



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**“INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO  
EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:  
**JOSÉ LUIS FABIÁN LÓPEZ**

ASESOR:  
**DR. JOSÉ MANUEL JARA GUERRERO**

MORELIA, MICHOACÁN, DICIEMBRE 2017



A mis padres,  
José Pedro y  
María Guadalupe Isabel

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por permitirme llegar a este momento y estar rodeado de personas maravillosas.

A mí apreciada Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Civil.

Al Dr. José Manuel Jara Guerrero, por darme la oportunidad de desarrollar esta investigación, por compartir sus conocimientos conmigo, por su apoyo y paciencia.

A mi familia de principio a fin me dieron su apoyo, a mis padres, por los valores que me han inculcado, por la formación y educación que con mucho esfuerzo han logrado darme. En particular, mi madre, por velar y preocuparse por mis desveladas y por el café que nunca faltó, a mi padre que me enseñó que con trabajo y esfuerzo puedo conseguir lo que quiera si Dios lo dispone, a mis hermanas Isabel y Ángeles, por su motivación, cariño y por esas cenas en la madrugada.

A Claudia Mabel por ser una parte importante de mi vida, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, por ser la mejor compañera de tesis, por su paciencia y amor incondicional. Te agradezco por tanta ayuda y tantos aportes no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también para mi vida, eres mi inspiración y mi motivación.

A Israel, Octavio, Vanessa y Daniel, por todo momento que pasamos juntos, por las tareas que juntos realizamos, por la confianza que en mí depositaron.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN.</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVO.</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 1. MÉTODOS COMUNES DE ESCALAMIENTO DE ACELEROGRAMAS.</b>	<b>5</b>
1.1 Escalamiento de la aceleración máxima del terreno.	6
1.2 Escalamiento de aceleración máxima espectral.	6
1.3 Escalamiento con la intensidad del espectro de aceleración.	6
1.4 Escalamiento para la aceleración espectral de un periodo específico.	7
<b>CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS PARA LOS ANÁLISIS.</b>	<b>8</b>
2.1 Tectónica de placas.	9
2.2 Placas tectónicas.	9
2.3 Límites de placas tectónicas.	10
2.3.1 Límite convergente.	10
2.3.2 Límite divergente.	11
2.3.3 Límite transformante.	12
2.4 Placas tectónicas que afectan al territorio mexicano.	13
2.5 Zona de subducción en México.	14
2.5.1 Estructura de la zona de subducción en México.	15
2.6 Estaciones sismológicas, red acelerográfica de México.	18
2.6.1 Acelerogramas.	20
2.6.2 Ondas sísmicas.	20
2.6.2.1 Ondas de cuerpo.	20

2.6.2.2 Ondas de superficie.	20
2.6.3 Magnitud.	20
2.6.3.1 Magnitud de onda de superficie.	21
2.6.3.2 Magnitud de onda de cuerpo.	21
2.6.3.3 Magnitud local.	21
2.6.3.4 Magnitud de momento sísmico.	22
2.6.3.5 Magnitud de coda.	22
2.6.3.6 Magnitud de energía.	22
2.6.3.7 Magnitud de energía y magnitud de amplitud.	23
2.6.4 Intensidad.	23
2.7 Sismos fuertes en México desde 1980.	25
2.8 Selección de estaciones sísmicas.	32
2.8.1 Registros del sismo de 1985 en estaciones seleccionadas.	33
2.8.2 Registros de sismos de pequeña magnitud.	35
<b>CAPÍTULO 3. ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICOS.</b>	<b>39</b>
3.1 Espectros de pseudo-aceleración y desplazamiento de la estación UNIO.	41
3.2 Espectros de pseudo-aceleración y desplazamiento de la estación AZIH.	46
3.3 Espectros de pseudo-aceleración y desplazamiento de la estación CALE.	51
<b>CAPÍTULO 4. ESPECTROS DE RESPUESTA INELÁSTICOS</b>	<b>57</b>
4.1 Espectros de aceleración y desplazamiento de la estación UNIO.	60
4.2 Espectros de aceleración y desplazamiento de la estación AZIH.	65
4.3 Espectros de aceleración y desplazamiento de la estación CALE.	70

<b>CAPÍTULO 5. CONTRIBUCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA.</b>	<b>76</b>
5.1 Espectros escalados comparados con el espectro del sismo de 1985 de la estación UNIO.	78
5.2 Espectros escalados comparados con el espectro del sismo de 1985 de la estación AZIH.	86
5.3 Espectros escalados comparados con el espectro del sismo de 1985 de la estación CALE.	94
5.4 Factores de escalamiento.	101
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>106</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>107</b>

## RESUMEN

Dos de los sismos de mayor magnitud que se ha presentado en México y de los cuales se tiene registro es el del 19 de septiembre de 1985, con una magnitud de 8.1 con epicentro en la costa del estado de Michoacán y el sismo del 07 de septiembre del 2017, con una magnitud de 8.2 con epicentro frente a costas de Chiapas. Por los efectos devastadores del evento de 1985, el país tuvo que reconstruirse en muchos aspectos, entre ellos, los reglamentos de construcción tuvieron importantes cambios.

En la actualidad se ha buscado los medios para proporcionar suficiente resistencia a una estructura, y asegurar un comportamiento satisfactorio para diferentes niveles de intensidad sísmica, esta ha propiciado un continuo desarrollo de modelos numéricos para estimar el comportamiento sísmico esperado de las estructuras. La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un sistema, requiere contar con registros sísmicos de varias intensidades que permitan determinar el comportamiento esperado. Desafortunadamente, para este tipo de investigación, existen un número muy limitado de registros correspondientes a grandes magnitudes de temblores, por lo que las señales sísmicas de pequeña magnitud suelen escalarse antes de realizar los estudios de vulnerabilidad.

En esta investigación, se obtuvieron registros sísmicos de estaciones sísmicas en suelos duros de gran magnitud y pequeña magnitud ( $M > 7$  y  $M < 5.5$  respectivamente). Con ello se pretendió comparar la respuesta de un sistema de un grado de libertad sometido a la señal sísmica correspondiente de gran magnitud y aquellos acelerogramas provenientes del escalamiento de registros sísmicos de temblores de magnitud pequeña.

**Palabras Clave:** Técnicas de escalamiento, intensidad espectral, espectros de respuesta, vulnerabilidad sísmica, señales sísmicas.

## ABSTRACT

Two of the strongest earthquakes occurred in Mexico are the 19/09/1985 and 7/09/2017 with magnitudes of 8.1 and 8.2, respectively. The devastating effect of the 1985 event conducted to important changes in seismic regulation codes.

Nowadays, provide sufficient resistance to a structure and ensure a satisfactory behavior for different levels of seismic intensity is one of the main objectives of current regulation codes, which has generated a continuous development of numerical models for estimate the expected seismic behavior of structures. The evaluation of the seismic vulnerability of a structure, requires collecting seismic records of various intensities to determine the expected behavior. Unfortunately, there is a very limited number of records for earthquakes with large magnitude that requires the use of scaled seismic signals before performing vulnerability studies.

In this investigation, seismic signals recorded on hard soil type, with large and small magnitude ( $M > 7$  and  $M < 5.5$ ) were obtained. The aim of the study is to compare the response of one-degree of freedom system subjected to large seismic signal with those scaled acelerograms of earthquakes of small magnitude.

**Key words:** Scaling techniques, spectral intensity, response spectra, seismic vulnerability, seismic signals

## **OBJETIVO**

Cuando se desea evaluar la vulnerabilidad sísmica de una estructura, se realizan modelos analíticos que se someten a acelerogramas aplicados en la base de la estructura. Dado que la instrumentación sísmica es relativamente reciente y todavía es escasa en muchos sitios, se utilizan para los análisis sísmicos registros que se escalan en amplitud para ser aplicados a las estructuras. En este trabajo se evalúa la influencia que la técnica de escalamiento tiene en la respuesta sísmica esperada de la estructura y finalmente en la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica.

## INTRODUCCIÓN

Todo el mundo está expuesto a la presencia de fenómenos naturales comunes como lluvias, heladas o mareas. Depende mucho de la zona o del área que hacen que unos fenómenos sean más frecuente y que su intensidad sea pronosticada para tomar acciones preventivas. Estos fenómenos pueden llegar a causar daños materiales y también pérdidas humanas. Los eventos generados en el interior de la tierra, como los sismos, se deben a la interacción de las placas tectónicas, resultado de la energía acumulada principalmente en la litósfera, son imposibles de ser pronosticados. Eventos colaterales como los tsunamis causan también daños en estructuras y pérdidas humanas.

La zona geográfica más vulnerable a presencia de sismos fuertes se encuentra en los continentes americano, asiático y oceánico, en específico en los países que tienen costa con el océano pacífico tales como Chile, Perú, México, Alaska, Japón, Indonesia e Islas Salomón. Cada zona tiene diferentes tiempos de retorno de sismos fuertes debido a las placas tectónicas que interactúan en estas zonas, además, de que estos países conforman el conocido “cinturón de fuego”.

La imposibilidad de reducir en forma importante las pérdidas humanas y materiales que anualmente se producen por la ocurrencia de temblores y la búsqueda de medios para proporcionar suficiente resistencia a una estructura, y asegurar un comportamiento satisfactorio para diferentes niveles de intensidad sísmica, ha propiciado un continuo desarrollo de modelos numéricos para estimar el comportamiento sísmico esperado de las estructuras.

En general, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un sistema, requiere contar con registros sísmicos de varias intensidades que permitan determinar el comportamiento esperado. Desafortunadamente, existen un número muy limitado de registros correspondientes a grandes magnitudes de temblores, por lo que las señales sísmicas suelen escalarse antes de realizar los estudios de vulnerabilidad.

Existen en la literatura diversas propuestas para escalar acelerogramas, sin embargo su influencia de cada una de ellas en la vulnerabilidad estimada es todavía poco conocida.

Es por ello que en este estudio se comparará la influencia de cada una de ellas, obteniendo el método más apropiado para la evaluación de vulnerabilidad sísmica de estructuras nuevas y ya existentes.

## CAPÍTULO 1.

# MÉTODOS COMUNES DE ESCALAMIENTO DE ACELEROGRAMAS

## CAPÍTULO 1.

### MÉTODOS COMUNES DE ESCALAMIENTO DE ACELEROGRAMAS

Existen varios tipos de escalamientos de acelerogramas. En general, todos ellos se basan en encontrar un Factor de Escalamiento (F.E.) para multiplicar las aceleraciones o pseudoaceleraciones en los espectros de respuesta, según sea el método.

#### 1.1 ESCALAMIENTO DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO.

El factor de escalamiento es el resultado del cociente de la aceleración máxima del terreno del sismo fuerte entre la aceleración máxima del terreno del sismo pequeño. El F.E. multiplica a las aceleraciones registradas del sismo pequeño.

#### 1.2 ESCALAMIENTO DE ACELERACIÓN MÁXIMA ESPECTRAL.

El factor de escalamiento se obtiene al dividir la pseudoaceleración máxima del espectro generado a partir de las aceleraciones registradas durante el sismo fuerte entre la pseudoaceleración máxima del espectro de respuesta que se genera a partir de las aceleraciones registradas del sismo pequeño. El F.E. multiplica a las aceleraciones registradas del sismo pequeño para obtener la pseudoaceleración máxima del sismo de menor magnitud con la misma amplitud del sismo grande.

#### 1.3 ESCALAMIENTO CON LA INTENSIDAD DEL ESPECTRO DE ACELERACIÓN.

En este tercer método el factor de escalamiento se obtiene a partir del área que se genera debajo de la curva del espectro de respuesta en un intervalo de periodos dado. En este caso, se utiliza el intervalo de 0.1 a 0.5 segundos. Se denomina intensidad del espectro de aceleraciones (ASI) por sus siglas en inglés (Acceleration Spectrum Intensity). Esta intensidad está definida por la siguiente integral.

$$ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 0.05, T) dT$$

Donde:

S<sub>a</sub>: Pseudoaceleración

ξ= Amortiguamiento de 5%

T: Periodo (s)

Con ayuda del programa Seismo Signal (2016) se calculó la intensidad ASI. El F.E. se obtiene al dividir el ASI del sismo fuerte entre el ASI de menor magnitud.

#### **1.4 ESCALAMIENTO PARA LA ACELERACIÓN ESPECTRAL DE UN PERIODO ESPECÍFICO**

Este método consiste en igualar el valor de la pseudoaceleración en un periodo definido de un sismo de menor magnitud al valor de la pseudoaceleración del mismo periodo del sismo de mayor magnitud.

El F.E. se calcula dividiendo el valor de la pseudoaceleración en un periodo del sismo fuerte entre el valor de la pseudoaceleración en el mismo periodo anterior del sismo de menor magnitud, y conduce a la misma pseudoaceleración del espectro escalado y del espectro base para el periodo seleccionado.

## CAPÍTULO 2.

# SELECCIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS PARA LOS ANÁLISIS

## CAPÍTULO 2.

### SELECCIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS PARA LOS ANÁLISIS

Los sismos también llamados terremotos, a diferencia de otros fenómenos naturales, son una amenaza silenciosa, nada podemos hacer para evitarlos, pero si podemos reducir sus consecuencias.

La tierra es un esferoide oblato, con un diámetro ecuatorial de 12,740 km y un diámetro polar de 12,700 km, está formada por rocas y minerales que están separados en diferentes capas. En ellas hay fuerzas, creando tensiones y en la capa más superficial y frágil del planeta, llamada litósfera es en donde ocurre la mayoría de las rupturas que dan origen a los sismos.

La tierra está formada por diferentes capas de roca, principalmente son tres: el núcleo, manto y corteza. Lo que las distingue, a estas tres capas es la composición química de sus rocas, que a su vez están formadas por minerales. Los minerales del núcleo son los más pesados por contener hierro y níquel. En el manto además de contener hierro, contiene magnesio y silicio. Por último los minerales de las rocas de la corteza son las más ligeras, ya que los minerales que las constituyen principalmente son silicio, sodio, potasio y aluminio.

#### 2.1 TECTÓNICA DE PLACAS

Debido al ascenso de rocas calientes en la profundidad de la astenósfera se forman corrientes de convección que provoca el movimiento continuo de las placas tectónicas. Los ciclos convectivos son las corrientes continuas de ascenso y descenso de rocas calientes y rocas frías respectivamente en el manto terrestre.

La tectónica de placas es la teoría que explica los fenómenos geológicos como terremotos, volcanes y nacimiento de montañas (orogénesis) en términos del movimiento que sufre la litosfera como resultado de los ciclos convectivos del manto. Surgió a partir de dos teorías anteriores: la deriva continental (Alfred Wegener) y la expansión del fondo oceánico (Harry Hess).

#### 2.2 PLACAS TECTÓNICAS

Por cada kilómetro de profundidad hacia el centro de la tierra la temperatura aumenta en promedio 25°C, por lo que a cierta profundidad las rocas duras se convierten en rocas blandas. Esta profundidad puede variar pero las rocas sufren esa transformación a los 1200°C, así que las rocas con menor temperatura son rocas duras y por lo tanto frágiles, que envuelve al planeta se le conoce como litósfera y está formada por rocas de la corteza y del manto. A las rocas blandas que se encuentran debajo de la litósfera se le conoce como astenósfera y está formada por rocas del manto.

El espesor de la litósfera es de 5 a 30 kilómetros en los océanos y pueden llegar a más de 100 kilómetros de espesor en los continentes. Esta capa es muy delgada a comparación con el radio del planeta.

La litósfera está dividida en grandes porciones de roca, simulando un rompecabezas gigante, cada pieza es una placa tectónica (Figura 1).



Figura 1. Principales placas tectónicas del mundo.

<http://manusoci-geografia.blogspot.mx/2009/01/distribucin-de-las-placas-technicas.html>

### 2.3 LÍMITES DE PLACAS TECTÓNICAS

Las placas conforman la litósfera, la capa superficial de la Tierra (incluye la corteza y la parte superior del manto). Las corrientes de las rocas más blandas que tienen debajo las impulsan como si se tratara de una cinta transportadora en mal estado. La actividad geológica proviene de la interacción de las placas cuando estas se acercan o separan.

#### 2.3.1 LÍMITE CONVERGENTE

Cuando las placas colisionan, la corteza hace una comba formando las cordilleras. India y Asia impactaron hace 55 millones de años, provocando la lenta formación del Himalaya, el sistema montañoso más alto del planeta. Mientras el choque continúa, las montañas se elevan cada vez más. Por ejemplo, el monte Everest, el pico más alto de la Tierra, podría ser mañana un poco más alto que hoy.

Estos límites convergentes también tienen lugar cuando una placa oceánica se hunde bajo la placa continental en un proceso llamado subducción (figura 2). Cuando la placa superior se eleva, también se forman sistemas montañosos.

Además, la placa inferior se derrite y a menudo sale a borbotones a través de erupciones volcánicas como las que formaron algunas de las montañas de los Andes en Sudamérica.

Al hundirse una placa bajo otra, se suelen formar zanjas como la Fosa de las Marianas, en el océano Pacífico Norte, el punto más profundo de la Tierra. Este tipo de colisiones también provocan la formación de volcanes submarinos que pueden transformarse en arcos insulares como Japón.

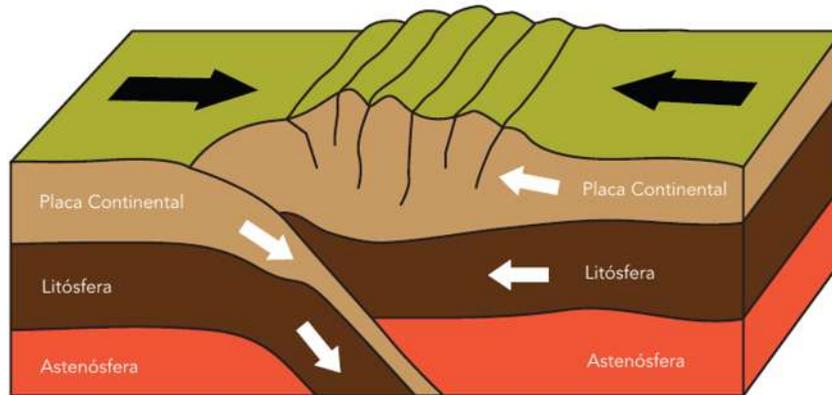


Figura 2. Limite convergente.

(<http://diarioactual.net/cinturon-de-fuego-del-pacifico-sismos-y-volcanes/>)

### 2.3.2 LÍMITE DIVERGENTE

En los límites divergentes de los océanos el magma surge en la superficie desde las profundidades del manto de la Tierra (figura 3), separando dos o más placas y renovando el fondo oceánico. Así, montañas y volcanes se elevan por esta grieta. Una única dorsal oceánica (elevación submarina) conecta los océanos, convirtiéndola en el sistema montañoso más largo del mundo.

Profundas depresiones como el Gran Valle del Rift se forman en tierra donde se separan las placas. Si estas continúan dividiéndose, en millones de años la región oriental de África se separará del continente formando una nueva masa continental. Así, una dorsal marcaría la separación entre las placas.

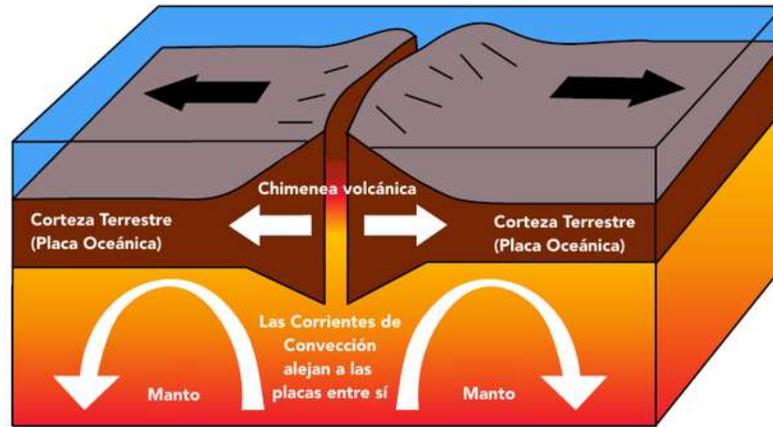


Figura 3. Límite convergente.

(<http://diarioactual.net/cinturon-de-fuego-del-pacifico-sismos-y-volcanes/>)

### 2.3.3 LÍMITE TRANSFORMANTE

La Falla de San Andrés es un ejemplo de límite transformante, en el que dos placas friccionan la una con la otra a lo largo de fallas de desgarre. Estos límites no crean espectaculares fenómenos como montañas u océanos, sin embargo, pueden provocar terremotos como el de 1906 que asoló la ciudad de San Francisco (figura 4).

