hipocentro [km]
Vs30=224.5; % Velocidad de onda de corte [m/s]
T_site=1.25; % Periodo predominante del sitio [s], si no se conoce T_site=0
F_FABA=0;   % Fore-arc-to-back-ark model scalin: 1 = back-ark
%                                     0 = fore-arc or unknown

sites
Feve=0;     % Tipo de sismo 0 = interface
%          1 = intraslab
GMPE='M';  % Modelos de atenuacion (GMPE): M = Montalva et al. 2017
%          I = Idini et al. 2017

%% Datos para espectros de respuesta, seleccion de registros y escalamiento
% Los registros SÍSMICOS considerados provienen del archivo Chilean
Records.mat
% - a_1 para compomente en la dirección 1 [g]
% - a_2 para compomente en la dirección 2 [g]
% - dt para intervalo de tiempo del registro (delta t [s])

damp=0.05;  % Amortiguamiento del sistema
g=9.81;    % Gravedad: 1, Sa en [g]
%          981, Sa en [cm/s2]
%          9.81, Sa en [m/s2]
n=7899;    % Tamaño de la muestra de registros (entre 11 y 7899)

%% Media y SD del modelo de atenuacion
[mean_lnSa_MRT_T_selec,SD_lnSa_MRT_T_selec]=mean_SD_GMPE(T_select,T_select,Mw
,R_rup,H,Vs30,T_site,F_FABA,Feve,GMPE)

mean_lnSa_MRT_T_selec = -3.0771
SD_lnSa_MRT_T_selec = 0.7625

Registros=load('Chilean Records.mat');

```

```

Epsilon_=zeros(1,n);

for i=1:1:n
    dt=Registros.dt(1,i);
    Sa_1=Spect_CentrDiff(T_select,Registros.a_1{1,i}',dt,damp,g);
    Sa_2=Spect_CentrDiff(T_select,Registros.a_2{1,i}',dt,damp,g);
    [RotD00, RotD100, RotD50]=RotD(Sa_1,Sa_2,T_select);

[epsilonX]=epsilon_X(T_select,T_select, RotD50, mean_lnSa_MRT_T_selec, SD_lnSa_MRT_T_selec);
    Epsilon_(i)=epsilonX;
end
[sortedVals_Epsilon, indexes_Epsilon]=sort(abs(epsilon-Epsilon_));
sortedVals_Epsilon(1,1:11)'

```

```

ans = 11x1
    0.0607
    0.0811
    0.0950
    0.1223
    0.1238
    0.1401
    0.1489
    0.1496
    0.1708
    0.1965
    0.2070

```

```

indexes_Epsilon(1,1:11)'

```

```

ans = 11x1
    341
    116
    156
     1
    2053
    18
    152
    148
    15
    107
    4775

```

Funciones utilizadas:

```

function
[mean_lnSa_MRT_T_selec, SD_lnSa_MRT_T_selec]=mean_SD_GMPE(T_selec,T,Mw,R_rup,H,
Vs30,T_site,F_FABA,Feve,GMPE)

%Step 2: Compute de Mean and Standar Deviation of the response spectrum,
%given M and R

```

```

if GMPE=='I'
    [mean_lnSa_MRT,SD_lnSa_MRT]=Idini_GMPE(T,Mw,R_rup,H,Vs30,T_site,Feve);
else
    [mean_lnSa_MRT,SD_lnSa_MRT]=
Montalva_GMPE(T,Mw,R_rup,H,Vs30,Feve,F_FABA);
end

% Estimate Epsilon
for i=1:1:size(T,1)
    if T_selec==T(i,1)
        index_epsilon=i;
        break
    else
        end
end

mean_lnSa_MRT_T_selec=mean_lnSa_MRT(index_epsilon,1);
SD_lnSa_MRT_T_selec=SD_lnSa_MRT(index_epsilon,1);

end

```

```

function
[epsilonX]=epsilon_X(T_selec,T,Sa,mean_lnSa_MRT_T_selec,SD_lnSa_MRT_T_selec)
% Step 1: Determine the target Sa at a given T and the associate M, R and
% epsilon
for i=1:1:size(T,1)
    if T_selec==T(i,1)
        index_=i;
        break
    else
        end
end

Sa_T_selec=Sa(index_,1); %[g]
epsilonX=(log(Sa_T_selec)-mean_lnSa_MRT_T_selec)/SD_lnSa_MRT_T_selec;