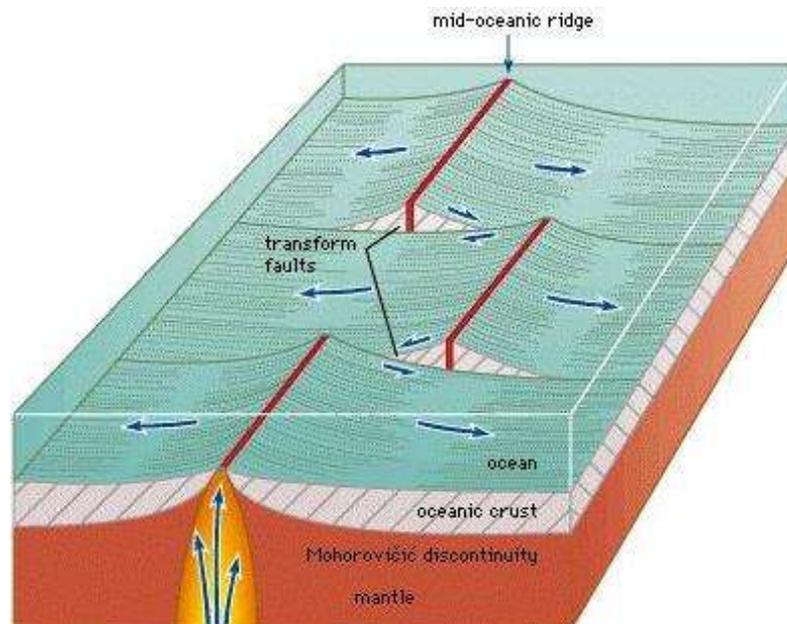


Figura 4. Límite de transformación.

(<http://roble.pntic.mec.es/afep0032/limitestransformantes.html>)

## 2.4 PLACAS TECTÓNICAS QUE AFECTAN EL TERRITORIO MEXICANO

En la zona noroeste, occidente y sureste de México se presentan la mayor cantidad de sismos por la conjunción de las cinco placas tectónicas que afectan al territorio, estas son: la placa norteamericana, la placa del pacífico, la placa de cocos, la placa del caribe, y la placa de Rivera (figura 5). Alrededor de la placa del pacífico se forma el “cinturón de fuego” o “anillo de fuego” denominada así por ser la zona donde se han presentado los sismos de mayor magnitud en todo el mundo.

El territorio mexicano se encuentra en la placa norteamericana. En el norte del país existe una falla de transformación, entre la placa del pacífico y la placa norteamericana, que afecta principalmente al estado de Baja California. La placa de cocos se encuentra frente a costas de Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca con una frontera tipo convergente (zona de subducción) con la placa norteamericana, y es en esta zona donde se han presentado los sismos de mayor magnitud en las últimas 3 décadas. La placa de cocos subyace debajo de la placa norteamericana. Por último, la placa del caribe con la placa de cocos tiene una frontera convergente es decir la placa de cocos subyace a la placa del caribe provocando sismos en el sur de México, así como en Guatemala principalmente y otros países de américa central (figura 5).

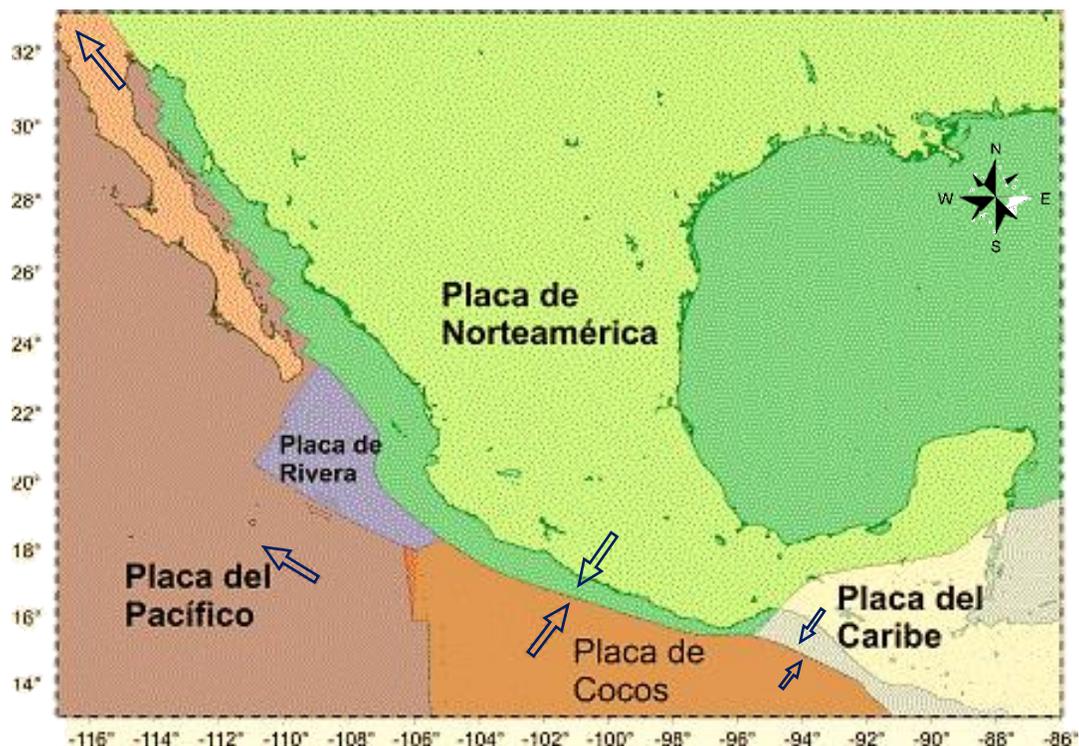


Figura 5. Placas tectónicas en México.

(<http://conocegeografia.blogspot.mx/2013/02/placas-tectonicas-de-mexico.html>)

Los sismos pueden ocurrir debido a diferentes orígenes: tectónico (se dividen en superficiales o profundos), actividad volcánica, impacto de meteoritos y por la actividad humana (explosiones nucleares). En este trabajo solo interesan los sismos de origen tectónico que en la figura 6 se muestra su clasificación.



Figura 6. Clasificación de los sismos de origen tectónico de acuerdo a su profundidad.

Investigadores en esta área sugieren que a partir de 60 km de profundidad sea considerada como profundo, en esta investigación también se hará esta consideración.

### 2.5 ZONA DE SUBDUCCIÓN EN MÉXICO.

La subducción es el proceso por el que una placa o corteza litosférica oceánica se hunde bajo otra placa, ya sea oceánica o continental (figura 7). La zona de subducción en México es la que provoca una alta frecuencia de sismos, y es la zona donde se han generado los sismos más fuertes. Frente a la costa del occidente y sureste de México y parte de Centroamérica, en la placa oceánica, se formó la fosa o trinchera mesoamericana. La zona de subducción está en el límite de la placa de cocos con la placa norteamericana y la placa del caribe (figura 5).

La fosa Mesoamericana o fosa Centroamericana es una fosa oceánica situada en el océano Pacífico oriental, a lo largo del litoral de América Central. Se extiende desde México central hasta Costa Rica. La fosa tiene una longitud de 2,750.0 km y una profundidad máxima de 6,669.0 m. Esta fosa es una zona de subducción importante y forma el límite tectónico entre la placa de Cocos y las placas de Nazca, Norteamericana, y Caribe.

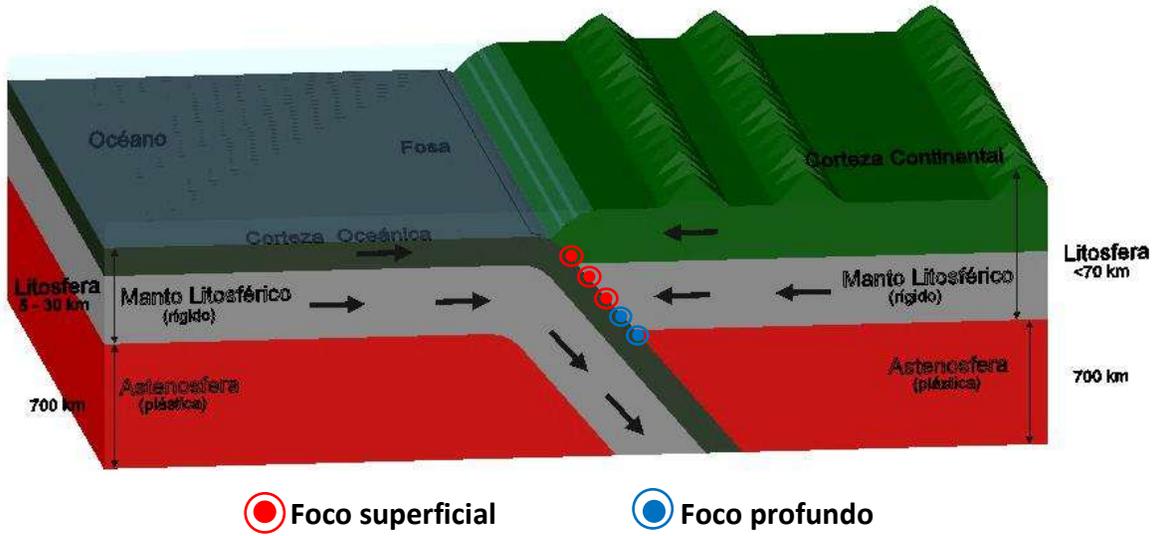


Figura 7. Zona de subducción.

Los temblores de origen tectónico pueden ser superficiales o profundos. Dependiendo de la posición del foco donde se libera la energía acumulada en las placas (hipocentro).

Los sismos de subducción (principal fuente de sismos en México) se caracterizan por tener una profundidad menor a 50 km. Otros tipos de sismos como el normal con una profundidad mayor a 50 km; y el local menor a 20 km, estos dos últimos se caracterizan por ser sismos con epicentros dentro del continente (intraplaca), en cambio los sismos como el primer tipo se presentan frente a las costas del pacífico (interplaca).

### 2.5.1 ESTRUCTURA DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN EN MÉXICO.

Existen tres regiones donde no se tenía evidencia convincente de la ocurrencia de grandes sismos durante este siglo. Estas tres regiones se encuentran en el Graben el Gordo (GEG), frente a las costas de Colima; Costa Grande de Guerrero, y en Tehuantepec en el estado de Oaxaca. Estas regiones se denominan brechas sísmicas por su ausencia de grandes sismos. Medidas continuas de deformación permiten definir en un futuro si estas zonas son asísmicas (regiones donde la energía se disipa sin producir grandes temblores) o son potencialmente peligrosos (figura 8).

La longitud de la ruptura de los grandes sismos de subducción que han ocurrido en México varía de unos 50 kilómetros hasta 200 kilómetros de largo. Estos temblores interplaca ocurren por el roce entre la placa Norteamericana y las placas oceánicas de Cocos y Rivera, a lo largo de su zona de contacto, como el sismo de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 con una magnitud de 8.1, tuvo una ruptura que cubrió casi toda la costa del estado de Michoacán (una longitud de 180 km).

# INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

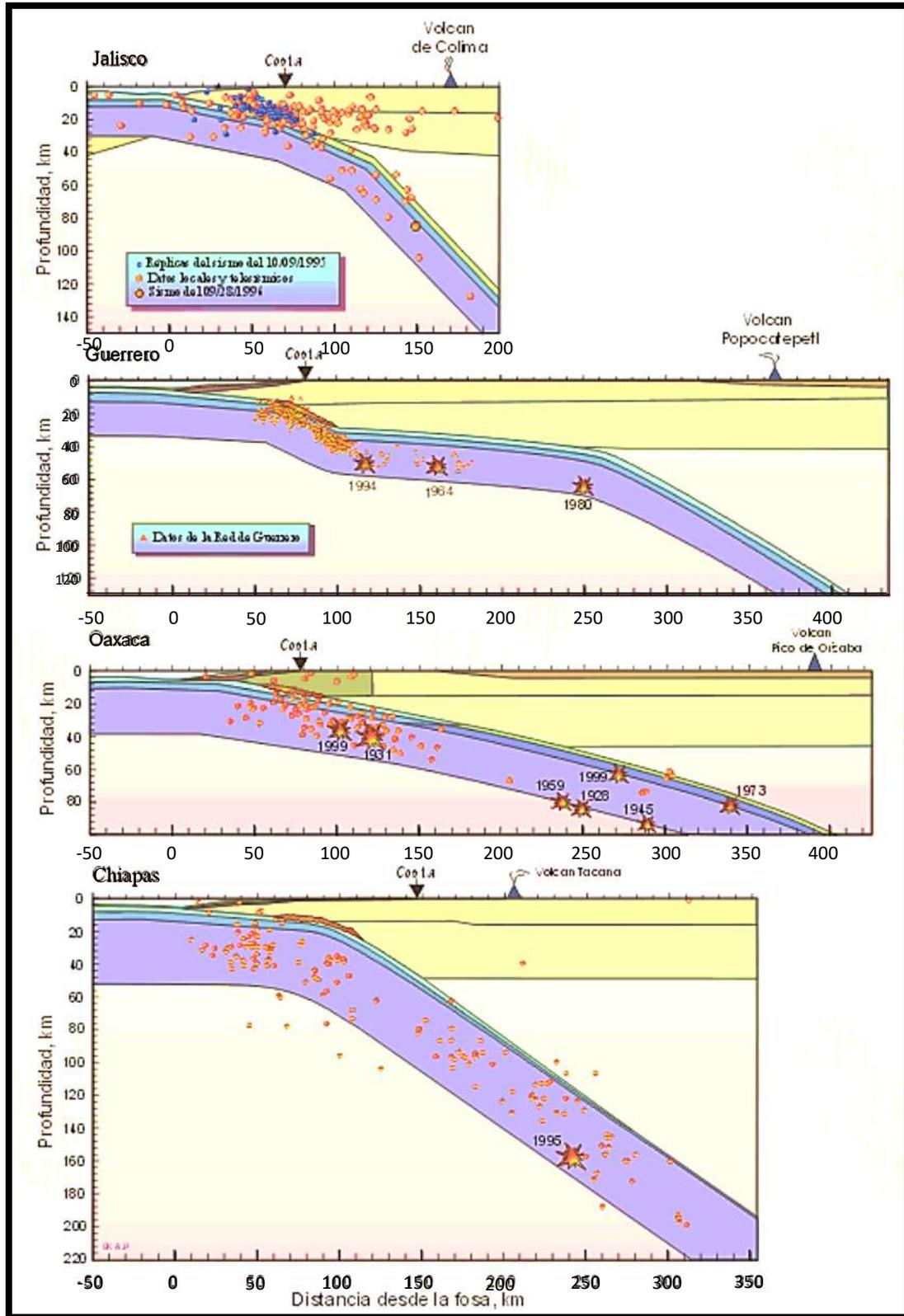


Figura 8. Estructura de la zona de subducción y localización de sismos en México.

<http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>

El Centro Internacional de Sismología o International Seismological Centre (ISC) ha registrado y promediado las profundidades de los epicentros en todo el mundo. En la figura 9 se muestran las profundidades promedio en las que ocurre la liberación de energía en las regiones del mundo.

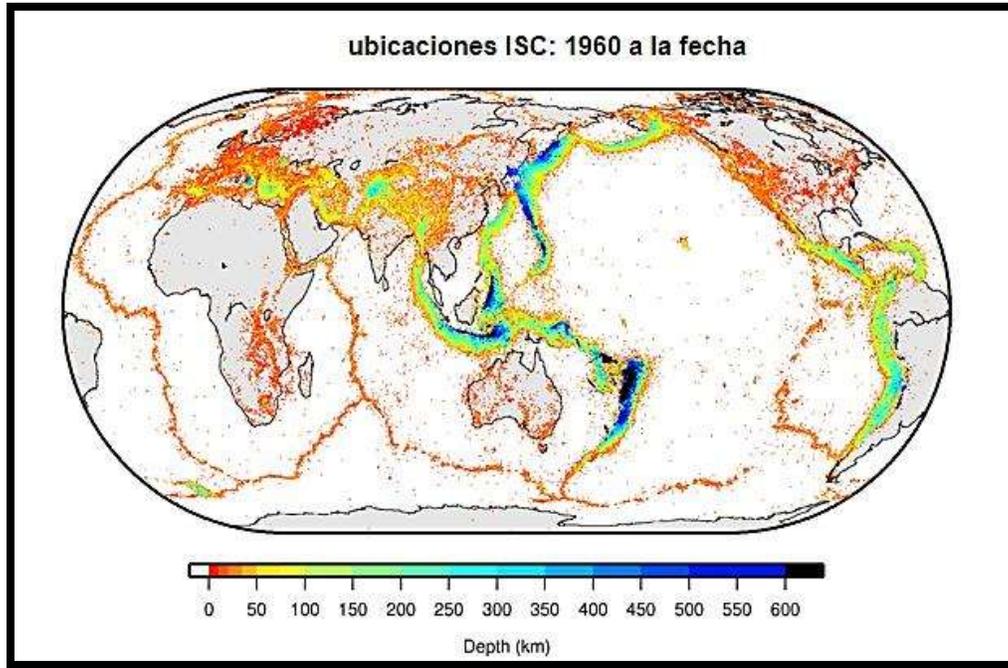


Figura 9. Profundidades de los hipocentros (<http://www.isc.ac.uk/>)

En tan solo 2016 el Servicio Sismológico Nacional tiene el registro de 15460 sismos, donde la mayor parte de ellos, más del 85%, se presentaron en el occidente y sur del país (figura 10).

La mayor cantidad de sismos tienen magnitudes que van de 3.0 a 3.9, en el 2016 se registraron 13,441 sismos, esto representa el 86.9% de los sismos ocurridos en este año, pero de acuerdo con la escala de Mercalli modificada la mayoría de estos sismos son casi imperceptibles, esto es subjetivo debido a factores, como la duración del sismo y tipo de suelo, que alteran la perceptibilidad humana, es decir, las aceleraciones máximas que pueden alcanzar sismos entre estas magnitudes.

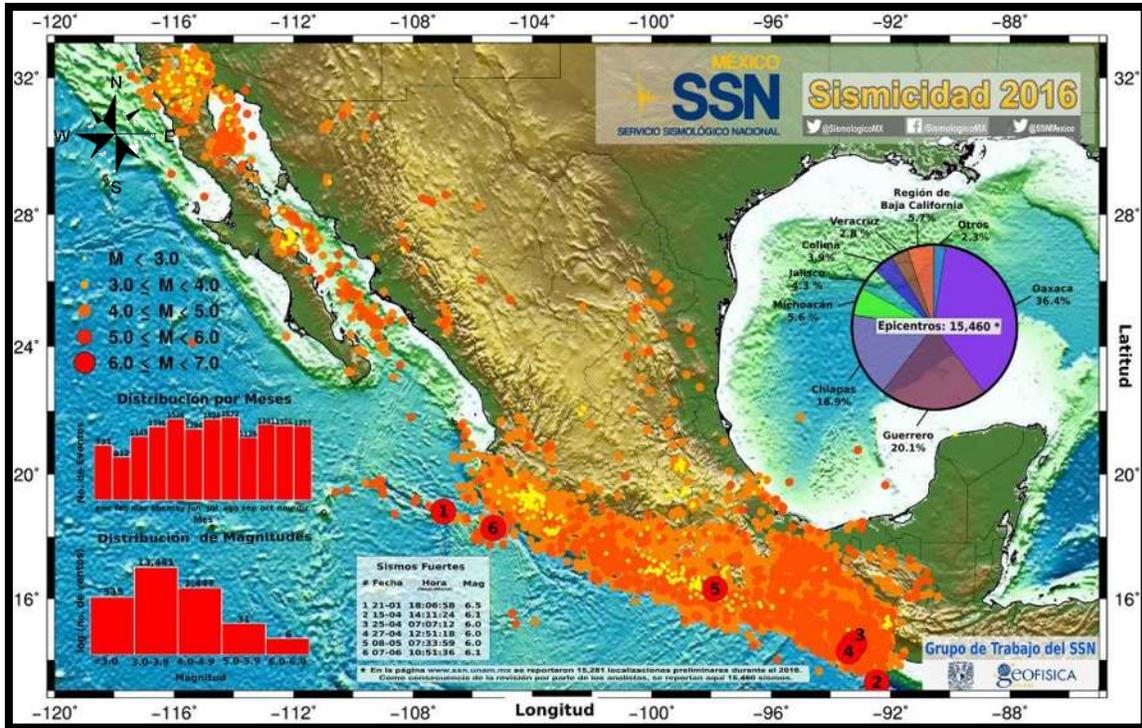


Figura 10. Sismos en el año 2016.

<http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/mapas-de-sismicidad-anual/>

## 2.6 ESTACIONES SISMOLÓGICAS, RED ACELEROGRÁFICA DE MÉXICO

Los acelerómetros cuentan con sensores de aceleración en tres direcciones, dos componentes horizontales perpendiculares entre sí, y una vertical.

Es el Instituto de Ingeniería (IINGEN) de la UNAM es una de las instituciones que monitorea instrumentos de la red acelerográfica del país. La red acelerográfica comenzó en 1910 con la instalación de observatorios y fue en la década de los 60's que se instalaron los dos primeros acelerógrafos en la ciudad de México; uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria, dando origen a la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería.

En la tabla 1 se muestra como se integra la red acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM actualmente y la figura 11 se presenta la localización de las estaciones.

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Tabla 1. Red acelerográfica del Instituto de Ingeniería.

Localización	Núm. de estaciones	Estaciones en operación
Chiapas	8	4
Colima	5	4
Ciudad de México	43	15
Estado de México	18	2
Guanajuato	1	1
Guerrero	53	25
Jalisco	5	5
Michoacán	19	7
Oaxaca	29	22
Puebla	18	11
Tabasco	1	1
Tlaxcala	1	1
Veracruz	6	4
<b>Total</b>	<b>207</b>	<b>102*</b>

Datos obtenidos de la base de datos de registros acelerográficos de la red sísmica mexicana (\* estaciones en operación al 2014)



Figura 11. Cobertura de la red acelerográfica del Instituto de Ingeniería (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/RedAcelerografica.aspx>)

### 2.6.1 ACELEROGRAMAS

Los acelerogramas registran pares de valores tiempo-aceleración durante la ocurrencia de un sismo. El intervalo de muestreo depende de cada aparato y del sistema de administración de las estaciones.

### 2.6.2 ONDAS SÍSMICAS

Las ondas sísmicas se generan a partir del punto de ruptura (litósfera), viajan por la tierra a partir de donde se libera la energía, es decir en el hipocentro.

La litósfera está formada por la corteza y la zona más externa del manto, con una profundidad de hasta 100 km y flota sobre la astenósfera, una capa plástica que forma parte del manto superior.

#### 2.6.2.1 ONDA DE CUERPO

##### **Onda P (primaria)**

Ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatando en la dirección de la propagación. Viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y viajan a través de cualquier tipo de material líquido o sólido.

##### **Onda S (secundarias)**

El desplazamiento es transversal a la dirección de la propagación y aparecen en el terreno después de las primeras. Este tipo de ondas no se propaga en líquidos.

#### 2.6.2.2 ONDA DE SUPERFICIE

##### **Onda Love**

Ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie, su velocidad es 90% de la velocidad de las ondas S y ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh

##### **Onda Rayleigh**

Ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo y su velocidad es 70% de la velocidad de las ondas S.

### 2.6.3 MAGNITUD

La magnitud de un sismo es un número que busca caracterizar el tamaño de un sismo y la energía sísmica liberada. Se mide en una escala logarítmica, de tal forma que cada unidad de magnitud corresponde a un incremento de raíz cuadrada de 1000, o bien, de aproximadamente 32 veces la energía liberada. Es decir que, un sismo de magnitud 8 es 32 veces más grande que uno de magnitud 7.

El cálculo de la magnitud es un proceso iterativo. La magnitud reportada inicialmente, tanto por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) como por otras agencias internacionales (por ejemplo, el Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS), es calculada por algoritmos computacionales de forma automática. Para que se tenga una estimación de manera expedita, estos algoritmos emplean pocos datos sismológicos. Además, el tipo de datos que se toman difiere entre las agencias, por lo que las metodologías utilizadas en el cálculo de la magnitud también difieren. Esta es la razón por la que los valores preliminares de magnitud son diferentes entre las agencias. Cuando se dispone de la mayoría de los datos y con más tiempo de cómputo, se revisa nuevamente la estimación de la magnitud para reportar entonces la magnitud final del sismo. En general, los valores finales de magnitud que reportan las diversas agencias coinciden; sin embargo, pueden existir pequeñas diferencias debido al tipo de datos que se usan.

Existen varios tipos de magnitud. Estos se diferencian entre sí por los datos y la metodología empleados. En general, el SSN reporta magnitud de coda,  $M_c$ , para sismos de magnitud menor de 4.5. Para sismos mayores de 4.5 se usan la magnitud de energía,  $M_E$ , y magnitud de amplitud,  $M_A$ , para México. Para sismos de magnitud mayor de 4.5, en general, se reporta la magnitud de momento sísmico,  $M_w$ . Esta puede ser calculada a partir de dos métodos, por lo que se puede llegar a valores distintos de magnitud  $M_w$ , distinguiéndolas como  $M_{ww}$  y  $M_{wr}$ . Enseguida se describen los tipos de magnitud que se utilizan.

### **2.6.3.1 Magnitud de onda de superficie ( $M_s$ )**

Su valor se obtiene a partir de la amplitud máxima, observada en los sismogramas, de las ondas superficiales (ondas de Rayleigh) en períodos de oscilación entre 18 y 22 segundos. Esta escala permite determinar magnitudes de sismos más grandes, las magnitudes de onda de superficie subestiman el tamaño de terremotos muy grandes, los valores máximos observados son de aproximadamente 8.3 – 8.7.

### **2.6.3.2 Magnitud de onda de cuerpo ( $m_b$ )**

Su valor se obtiene a partir de la amplitud máxima, observada en los sismogramas, de las ondas de cuerpo, con períodos de oscilación de 1 segundo. Un problema de esta magnitud es que se satura a magnitudes de 6.5 - 6.8; es decir, no es posible determinar  $m_b$  para sismos con magnitud superior a estos valores.

### **2.6.3.3 Magnitud local ( $M_L$ )**

La magnitud local es conocida como magnitud Richter. La magnitud Richter fue propuesta por Charles F. Richter en 1935 (Sismólogo de California Technological Institute) con la colaboración de Beno Gutenberg. Inicialmente fue empleada para calcular magnitudes de sismos que ocurrían en California con un radio de 600 km y que eran registrados en un tipo de instrumentos específicos (sismógrafo de torsión Wood Anderson). Esta escala ha sido calibrada para poder ser usada en diferentes

partes del mundo y usando registros de otros instrumentos. Sin embargo, por limitaciones intrínsecas al tipo de datos sismológicos que emplea, además de que es difícil relacionarla con las características físicas del origen del terremoto esta escala ya no es usada y ha sido remplazada por otras escalas de magnitud más robustas y generales, como la de Magnitud de momento sísmico ( $M_w$ ).

### **2.6.3.4 Magnitud de momento sísmico ( $M_w$ )**

Esta magnitud se determina a partir del momento sísmico, que es una cantidad (valor absoluto) proporcional al área de ruptura (al tamaño de la falla geológica que rompió) y al deslizamiento que ocurra en la falla. Fue introducida en 1979 por Thomas Hanks y Hiroo Kanamori.

Su estimación es compleja y puede llevarse a cabo empleando diversos métodos y tipos de datos. En general, su cálculo requiere, por lo menos, de los primeros 15 minutos después de ocurrido el evento sísmico. Esta magnitud es la más robusta; a diferencia de  $M_L$ ,  $m_b$  y  $M_s$ , la escala  $M_w$  no se satura, por lo que hoy en día es la más confiable y la más usada por las agencias dedicadas a la detección de sismos. También es la magnitud más usada por científicos para comparar los tamaños entre sismos.

### **2.6.3.5 Magnitud de coda ( $M_c$ )**

Esta magnitud se obtiene a partir de la duración del registro sísmico. La coda de un sismograma corresponde a la parte tardía de la señal que decrece monotónicamente conforme pasa el tiempo hasta alcanzar su nivel original, previo al sismo. La duración de la coda es proporcional al tamaño del sismo, aunque puede verse afectada por otros factores, como lo es la naturaleza del suelo en el que se encuentra la estación, Suteau y Whitcom (1979).

### **2.6.3.6 Magnitud de energía ( $M_e$ )**

La magnitud de energía es proporcional a la energía que irradió el sismo en forma de ondas sísmicas. Para un sismo dado, este valor puede ser diferente al determinado para  $M_w$ , pues  $M_e$  cuantifica un aspecto diferente del sismo. Su cálculo es laborioso, por lo que generalmente esta magnitud no es reportada por las agencias durante los primeros días de sucedido el sismo, Choy y Boatwright (1995).

Existen dos tipos de magnitudes más para México las cuales se definen a continuación.

### **2.6.3.7 Magnitud de energía y magnitud de amplitud ( $M_E$ y $M_A$ respectivamente)**

Para sismos de magnitudes mayores de 4.5 y cuyo epicentro haya tenido lugar en las costas de Guerrero, se tienen calibradas dos tipos de magnitud usando una sola estación, por lo que su estimación es muy rápida.  $M_E$  se basa en un cálculo simple de la energía irradiada y  $M_A$  en la amplitud máxima observada en el registro de la estación sismológica ubicada en Ciudad Universitaria de la UNAM. Estas estimaciones son consideradas preliminares pues se obtienen sólo con un dato sismológico, Singh y Pacheco (1994).

### **2.6.4 INTENSIDAD**

El efecto de un terremoto en la superficie de la Tierra se llama intensidad. La escala de intensidad consiste en una serie de respuestas clave como, si despertó a gente, movimiento de muebles, daños en las chimeneas, muros, losas, y finalmente la destrucción total.

Numerosas escalas de intensidad se han desarrollado durante los últimos cientos de años para evaluar los efectos de los terremotos, la que se utiliza actualmente en los Estados Unidos es la Escala de Intensidad de Mercalli Modificada (MM). Fue desarrollado en 1931 por los sismólogos estadounidenses Harry Wood y Frank Neumann. Esta escala, compuesto de aumento de los niveles de intensidad que van desde imperceptible agitación a la destrucción catastrófica, es designado por números romanos. No tiene una base matemática; en cambio, es una clasificación arbitraria basada en los efectos observados debido a algún sismo.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM, de su base de datos de registros acelerográficos, se obtuvo los registros de aceleraciones que se utilizaron, para tener un conjunto de registros con los que se obtienen valores medios y analizar los métodos de escalamiento.

En la tabla 2 se muestra la clasificación de la intensidad.

Tabla 2. Escala de Mercalli Modificada.

Grado	Descripción
I. Muy débil	Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables. Aceleración menor a 0.5 Gal.
II. Débil	Perceptible sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar. Aceleración entre 0.5 y 2.5 Gal.
III. Leve	Perceptible por algunas personas dentro de edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo reconocen como terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Sensación semejante al paso de un camión pequeño. Aceleración entre 2.5 y 6.0 Gal.
IV. Moderado	Perceptible por la mayoría de personas dentro de edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbación en cerámica, puertas y ventanas. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación semejante al paso de un camión grande. Aceleración entre 6.0 y 10 Gal.
V. Poco fuerte	La mayoría de los objetos se caen, caminar es dificultoso, las ventanas suelen hacer ruido. Aceleración entre 10 y 20 Gal.
VI. Fuerte	Lo perciben todas las personas, muchas personas asustadas suelen correr al exterior, paso insostenible. Ventanas, platos y cristalería dañados. Los objetos se caen de sus lugares, muebles movidos o caídos. Revoque dañado. Daños leves a estructuras. Aceleración entre 20 y 35 Gal.
VII. Muy fuerte	Pararse es dificultoso. Muebles dañados. Datos insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables en estructuras pobremente construidas. Mampostería dañada. Perceptible por personas en vehículos en movimiento. Aceleración entre 35 y 60 Gal.
VIII. Destructivo	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles colapsos. Daño severo en estructuras pobremente construidas. Mampostería seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar. Aceleración entre 60 y 100 Gal.
IX. Ruinoso	Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con colapsos parciales. Edificios desplazados fuera de las bases. Aceleración entre 100 y 250 Gal.
X. Desastroso	Algunas estructuras de madera bien construidas destruidas. La mayoría de las estructuras de mampostería y el marco destruido con sus bases. Rieles doblados. Aceleración de 250 y 500 Gal.
XI. Muy desastroso	Pocas, si las hubiera, estructuras de mampostería permanecen en pie. Puentes destruidos. Rieles curvados en gran medida. Aceleración mayor a 500 Gal.
XII. Catastrófico	Destrucción total con pocos sobrevivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionadas.

## 2.7 SISMOS FUERTES EN MÉXICO DESDE 1980

En la década de los sesentas cuando realmente se comienza a tomar conciencia de la importancia de contar con datos instrumentales para la interpretación del fenómeno sísmico, para dar respuesta a los graves daños producidos por eventos sísmicos como Acambay (1912), Oaxaca (1931) y San Marcos (1957). Los primeros registros obtenidos corresponden a los temblores del 10 de diciembre de 1961 (M=5) y los ocurridos en Acapulco en mayo de 1962, cuyos estudios hicieron evidente la gran utilidad de este tipo de información, entre otras aplicaciones, para calibrar los modelos sobre el comportamiento dinámico de estructuras excitadas por sismo y para entender las características de propagación de las ondas sísmicas. El primer registro acelerográfico en la base de datos que está disponible al público es el sismo de 06 de Julio de 1964 con Mb=6.7.

Todos los registros de sismos tienen como referencia de hora, GMT (Greenwich Mean Time) o su equivalente UTC (Universal Time Coordinated). Para conocer la hora en México se usa GMT-6 (hora centro), es decir se le resta 6 horas.

En la figura 12 se muestran los sismos más importantes que han ocurrido en territorio mexicano. El círculo de color rojo indica el lugar del epicentro del sismo de 19 de septiembre de 2017, la línea de color negro es la zona de ruptura del sismo del 7 de septiembre de 2017. Las elipses corresponden a las áreas de ruptura de los sismos interplaca que han ocurrido en México. Las estrellas rojas y azules son los epicentros de sismos intraplaca, en rojo los sismos profundos y en azul los sismos someros (superficiales).

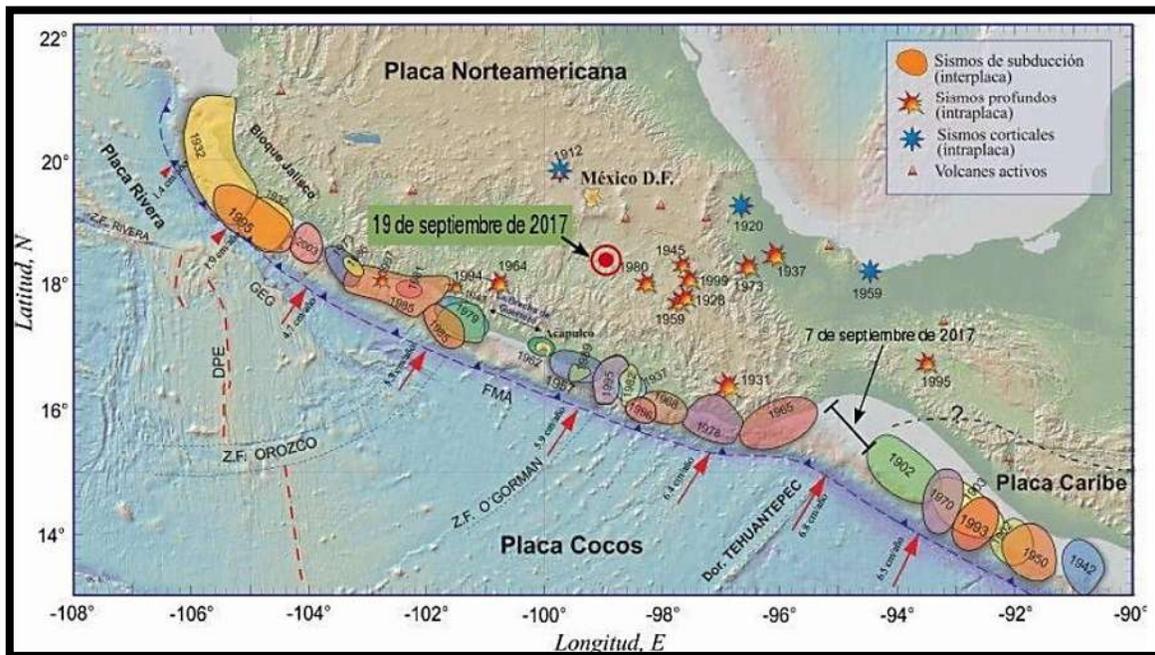


Figura 12. Áreas de ruptura de los sismos más importantes que han ocurrido en México.

[http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170919 Puebla-Morelos\\_M71.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf)

## INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

La base mexicana de sismos fuertes desde 1980 a septiembre del 2017 tiene registro de 20 sismos de magnitud mayor o igual a 7.0, los cuales se presentan en la tabla 3 se presentan las fechas locales con hora en utc y en la figura 13, 14 y 15.

Tabla 3. Sismos fuertes (con magnitud mayor a 7.0) en México desde 1980 hasta septiembre del 2017.

No.	Fecha y hora (UTC)	Latitud	Longitud	Profundidad (Km)		Magnitud
				USGS	SSN	
1	19/09/2017 T18:14:38	18.400	-98.720	51	57	Mww=7.1 Mb=6.6
		Puebla, México				
2	07/09/2017 T04:49:18	14.850	-94.110	69.7	58	Mw=8.2 Mb=7.2
		Costa de Chiapas, México				
3	18/04/2014 T14:27:24	17.397	-100.9723	24	18	Mww=7.2 Mb=6.5 Md=7.2
		Guerrero, México				
4	12/04/2012 T07:15:48	28.696	-113.104	13	-	Mw=7.1 Mb=6.2 Ms=6.9
		Costa de Baja California, México				
5	20/03/2012 T18:02:47	16.493	-98.231	20	18	Mw=7.3 Mb=6.6 Ms=7.6
		Oaxaca, México.				
6	04/04/2010 T22:40:42	32.286166	-115.295333	10	10	Mw=7.2 Ml=6.85
		Baja California, México				
7	21/01/2003 T02:06:34	18.77	-104.104	24	9	Mb=6.5 Ms=7.6 Mw=7.4
		Costa de Colima, México				
8	30/09/1999 T16:31:14	16.059	-96.931	60.6	39	Mb=6.5 Ms=7.5 Mw=7.5
		Oaxaca, México				
9	15/06/1999 T20:42:05	18.386	-97.436	70	63	Mb=6.4 Mw=7.0 Ms=6.5
		Puebla, México				
10	11/01/1997 T20:28:26	18.219	-102.756	33	40	Mw=7.2 Mb=6.5 Ms=6.9
		Michoacán, México				
11	24/02/1996 T03:08:15	15.978	-98.07	21.1	15	Mw=7.1 Mb=6.1 Ms=6.9
		Costa de Oaxaca, México				

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

No.	Fecha y hora (UTC)	Latitud	Longitud	Profundidad (Km)		Magnitud
				USGS	SSN	
12	20/10/1995 T02:38:57	16.84	-93.469	159.3	160	Mw=7.2 Mb=6.3
		Chiapas, México				
13	09/10/1995 T15:35:53	19.055	-104.205	33	25	Mw=8 Mb=6.6 Ms=7.4
		Colima, México				
14	14/09/1995 T14:04:31	16.779	-98.597	23	21	Mwb=7.4 Mb=6.4
		Guerrero, México				
15	10/09/1993 T19:12:54	14.717	-92.645	34.1	34	Mw=7.2 Mb=6.2 Ms=7.2
		Costa de Chiapas, México				
16	30/04/1986 T07:07:18	18.404	-102.973	26.5	20	Mw=7.0 Mb=6.2 Ms=7.0
		Michoacán, México				
17	21/09/1985 T01:37:13	17.802	-101.647	30.8	15	Mw=7.6 Mb=6.3 Ms=7.6
		Guerrero, México				
18	19/09/1985 T13:17:47	18.19	-102.533	27.9	15	Mw=8.0 Mb=6.8 Ms=8.1
		Michoacán, México				
19	07/06/1982 T10:59:40	16.558	-98.358	33.8	24	Ms=7.0 Mb=6.3 Ms=6.9
		Guerrero, México				
20	25/10/1981 T03:22:15	18.048	-102.084	33	14	Ms=7.3 Mb=6.2
		Guerrero, México				

Continuación de tabla 3.

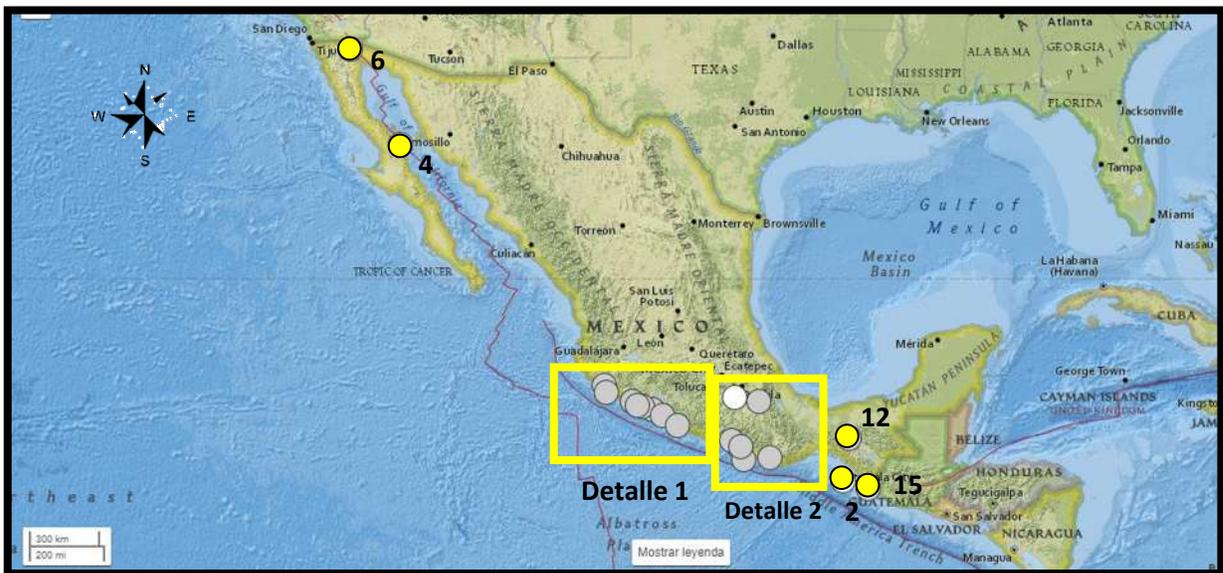


Figura 13. Epicentros de sismos fuertes en México desde 1980, imagen obtenida de USGS.

# INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

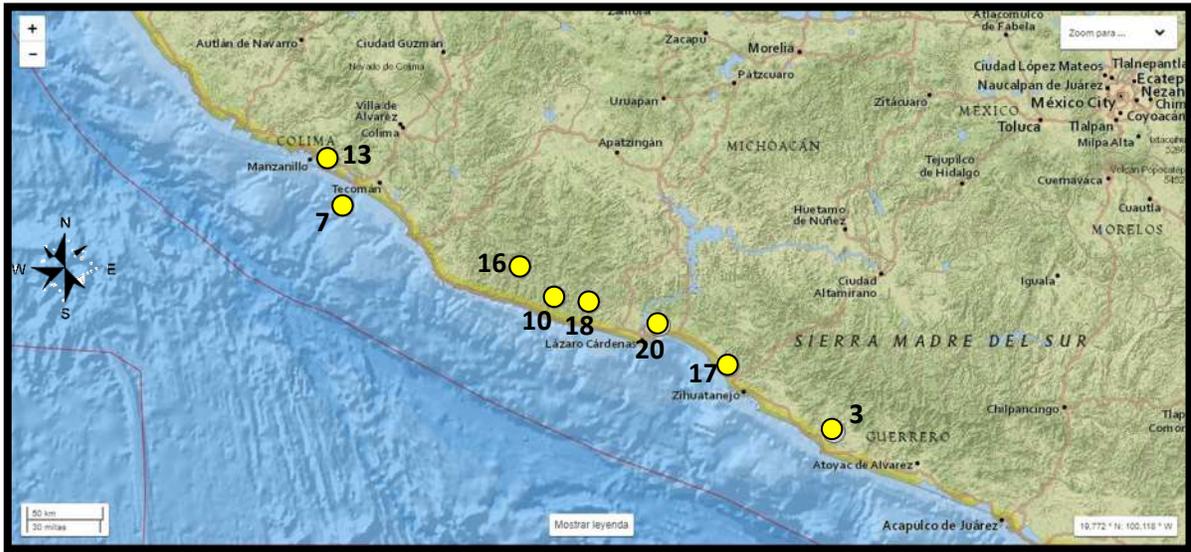


Figura 14. Detalle 1 de figura 13. Epicentros de sismos fuertes. Imagen obtenida de USGS.

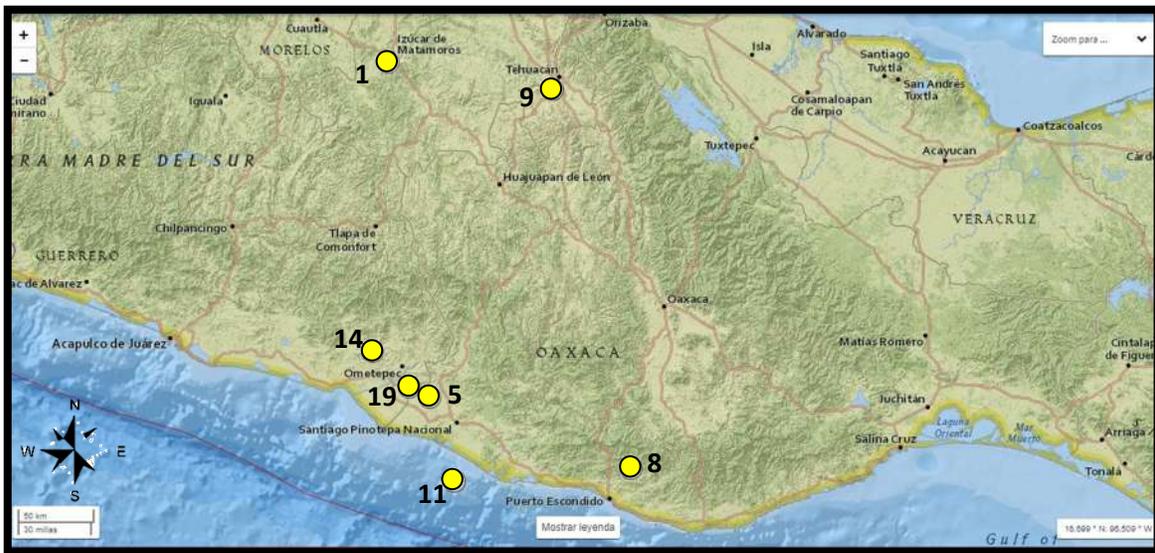


Figura 15. Detalle 2 de figura 13. Epicentros de sismos fuertes. Imagen obtenida de USGS.

## INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Hasta ahora, el sismo más grande registrado es el sismo del 07 de septiembre del 2017, con epicentro frente a las costas de Chiapas (14.850° N 94.110° W), se muestra en la figura 13, epicentro número 2 y figura 16.

Las dos réplicas mayores alcanzaron una magnitud 6.1, la primera ocurrió el 8 de septiembre, se localizó a 72 km al sureste de Salina Cruz. La segunda réplica de magnitud 6.1 ocurrió el día 23 de septiembre en las cercanías de Unión Hidalgo, Oaxaca, y más de 6000 réplicas de magnitud menor (hasta principios de octubre del 2017). Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Veracruz fueron los estados más afectados. Sumaron en total más de 90 personas fallecidas, se dañaron a casas y edificios. En Oaxaca, 41 municipios resultaron afectados, entre ellos, Juchitán de Zaragoza, Matías Romero, Unión Hidalgo, San Dionisio del Mar, se registraron colapsos de casas, edificios (palacio municipal en Juchitán) y hoteles. En el estado de Chiapas los municipios más afectados fueron, Tonalá, San Cristóbal de las Casas, Pijijiapan, Tapachula. También hubo daños en Villahermosa, Tabasco. En general se registraron daños considerables como grietas y caídas de bardas de mampostería sin confinamiento y de adobe principalmente, se reportaron en total 110,000 inmuebles dañadas. También hubo interrupciones en el suministro eléctrico en diferentes ciudades. En la Ciudad de México solo hubo caídas de bardas, cortes al suministro de electricidad, cristales de ventanas rotas. En las zonas cercanas (radio menor a 200 km) del epicentro se tuvo una intensidad en la escala Mercalli de VIII y IX (figura 16).

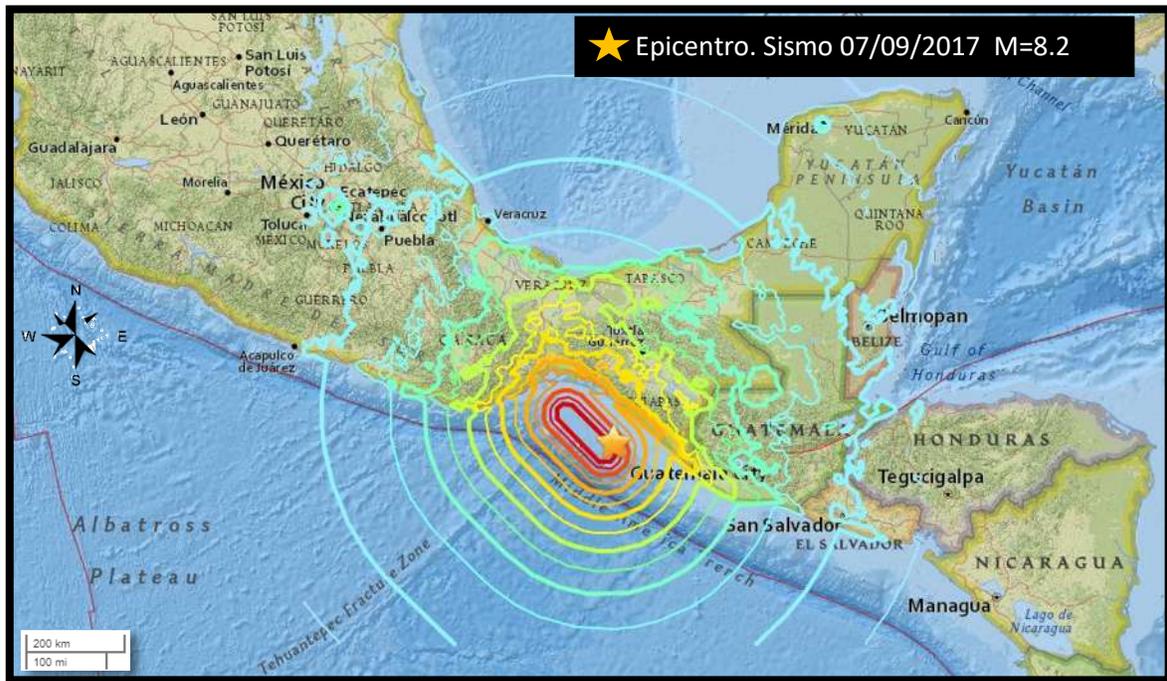


Figura 16. Sismo del 7 de septiembre del 2017. Imagen obtenida de USGS



## INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

importantes en localidades del estado de Michoacán, y estados circundantes. Se desconoce el número total de víctimas, pues hay estimaciones que van desde los 3,629 (de acuerdo a Registro Civil de la Ciudad de México), 10,000 (según la Cruz Roja Mexicana), hasta las 40,000 personas y 4,000 personas rescatadas con vida (de acuerdo de Servicio Sismológico Nacional). Sin embargo, la mayoría de los conteos o estimaciones rondan los 10 mil muertos. Cerca de 30 mil estructuras presentaron daños totales, y 68,000 daños parciales. Entre los edificios más importantes que se vinieron abajo estaban el edificio Nuevo León del Conjunto Urbano Nonoalco Tlatelolco; los edificios A1, B2 y C3 del Multifamiliar Juárez; Televicentro (hoy Televisa Chapultepec), los Televiteatros (hoy Centro Cultural Telmex); los Hoteles Regis (ahora Plaza de la Solidaridad); el Hospital Juárez, Hospital General y el Centro Médico Nacional, entre otros. Se registraron más de 30 réplicas con magnitudes entre 4 y 5, la más significativa fue de magnitud 7.6, el día 20 de septiembre de 1985, con epicentro en Guerrero entre Zihuatanejo y La Unión (ver tabla 3 número 17) como consecuencia colapsaron 20 edificios más.

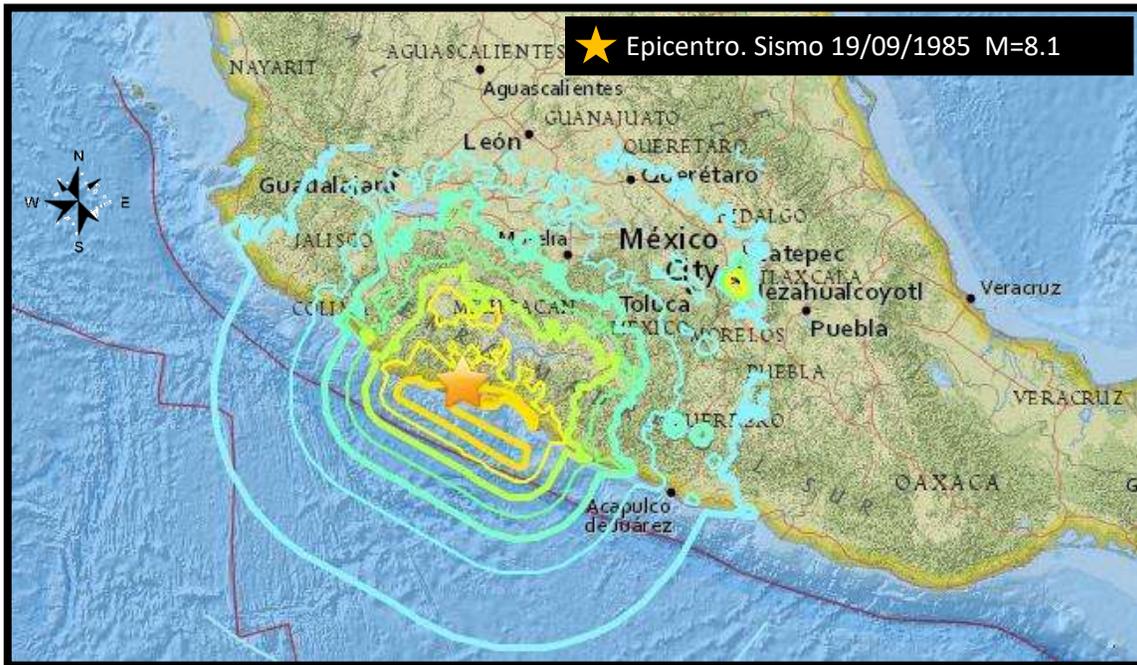


Figura 18. Sismo en Michoacán del 19 de septiembre de 1985. Imagen obtenida de USGS.

Sin embargo, el sismo de 1985 fue el referente de investigaciones posteriores ya que fue un parteaguas en el estudio de este fenómeno, mayor registro de información (estaciones sismológicas), la respuesta dinámica de estructuras y por ende la creación y revisión constante de reglamentos de construcción en las zonas más propensas a sufrir daños debido a su localización y también el comportamiento (repuesta) del suelo.

## 2.8 SELECCIÓN DE ESTACIONES SÍSMICAS

Para esta investigación se eligieron tres estaciones sismológicas en una zona de alta sismicidad en México, las cuales se muestran en la tabla 4 y en la figura 19.

Tabla 4. Estaciones en las que obtuvieron los registros sísmicos.

Entidad	Clave	Tipo de Suelo	Altitud (msnm)	Localización		Ubicación
				Latitud	Longitud	
Guerrero (La Unión)	UNIO	Roca	56	17.98762	-101.8106	Escuela Secundaria Técnica #37, a 60km de Zihuatanejo y a 8km del entronque con la carretera Zihuatanejo-Lázaro Cárdenas. La Unión, Guerrero.
Guerrero (Zihuatanejo)	AZIH	Roca	11	17.60654	-101.4653	Aeropuerto Internacional de Zihuatanejo, ladera derecha. Zihuatanejo, Guerrero.
Michoacán (Caleta de Campos)	CALE	Roca	10	18.07287	-102.7544	Escuela Secundaria Técnica 68 de Pesca, en Caleta de Campos. A 80km de Lázaro Cárdenas, carretera Lázaro Cárdenas-Manzanillo, Michoacán.



Figura 19. Localización de las estaciones sismológicas seleccionadas (imagen obtenida de google).

### 2.8.1 REGISTROS DEL SISMO DE 1985 EN ESTACIONES SELECCIONADAS

Para analizar la vulnerabilidad sísmica de una estructura se hacen modelos analíticos sometiéndolos a acelerogramas aplicados en la base de la estructura. Se eligieron al azar sismos de pequeña magnitud, los cuales tienen una magnitud máxima de 5.5 que son consecuencia del movimiento de subducción (profundidad menor a 50 km cercana a la corteza oceánica). Para tener un análisis más preciso y completo se hizo un promedio de todos los sismos por cada estación, comparando este promedio con los correspondientes al del sismo fuerte (Michoacán 1985).

Se eligieron estaciones en un tipo de suelo duro ya que se pretende hacer el análisis lo más preciso posible sin que intervengan otros factores como la respuesta del suelo tipo blando (arcilla), la cual afectaría de manera significativa (en este caso) el escalamiento de las señales sísmicas y requeriría incluir un número mayor de variables en los análisis.

En la tabla 5 se muestra la aceleración máxima registrada del sismo de 1985 de las tres estaciones seleccionadas en las tres direcciones, posterior a esto se presentan los acelerogramas correspondientes al registro sísmico de las tres estaciones así como el espectro de pseudoaceleración de cada registro (figura 20, 21, 22 y 23 respectivamente).

Tabla 5. Aceleraciones máximas en las tres direcciones de las estaciones seleccionadas del sismo del 19/09/1985.

Aceleraciones máximas del sismo de 1985			
Estación	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )		
	Canal	Dirección	Aceleración máxima
UNIO	Canal 1	S90E	148.58
	Canal 2	VERT	-129.46
	<b>Canal 3</b>	<b>S00E</b>	<b>-165.29</b>
AZIH	Canal 1	VERT	-100.09
	<b>Canal 2</b>	<b>N90E</b>	<b>-153.93</b>
	Canal 3	N00E	-98.63
CALE	<b>Canal 1</b>	<b>S90E</b>	<b>140.68</b>
	Canal 2	VERT	88.45
	Canal 3	S00E	-139.73

## INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS



Figura 20. Acelerograma de la estación UNIO del canal 3 (S00E) del sismo 19/09/1985.



Figura 21. Acelerograma de la estación AZIH del canal 2 (N90E) del sismo 19/09/1985.

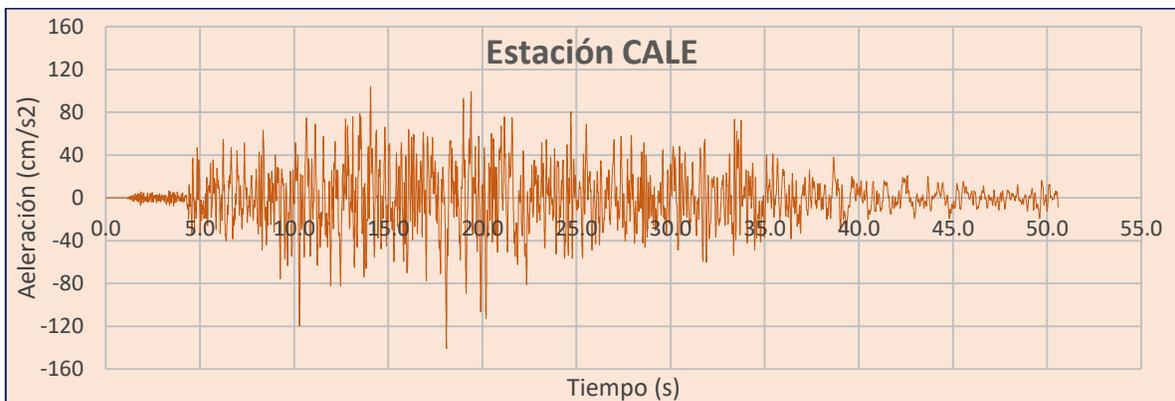


Figura 22. Acelerograma de la estación CALE del canal 1 (S90E) del sismo 19/09/1985.

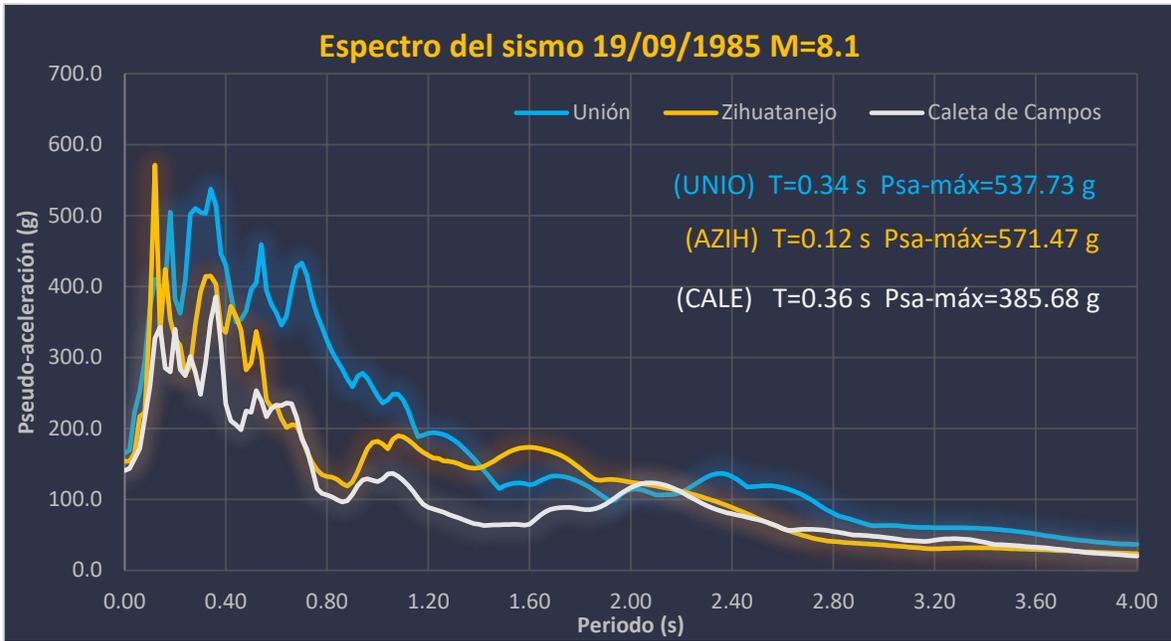


Figura 23. Espectro de pseudoaceleración del sismo del 19/09/1985 M=8.1 en Michoacán.