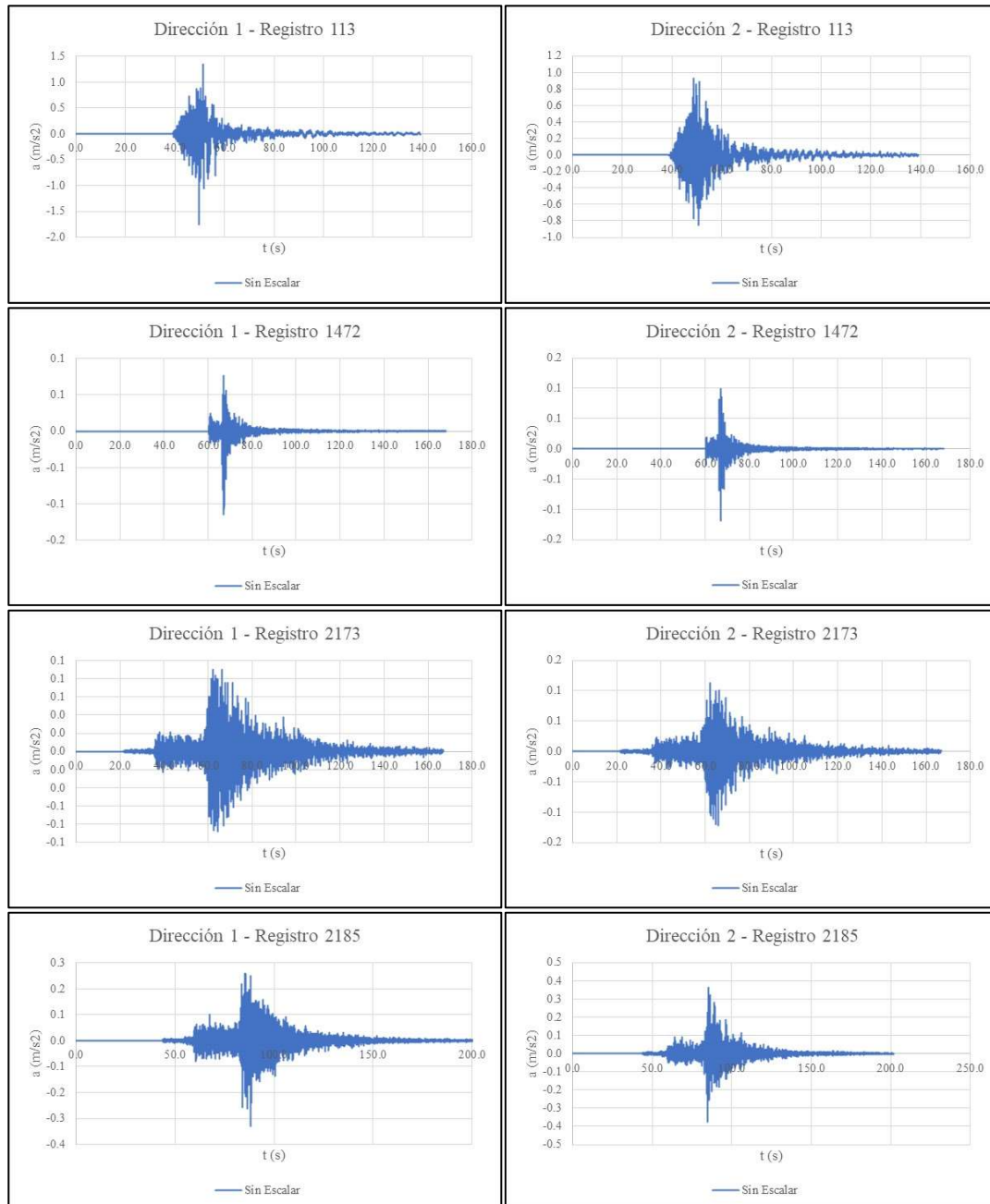
end

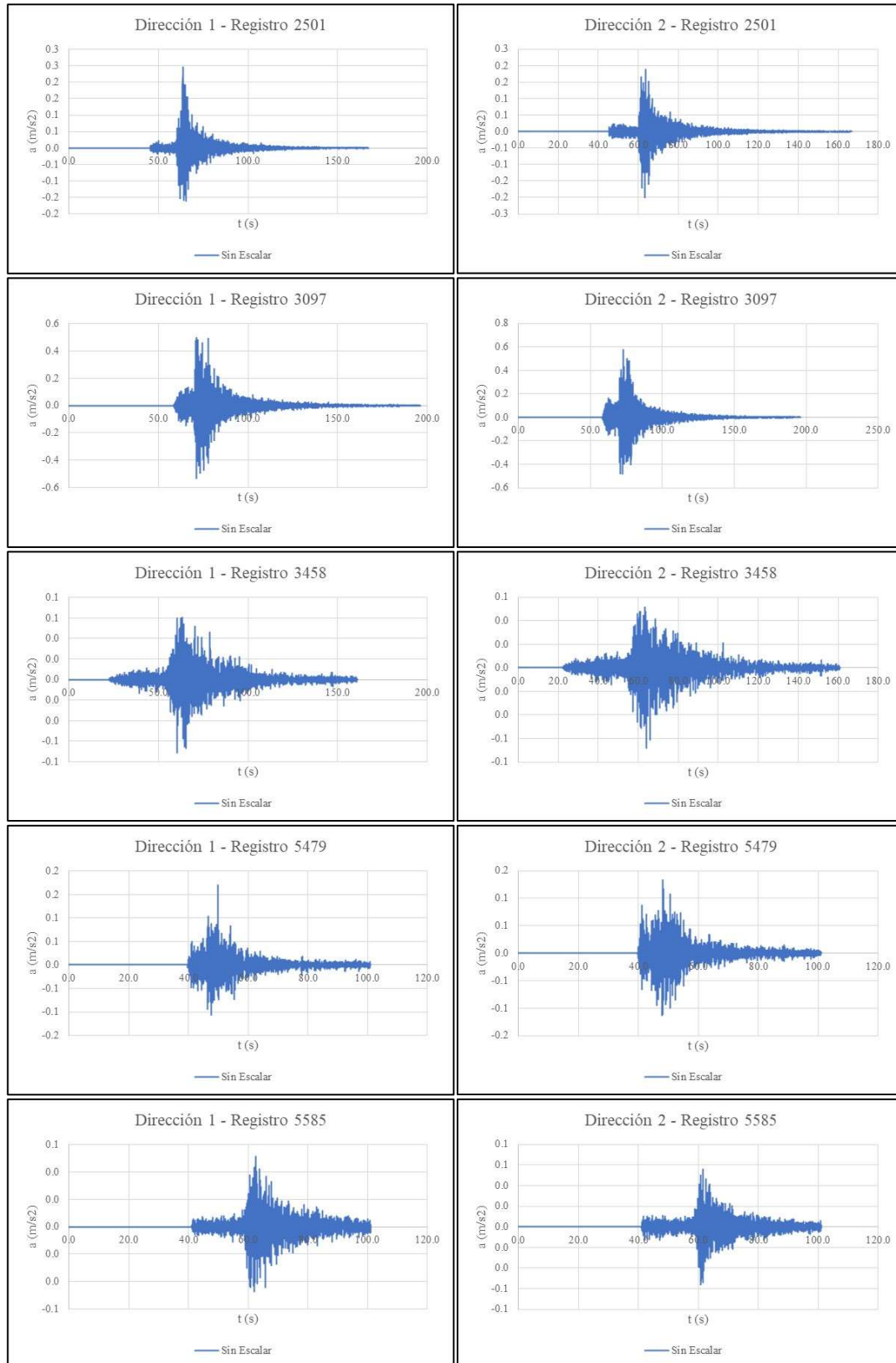
```

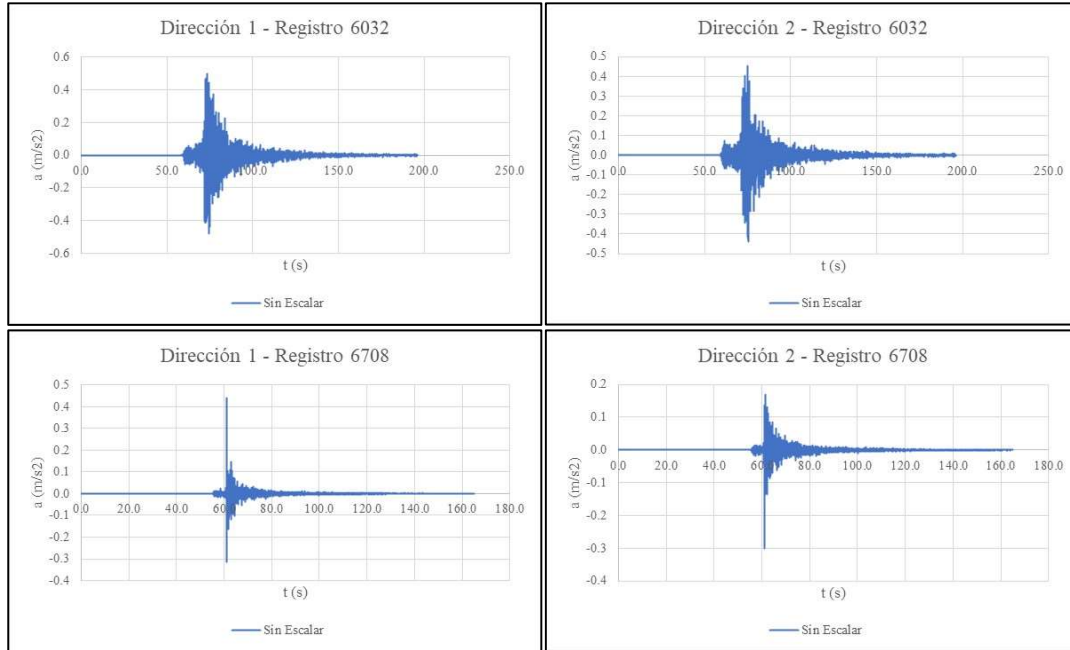
ANEXO F: REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS UTILIZANDO RANDOM

Se presentan los 11 pares de registros seleccionados considerando RANDOM

Selección RANDOM:



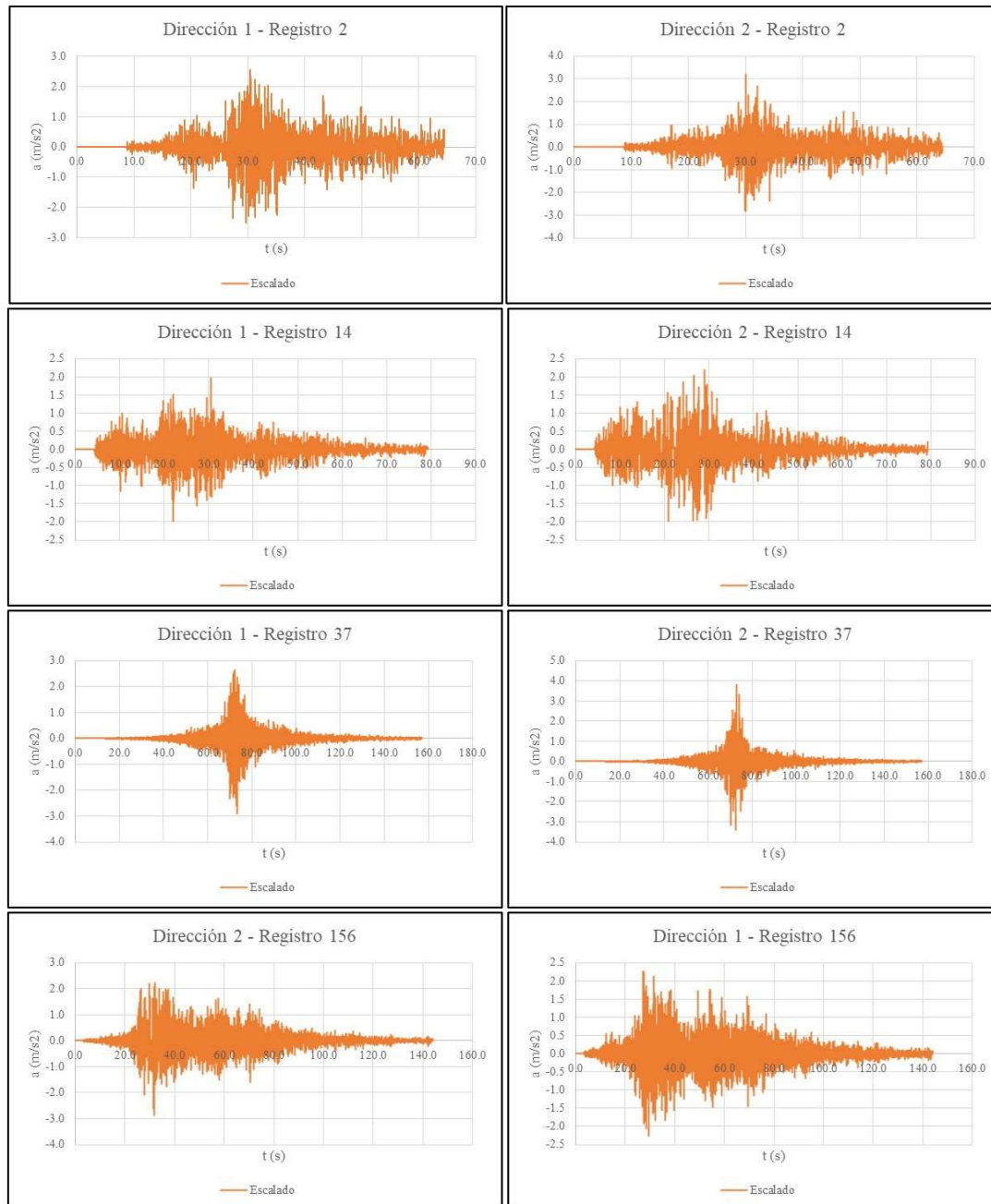


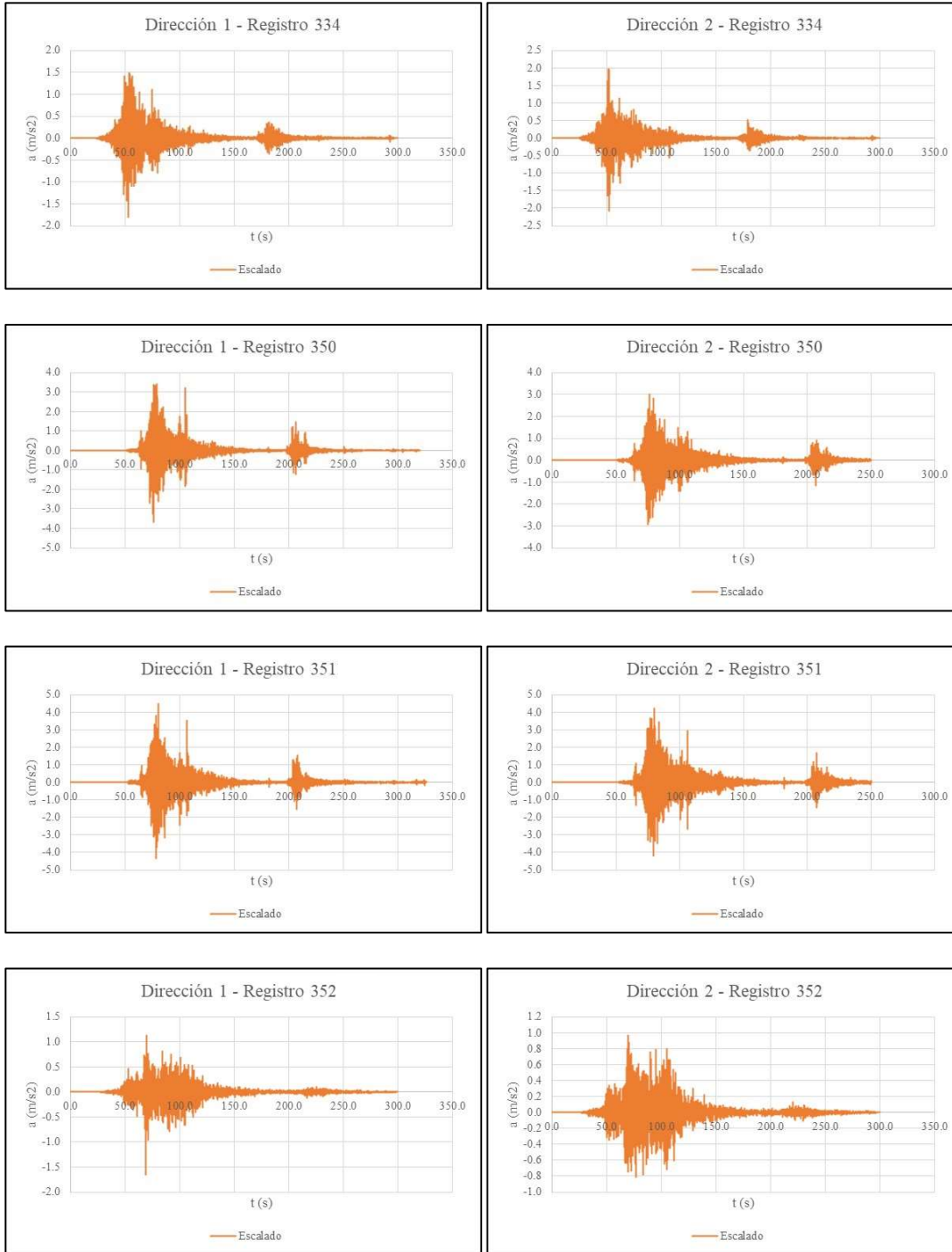


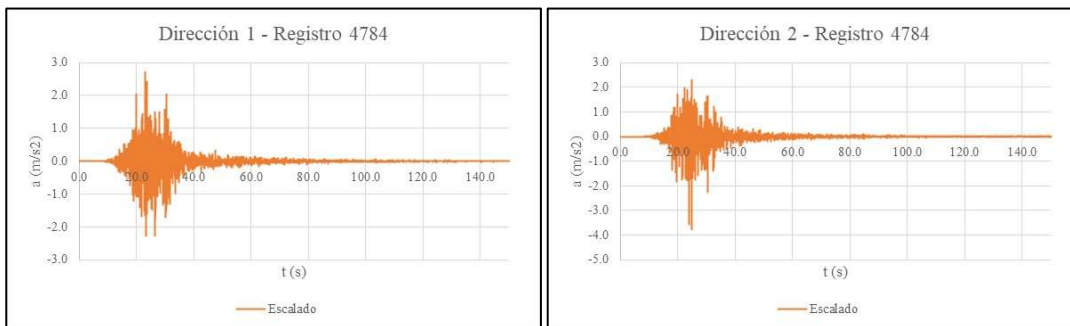
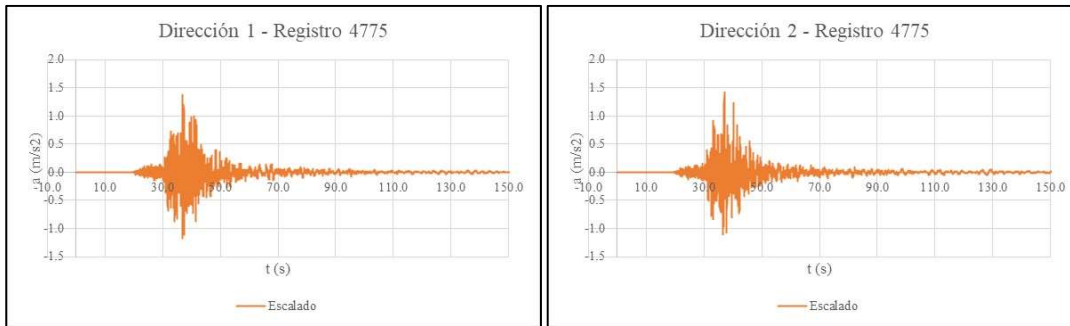
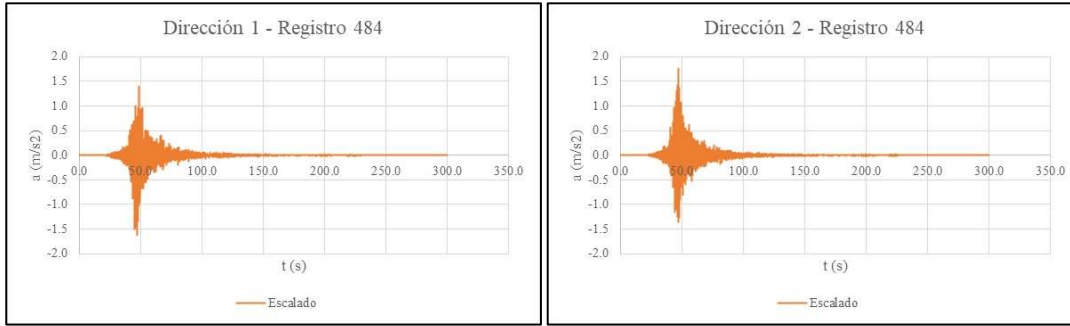
ANEXO G: REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS ESCALADOS CONSIDERANDO CRITERIOS CMS, UHS, EPSILON Y RANDOM

Se presentan los 11 pares de registros seleccionados considerando los cuatro métodos, escalados

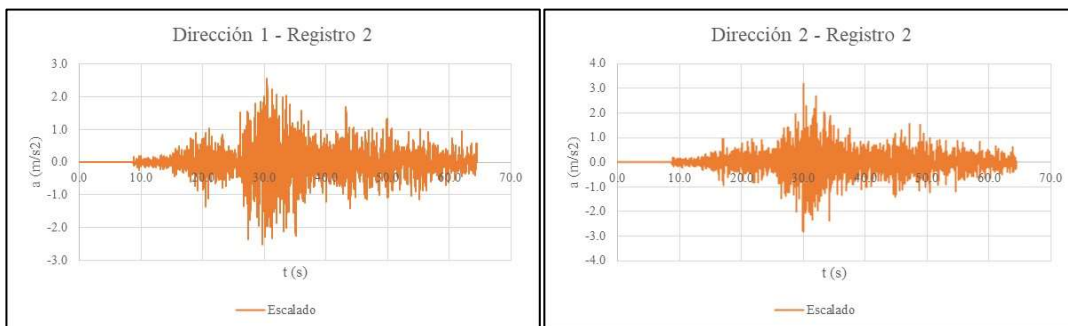
Selección CMS, escalada:

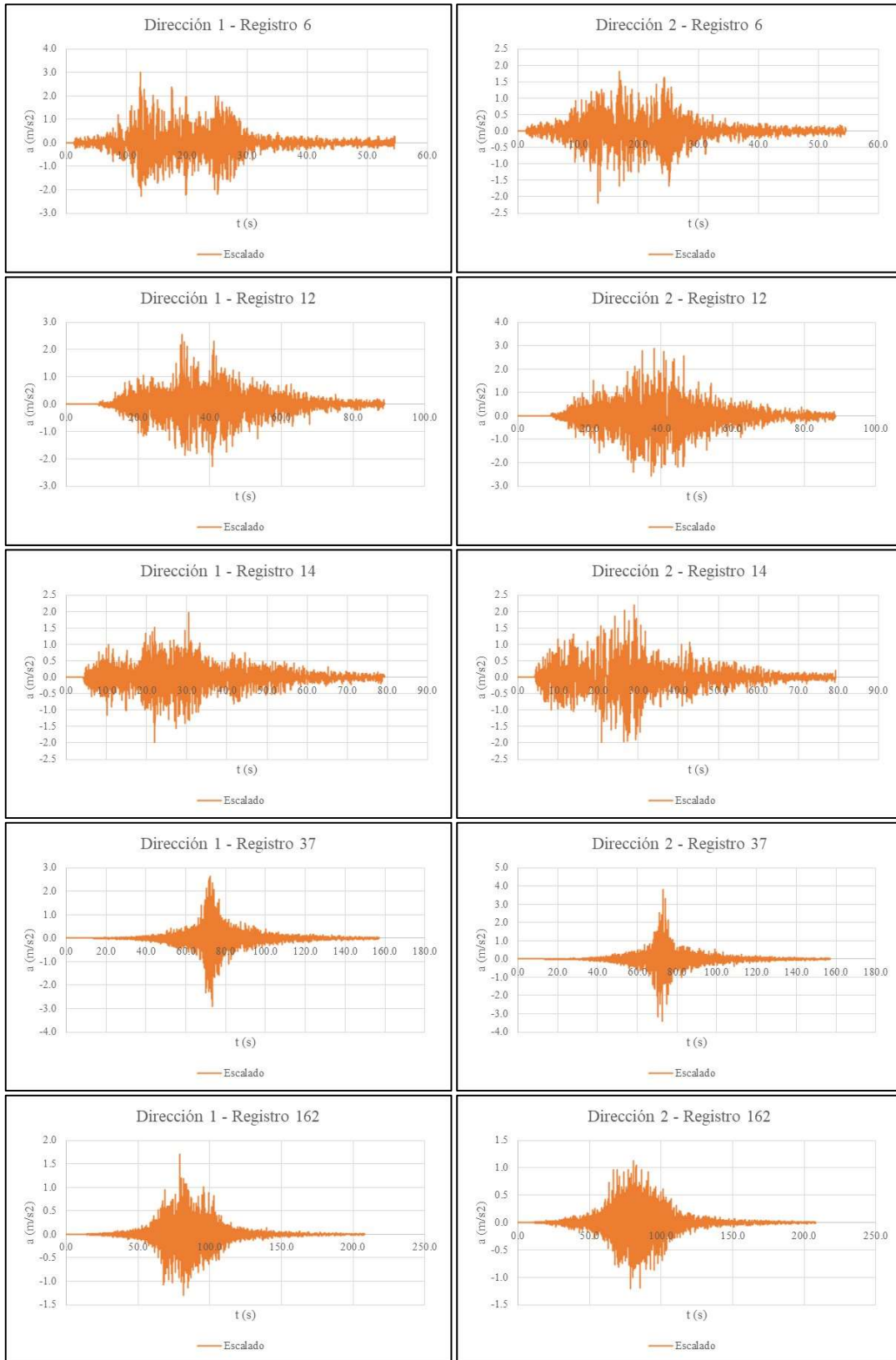


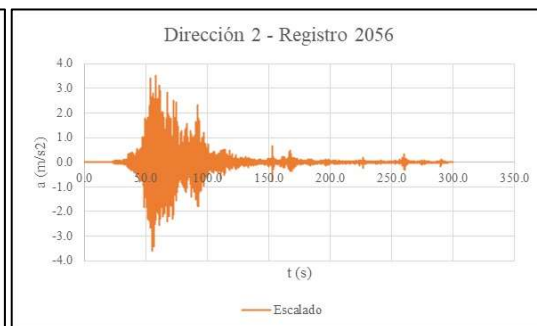
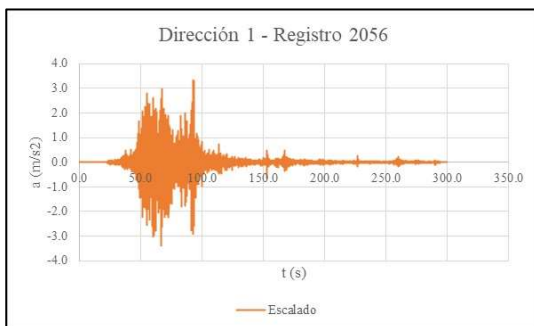
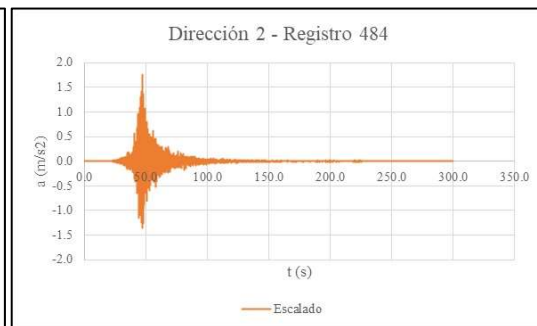
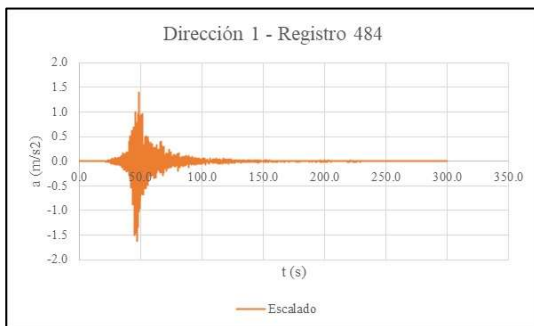
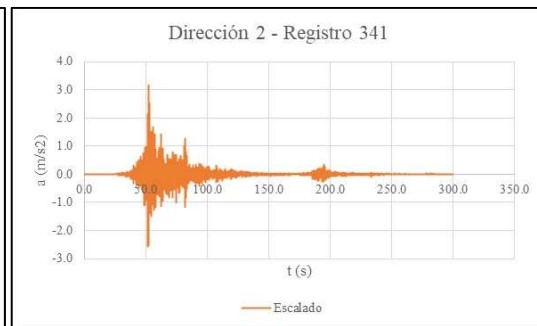
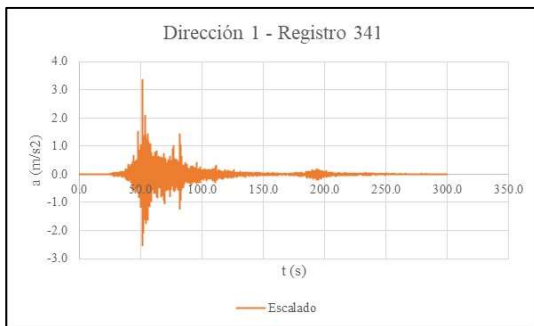
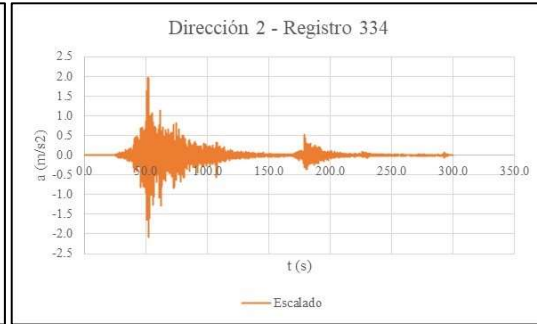
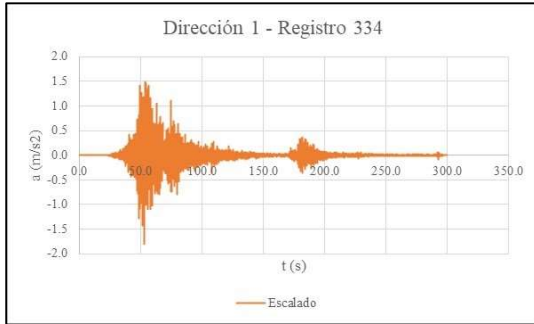


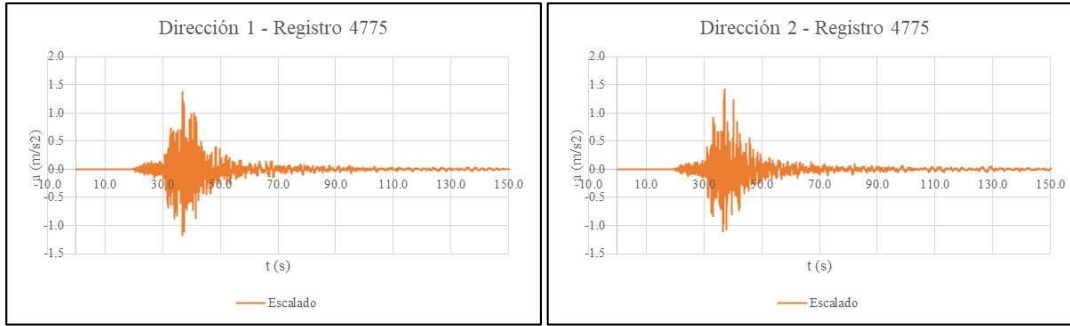


Selección UHS, escalada:

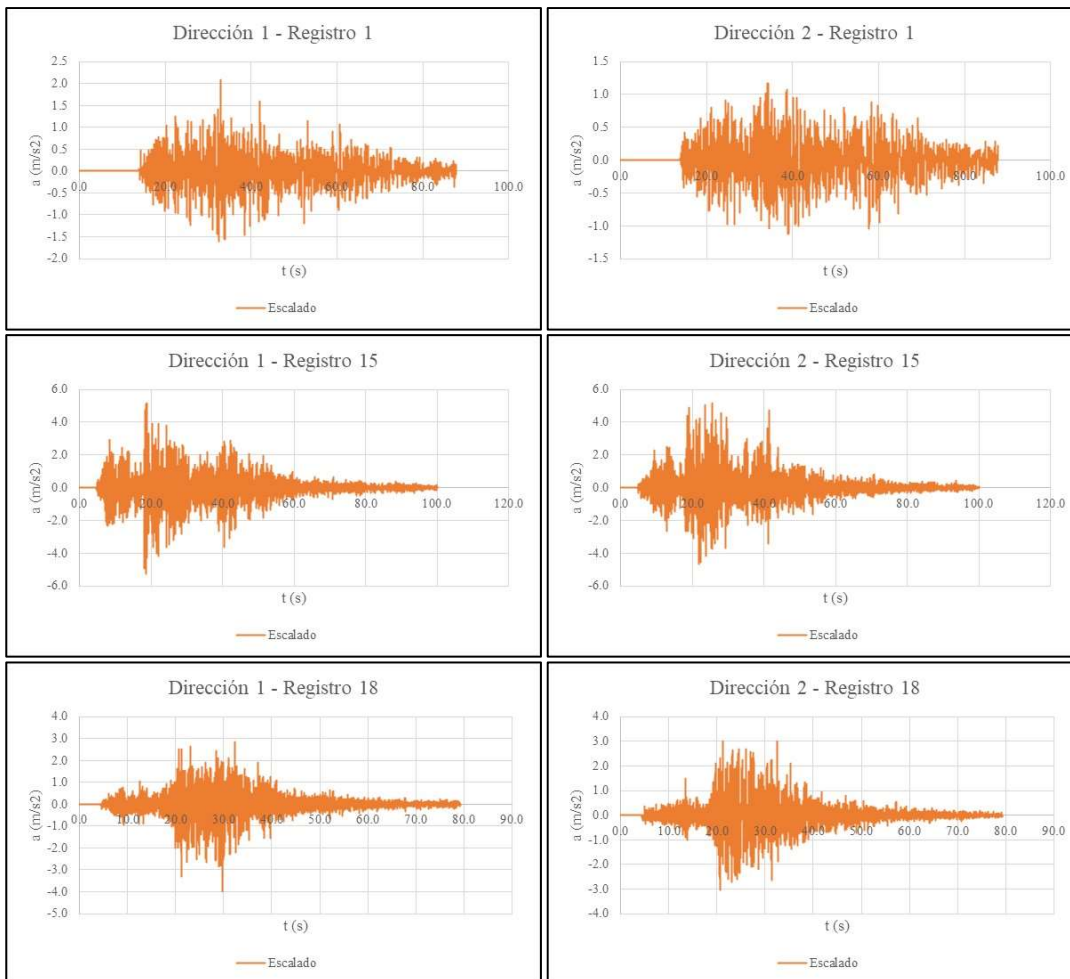


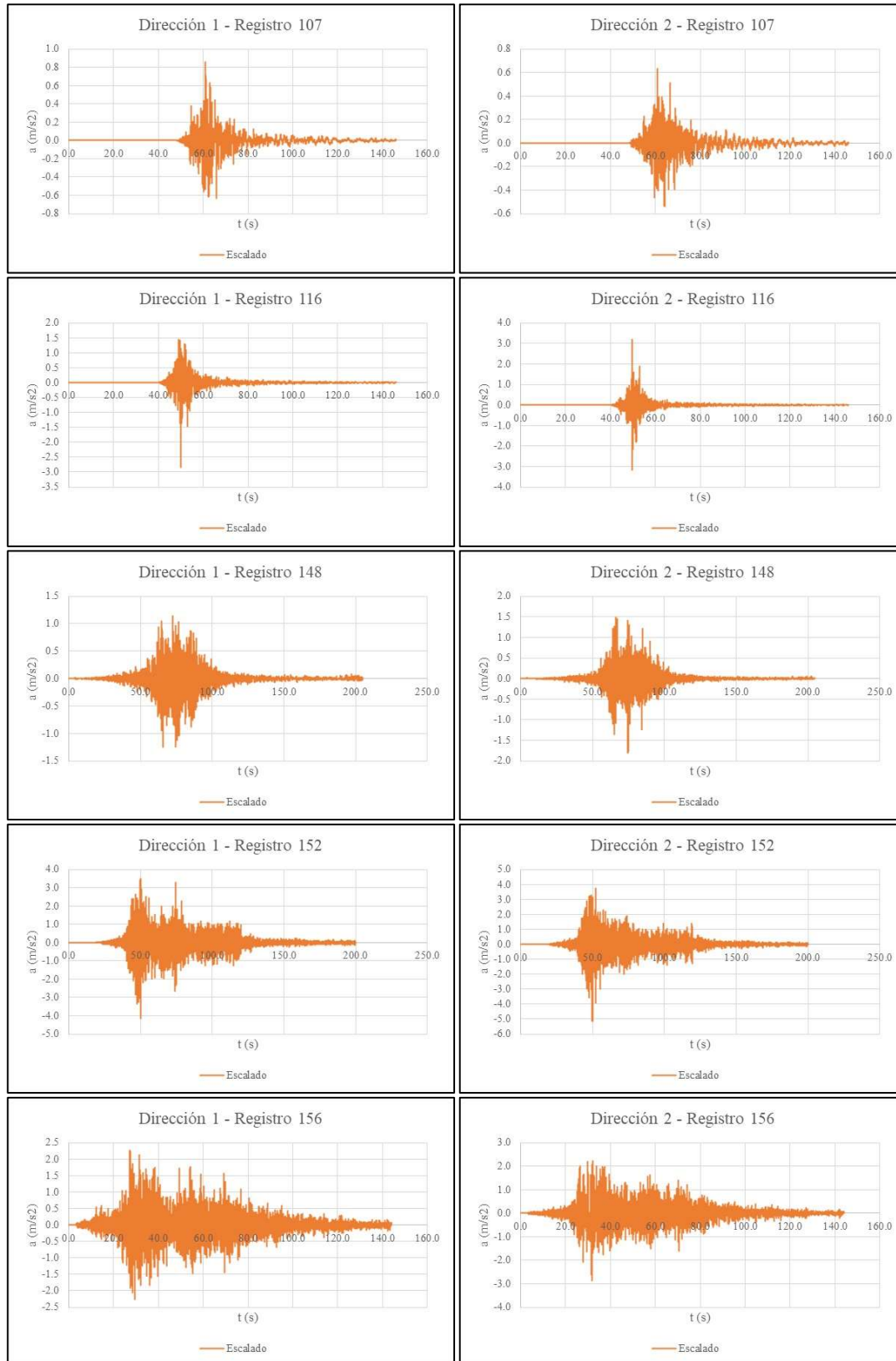


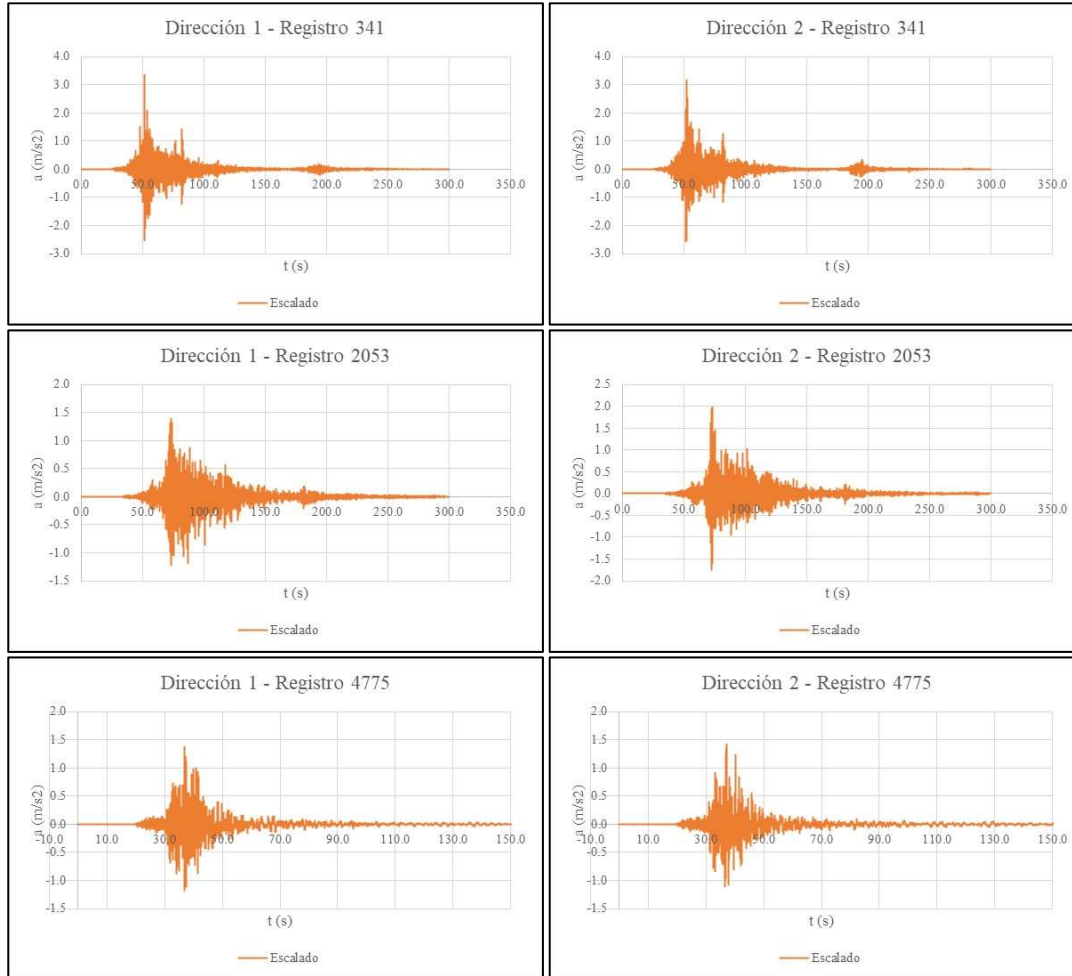




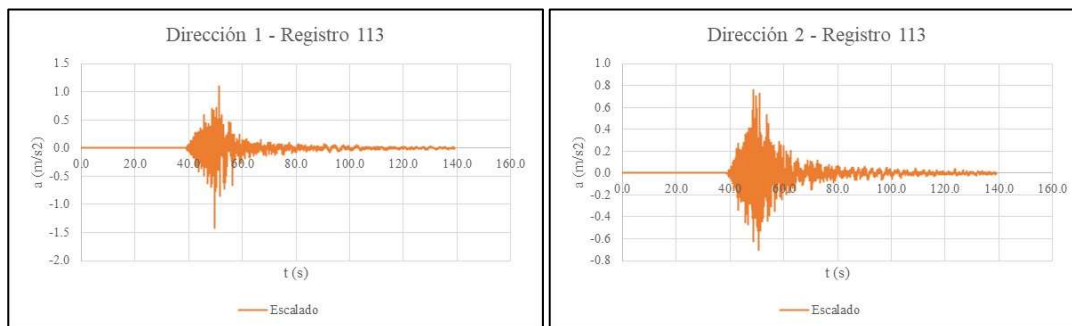
Selección EPSILON, escalada:

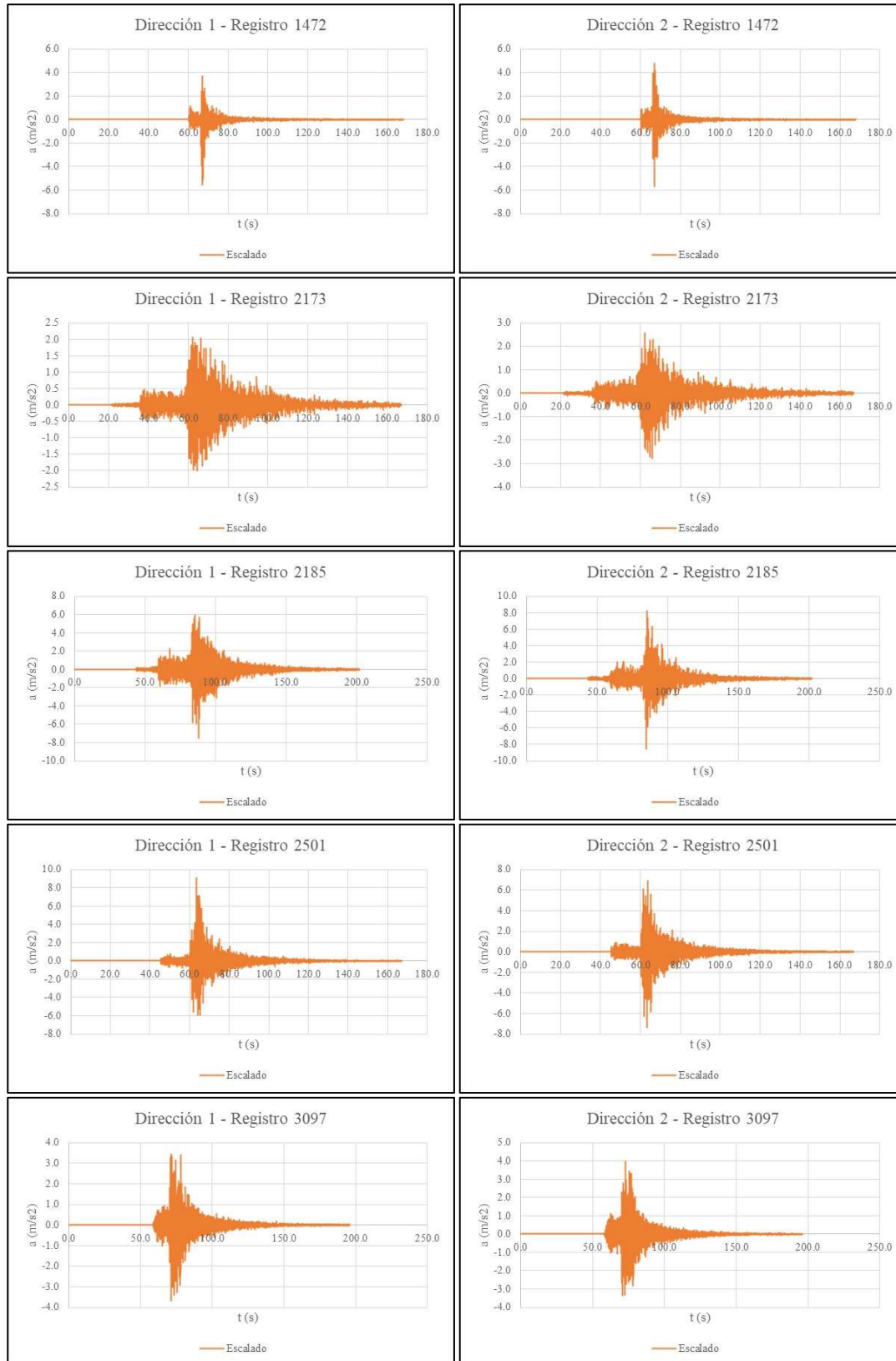


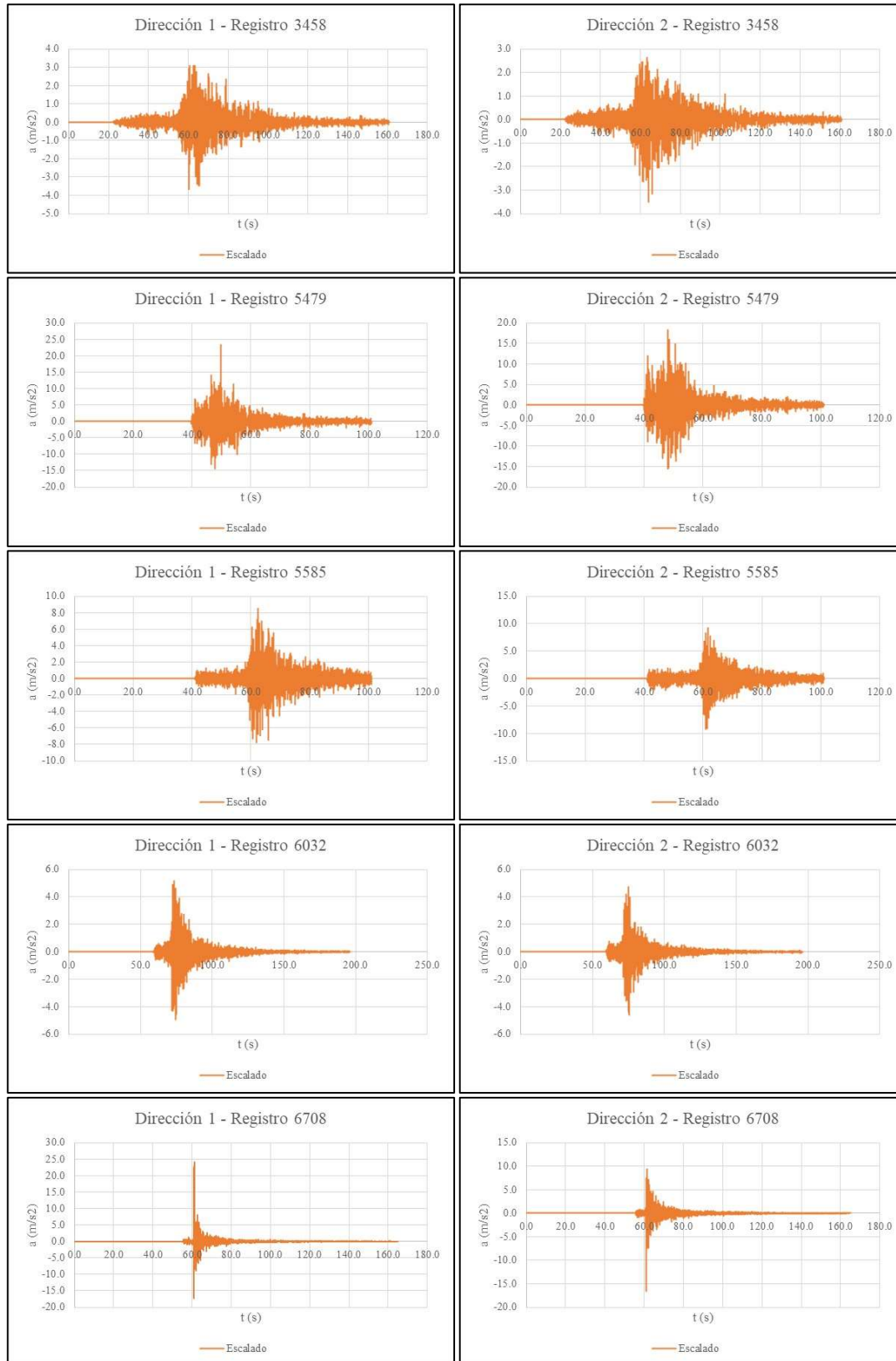




Selección RANDOM, escalada:



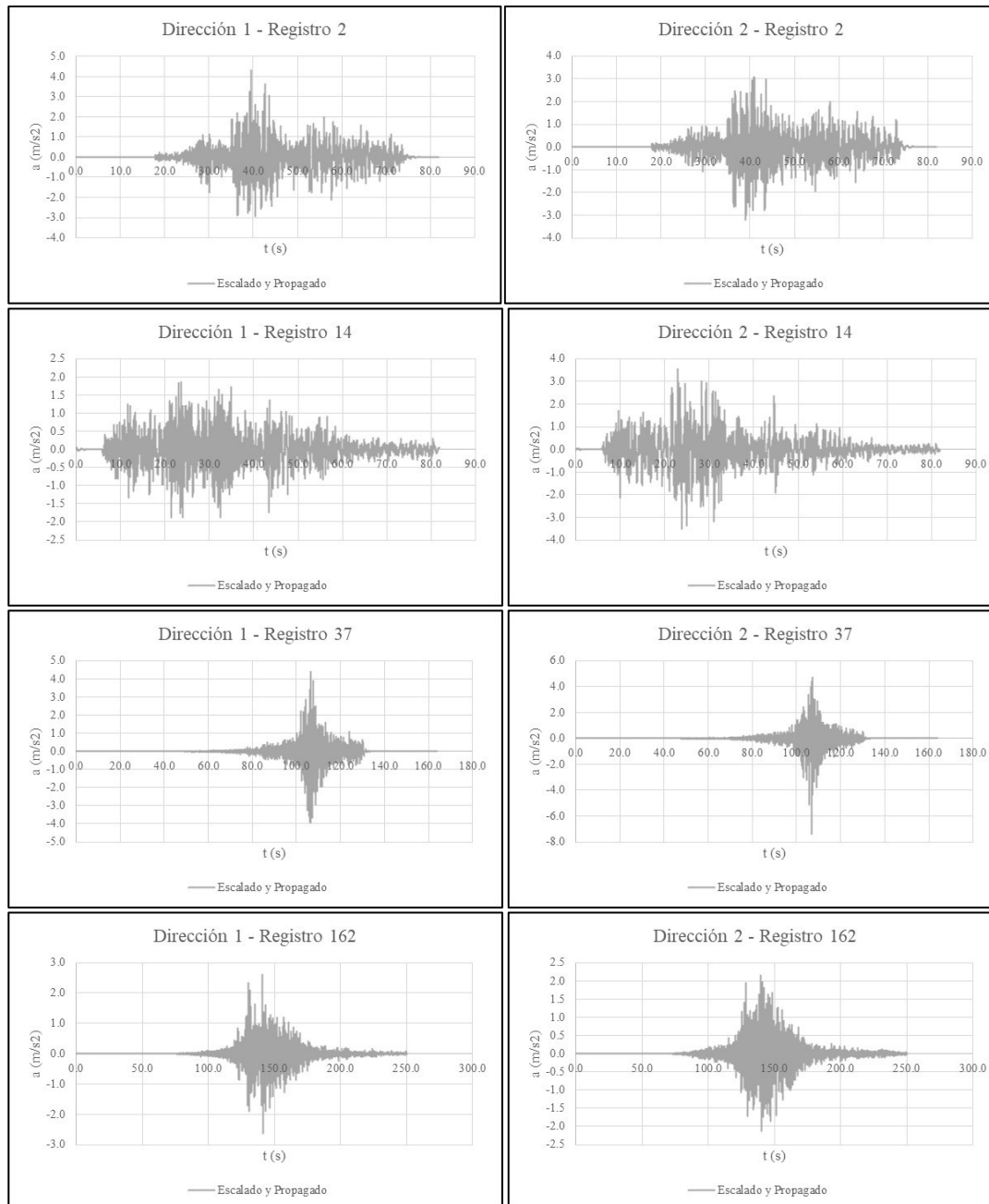


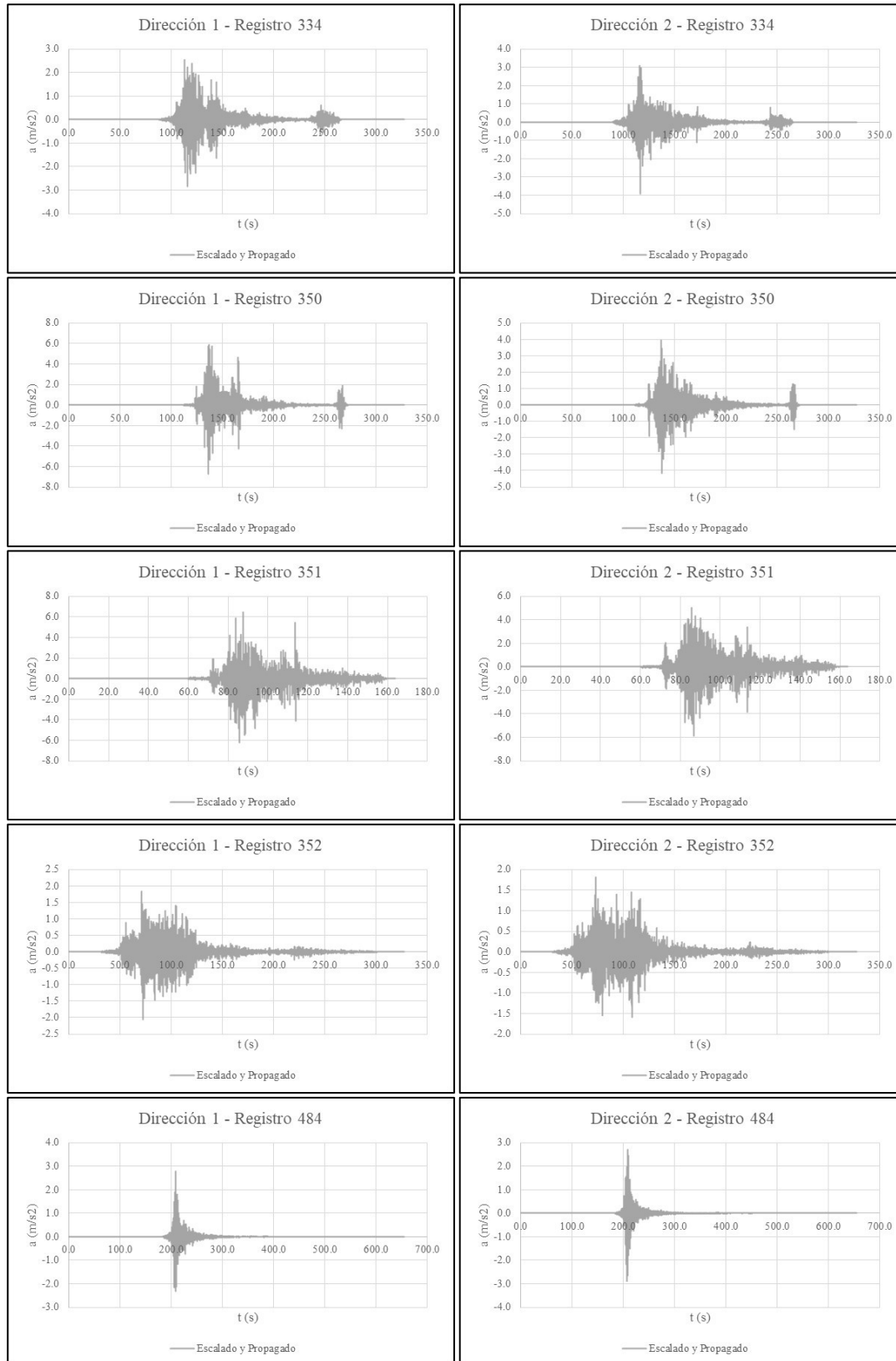


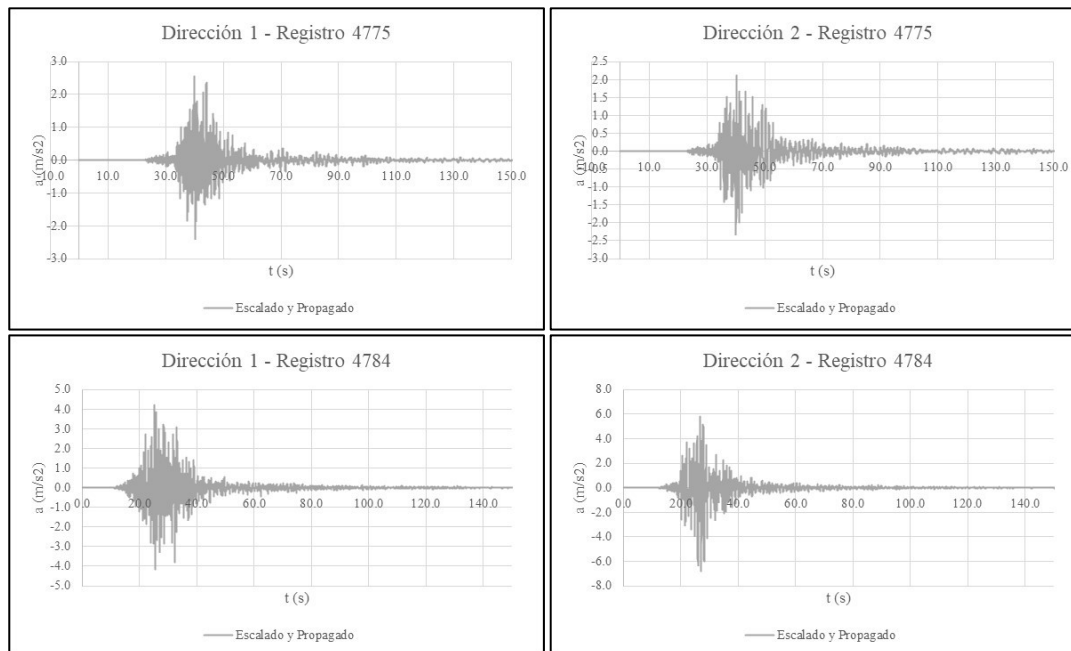
ANEXO H: REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS ESCALADOS Y PROPAGADOS CONSIDERANDO CRITERIOS CMS, UHS, EPSILON Y RANDOM

Se presentan los 11 pares de registros seleccionados considerando los cuatro métodos, escalados y propagados

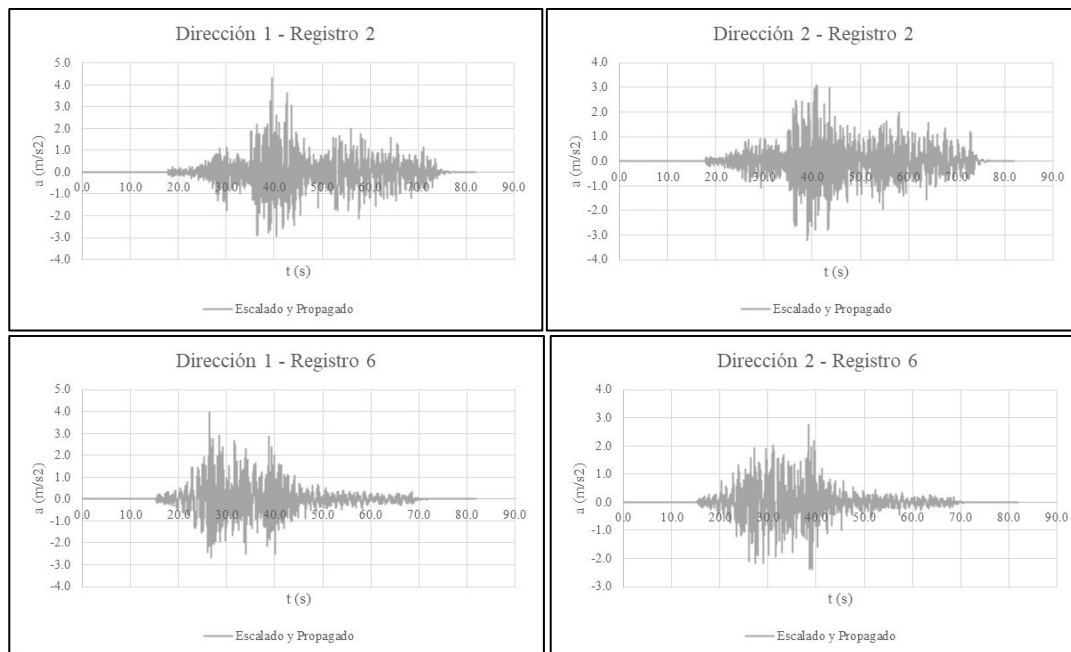