### 2.8.2 REGISTROS DE SISMOS DE PEQUEÑA MAGNITUD

A continuación se muestran los sismos seleccionados para la aplicación de las técnicas de escalamiento. En la tabla 6 se muestran los sismos seleccionados de la estación UNIO. En la tabla 7 se muestran los sismos seleccionados de la estación AZIH. En la tabla 8 se muestran los sismos seleccionados de la estación CALE. Para la aplicación de las técnicas de escalamiento de los sismos se tomó el canal con la mayor aceleración de los tres canales de cada registro.

La elección fue al azar y sin un número determinado de registros, se optó por tener un número representativo de registros, el cual se propuso un número mínimo de 10 registros sin importar la fecha ni localización. Todos tienen una magnitud menor a 5.5 con una profundidad máxima de 50 km, lo que los ubica en la fuente sísmica de subducción.

Debido a que la fuente de información varía en algunos datos se incluyeron ambas en las 3 tablas siguientes, ya que las agencias encargadas de generar los datos del sismo usan métodos diferentes, sin embargo, cabe resaltar, que los datos son correctos sin importar la discrepancia entre ellos.

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Tabla 6. Sismos seleccionados en la estación la Unión (UNIO).

No.	Fecha	Localización (Epicentro)					Magnitud	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )		
		Entidad	Latitud	Longitud	Profundidad (km)			Canal	Dirección	Aceleración máxima
					USGS	SSN				
1	14-01-1991 H 21:11:04	Guerrero, México.	18.029	-101.700	30.5	25	Mb= 5.3 Ms=5.0 Mc= 5.1	Canal 1	S90E	-52.64
								Canal 2	VERT	40.19
								Canal 3	S00E	37.32
2	22-12-1997 H 05:22:05	Guerrero, México.	17.297	-101.036	10	5	Mb=5.1 Ms=5.0 Mc=4.6 Me= 5.1	Canal 1	N90W	3.29
								Canal 2	VERT	-2.37
								Canal 3	N00W	2.86
3	09-05-1998 H 17:03:12	Guerrero, México.	17.519	-101.310	33	18	Ms= 4.7 Mb= 4.8 Me= 5.1	Canal 1	N90W	8.76
								Canal 2	VERT	-8.26
								Canal 3	N00W	7.41
4	27-03-2003 H 07:44:23	Guerrero, México.	18.010	-101.780	33	25	Mb=4.8 Mc=4.8 Me=5.1	Canal 1	N90W	73.49
								Canal 2	VERT	29.62
								Canal 3	N00W	-49.60
5	20-10-2008 H 05:00:52	Guerrero, México.	17.462	-101.003	26.2	25	Mb=5.1	Canal 1	N90W	-3.08
								Canal 2	VERT	1.96
								Canal 3	N00W	-2.56
6	05-04-2013 H 01:58:48	Guerrero, México.	17.226	-100.540	35	17	Mb=5.3	Canal 1	N90W	1.29
								Canal 2	VERT	1.23
								Canal 3	N00W	1.38
7	01-12-2013 H 03:20:55	Guerrero, México.	17.295	-101.668	20	10	Mb=5.1 Md=5.4	Canal 1	N90W	-6.63
								Canal 2	VERT	3.34
								Canal 3	N00W	2.84
8	19-04-2014 H 14:58:15	Guerrero, México.	17.240	-101.450	35	20	Mb=5.0	Canal 1	N90W	-2.05
								Canal 2	VERT	-1.08
								Canal 3	N00W	-1.44
9	30-09-2015 H 17:25:54	Guerrero, México.	18.0401	-101.3369	42	30	Mb=5.5	Canal 1	N00W	-54.91
								Canal 2	N90W	-59.23
								Canal 3	VERT	-23.87
10	25-10-2015 H 14:47:51	Guerrero, México.	18.2628	-101.611	42	20	Mb=5.1 Md=5.0	Canal 1	N00E	22.84
								Canal 2	N90E	-14.71
								Canal 3	VERT	10.66

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Tabla 7. Sismos seleccionados de la estación AZIH.

No.	Fecha	Localización (Epicentro)					Magnitud	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )		
		Entidad	Latitud	Longitud	Profundidad (km)			Canal	Dirección	Aceleración máxima
					USGS	SSN				
1	28/09/1985 H 03:52:50	Guerrero, México	17.532	-101.111	33	10	Mb=5.1 Ms=5.0 Mc=4.5	Canal 1	V	-4.466
								<b>Canal 2</b>	<b>N90W</b>	<b>-8.249</b>
								Canal 3	S00E	6.123
2	14/01/1991 H 21:11:06	Guerrero, México	17.838	-101.854	30.5	25	Mb=5.3 Ms=5.0 Mc=5.1	Canal 1	V	8.610
								<b>Canal 2</b>	<b>N90E</b>	<b>11.480</b>
								Canal 3	N00E	-8.610
3	12/02/1992 H 11:56:58	Guerrero, México	17.733	-101.058	32	< 5	Mb=5.1 Ms=4.6 Mc=4.4	Canal 1	V	-13.400
								<b>Canal 2</b>	<b>N90E</b>	<b>17.230</b>
								Canal 3	N00E	-15.310
4	18/07/1996 H 08:16:46	Guerrero, México	17.540	-101.200	33	20	Mb=4.9 Ms=4.7 Mc=5.1	Canal 1	V	-17.700
								<b>Canal 2</b>	<b>N90E</b>	<b>-28.600</b>
								Canal 3	N00E	16.670
5	09/05/1998 H 17:03:13	Guerrero, México	17.340	-101.410	33	18	Mb=4.8 Ms=4.7 Mc=4.8	Canal 1	V	-12.580
								Canal 2	N90E	18.470
								<b>Canal 3</b>	<b>N00E</b>	<b>-23.810</b>
6	04/11/2002 H 10:00:45	Guerrero, México	17.250	-101.600	33	4	Mb=5.2 Mc=4.9 Me=5.2	Canal 1	V	-3.350
								Canal 2	N90E	2.870
								<b>Canal 3</b>	<b>N00E</b>	<b>-4.890</b>
7	27/03/2003 H 07:44:23	Guerrero, México	18.010	-101.780	33	25	Mb=4.8 Mc=4.8 Me=5.1	Canal 1	V	4.310
								<b>Canal 2</b>	<b>N90E</b>	<b>-6.230</b>
								Canal 3	N00E	-4.310
8	19/04/2007 H 10:02:09	Guerrero, México	17.210	-101.370	23.8	24	Mb= 5.3 Md=5.2 Ms= 4.8	Canal 1	V	-2.410
								<b>Canal 2</b>	<b>N90W</b>	<b>5.080</b>
								Canal 3	N00W	3.350
9	27/03/2009 H 08:48:16	Guerrero, México	17.530	-100.820	22.4	30	Mb=5.4 Mwc=5.3	Canal 1	V	8.380
								Canal 2	N90E	9.700
								<b>Canal 3</b>	<b>N00E</b>	<b>10.790</b>
10	12/04/2013 H 03:45:09	Guerrero, México	17.780	101.580	37.1	35	Mb=5.2 Md=5.2	Canal 1	V	13.130
								Canal 2	N90E	-14.280
								<b>Canal 3</b>	<b>N00E</b>	<b>-20.970</b>

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Tabla 8. Sismos seleccionados de la estación CALE

No.	Fecha	Localización (Epicentro)					Magnitud	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )		
		Entidad	Latitud	Longitud	Profundidad (km)			Canal	Dirección	Aceleración máxima
					USGS	SSN				
1	29/01/1990 H 02:41:23	Michoacán, México	18.271	-102.547	39.1	39	Mb=5.4 Ms=4.4 Mc=5.1	Canal 1	S90E	17.23
								Canal 2	V	9.57
								<b>Canal 3</b>	<b>S00E</b>	<b>-18.18</b>
2	16/01/1997 H 21:41:10	Michoacán, México	17.940	-102.760	28.3	25	Mb=5.6 Ms=4.9 Mc=5.1	Canal 1	S90E	-61.25
								Canal 2	V	51.68
								<b>Canal 3</b>	<b>S00E</b>	<b>66.99</b>
3	01/12/2000 H 14:07:45	Michoacán, México	17.940	-102.580	33	14	Mb=5.3 Ms=5.1 Mc=5.3	<b>Canal 1</b>	<b>N90W</b>	<b>-60.04</b>
								Canal 2	V	21.1
								Canal 3	N00W	-39.05
4	27/03/2003 H 07:44:23	Guerrero, México	18.010	-101.780	33	25	Mb=4.8 Mc=4.8 Me=5.1	<b>Canal 1</b>	<b>N90W</b>	<b>-3.3</b>
								Canal 2	V	1.97
								Canal 3	N00W	-3.04
5	13/08/2006 H 15:14:26	Michoacán, México	18.230	-103.620	21.4	13	Mb=5.3 Ms=4.9 Md=5.1	<b>Canal 1</b>	<b>N90W</b>	<b>-24.31</b>
								Canal 2	V	-9.2
								Canal 3	N00W	-17.93
6	31/01/2009 H 13:24:58	Guerrero, México	17.540	-101.960	4.5	25	Mb=5.2 Md=5.2	<b>Canal 1</b>	<b>N00W</b>	<b>2.87</b>
								Canal 2	N90W	-5
								Canal 3	V	1.81
7	27/03/2009 H 08:48:16	Guerrero, México	17.350	-100.820	22.4	30	Mb=5.4 Mwc=5.3	<b>Canal 1</b>	<b>N90W</b>	<b>1.69</b>
								Canal 2	V	0.79
								Canal 3	N00W	-1.47
8	12/04/2013 H 03:45:09	Guerrero, México	17.780	-101.5800	37.1	35	Mb=5.2 Md=5.2	<b>Canal 1</b>	<b>N90W</b>	<b>5.31</b>
								Canal 2	V	2.66
								Canal 3	N00W	-4.85
9	29/09/2015 H 15:02:15	Michoacán, México	17.850	-102.510	19.8	10	Mb=5.0 Md=5.0	Canal 1	N90W	3.77
								Canal 2	V	2.62
								<b>Canal 3</b>	<b>N00W</b>	<b>-4.24</b>
10	30/09/2015 H 17:25:55	Guerrero, México	17.830	-101.520	42	30	Mb=5.5	<b>Canal 1</b>	<b>N90W</b>	<b>-2.64</b>
								Canal 2	V	1.62
								Canal 3	N00W	-1.91
11	25/10/2015 H 14:47:53	Guerrero, México	18.080	-101.870	42	20	Mb=5.1 Md=5.0	<b>Canal 1</b>	<b>N90W</b>	<b>2.51</b>
								Canal 2	V	1.49
								Canal 3	N00W	-2.15

## CAPÍTULO 3.

# ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICOS

## CAPÍTULO 3.

### ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICOS

Representan parámetros de respuesta máxima para un acelerograma determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. El amortiguamiento origina que la vibración de un sistema estructural se reduzca como función del tiempo. En los edificios se desarrolla amortiguamiento fundamentalmente por la fricción que existe entre los diferentes elementos estructurales y este se incrementa cuando las estructuras tienen daños.

Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto.

Como se mencionó anteriormente la propia estructura genera un amortiguamiento que se origina entre los elementos que forman la estructura; normalmente se considera un amortiguamiento de 5%.

Característica común de los sismos registrados en estaciones sobre suelo duro (roca) es que las pseudoaceleraciones máximas (observadas en los espectros de respuesta) comúnmente oscilan entre 0.1 y 0.4 segundos, o por periodo más grande es posible hasta 0.6 segundos, en comparación a sismos registrados en estaciones sobre suelo blando (arcilla), las pseudoaceleraciones máximas se presentan comúnmente entre 1.5 segundos a 2.6 segundos.

A continuación (figuras 24 a la 85) se muestran los espectros de respuesta de los sismos menores antes mencionados, en los que se graficó la pseudoaceleración (g) vs periodo (s) y también el desplazamiento (cm) vs periodo (s), los cuales se comparan en el capítulo siguiente con los correspondientes al sismo de Michoacán de 1985

3.1 ESPECTROS DE PSEUDO-ACELERACIÓN Y DEPLAZAMIENTO DE LA ESTACION LA UNIÓN (UNIO).

Sismo 1



Figura 24. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 14/01/1991.

Figura 25 Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 14/01/1991.

Sismo 2



Figura 26. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 22/12/1997.

Figura 27 Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 22/17/1997.

Sismo 3



Figura 28. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 09/05/1998.



Figura 29. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 09/05/1998.

Sismo 4

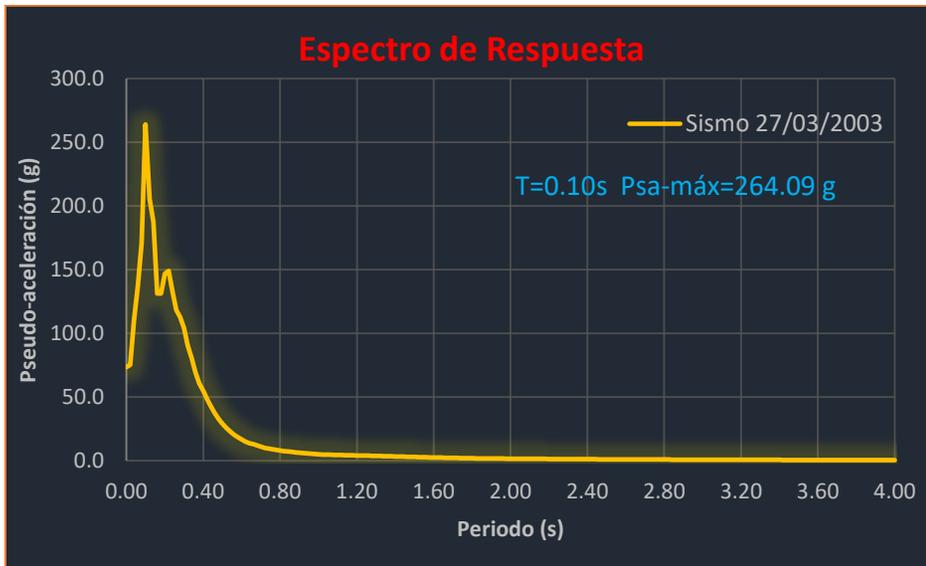


Figura 30. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 27/03/2003.



Figura 31. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2003.

Sismo 5

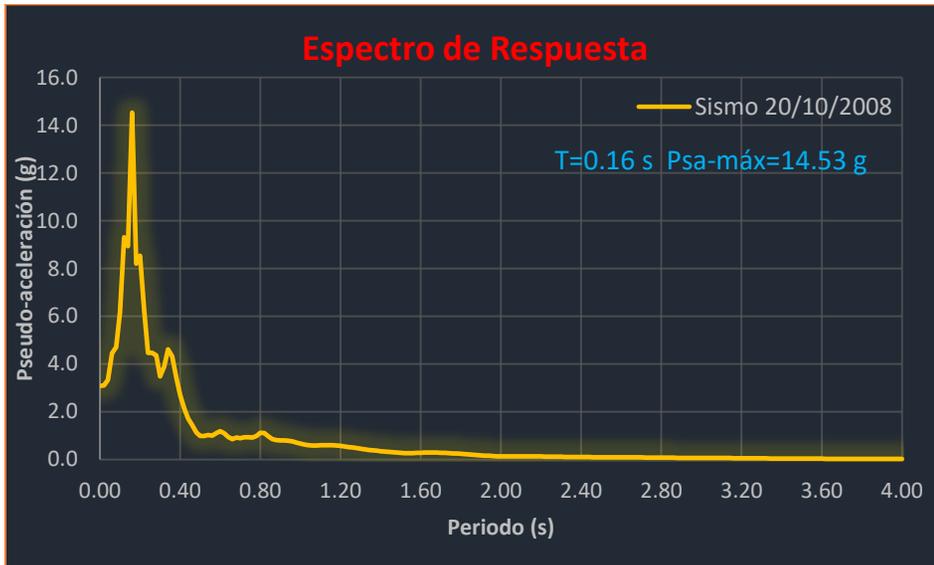


Figura 32. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 20/10/2008.

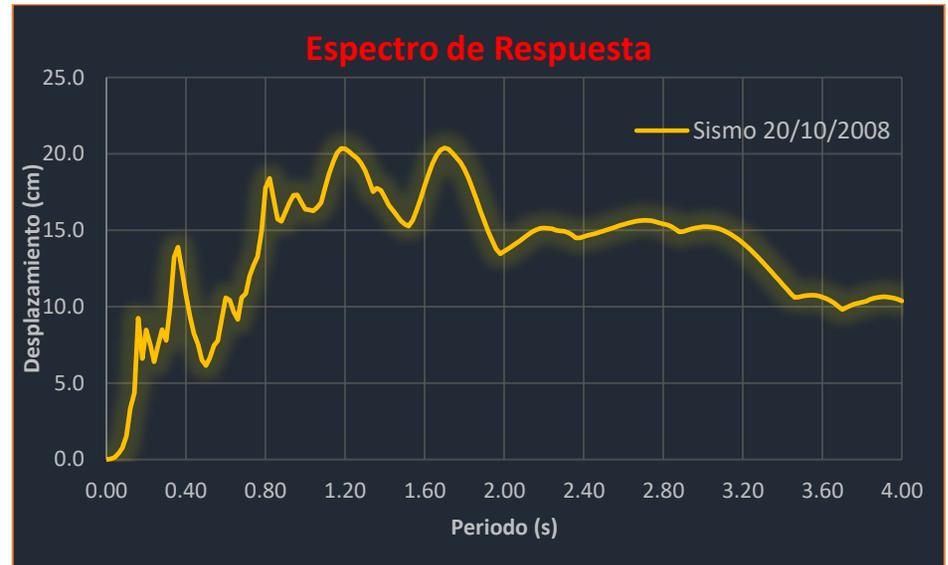


Figura 33. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 20/10/2008.

Sismo 6



Figura 34. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 05/04/2013.



Figura 35. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 05/04/2013.

Sismo 7



Figura 36. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 01/12/2013.



Figura 37. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 01/12/2013.

Sismo 8



Figura 38. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 19/04/2014.



Figura 39. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 19/04/2014.

Sismo 9



Figura 40. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 30/09/2015.

Figura 41. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 30/09/2015.

Sismo 10



Figura 42. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 25/10/2015.

Figura 43. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 25/10/2015.

3.2 ESPECTROS DE PSEUDO-ACELERACIÓN Y DEPLAZAMIENTO DE LA ESTACIÓN EN EL AEROPUERTO DE ZIHUATANEJO (AZIH)

Sismo 1

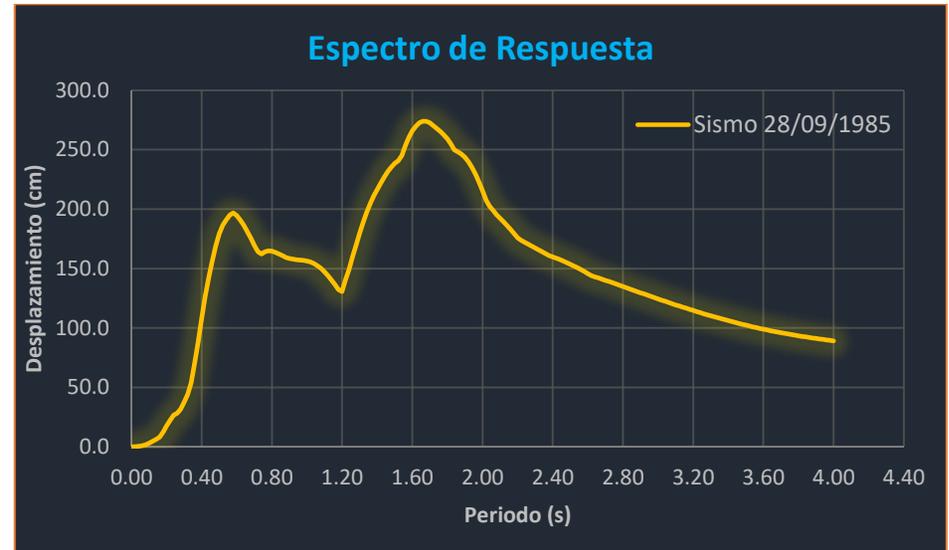


Figura 44. Espectro de Respuesta de pseudoaceleración del sismo 28/09/1985. Figura 45. Espectro de Respuesta de desplazamiento del sismo 28/09/1985.

Sismo 2



Figura 46. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 14/01/1991. Figura 47. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 14/01/1991.

Sismo 3



Figura 48. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 12/02/1992.

Figura 49. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 12/02/1992.

Sismo 4



Figura 50. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 18/07/1996.

Figura 51. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 18/07/1996.

Sismo 5



Figura 52. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 09/05/1998.

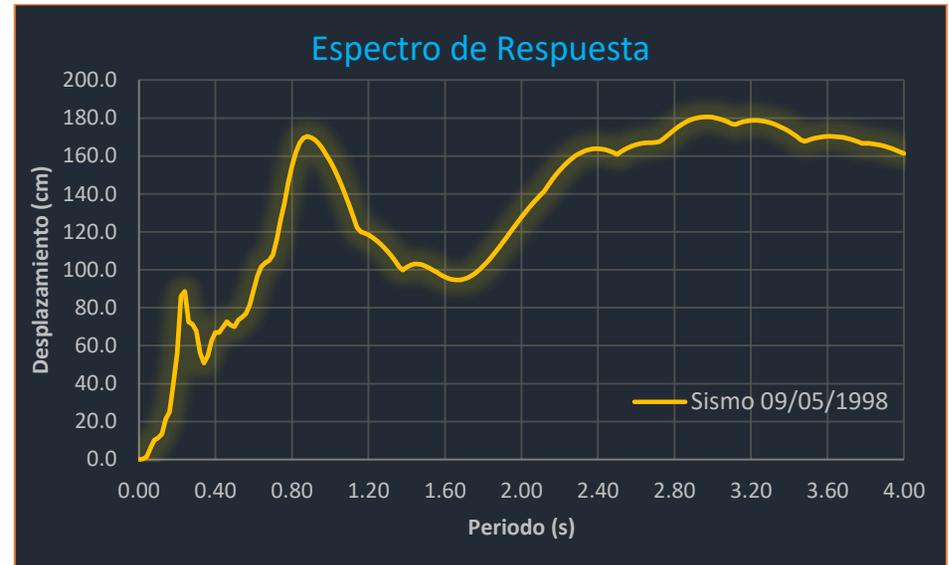


Figura 53. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 09/05/1998.

Sismo 6



Figura 54. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 04/11/2002.



Figura 55. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 04/11/2002.

Sismo 7

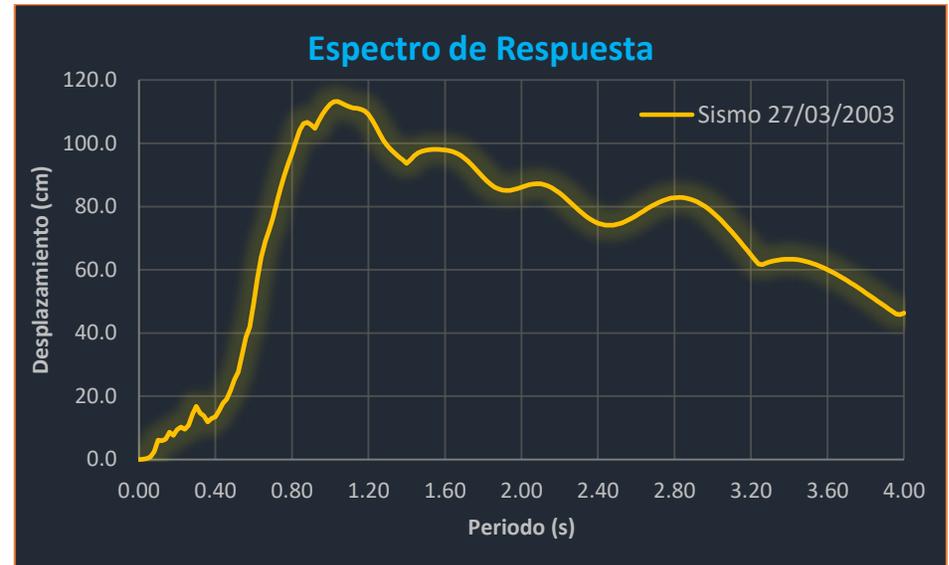


Figura 56. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 27/03/2003.

Figura 57. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2003.

Sismo 8



Figura 58. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 19/04/2007.

Figura 59. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 19/04/2007.

Sismo 9



Figura 60. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 27/03/2009.



Figura 61. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2009.

Sismo 10



Figura 62. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 12/04/2013.



Figura 63. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 12/04/2013.

3.3 ESPECTROS DE PSEUDO-ACELERACIÓN Y DEPLAZAMIENTO DE LA ESTACIÓN EN CALETA DE CAMPOS (CALE).

Sismo 1



Figura 64. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 29/01/1990.

Figura 65. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 29/01/1990.

Sismo 2



Figura 66. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 16/01/1997.

Figura 67. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 16/01/1997.

# INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

## Sismo 3



Figura 68. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 01/12/2000.



Figura 69. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 01/12/2000.

## Sismo 4



Figura 70. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 27/03/2003.

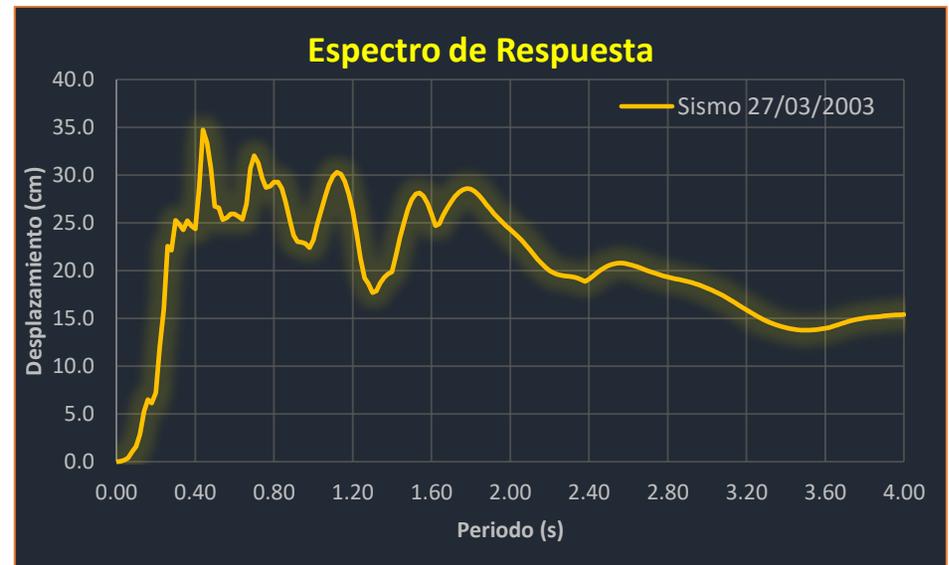


Figura 71. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2003.

Sismo 5



Figura 72. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 13/08/2006.



Figura 73. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 13/08/2006.

Sismo 6



Figura 74. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 31/01/2009.



Figura 75. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 31/01/2009.

Sismo 7



Figura 76. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 27/03/2009.



Figura 77. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2009.

Sismo 8



Figura 78. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 12/04/2013.



Figura 79. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 12/04/2013.

Sismo 9



Figura 80. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 29/09/2015.



Figura 81. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 29/09/2015.

Sismo 10



Figura 82. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 30/09/2015.



Figura 83. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 30/09/2015.

Sismo 11



Figura 84. Espectro de respuesta de pseudoaceleración del sismo 25/10/2015.

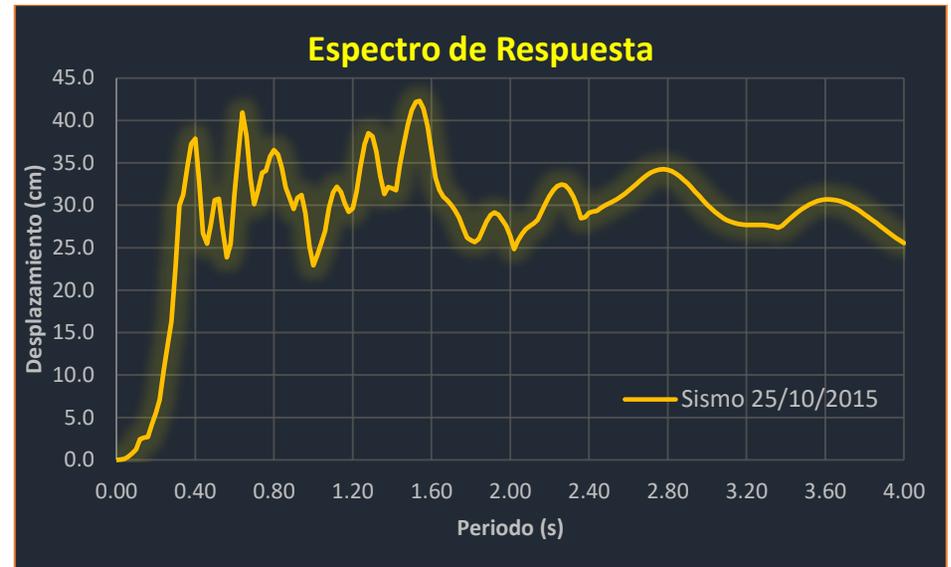


Figura 85. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 25/10/2015.

## CAPÍTULO 4.

# ESPECTROS DE RESPUESTA INELÁSTICOS

## CAPÍTULO 4.

### ESPECTROS DE RESPUESTA INELÁSTICOS

Los espectros de respuesta inelásticos son similares a los espectros de respuesta elásticos pero en este caso se asume que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en el intervalo plástico por acción del terremoto.

Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en el intervalo inelástico de comportamiento bajo la acción del sismo de diseño.

Como ejemplo, se obtienen los espectros de ductilidad constante (recordemos que ductilidad de desplazamientos es la relación entre el desplazamiento máximo que experimenta la estructura y el desplazamiento de fluencia). Estos espectros representan la demanda de ductilidad de un S1GL sometido a un acelerograma como función del periodo de vibración de la estructura, y se grafican usualmente para distintos niveles de resistencia. También, se construyen espectros de aceleración, desplazamiento de fluencia o desplazamiento último de sistemas inelásticos, en donde se consideran distintos niveles de ductilidad o distintos tipos de comportamiento histerético de la estructura.

Las normativas de diseño sismorresistente admiten de forma explícita la incursión de las estructuras dentro del intervalo de comportamiento plástico, pero ante la dificultad existente en la práctica profesional de realizar el análisis no lineal en el proceso de cálculo y los costos de construcción, se permite la aplicación del análisis elástico, con fuerzas sísmicas reducidas mediante factores de reducción de respuesta conocidos como factores R.

La aplicación de factores de reducción de respuesta tiene su punto de partida en la necesidad de aplicar un método basado en espectros de diseño en el proceso de análisis sísmico de estructuras. De esta forma, las fuerzas aplicadas en el análisis se calculan mediante espectros elásticos de diseño, con ordenadas reducidas mediante factores dependientes del periodo estructural y su capacidad de disipar energía, traducida en un factor de ductilidad ( $\mu$ ) asociados a tipologías estructurales y a niveles de diseño capaces de garantizar disipación. Estudios recientes han demostrado que la dependencia exclusiva de los factores de reducción R es poco segura en el rango de periodos bajos y excesivamente conservadora para periodos intermedios y largos (Ordaz y Pérez-Rocha, 1998). Investigaciones recientes (Ridell et. al 1989; Miranda 1993; Vidic et. al 1994; Lee et al 1999) han determinado expresiones de R ajustas a la respuesta no lineal de diferentes tipologías estructurales, basadas en análisis efectuados a sistemas de un grado de libertad, cuya respuesta se representa con modelos histeréticos poligonales. El ATC (Applied Technology

Council, 1998) fundada por National Science Foundation y por National Center for Earthquake Engineering Research separa el factor de reducción en tres componentes:

$$R = (R_S \cdot R_\mu) \cdot R_R$$

Donde:

$R_S$ : factor de sobrerresistencia

$R_\mu$ : factor de ductilidad

$R_R$ : factor de redundancia

Estos tres factores que conforman el factor de reducción, considerando edificaciones regulares y con redundancia, el factor de mayor importancia relativa es el factor de ductilidad  $R_\mu$ , esto es válido para sistemas simples. La contribución del factor  $R$  es solo parcial y en el caso estructuras con múltiples grados de libertad es necesario considerar el factor de reducción por redundancia  $R_R$ , mientras que en la respuesta de edificaciones con capacidad disipativa y amortiguamiento, se debe incluir el factor de sobrerresistencia  $R_S$

De las figuras 86 a la 147 se muestran los espectros de aceleración y de desplazamiento con un factor de ductilidad ( $R_\mu$ ) de 2.0 y 4.0, los cuales se comparan en el capítulo siguiente con los correspondientes al del sismo de Michoacán en 1985.

4.1 ESPECTROS DE ACELERACIÓN Y DESPLAZAMIENTO DE LA ESTACIÓN LA UNIÓN (UNIO).

Sismo 1

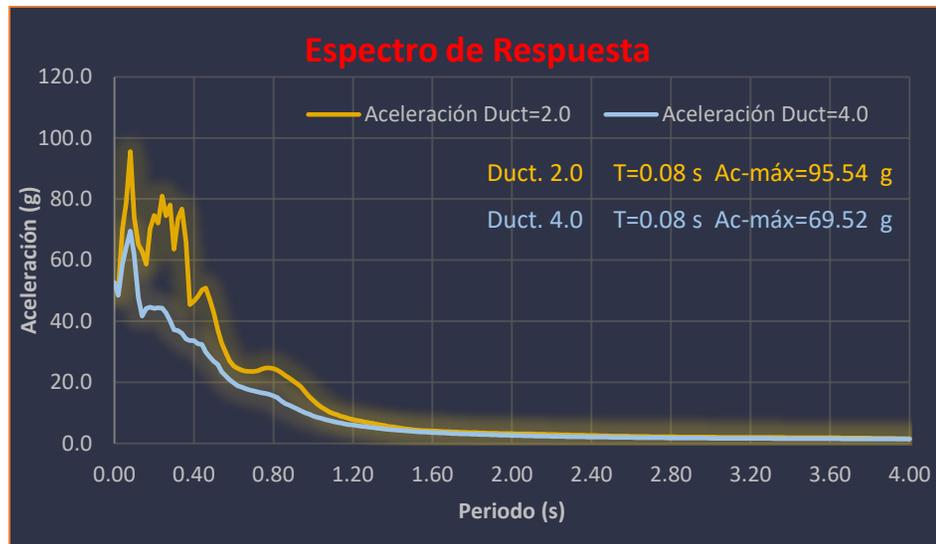


Figura 86. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 14/01/1991.

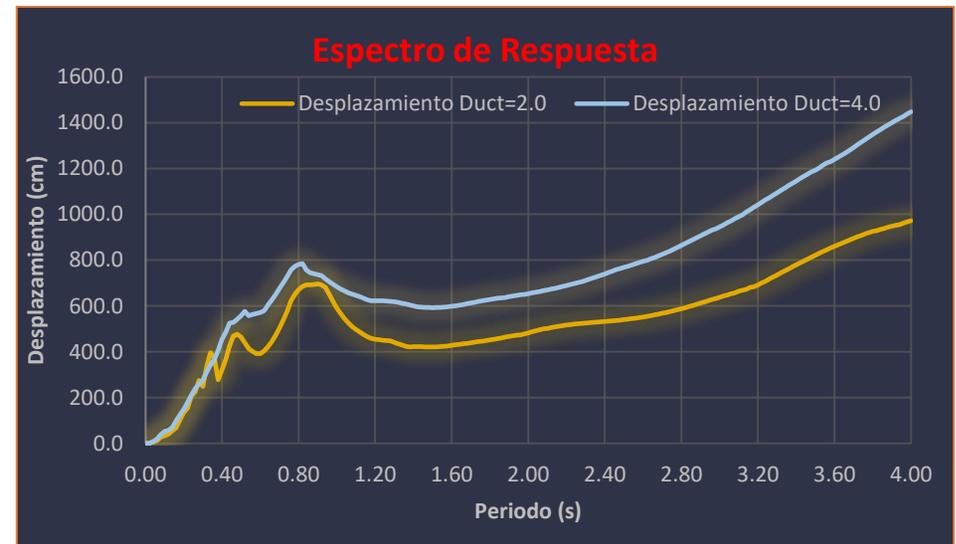


Figura 87. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 14/01/1991.

Sismo 2



Figura 88. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 22/12/1997.

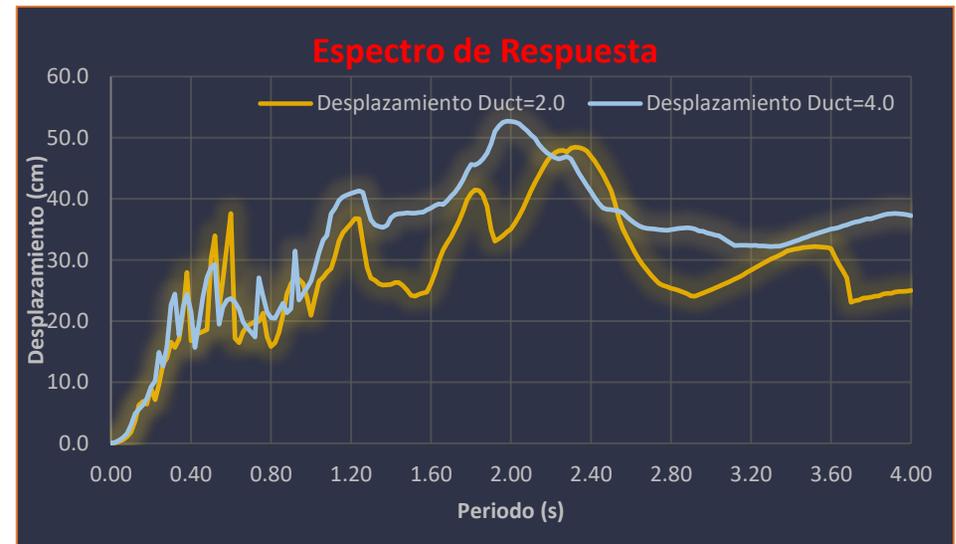


Figura 89. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 22/12/1997.

Sismo 3



Figura 90. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 09/05/1998.

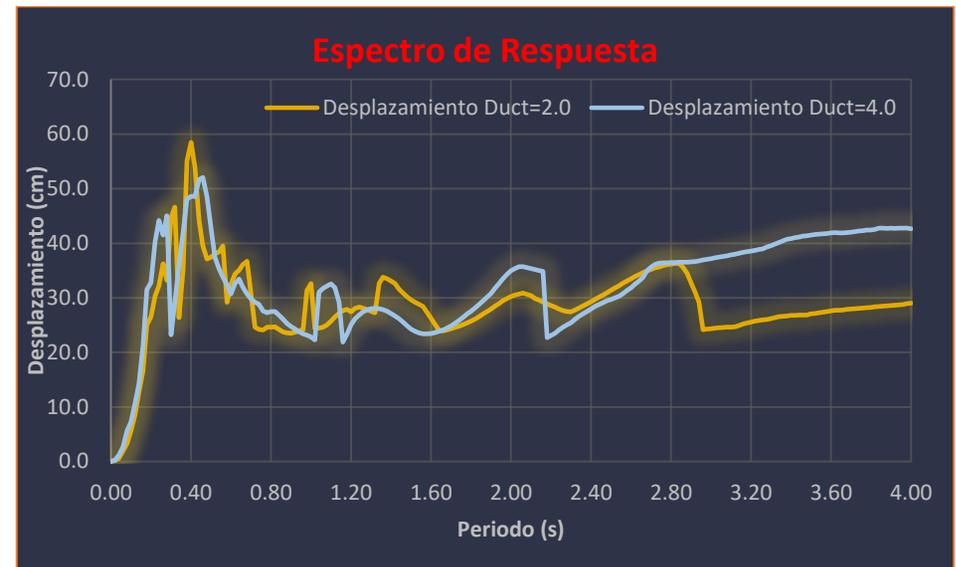


Figura 91. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 09/05/1998.

Sismo 4

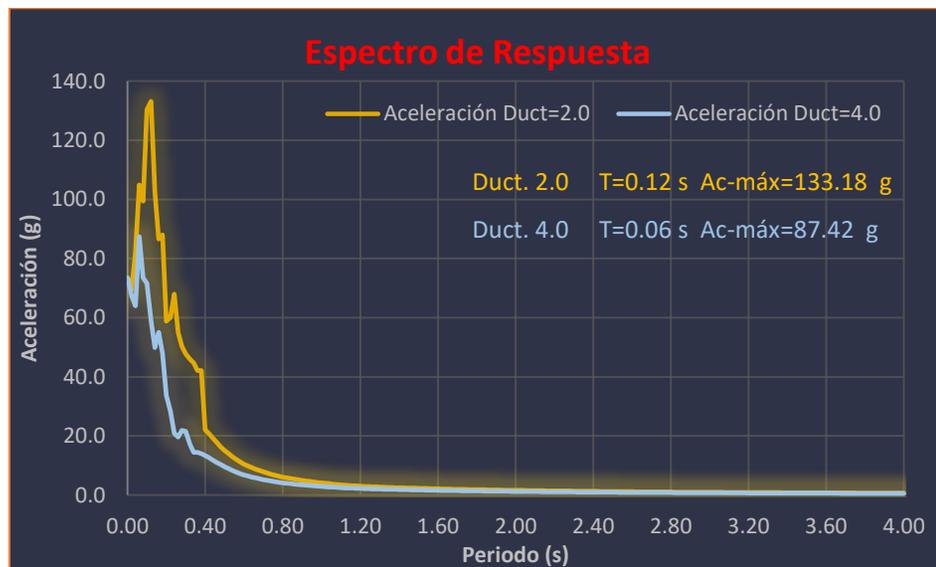


Figura 92. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 27/03/2003.