Selección CMS, escalada y propagada:

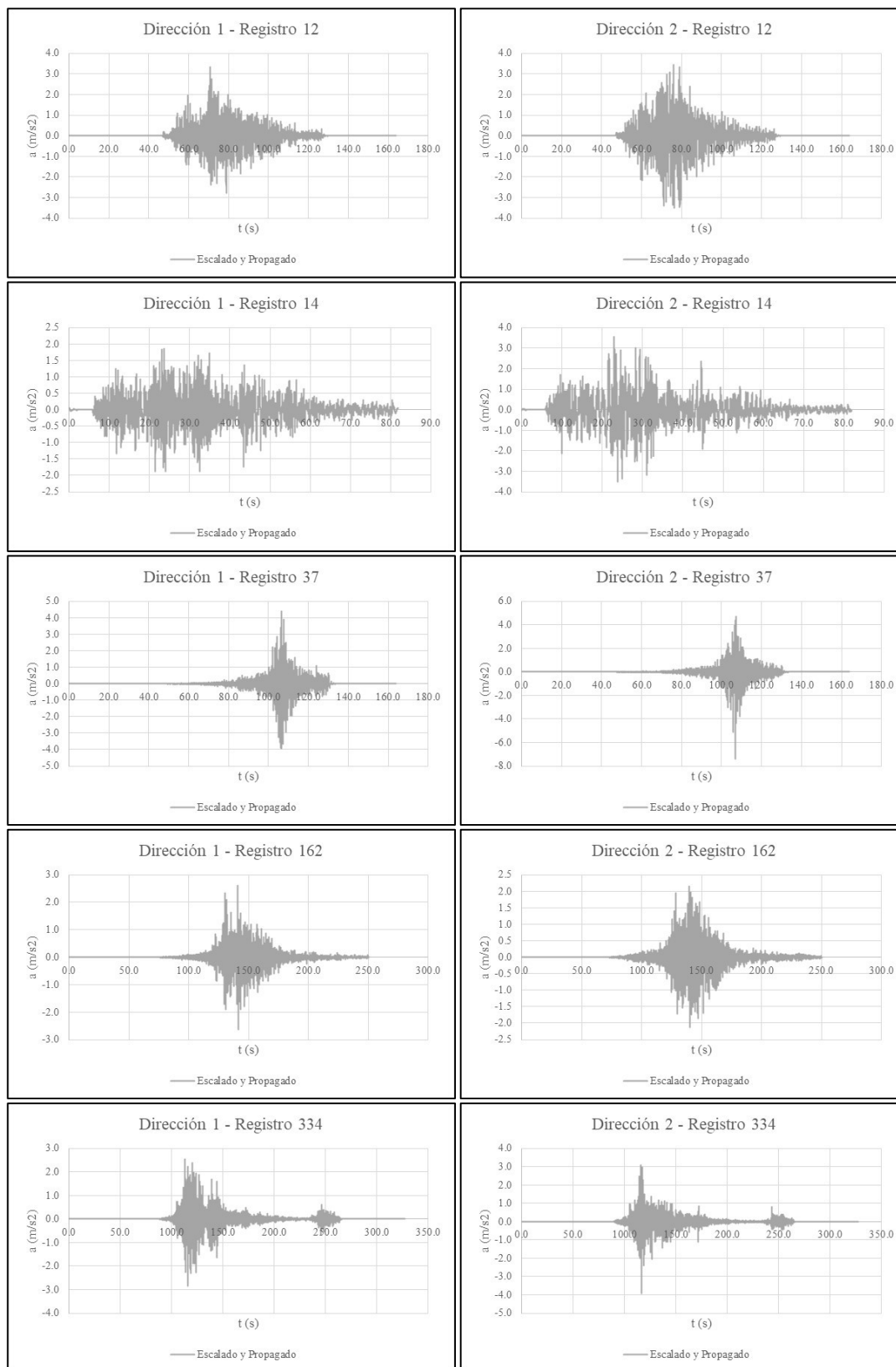


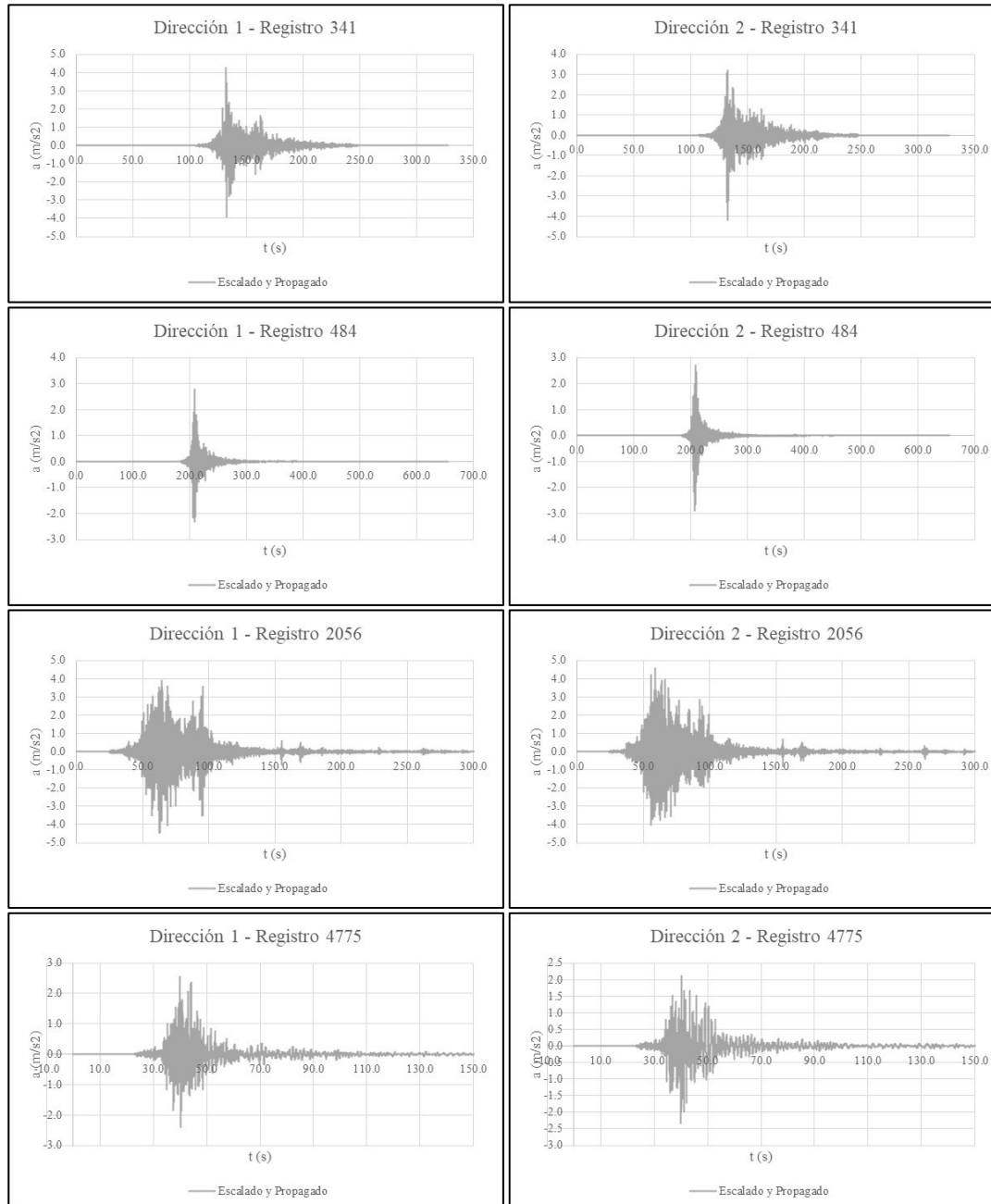


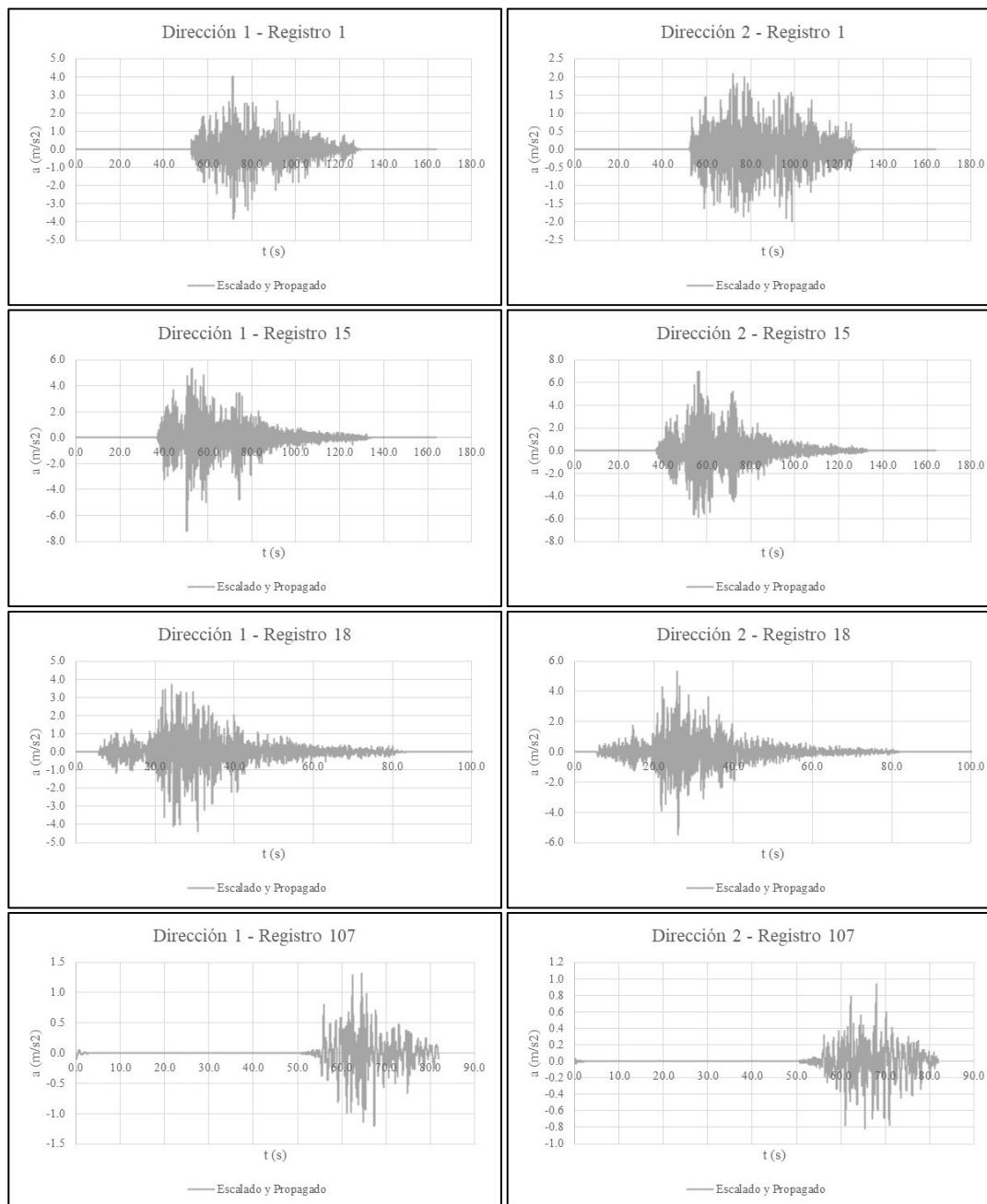


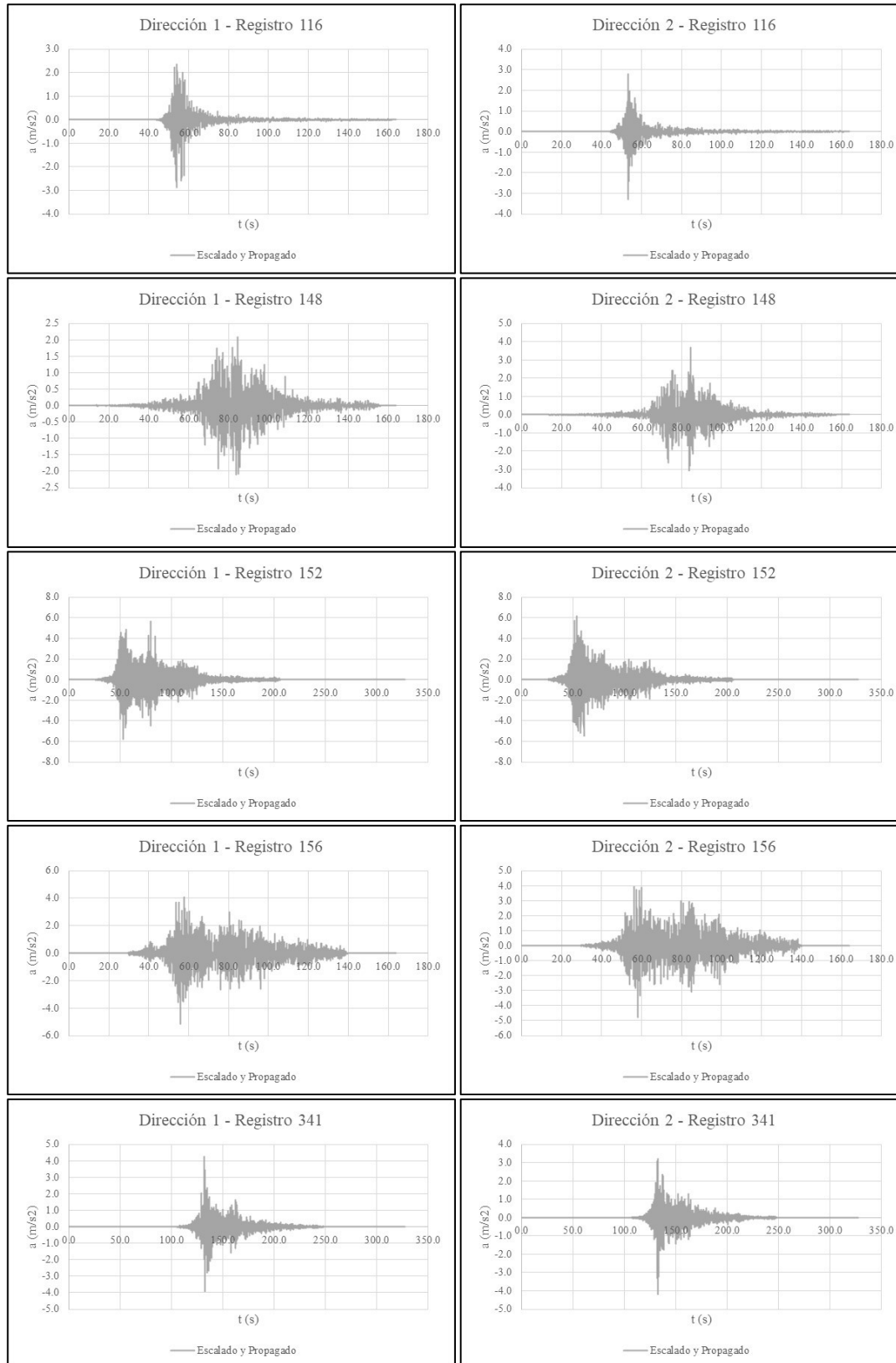
Selección UHS, escalada y propagada:

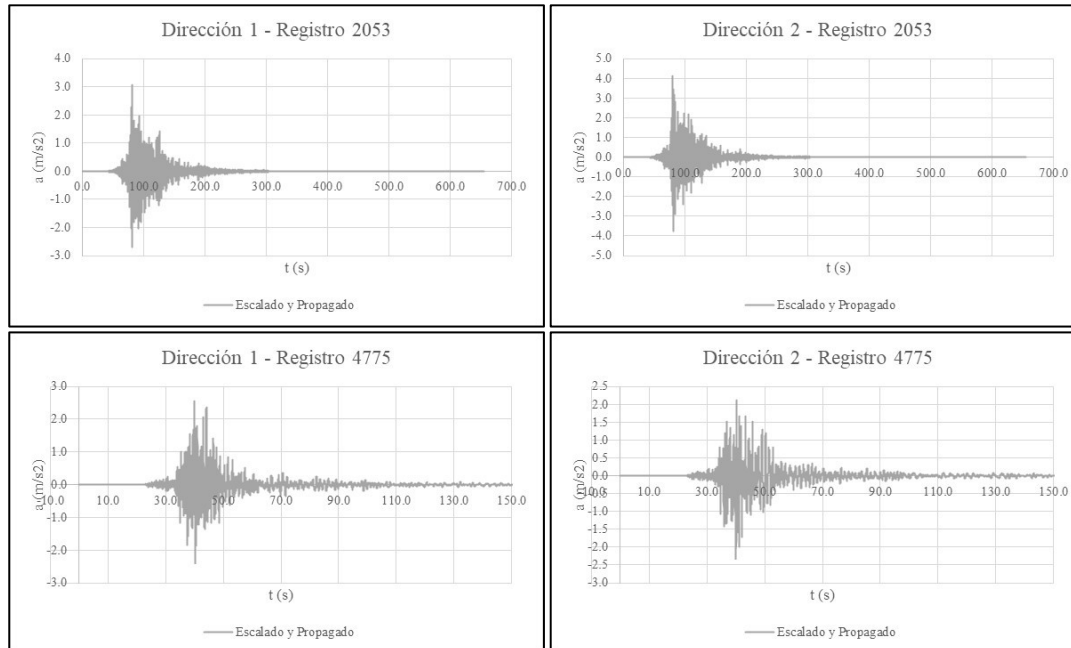




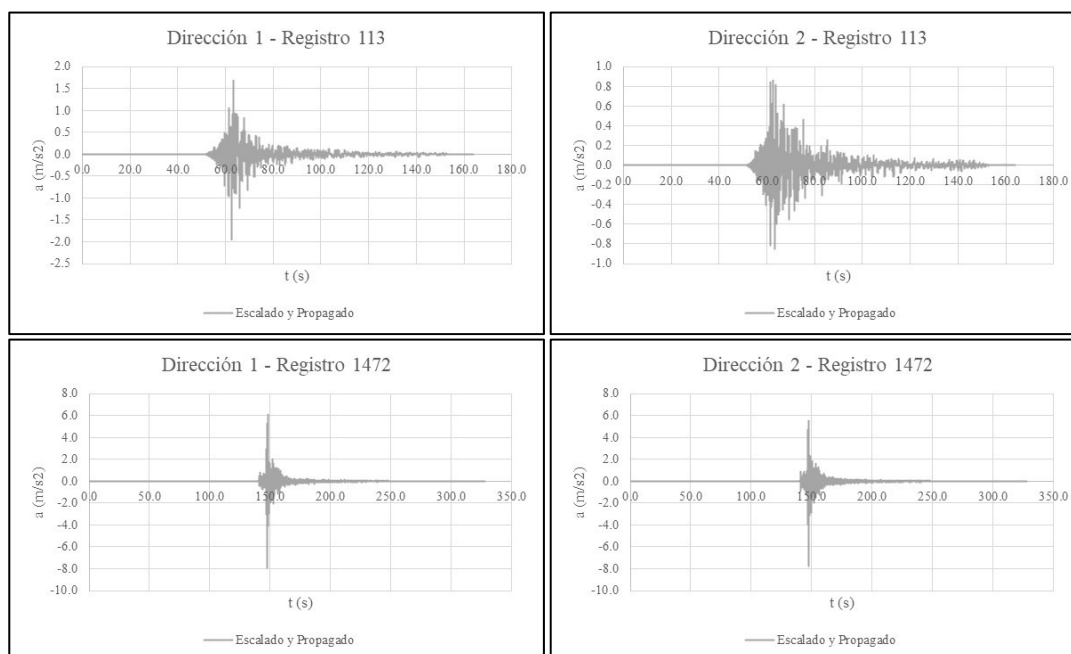


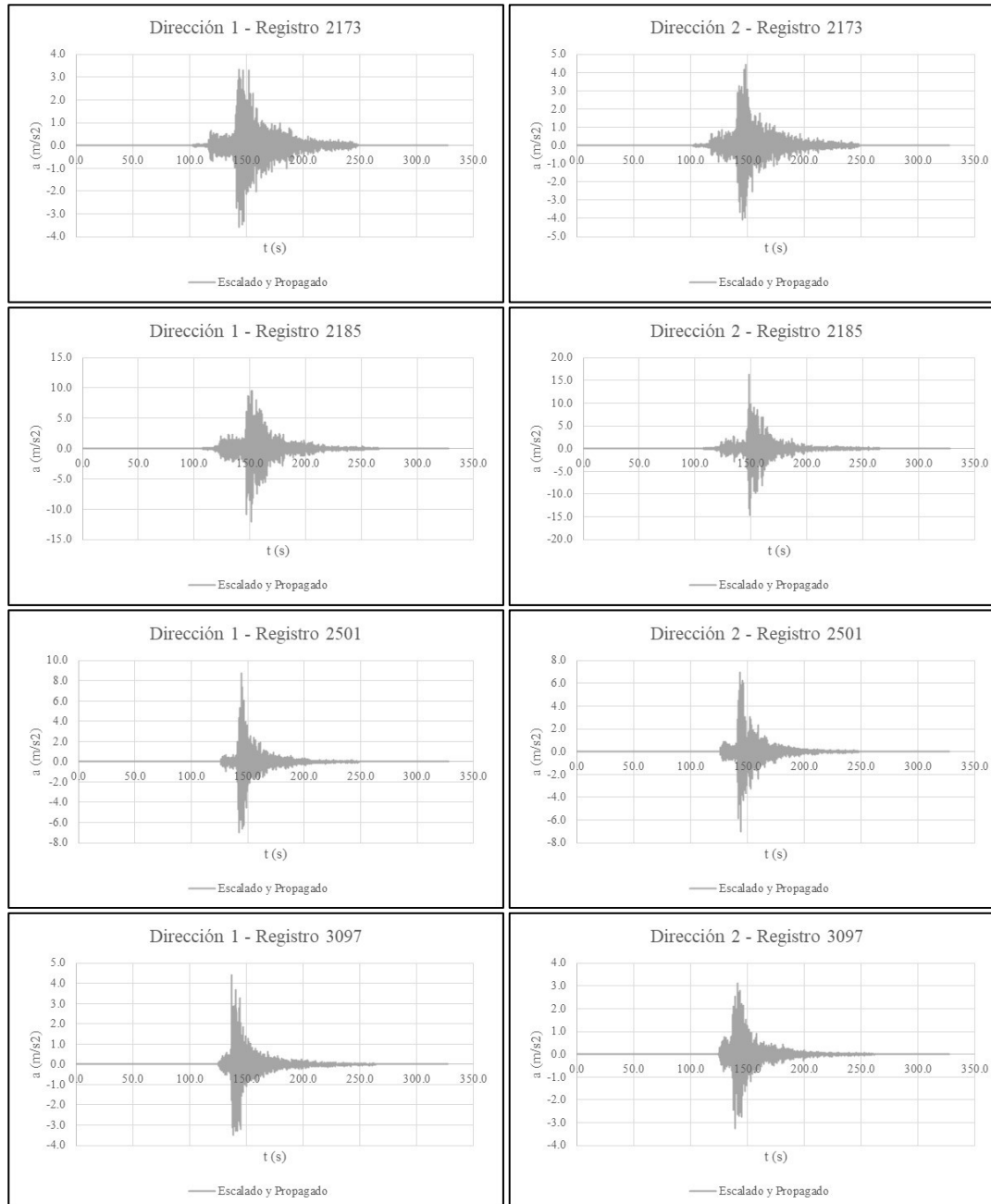
Selección EPSILON, escalada y propagada:

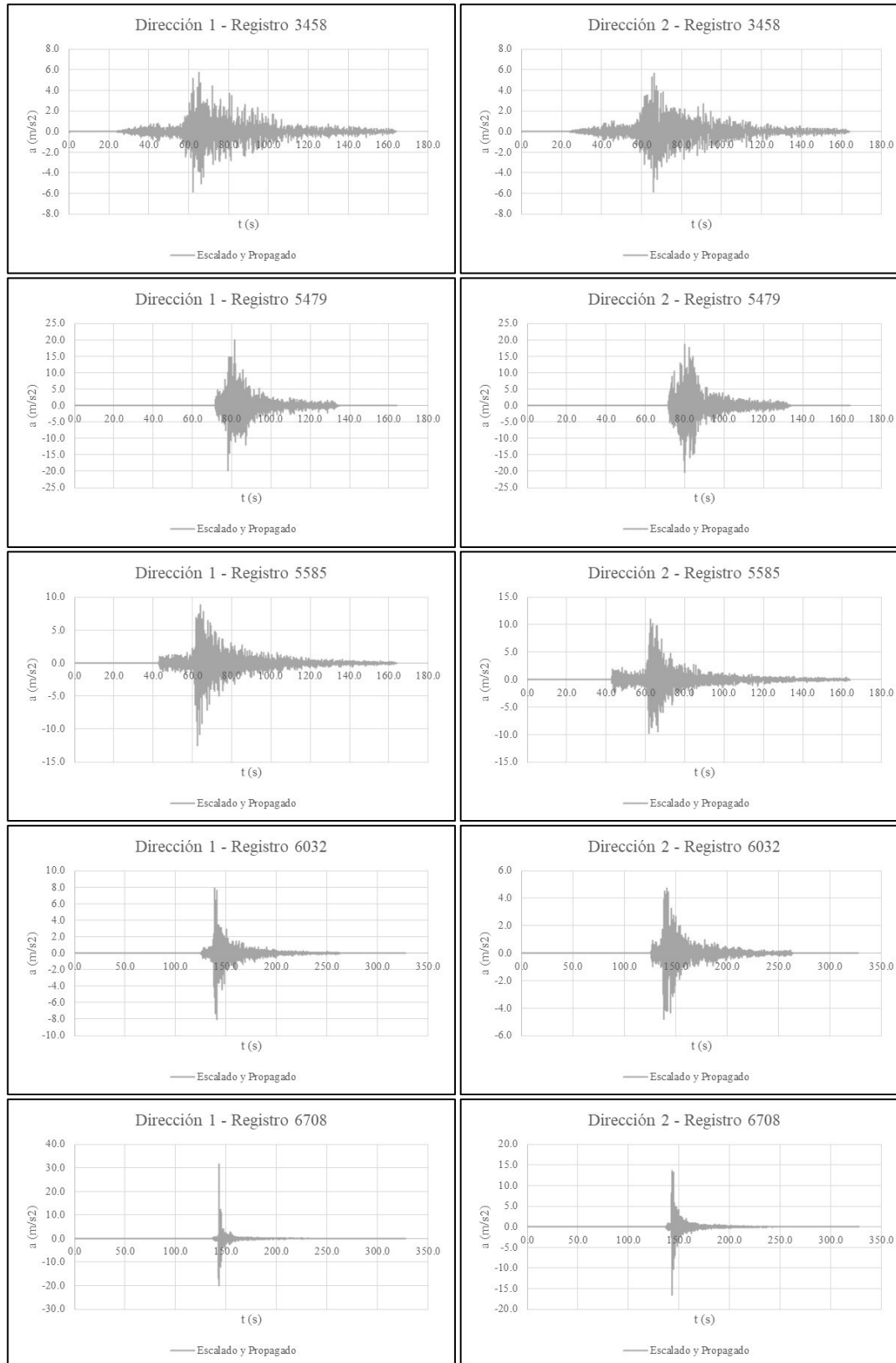




Selección RANDOM, escalada y propagada:



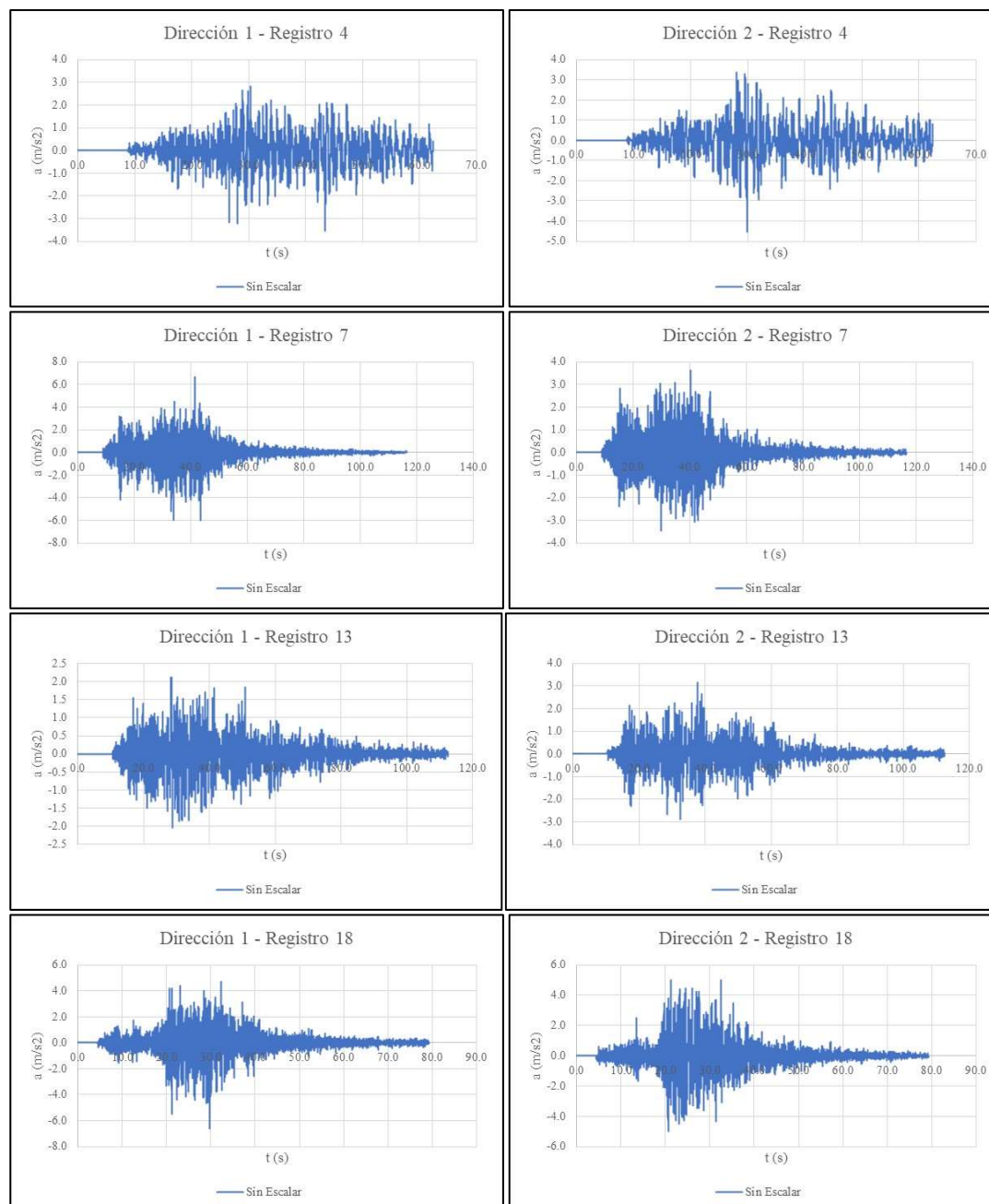


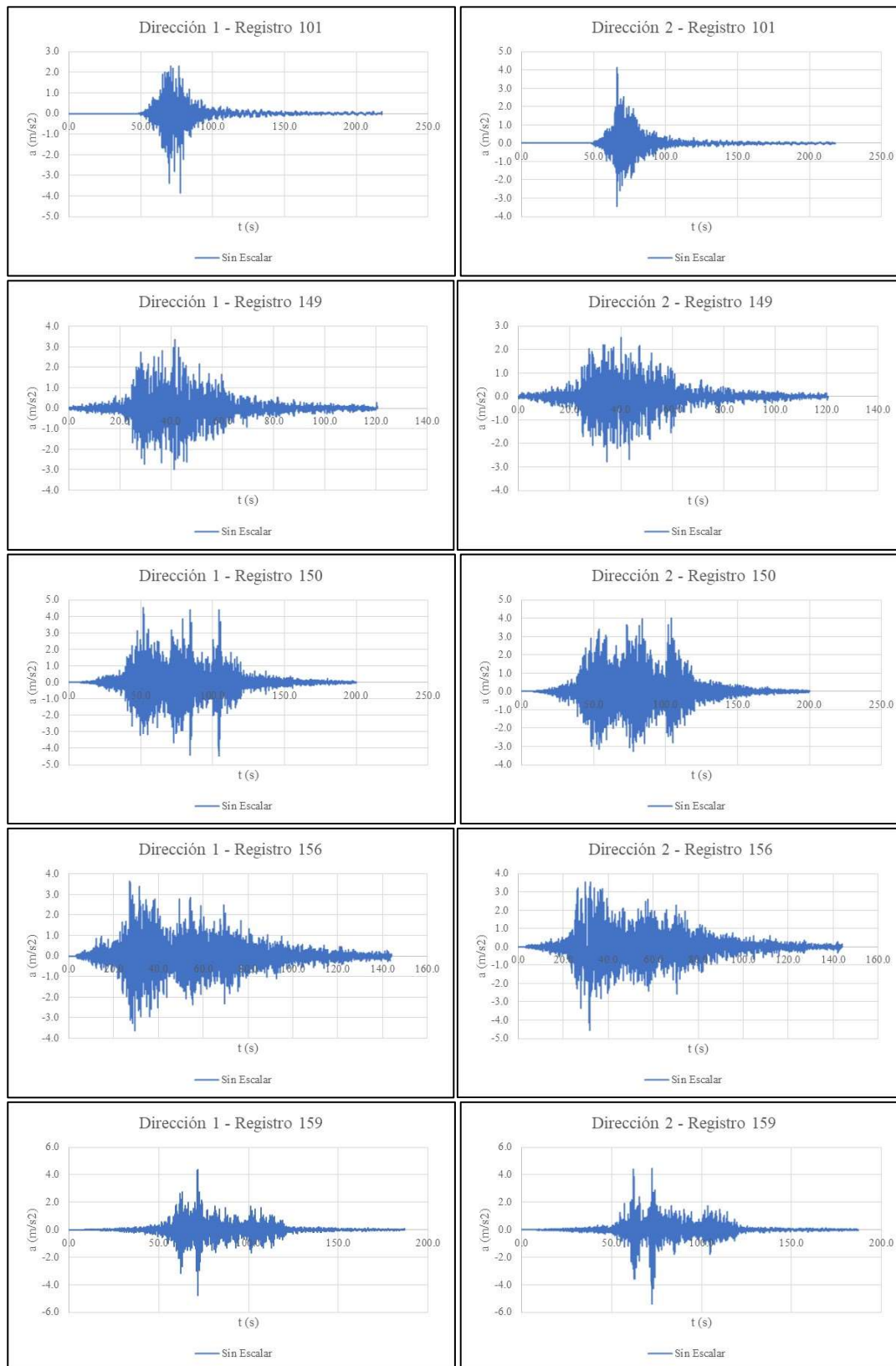


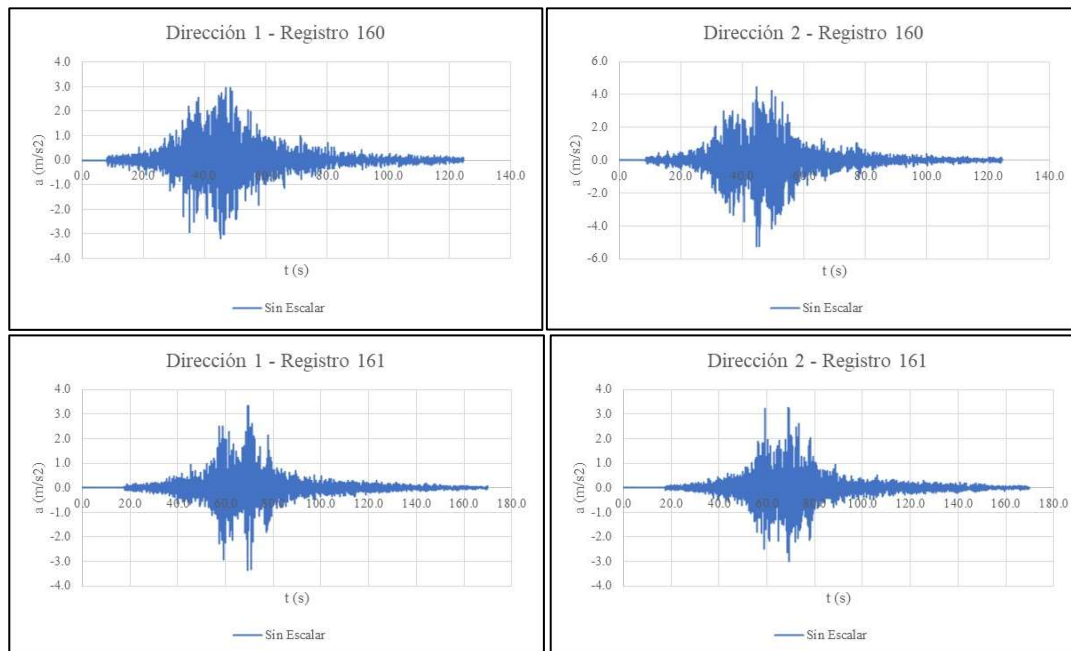
ANEXO I: REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS CONSIDERANDO ESPECTROS DE SITIO PARA CMS, UHS, EPSILON Y RANDOM

Se presentan los 11 pares de registros seleccionados considerando los espectros de sitio desarrollados por los cuatro métodos

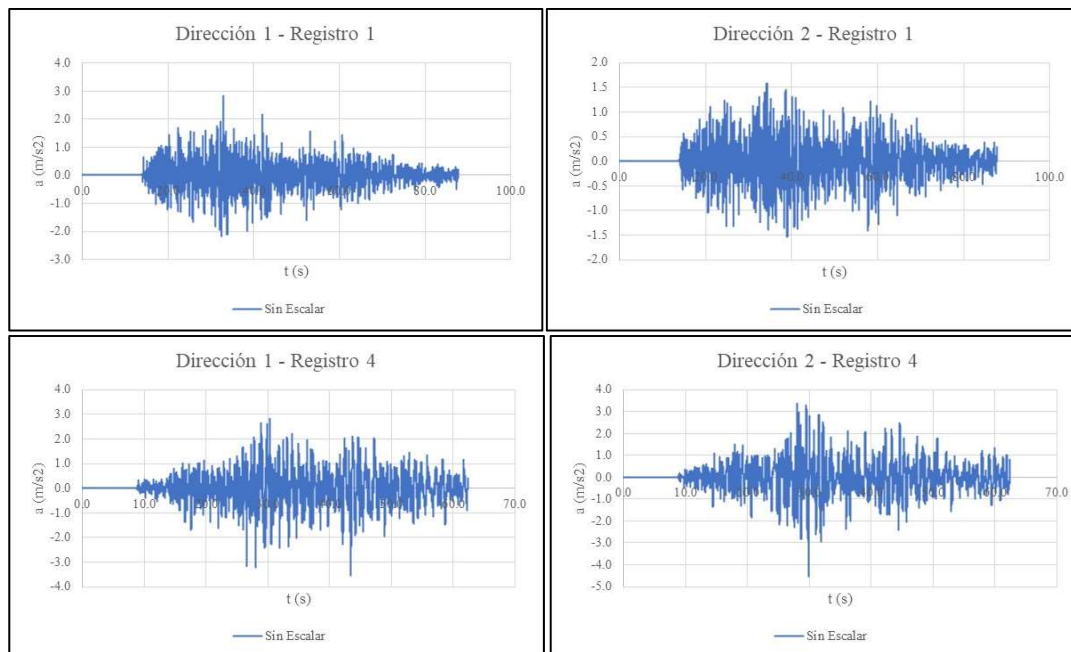
Selección CMS, espectro de sitio:

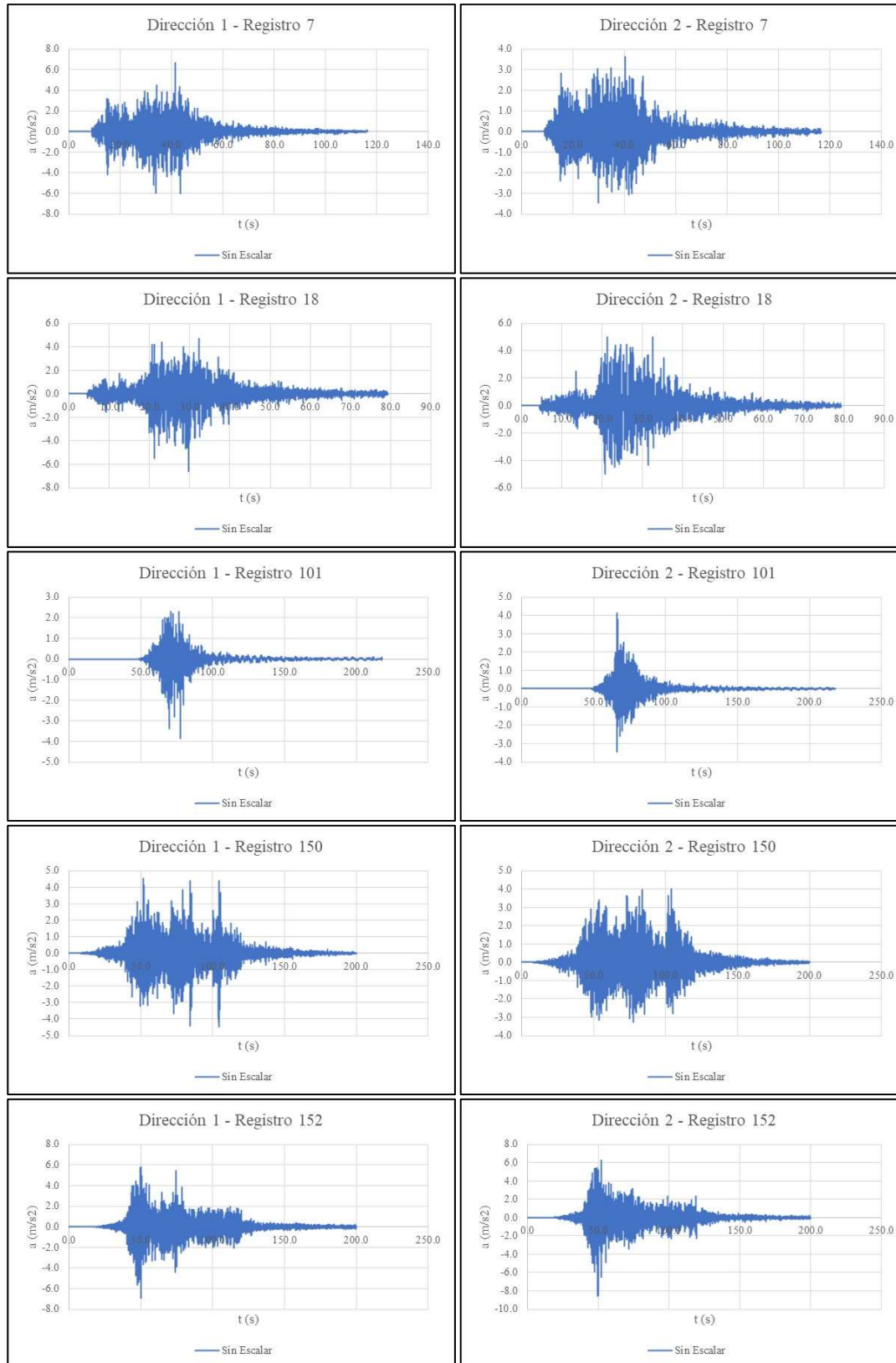


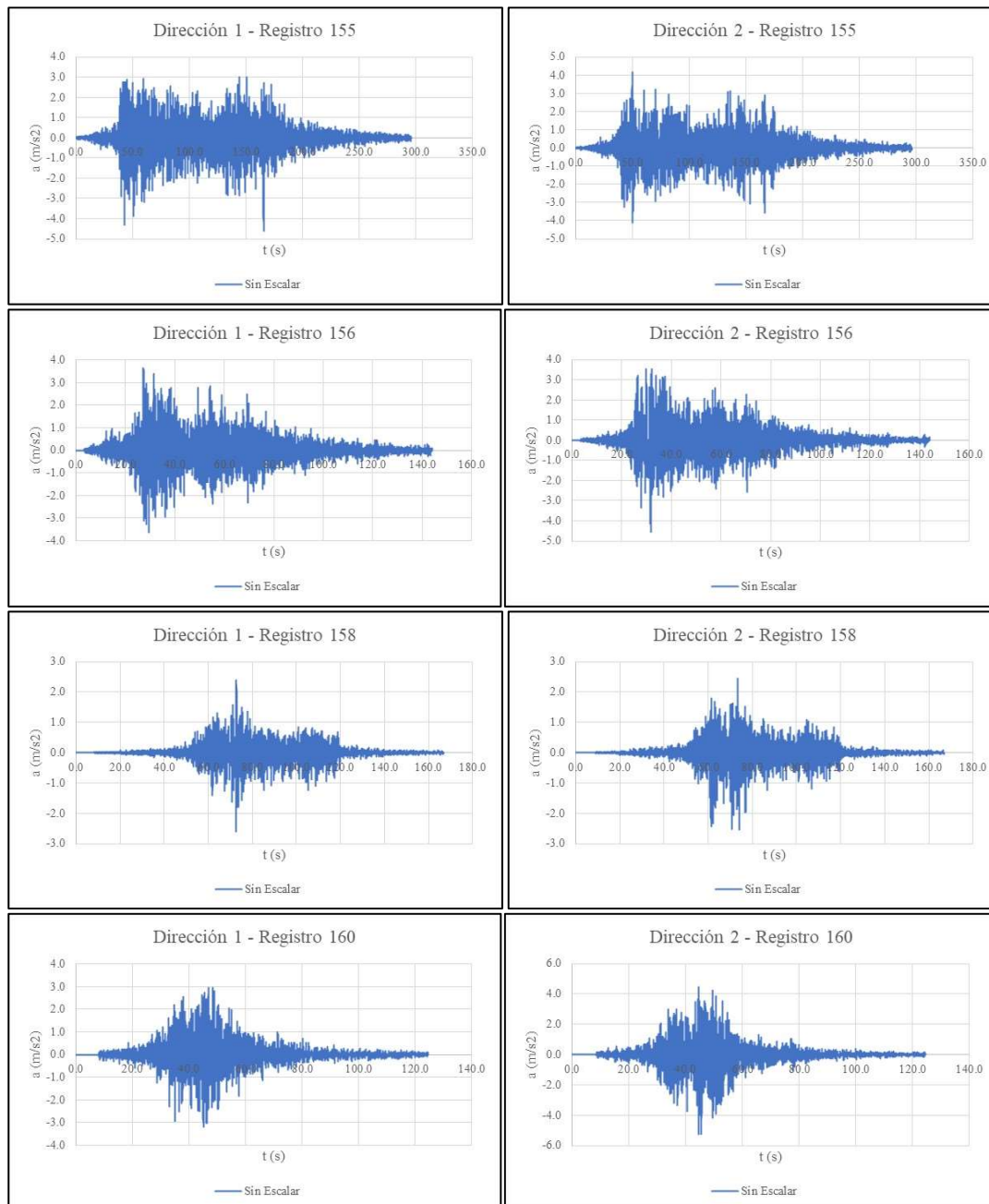




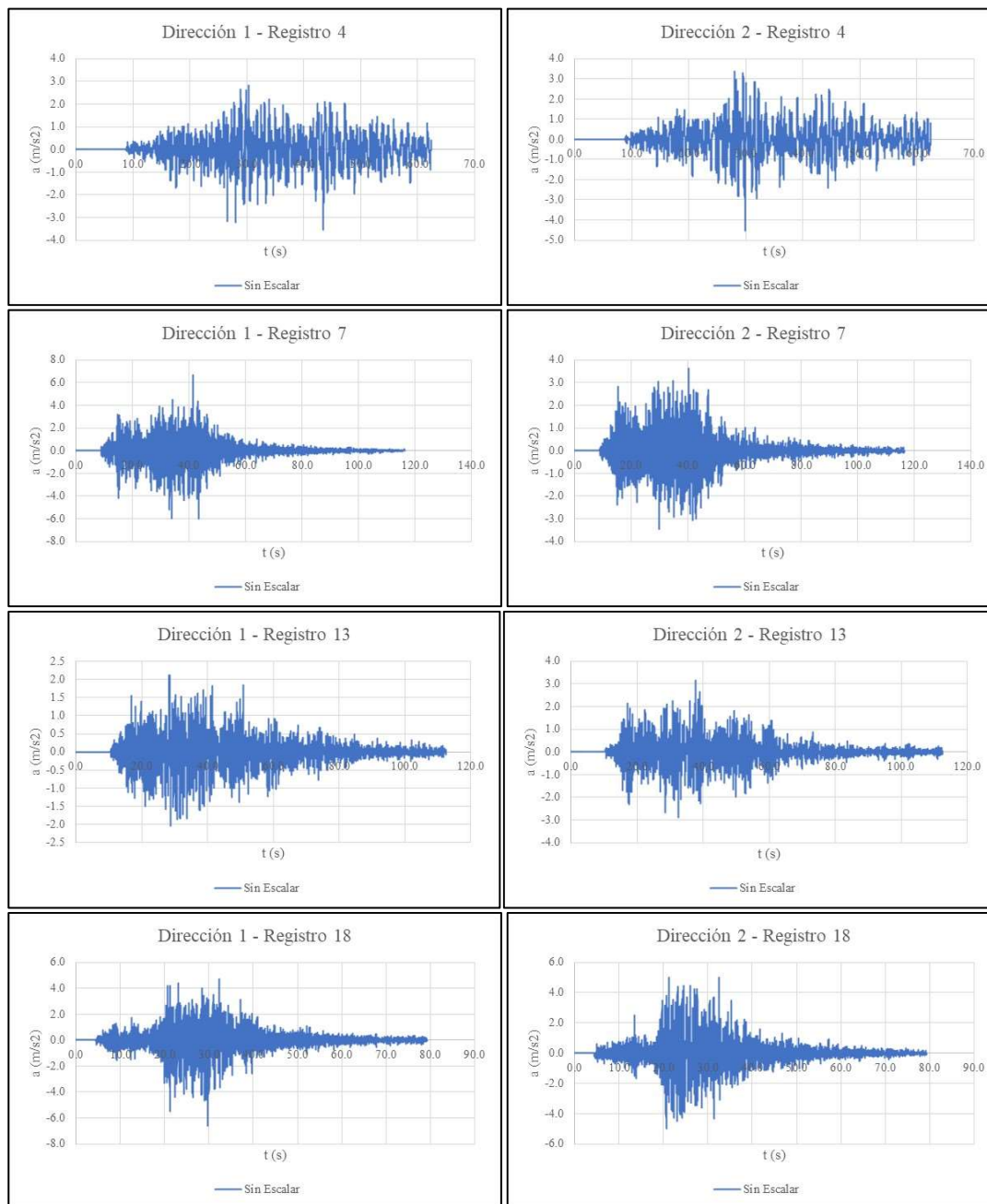
Selección UHS, espectro de sitio:

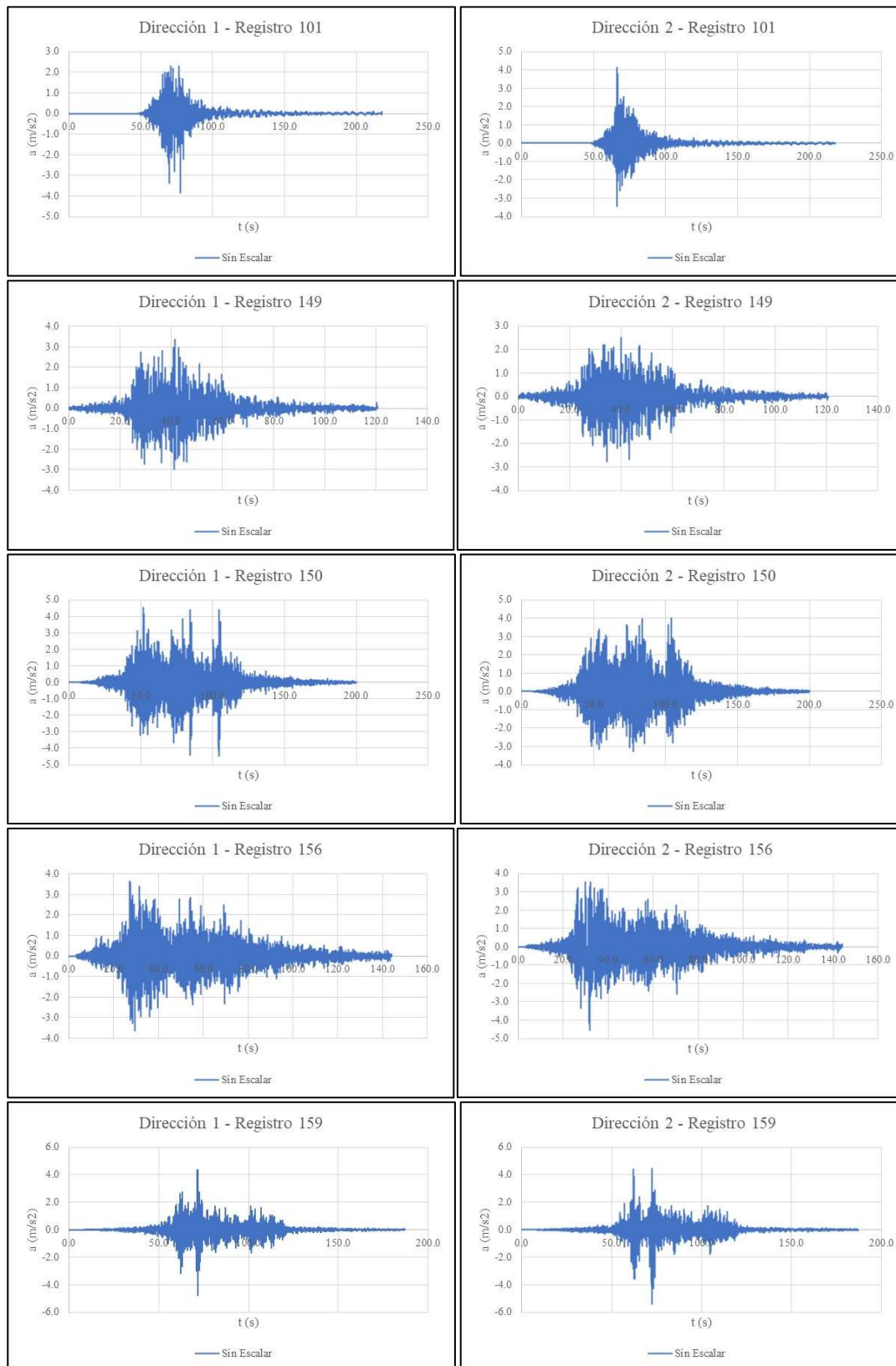


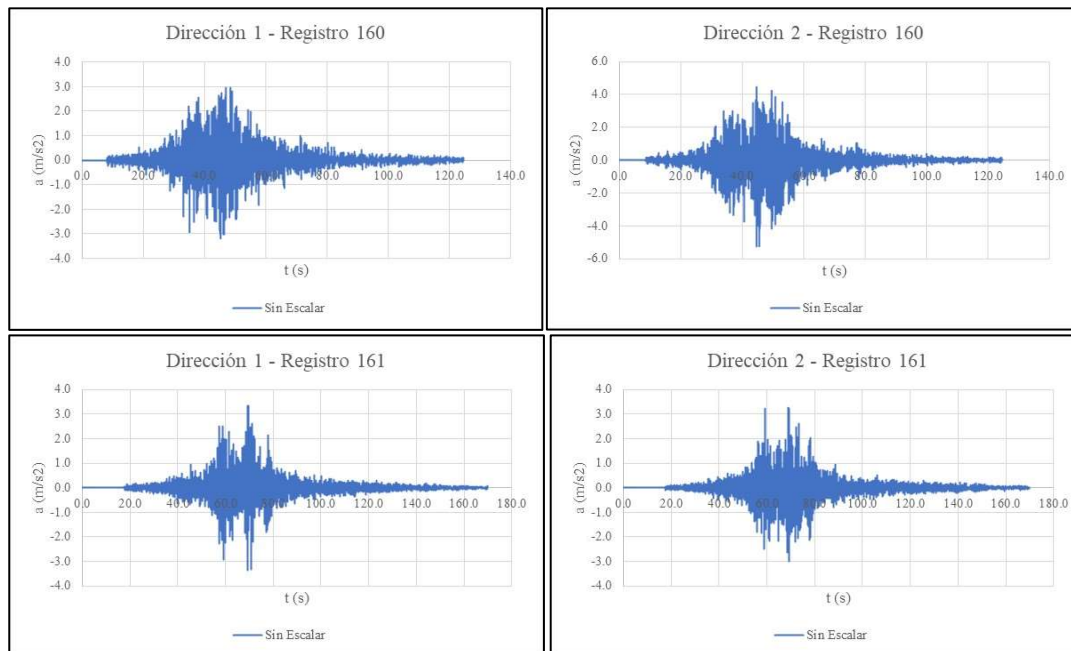




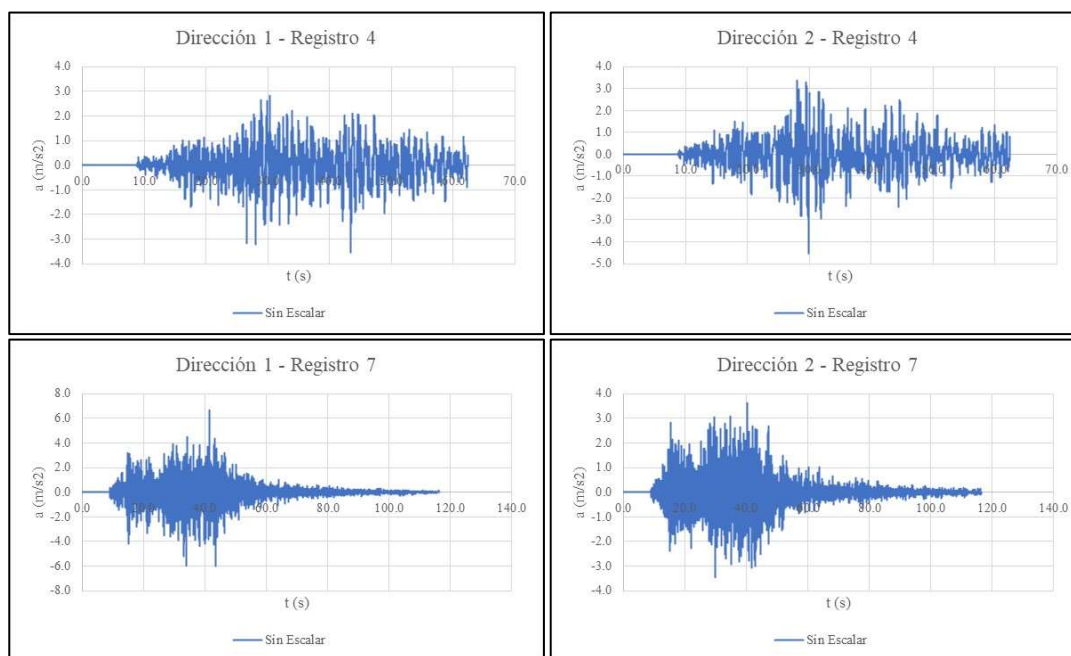
Selección EPSILON, espectro de sitio:

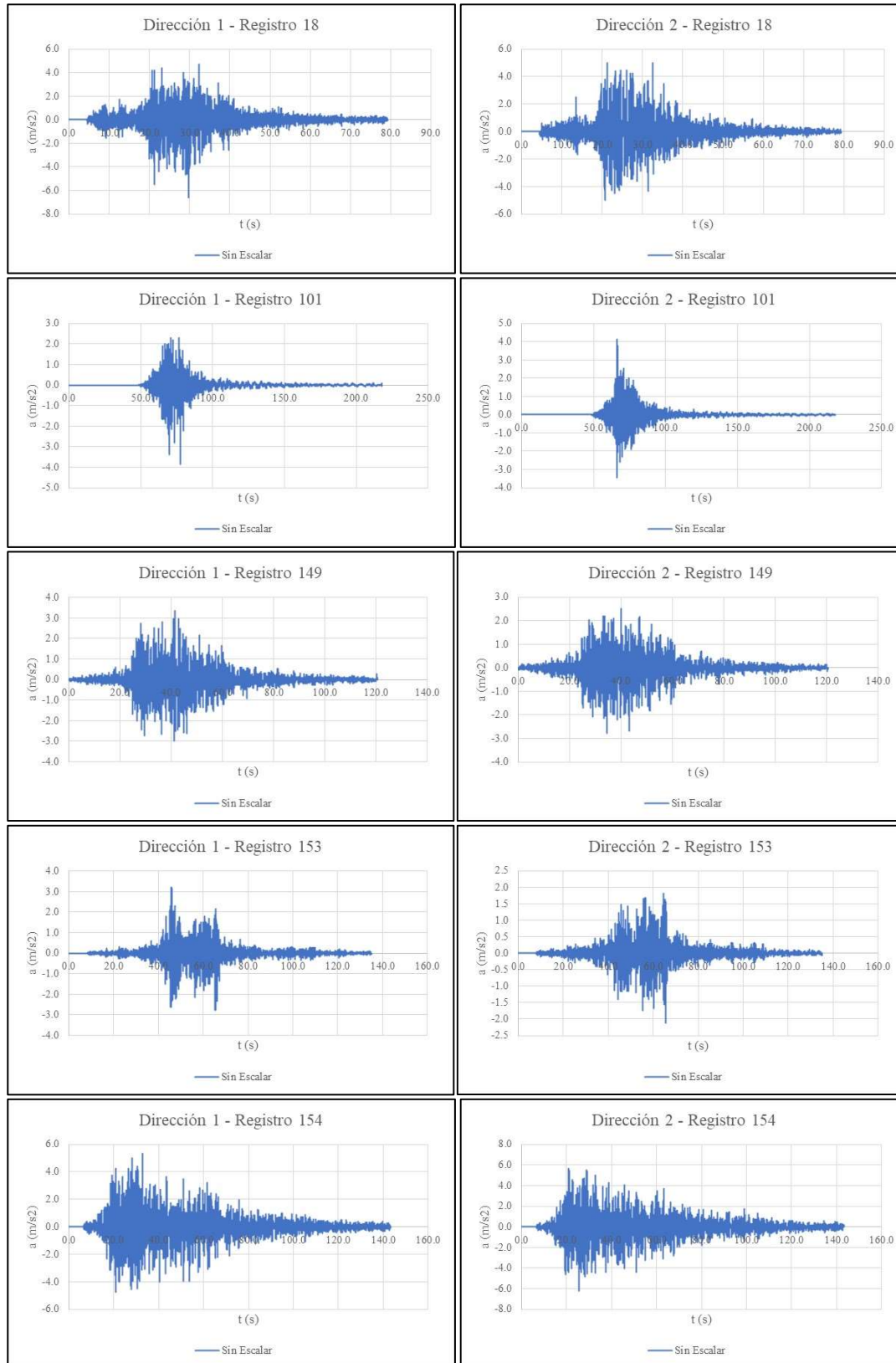


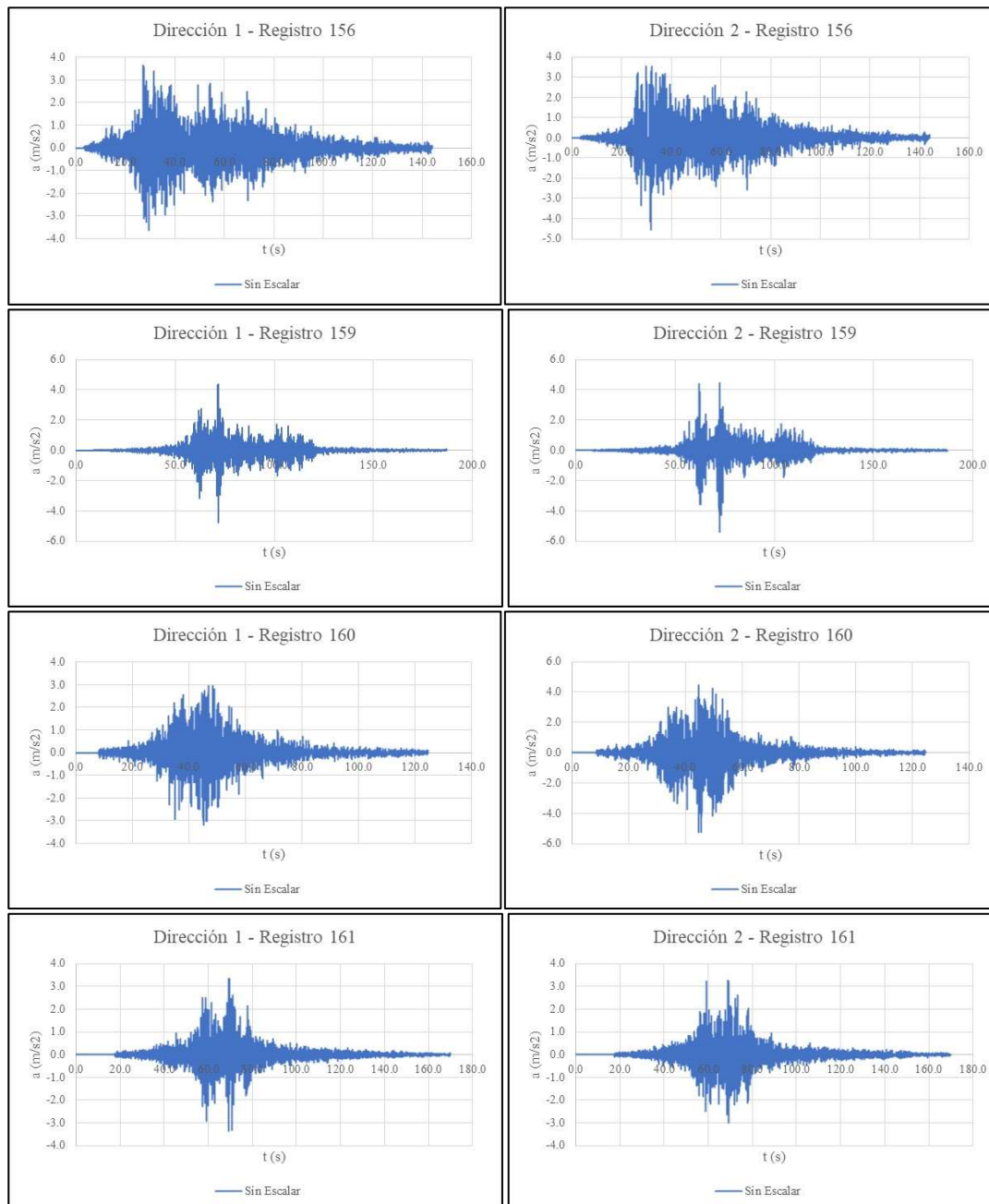




Selección RANDOM, espectro de sitio:



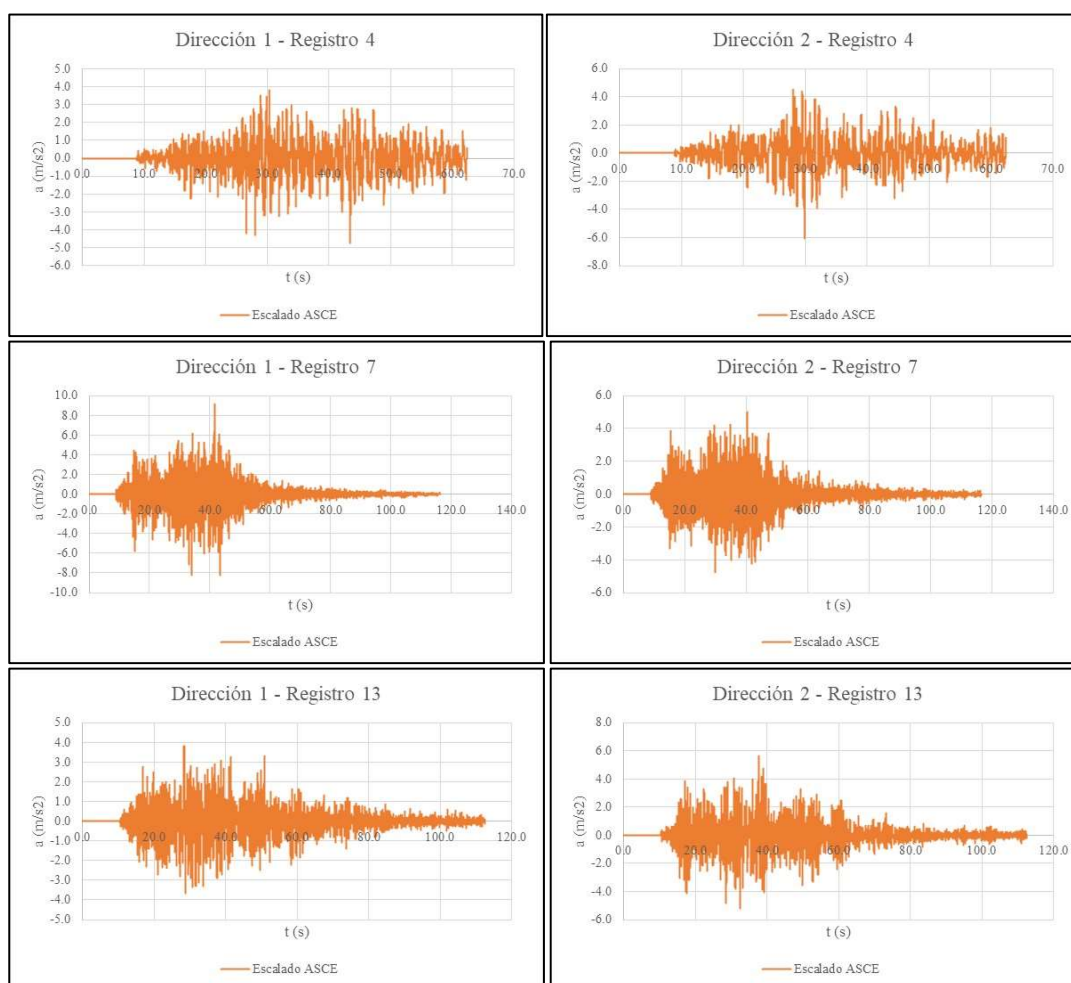


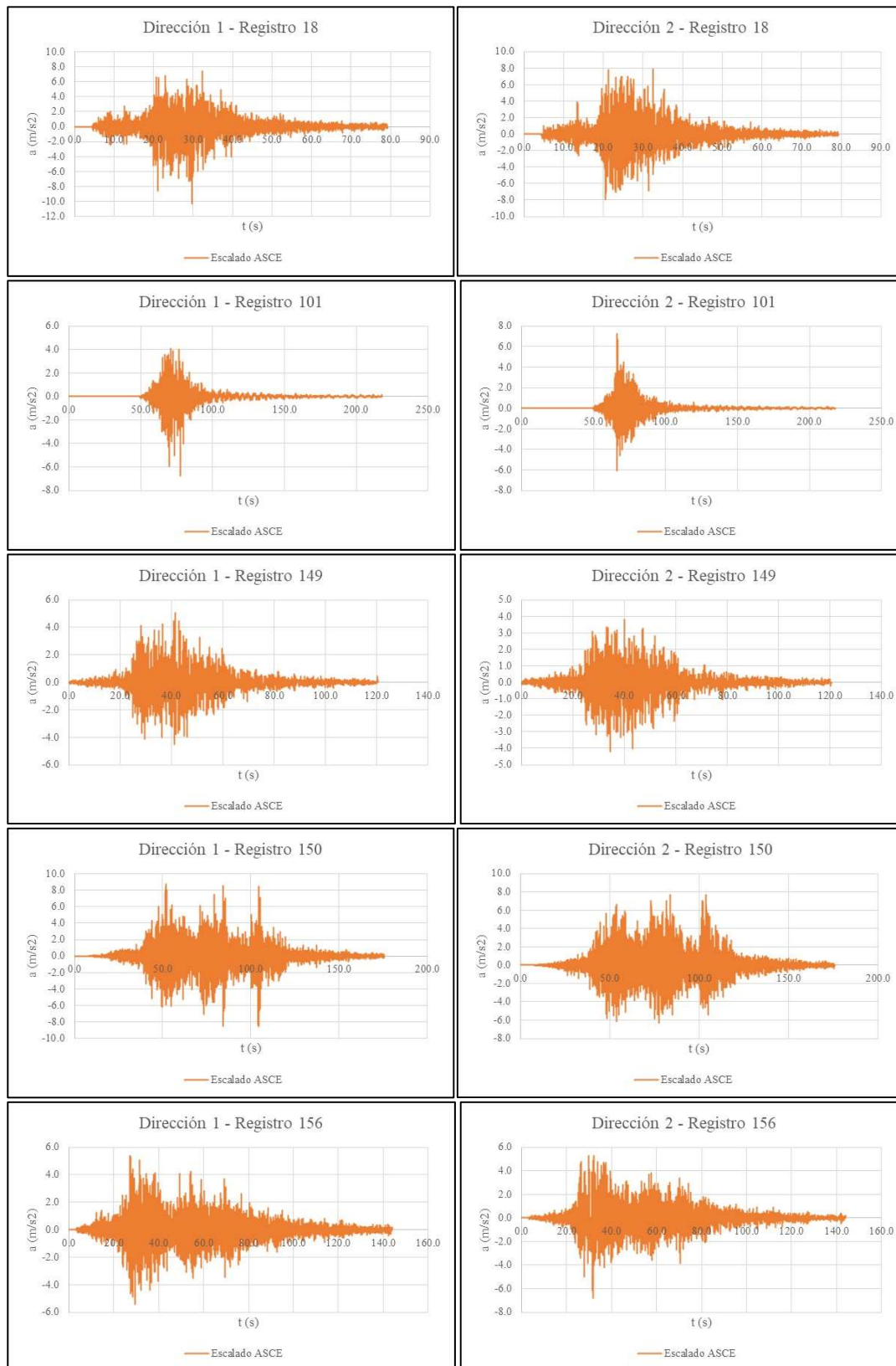


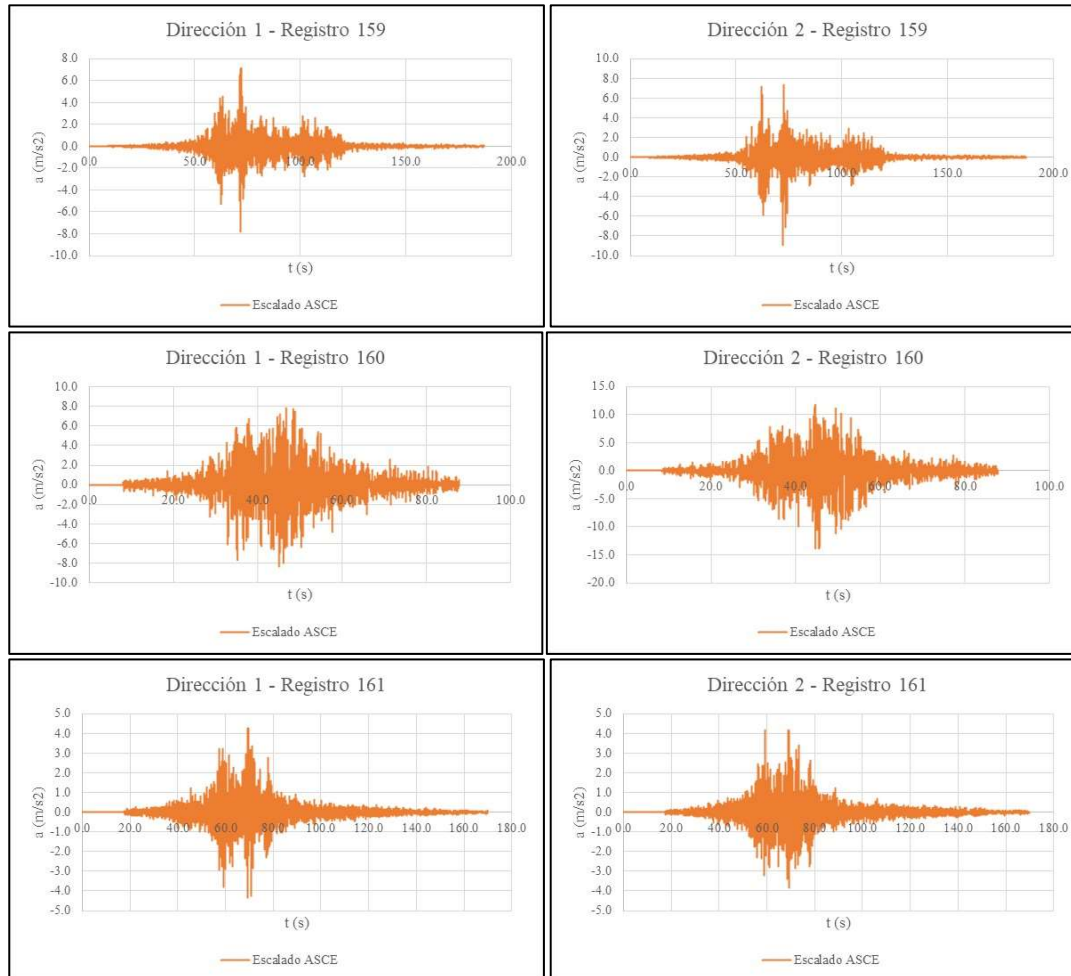
ANEXO J: REGISTROS SÍSMICOS ESCALADSO CONSIDERANDO ASCE PARA CMS, UHS. EPSILON Y RANDOM

Se presentan los 11 pares de registros seleccionados considerando los espectros de sitio desarrollados por los cuatro métodos y escalados considerando la norma ASCE, la cual indica que para el rango de periodos comprendidos entre 0.2 y 1.5 T, las aceleraciones espectrales deben estar por sobre el espectro de sitio

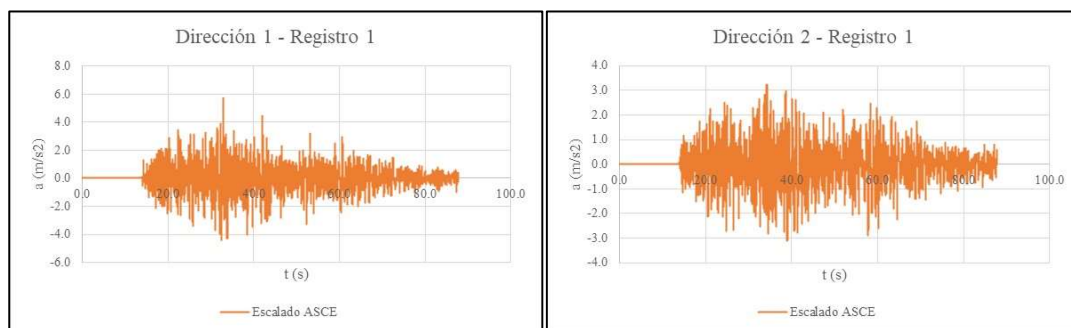
Selección CMS, escalado ASCE:

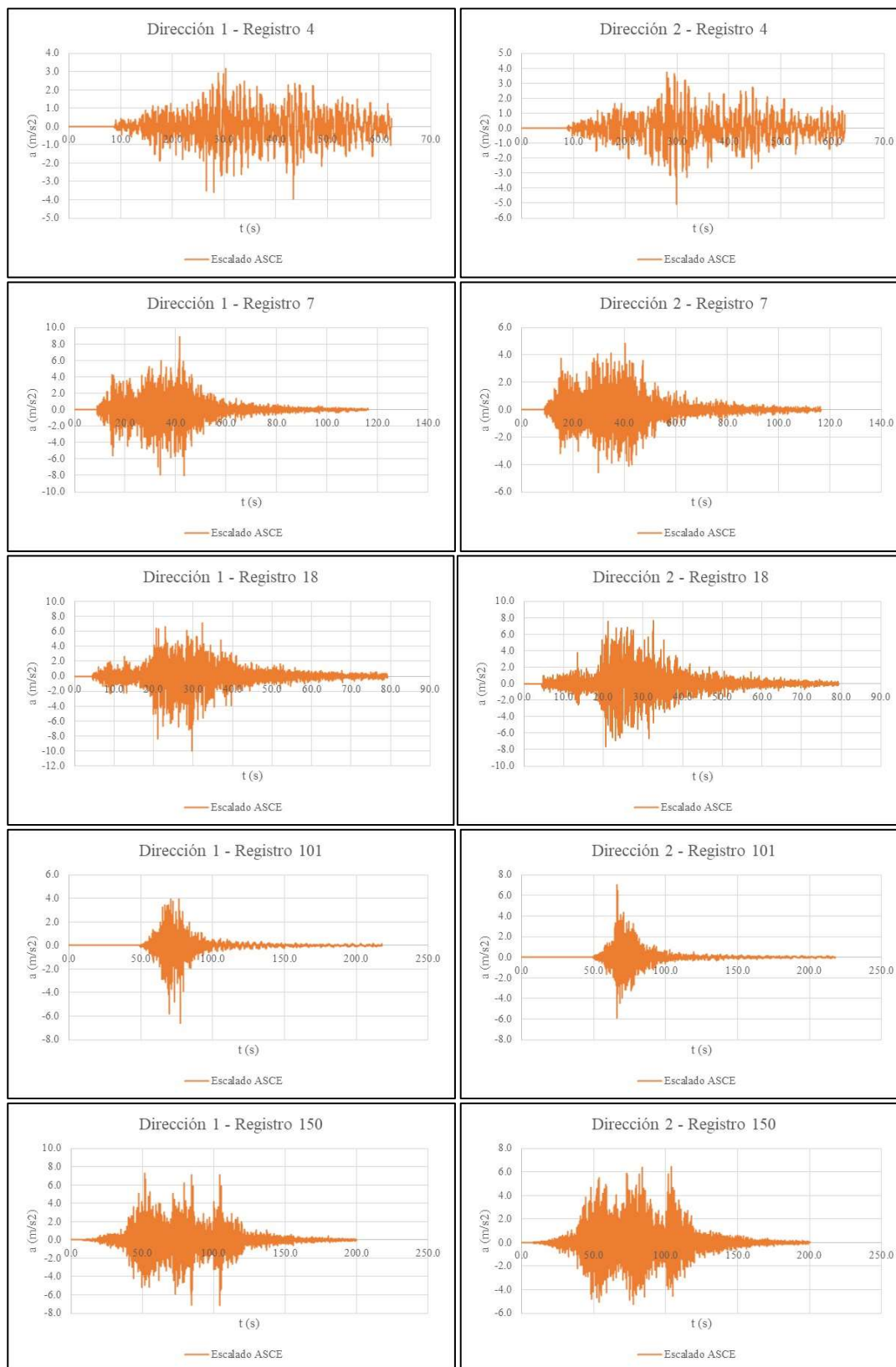


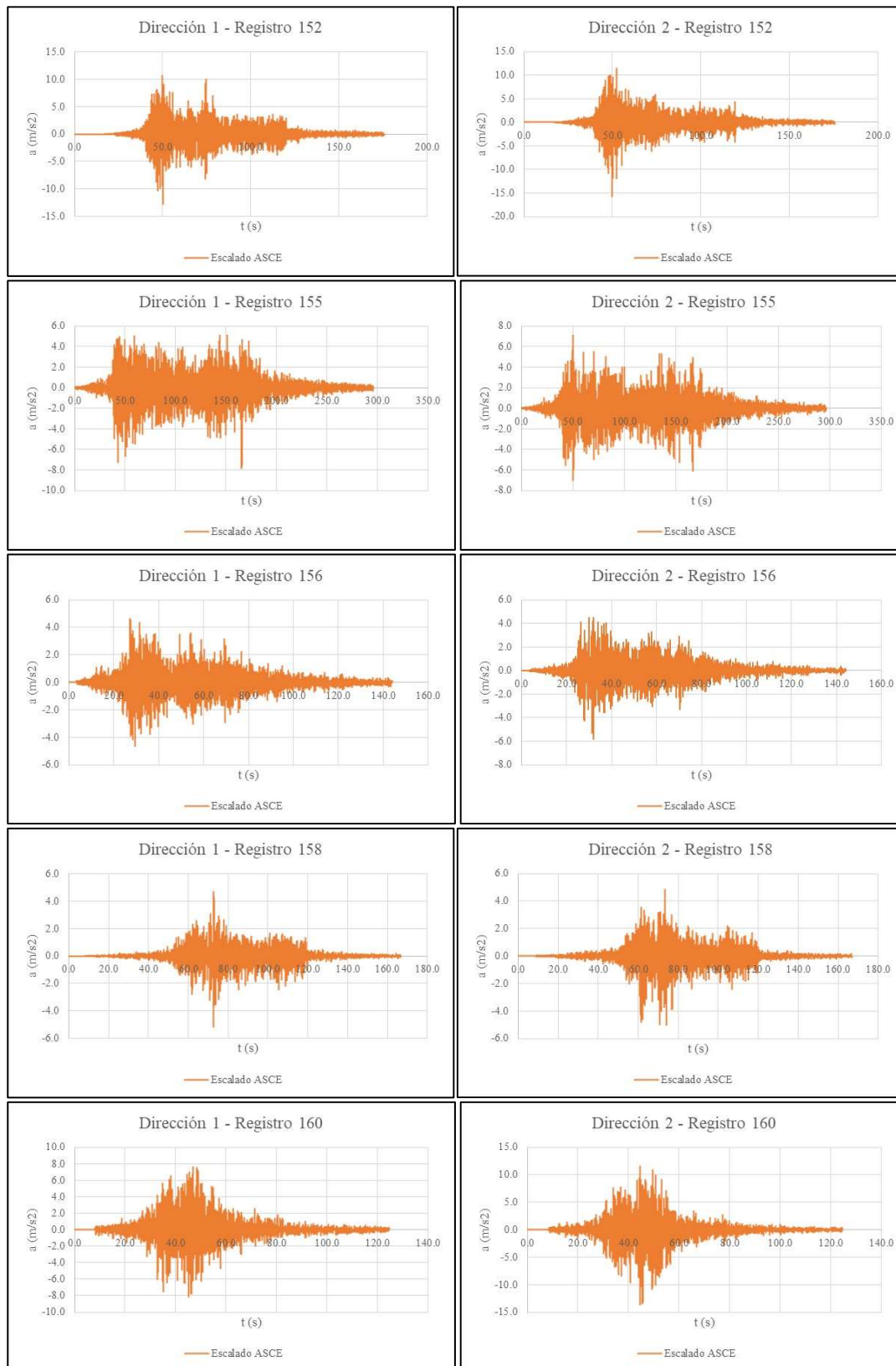


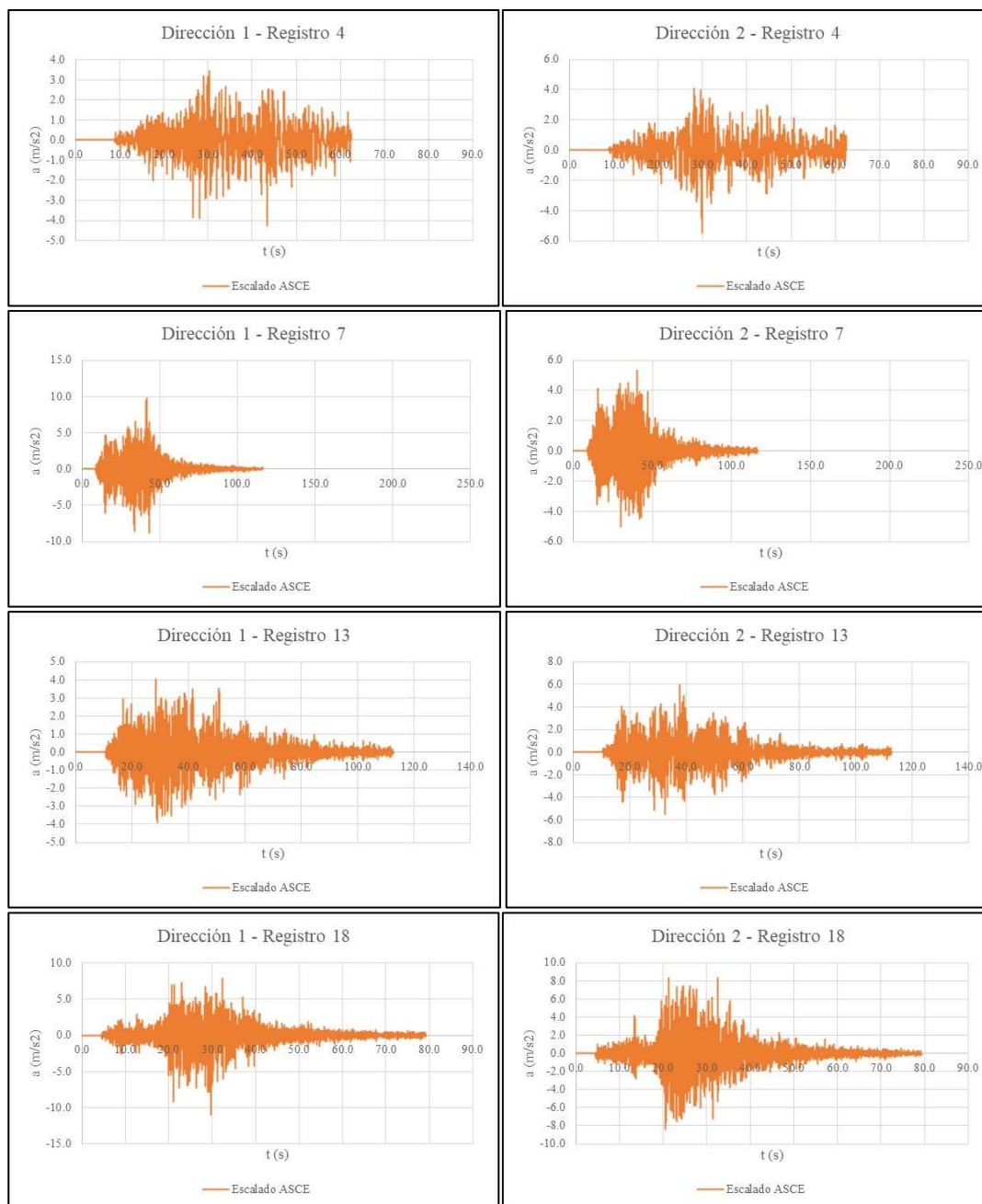


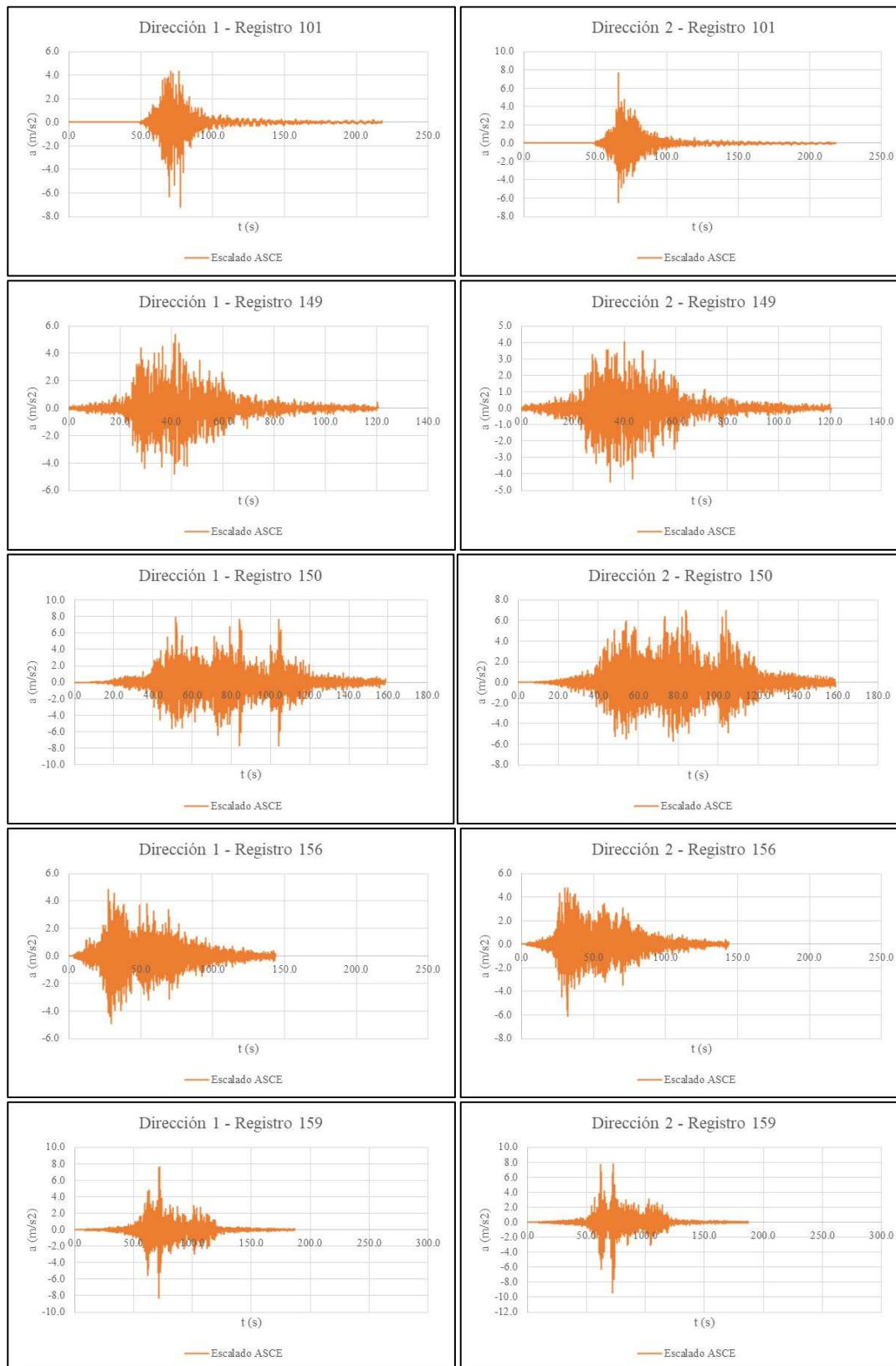
Selección UHS, escalado ASCE:

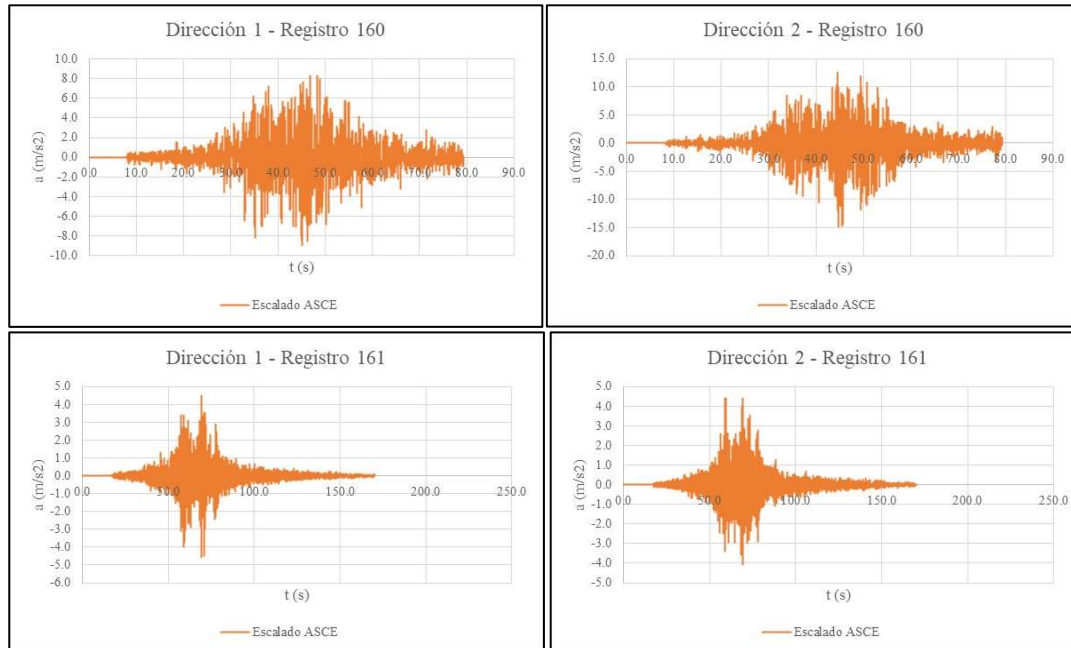




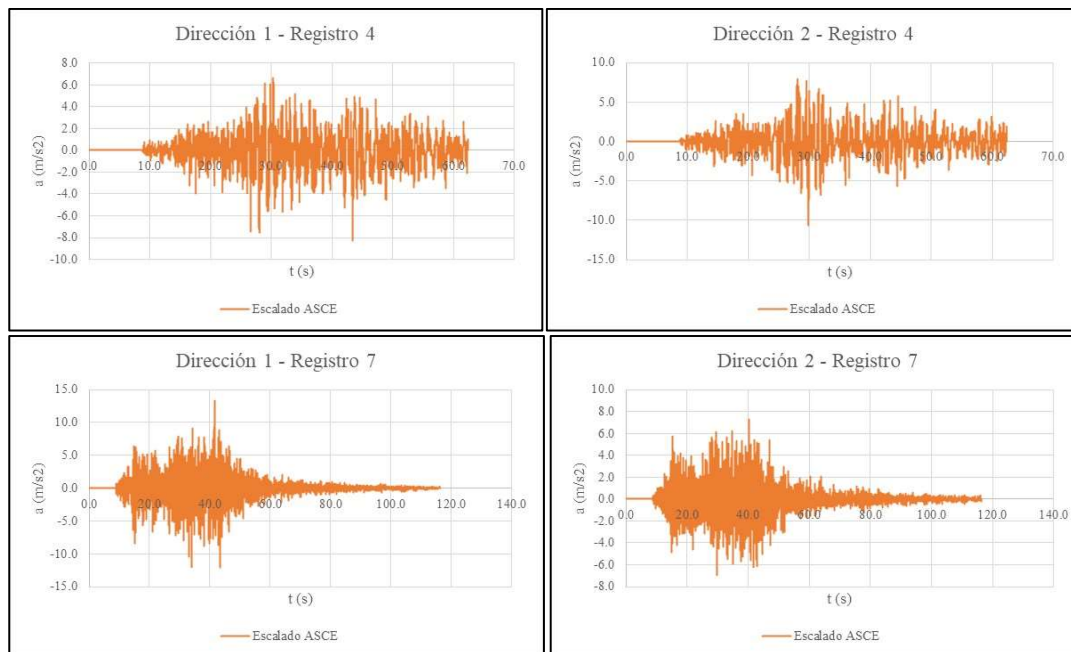


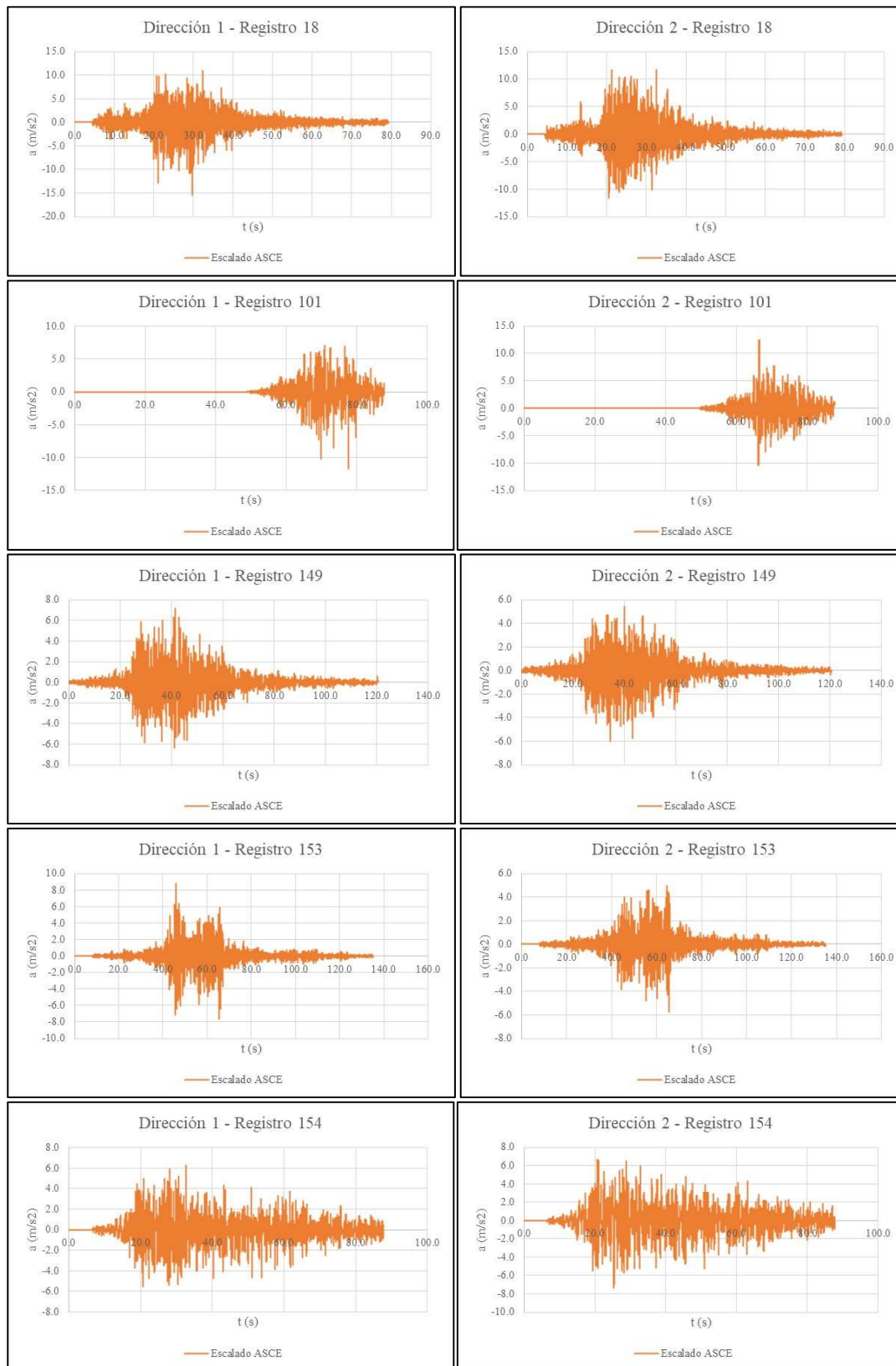
Selección EPSILON, escalado ASCE:

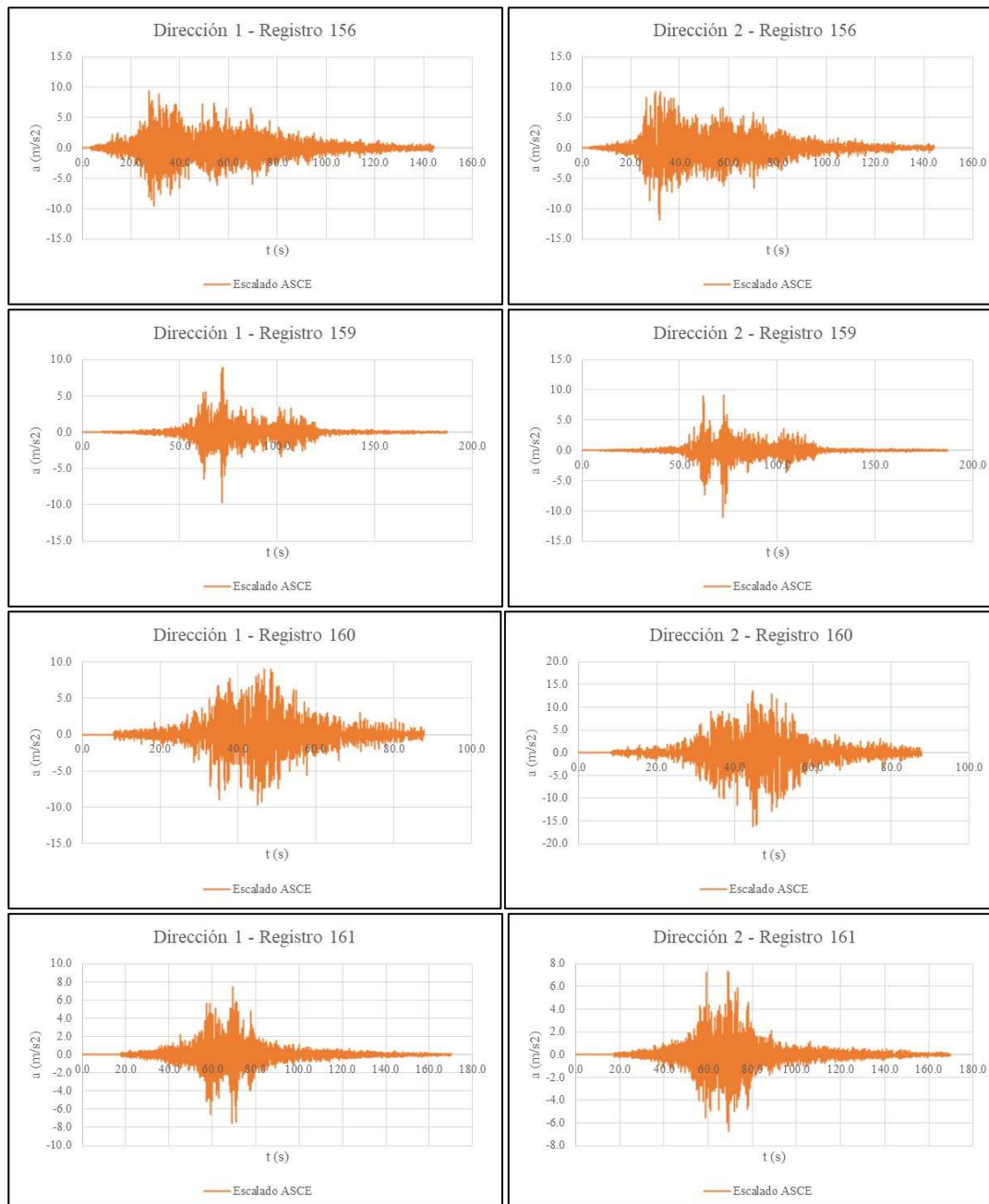




Selección RANDOM, escalado ASCE:







**ANEXO K: RESULTADOS DEL MODELO EN OPENSEES, PARA CMS, UHS.
EPSILON Y RANDOM**

Se presentan los resultados obtenidos de OpenSees para los 4 casos, en derivas y aceleraciones máximas

CMS																	
Caso 1_1									Caso 1_2								
Max_Accs (g)									Max_Accs (g)								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
4	0.86	0.90	0.84	0.88	1.16	0.92	0.94	1.13	4	0.99	1.11	0.91	1.15	1.09	1.03	1.19	1.16
7	1.26	1.64	1.35	1.44	1.54	1.56	1.38	1.44	7	1.21	1.06	1.08	1.26	1.10	1.29	1.28	1.17
13	0.80	0.80	1.08	1.07	0.77	1.01	0.95	0.92	13	0.80	0.85	1.16	1.01	0.98	0.97	0.82	0.96
18	1.64	1.42	1.52	1.57	1.35	1.31	1.94	1.70	18	1.68	1.67	1.81	1.34	1.40	1.56	1.58	1.43
101	0.82	1.03	1.13	1.11	0.92	1.02	0.95	1.07	101	1.16	1.24	1.15	1.15	1.15	1.09	1.14	1.14
149	0.81	1.00	0.96	0.95	1.01	1.09	0.88	1.05	149	0.87	0.93	0.94	1.18	0.93	0.93	0.78	1.07
150	1.88	1.47	1.27	1.28	1.33	1.61	1.73	1.26	150	1.32	1.32	1.27	1.32	1.46	1.23	1.43	1.36
156	1.11	1.26	1.02	1.26	1.19	0.97	1.05	1.06	156	1.15	1.25	1.40	1.42	1.07	1.52	1.30	1.11
159	0.83	1.26	1.35	1.27	1.30	1.42	0.92	0.92	159	0.97	1.15	1.24	1.25	1.34	1.42	1.11	1.48
160	1.12	1.28	1.17	1.06	1.36	1.52	1.26	1.09	160	1.82	2.16	2.29	2.17	1.93	1.99	2.42	1.69
161	0.67	0.84	0.75	0.85	0.82	0.89	0.89	1.03	161	0.93	0.88	0.80	0.87	0.72	0.93	0.90	1.18
Max	1.88	1.64	1.52	1.57	1.54	1.61	1.94	1.70	Max	1.82	2.16	2.29	2.17	1.93	1.99	2.42	1.69
Max_Drifts									Max_Drifts								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
4	1.30	1.04	0.95	1.22	1.42	1.29	1.36	1.47	4	1.12	0.88	0.81	0.87	1.22	1.28	1.37	1.69
7	1.70	1.38	1.55	1.50	1.74	1.69	1.46	2.11	7	0.72	0.62	0.66	0.68	0.80	0.99	1.18	1.26
13	1.13	0.87	0.57	0.77	0.99	1.38	1.42	1.38	13	2.02	1.48	1.31	1.35	1.54	1.53	1.58	1.42
18	1.43	1.18	1.06	1.02	1.09	1.14	1.28	1.40	18	1.31	0.75	0.87	1.25	1.14	1.52	1.62	1.65
101	2.50	2.14	1.77	1.70	1.64	1.50	1.42	1.23	101	1.30	1.20	1.09	1.22	1.46	2.06	2.32	2.25
149	2.47	1.99	1.68	1.62	1.70	1.72	2.33	2.54	149	1.14	0.91	1.09	1.06	1.18	1.39	1.26	1.52
150	1.06	1.18	1.26	1.49	1.49	1.53	1.68	1.77	150	1.60	1.37	1.21	1.15	1.21	1.44	1.56	1.65
156	1.70	1.26	0.85	0.95	1.17	1.44	1.56	1.53	156	1.25	1.05	0.94	1.25	1.45	1.83	1.75	2.06
159	1.46	1.37	1.32	1.43	1.34	1.15	1.43	1.58	159	1.42	1.32	1.26	1.39	1.20	1.48	2.04	2.29
160	1.44	1.07	1.04	1.04	1.10	1.38	1.68	1.57	160	1.39	1.15	1.45	1.69	1.45	1.70	1.77	2.14
161	1.08	0.76	0.52	0.73	1.26	1.55	1.86	2.12	161	1.06	0.93	0.77	0.90	1.42	1.76	1.74	1.39
Max	2.50	2.14	1.77	1.70	1.74	1.72	2.33	2.54	Max	2.02	1.48	1.45	1.69	1.54	2.06	2.32	2.29
EPSILON																	
Caso 2_1									Caso 2_2								
Max_Accs (g)									Max_Accs (g)								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
4	0.81	0.83	0.75	0.93	1.13	0.91	0.94	1.10	4	0.91	1.04	0.92	1.11	1.02	0.98	1.12	1.12
7	1.32	1.69	1.48	1.47	1.52	1.61	1.43	1.47	7	1.26	1.08	1.19	1.31	1.19	1.37	1.32	1.24
13	0.80	0.82	1.06	1.12	0.78	1.04	0.96	0.91	13	0.86	0.87	1.24	1.13	1.05	1.02	0.85	0.99
18	1.67	1.47	1.62	1.58	1.39	1.37	2.01	1.75	18	1.74	2.02	1.87	1.55	1.61	1.62	1.65	1.48
101	0.87	1.16	1.21	1.18	0.93	1.11	0.99	1.10	101	1.19	1.28	1.19	1.21	1.19	1.15	1.20	1.07

149	0.82	0.99	1.01	0.97	1.10	1.15	0.90	1.07	149	0.72	0.74	0.70	0.96	0.86	0.81	0.73	0.94
150	1.70	1.39	1.08	1.15	1.15	1.51	1.26	1.24	150	0.95	1.16	1.04	1.13	1.36	1.14	1.10	1.12
156	1.16	1.19	1.03	1.17	1.07	1.14	0.90	0.99	156	1.44	1.16	1.35	1.37	1.29	1.38	1.28	1.20
159	0.89	1.32	1.39	1.42	1.36	1.48	0.99	0.95	159	0.89	1.02	1.07	1.27	1.41	1.53	0.81	0.98
160	1.69	2.10	1.75	1.59	1.83	1.71	1.80	1.78	160	1.92	2.27	2.43	2.24	1.88	2.10	2.45	1.88