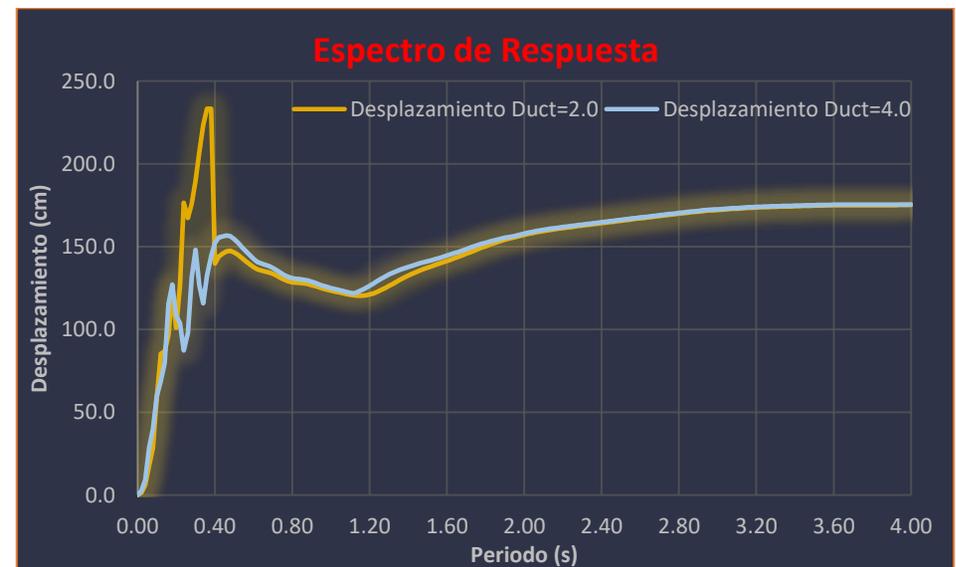


Figura 93. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2003.

Sismo 5

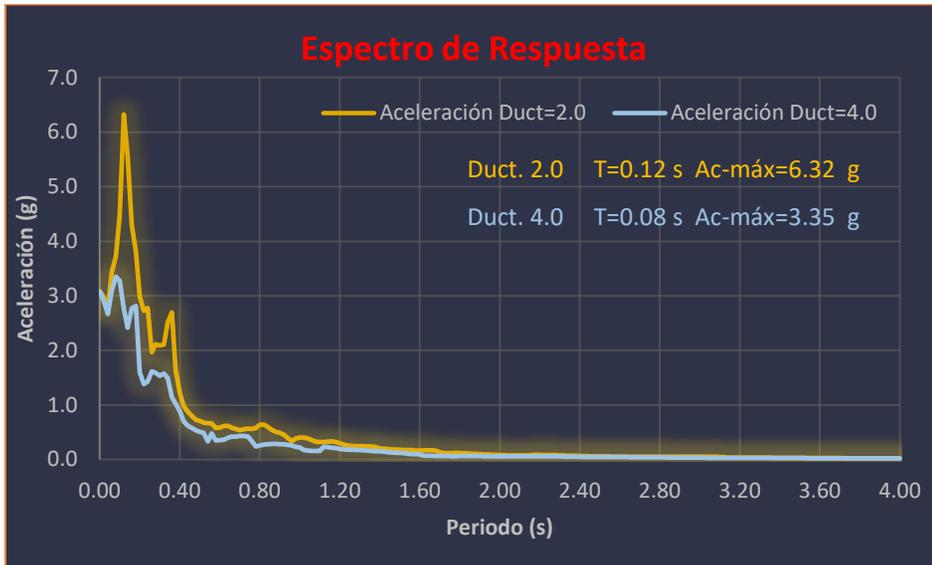


Figura 94. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 20/10/2008.

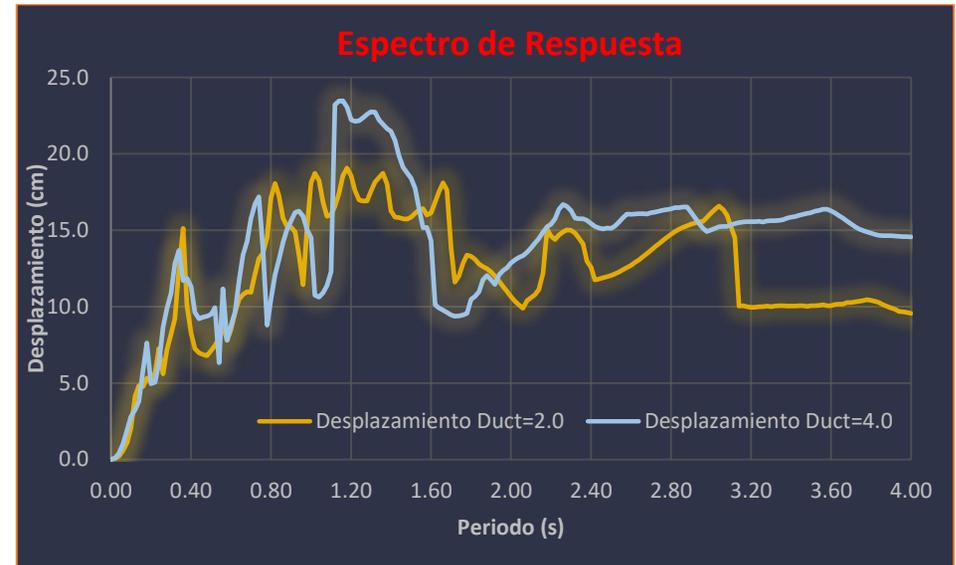


Figura 95. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 20/10/2008.

Sismo 6



Figura 96. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 05/04/2013.

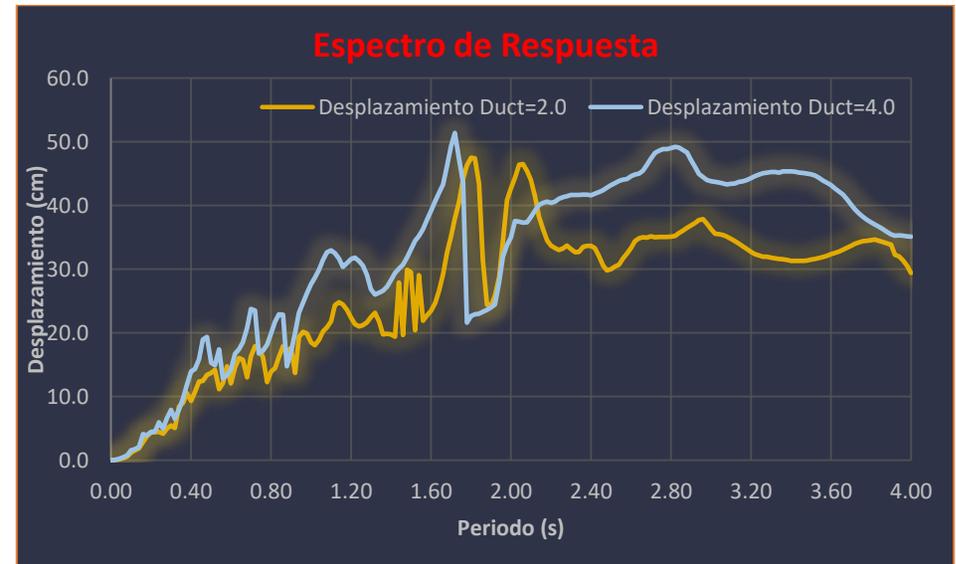


Figura 97. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 05/04/2013.

Sismo 7

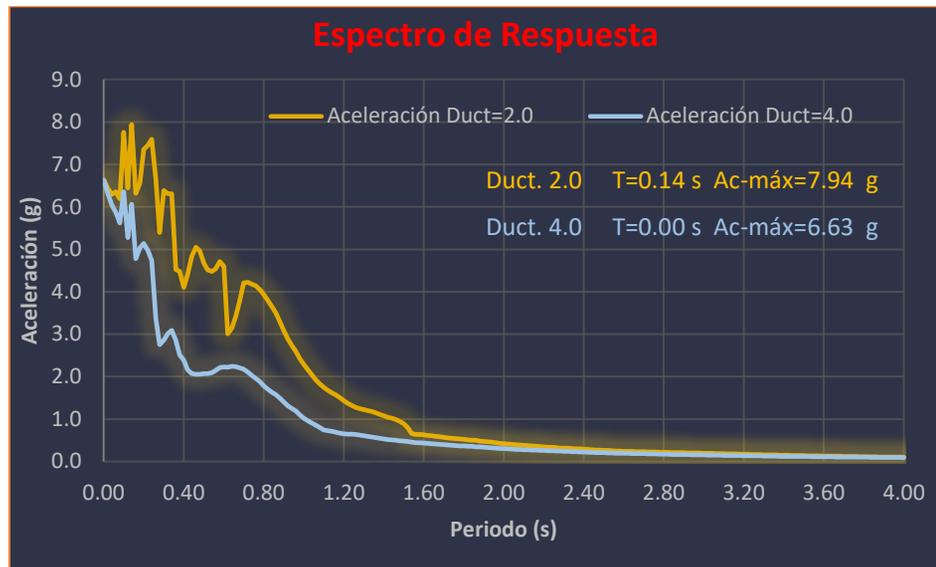


Figura 98. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 01/12/2013.



Figura 99. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 01/12/2013.

Sismo 8

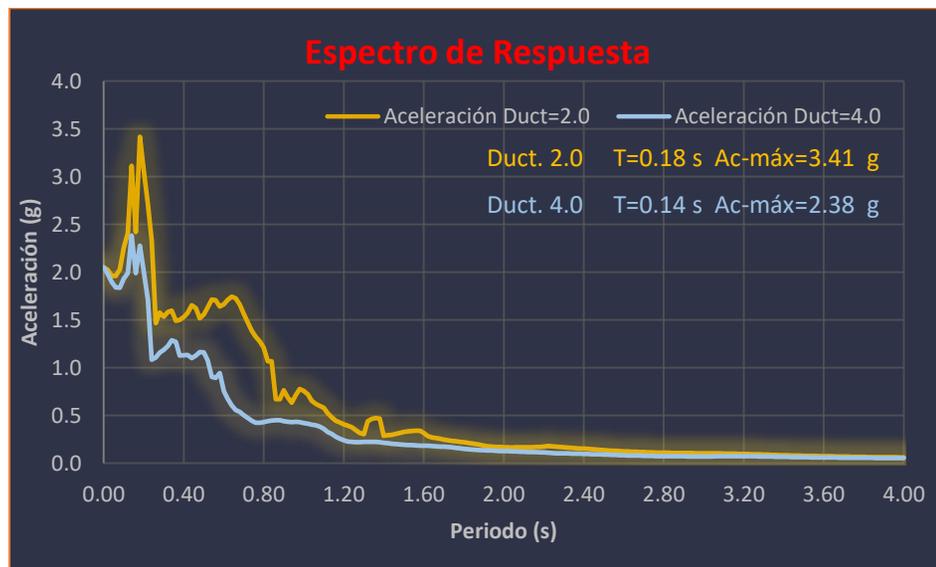


Figura 100. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 19/04/2014.



Figura 101. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 19/04/2014.

Sismo 9

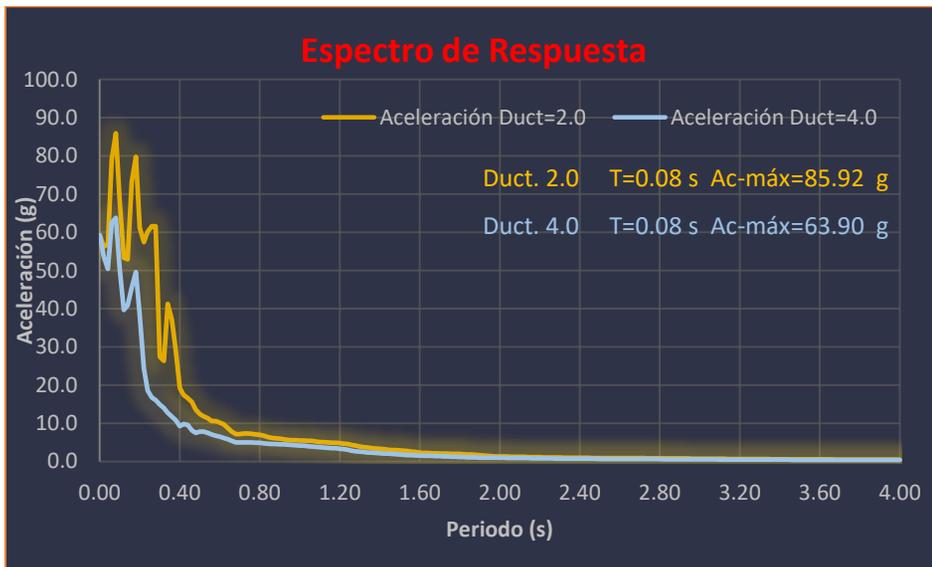


Figura 102. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 30/09/2015.

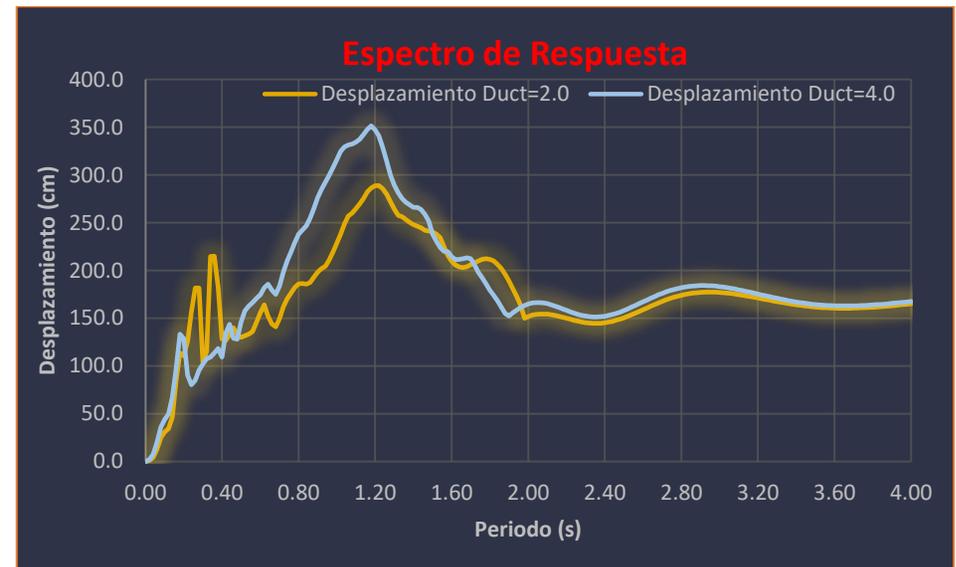


Figura 103. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 30/09/2015.

Sismo 10



Figura 104. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 25/10/2015.



Figura 105. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 25/10/2015.

4.2 ESPECTROS DE ACELERACIÓN Y DESPLAZAMIENTO DE LA ESTACIÓN EL AEROPUERTO DE ZIHUATANEJO (AZIH).

Sismo 1

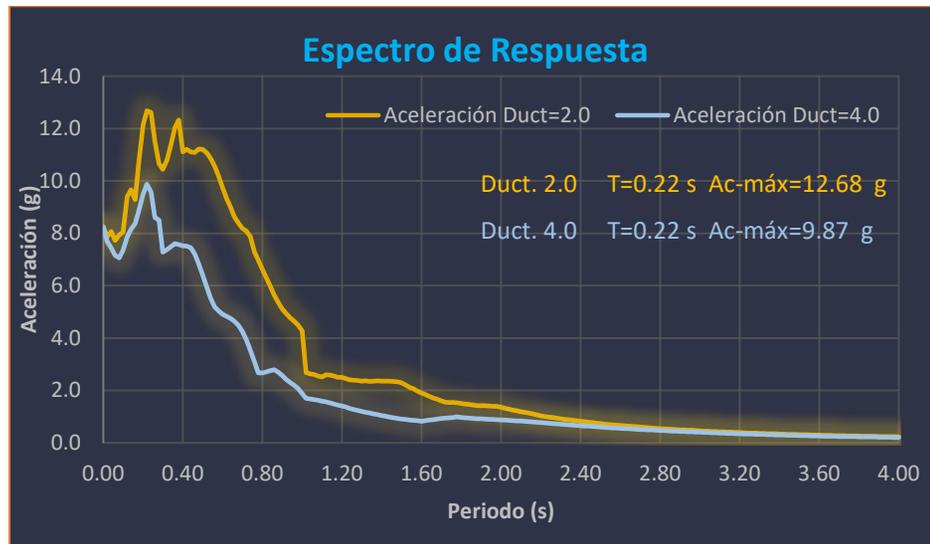


Figura 106. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 28/09/1985.

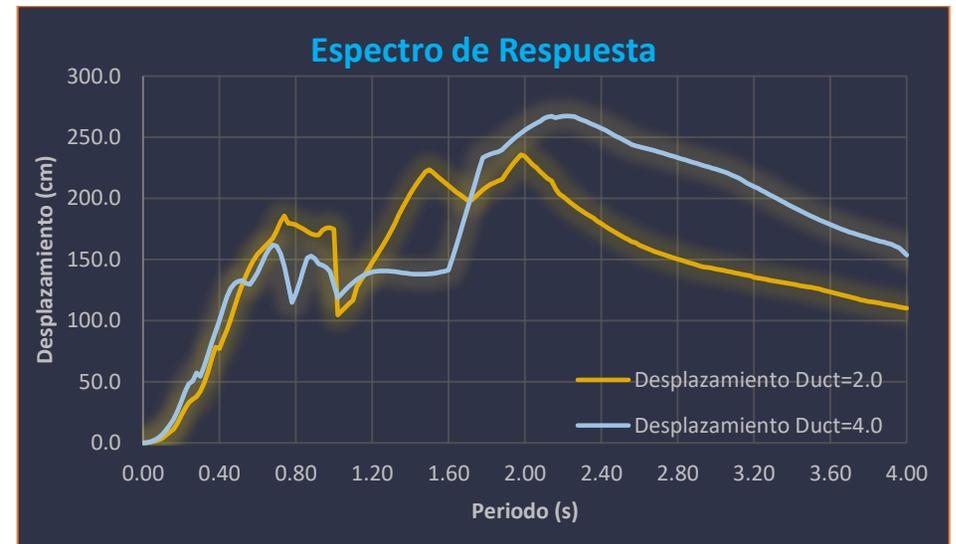


Figura 107. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 28/09/1985.

Sismo 2



Figura 108. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 14/01/1991.



Figura 109. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 14/01/1991.

Sismo 3

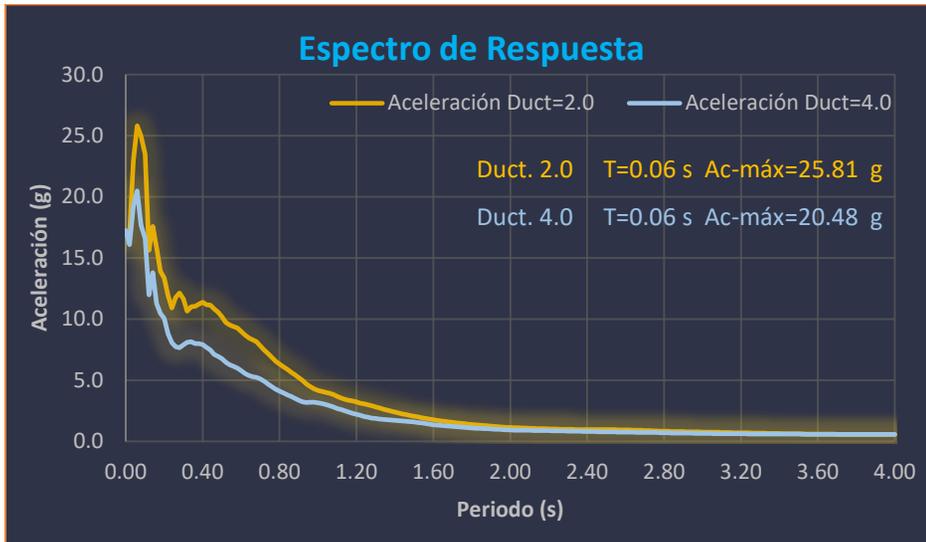


Figura 110. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 12/02/1992.