161	0.70	0.84	0.79	0.87	0.82	0.91	0.91	0.96	161	0.95	0.92	0.79	0.91	0.78	0.90	0.98	1.21
Max	1.70	2.10	1.75	1.59	1.83	1.71	2.01	1.78	Max	1.92	2.27	2.43	2.24	1.88	2.10	2.45	1.88
Max_Drifts									Max_Drifts								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
4	1.17	0.96	0.88	1.16	1.31	1.30	1.35	1.40	4	1.10	0.85	0.77	0.83	1.22	1.27	1.38	1.61
7	1.75	1.47	1.60	1.58	1.76	1.71	1.63	2.18	7	1.04	0.81	0.69	0.88	0.96	1.05	1.49	1.58
13	1.17	0.90	0.60	0.83	1.01	1.46	1.45	1.43	13	2.19	1.59	1.48	1.56	1.65	1.62	1.65	1.59
18	1.54	1.25	1.14	1.07	1.12	1.20	1.32	1.43	18	1.31	0.93	0.93	1.34	1.33	1.57	1.66	1.69
101	2.62	2.24	1.84	1.75	1.75	1.54	1.47	1.29	101	1.41	1.28	1.14	1.15	1.50	2.17	2.40	2.28
149	2.52	1.99	1.67	1.63	1.71	1.75	2.41	2.59	149	0.93	0.91	1.08	1.05	0.87	0.99	1.06	1.13
150	1.00	1.10	1.17	1.40	1.36	1.35	1.55	1.53	150	1.25	0.97	1.02	1.06	1.07	1.38	1.35	1.49
156	1.60	1.17	0.78	0.94	1.09	1.38	1.49	1.44	156	1.29	1.10	0.91	1.13	1.29	1.64	1.64	1.87
159	1.56	1.32	1.33	1.43	1.37	1.09	1.44	1.61	159	1.16	1.11	1.25	1.41	1.24	1.16	2.06	2.50
160	1.94	1.43	1.23	1.75	1.83	2.18	2.39	3.00	160	3.10	2.32	1.85	1.69	1.67	1.73	1.82	2.28
161	1.10	0.79	0.51	0.66	0.95	1.36	1.88	2.17	161	1.05	0.87	0.78	1.00	1.54	1.90	1.86	1.54
Max	2.62	2.24	1.84	1.75	1.83	2.18	2.41	3.00	Max	3.10	2.32	1.85	1.69	1.67	2.17	2.40	2.50
RANDOM																	
Caso 3_1									Caso 3_2								
Max_Accs (g)									Max_Accs (g)								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
4	1.37	1.11	1.21	1.39	1.56	1.68	1.54	1.29	4	0.76	0.67	0.90	0.76	1.08	0.94	0.92	1.03
7	1.37	1.14	1.33	1.43	1.52	1.21	1.45	1.74	7	1.30	1.35	1.02	1.40	1.25	1.44	1.10	1.34
18	2.02	1.92	1.54	1.63	1.46	1.71	2.40	1.91	18	1.68	2.03	2.20	1.74	1.50	1.81	1.80	1.65
101	0.83	0.92	0.97	0.85	0.87	0.76	0.97	1.03	101	0.68	1.05	0.87	0.92	1.13	1.01	0.95	1.03
149	1.04	1.06	1.21	1.68	1.69	1.42	1.16	1.18	149	0.99	1.31	1.34	1.41	1.27	1.22	1.00	1.18
153	0.94	1.21	1.31	1.55	1.31	1.26	1.28	1.30	153	0.91	0.91	1.17	1.34	1.31	1.31	1.22	1.09
154	1.33	1.33	1.36	1.81	1.44	1.30	1.38	1.35	154	1.48	1.34	1.14	1.60	1.07	1.18	1.33	1.53
156	1.59	1.55	1.65	1.65	1.66	1.77	1.63	1.49	156	1.52	1.67	1.46	1.52	2.12	1.70	1.62	1.76
159	0.81	0.95	1.07	1.24	1.16	1.10	0.99	1.03	159	1.17	1.31	1.43	1.51	1.67	1.66	1.42	1.63
160	1.03	1.38	1.36	1.16	1.28	1.75	1.39	1.06	160	1.18	1.28	1.51	1.36	1.33	1.24	1.00	1.26
161	1.20	1.06	1.13	1.19	1.19	1.24	1.10	1.37	161	1.10	1.16	1.15	1.09	1.18	1.12	1.39	1.27
Max	2.02	1.92	1.65	1.81	1.69	1.77	2.40	1.91	Max	1.68	2.03	2.20	1.74	2.12	1.81	1.80	1.76
Max_Drifts									Max_Drifts								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
4	1.47	1.43	1.50	1.88	2.01	2.06	2.14	2.05	4	0.77	0.67	0.60	0.85	0.85	0.68	1.00	1.19
7	1.02	0.70	0.79	1.03	1.10	0.99	1.63	2.38	7	0.68	0.54	0.71	0.74	0.71	0.89	0.81	1.35
18	1.27	1.03	1.30	1.24	1.15	1.32	1.55	1.54	18	1.12	1.00	1.30	1.73	1.66	2.19	2.12	2.09
101	1.08	0.99	0.84	1.01	1.11	0.81	1.07	1.52	101	0.35	0.51	0.61	0.83	0.81	0.82	1.07	1.05
149	2.46	1.99	1.85	1.70	1.76	1.89	2.48	2.55	149	1.99	1.46	1.16	1.03	1.08	1.35	1.56	2.17
153	2.83	2.21	1.64	1.73	2.18	2.29	2.21	2.21	153	1.68	1.30	1.06	1.08	1.38	1.88	1.94	1.91
154	1.65	1.26	1.06	1.29	1.70	1.86	1.64	1.65	154	2.04	1.74	1.57	1.39	1.77	2.00	2.09	2.31

156	2.20	1.67	1.57	1.97	2.04	1.95	2.19	2.63	156	36.59	32.76	25.73	13.95	5.65	4.16	3.60	3.01
159	1.37	1.34	1.38	1.39	1.44	1.17	1.36	1.54	159	1.47	1.27	1.28	1.45	1.25	1.83	2.48	2.79
160	1.24	1.00	0.92	0.76	1.13	1.31	1.46	1.80	160	1.30	0.92	1.10	0.98	1.08	1.07	1.42	1.72
161	1.37	1.29	1.00	0.85	1.26	1.51	1.91	1.98	161	1.76	1.20	1.23	1.54	1.76	2.41	2.58	2.38
Max	2.83	2.21	1.85	1.97	2.18	2.29	2.48	2.63	Max	36.59	32.76	25.73	13.95	5.65	4.16	3.60	3.01
UHS																	
Caso 4_1									Caso 4_2								
Max_Accs (g)									Max_Accs (g)								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.87	1.15	1.17	1.06	1.19	1.20	0.95	1.01	1	0.74	0.86	0.80	0.93	0.69	0.78	0.84	0.99
4	0.76	0.77	0.70	0.86	1.08	0.90	0.91	1.04	4	0.62	0.76	0.68	0.65	0.71	0.64	0.64	1.09
7	1.23	1.59	1.31	1.41	1.55	1.53	1.37	1.43	7	1.19	1.04	0.87	1.14	1.08	1.26	0.98	1.01
18	1.62	1.38	1.43	1.56	1.34	1.30	1.91	1.68	18	1.65	1.63	1.77	1.26	1.41	1.53	1.54	1.41
101	0.80	0.99	1.11	1.08	0.92	0.99	0.92	1.06	101	0.78	1.12	1.07	1.03	1.13	1.05	1.00	0.99
150	1.90	1.58	1.58	1.39	1.50	1.65	1.63	1.44	150	1.77	1.32	1.44	1.58	1.71	2.08	1.65	1.28
152	1.42	1.55	1.98	1.14	1.54	1.67	2.21	1.20	152	1.70	1.85	2.06	1.56	1.36	1.57	2.15	1.68
155	0.83	0.97	1.10	1.32	1.19	1.13	1.13	1.28	155	1.04	1.34	1.36	1.31	1.21	1.65	1.27	1.38
156	1.17	1.17	0.95	1.07	1.04	1.17	0.84	0.95	156	1.39	1.10	1.33	1.34	1.24	1.32	1.25	1.15
158	0.74	0.78	0.84	0.77	0.81	0.70	0.82	0.86	158	0.98	0.86	0.97	1.01	1.09	0.95	0.99	1.07
160	1.10	1.23	1.15	1.05	1.34	1.47	1.23	1.08	160	1.01	1.14	1.47	1.24	1.20	1.29	0.83	1.12
Max	1.90	1.59	1.98	1.56	1.55	1.67	2.21	1.68	Max	1.77	1.85	2.06	1.58	1.71	2.08	2.15	1.68
Max_Drifts									Max_Drifts								
Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8	Piso/ Reg.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.18	1.19	1.22	1.30	1.47	1.64	1.54	1.59	1	1.05	0.75	0.62	0.63	0.99	1.45	1.36	1.37
4	1.04	0.88	0.85	1.10	1.28	1.28	1.34	1.33	4	0.63	0.56	0.58	0.59	0.80	0.82	1.18	1.33
7	1.72	1.38	1.55	1.49	1.72	1.68	1.41	2.11	7	0.57	0.47	0.66	0.68	0.66	0.79	0.89	1.18
18	1.03	0.98	0.95	1.00	1.06	1.11	1.26	1.38	18	1.30	0.72	0.85	1.22	1.12	1.49	1.61	1.64
101	2.46	2.10	1.74	1.69	1.62	1.48	1.41	1.20	101	1.14	0.89	0.65	0.72	1.09	1.75	2.04	2.22
150	1.14	1.06	1.24	1.34	1.26	1.24	1.55	1.70	150	1.70	1.49	1.42	1.44	1.41	1.37	1.67	1.75
152	0.97	0.83	1.26	1.09	1.19	1.20	1.14	1.27	152	0.95	0.73	0.89	0.79	0.91	1.15	0.88	1.29
155	13.77	11.28	7.10	3.48	2.64	2.00	1.72	1.69	155	14.28	11.98	8.19	4.46	2.62	2.23	1.89	1.62
156	1.53	1.12	0.74	0.91	1.05	1.36	1.47	1.42	156	1.28	1.08	0.87	1.10	1.22	1.54	1.58	1.77
158	1.31	1.26	1.17	1.32	1.37	1.17	1.06	0.91	158	1.47	1.28	1.31	1.66	1.56	1.46	1.94	1.84
160	1.41	1.06	1.02	1.03	1.09	1.36	1.66	1.54	160	1.20	0.74	0.90	0.81	1.06	0.94	1.20	1.66
Max	13.77	11.28	7.10	3.48	2.64	2.00	1.72	2.11	Max	14.28	11.98	8.19	4.46	2.62	2.23	2.04	2.22