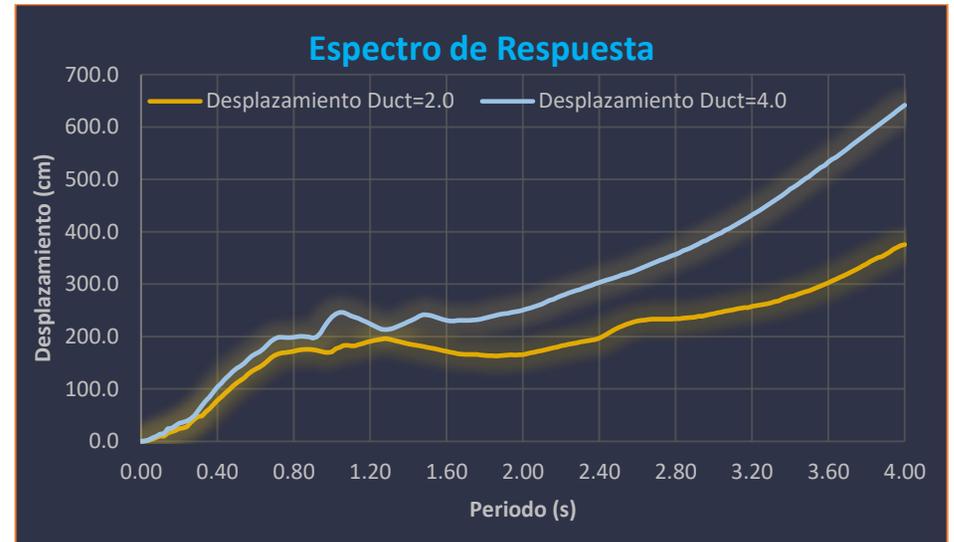


Figura 111. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 12/02/1992.

Sismo 4

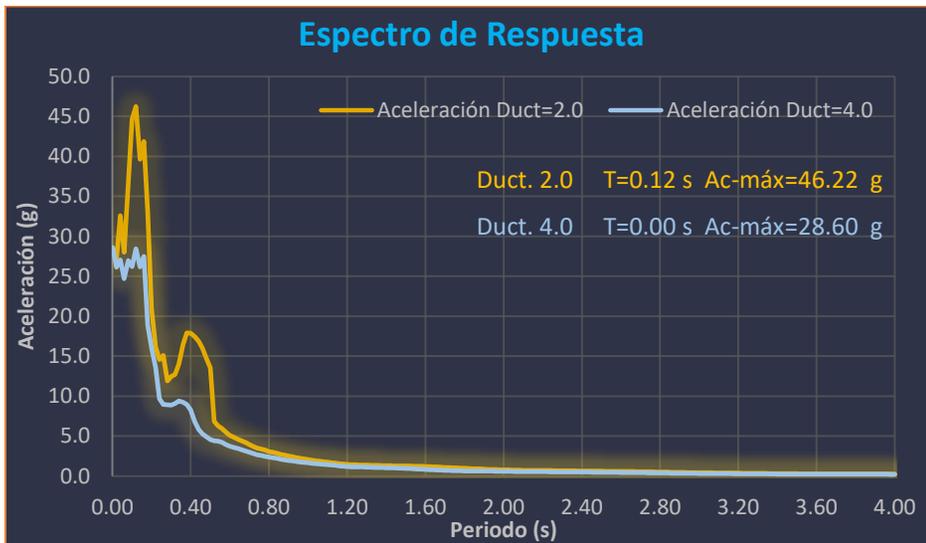


Figura 112. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 18/07/1996.

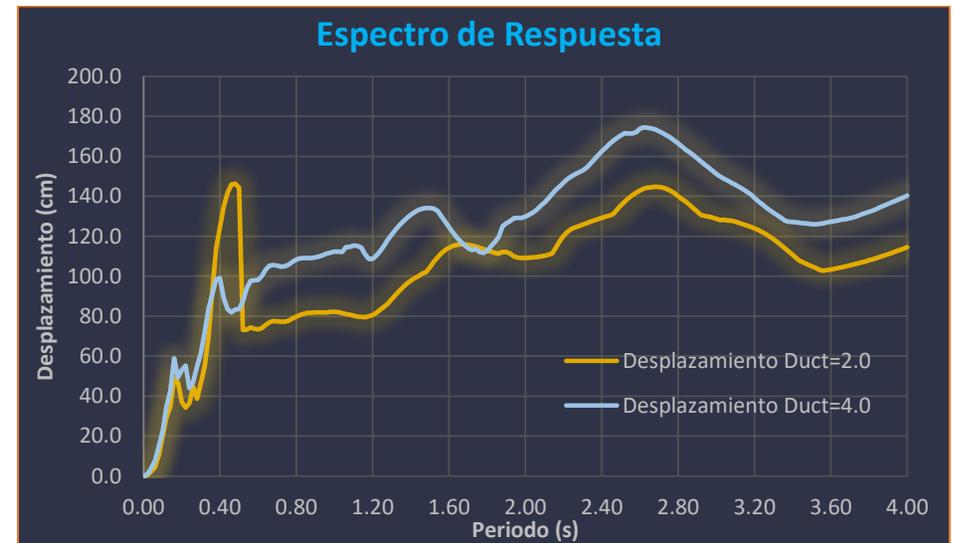


Figura 113. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 18/07/1996.

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Sismo 5



Figura 114. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 09/05/1998.

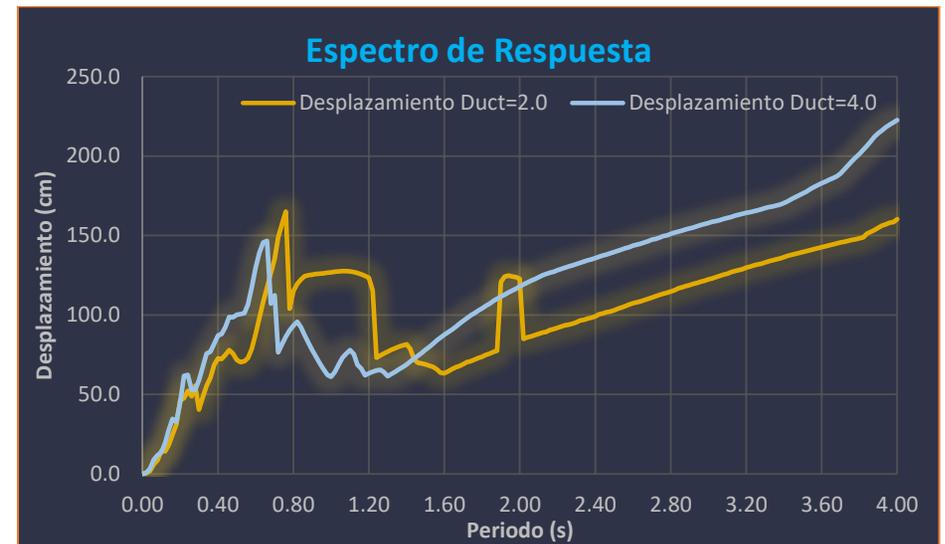


Figura 115. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 09/05/1998.

Sismo 6



Figura 116. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 04/11/2002.

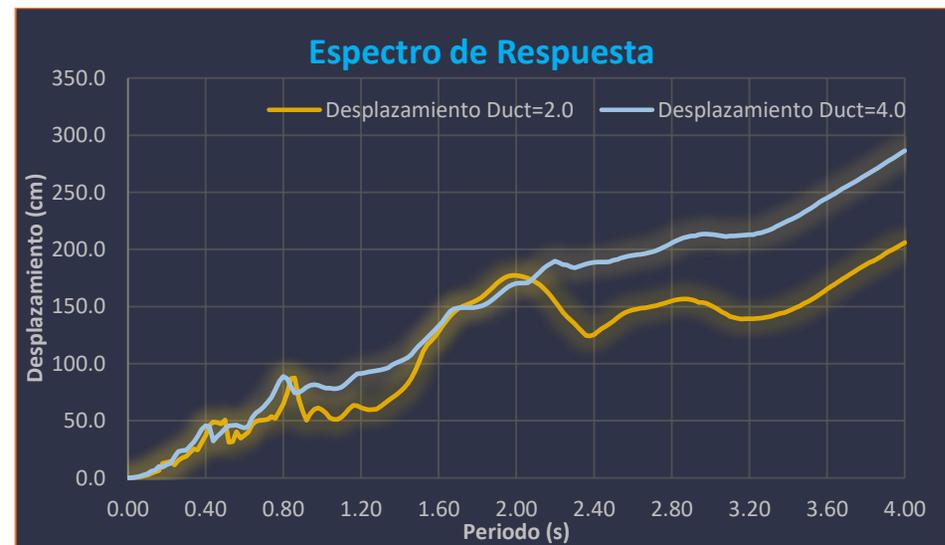


Figura 117. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 04/11/2002.

Sismo 7

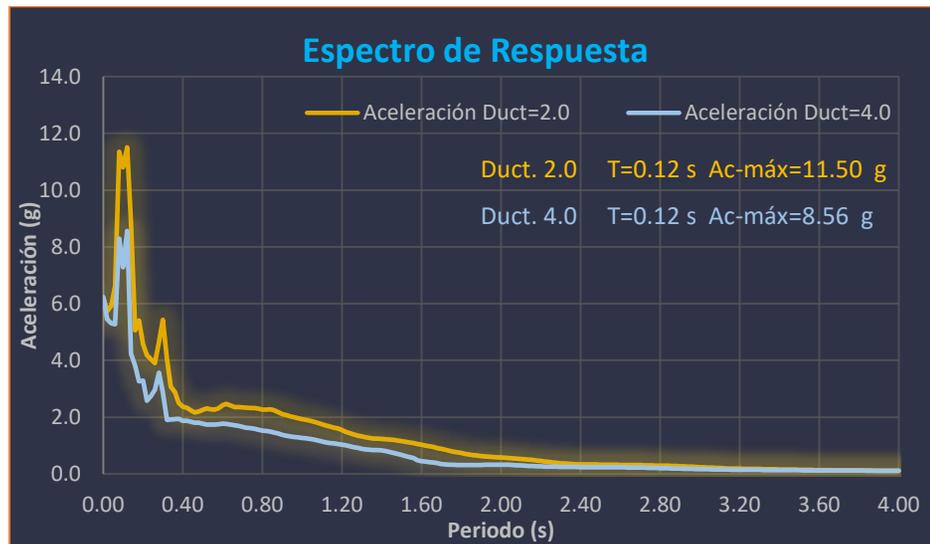


Figura 118. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 27/03/2003.

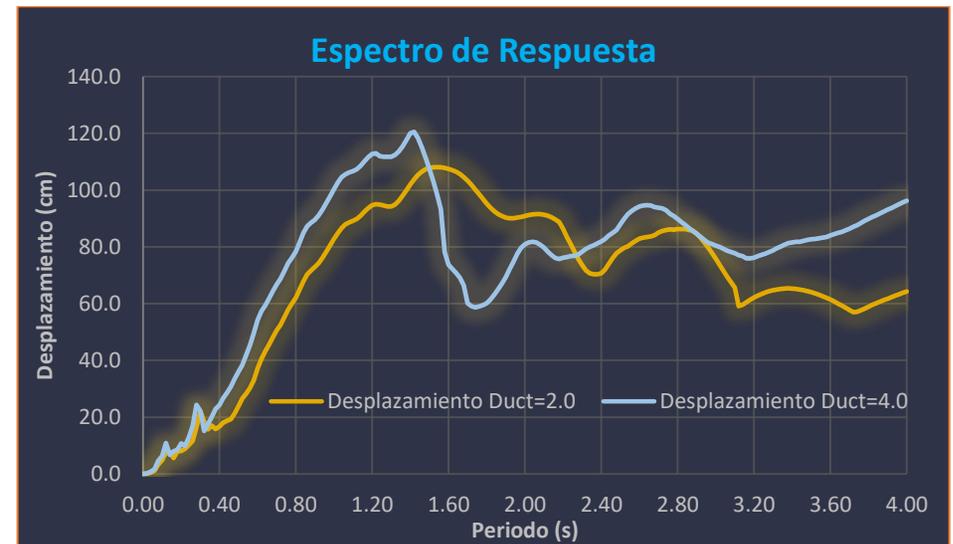


Figura 119. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2003.

Sismo 8



Figura 120. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 19/04/2007.

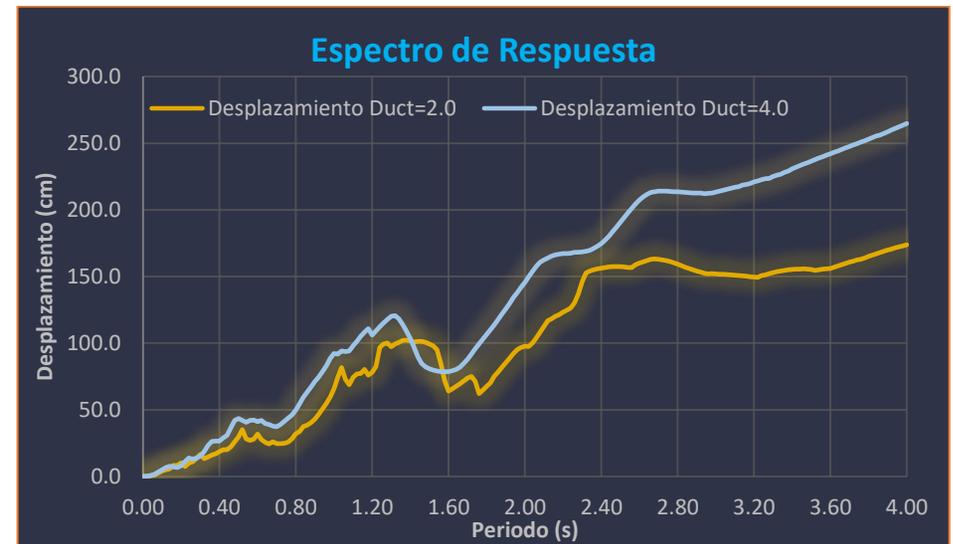


Figura 121. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 19/04/2007.

Sismo 9



Figura 122. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 27/03/2009.



Figura 123. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2009.

Sismo 10

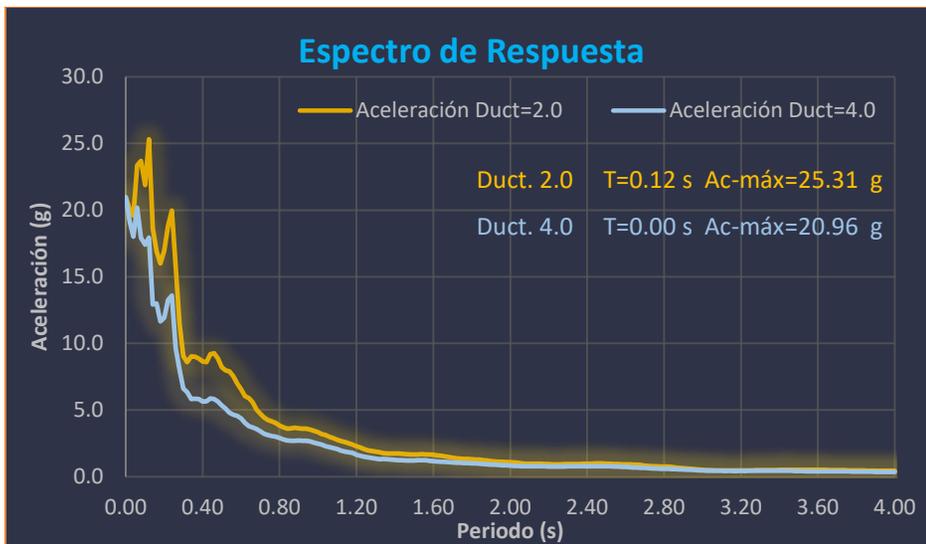


Figura 124. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 12/04/2013.

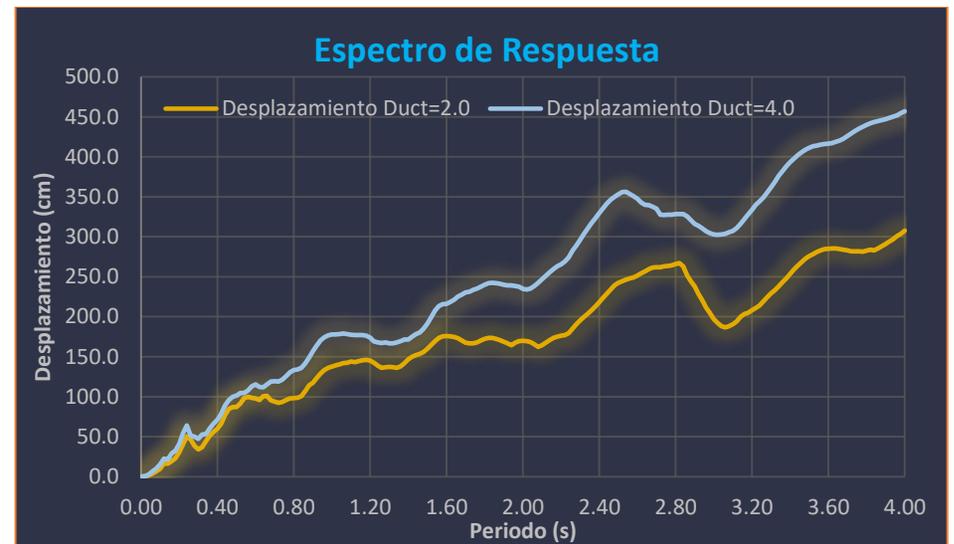


Figura 125. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 12/04/2013.

4.3 ESPECTROS DE ACELERACIÓN Y DESPLAZAMIENTO DE LA ESTACIÓN EN CALETA DE CAMPO (CALE).

Sismo 1



Figura 126. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 29/01/1990.



Figura 127. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 29/01/1990.

Sismo 2



Figura 128. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 16/01/1997.

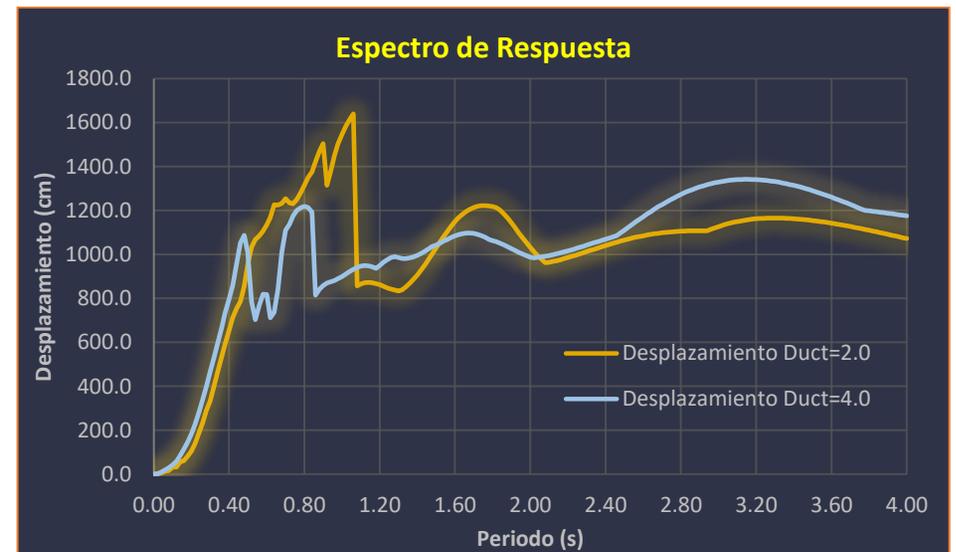


Figura 129. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 16/01/1997.

Sismo 3



Figura 130. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 01/12/2000.

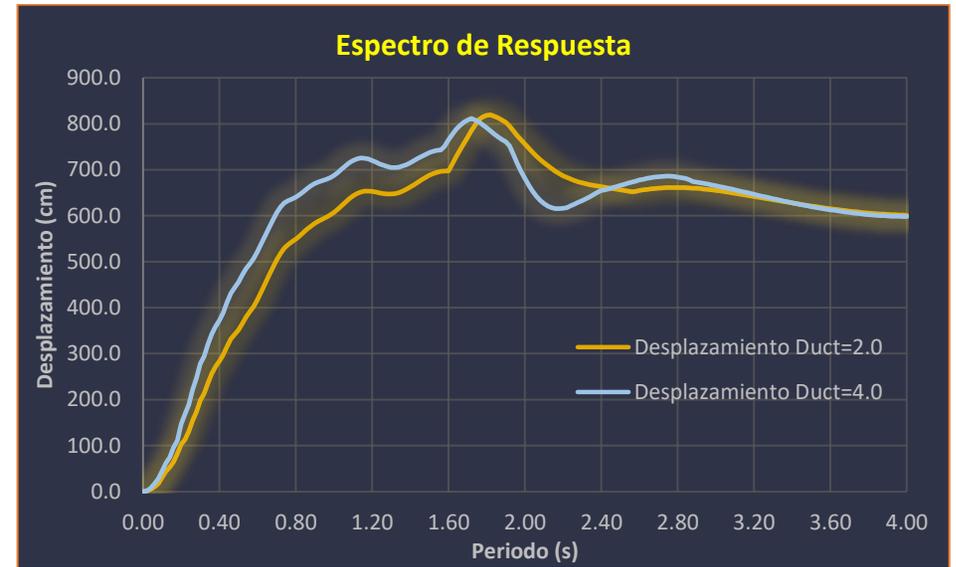


Figura 131. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 01/12/2000.

Sismo 4



Figura 132. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 27/03/2003.

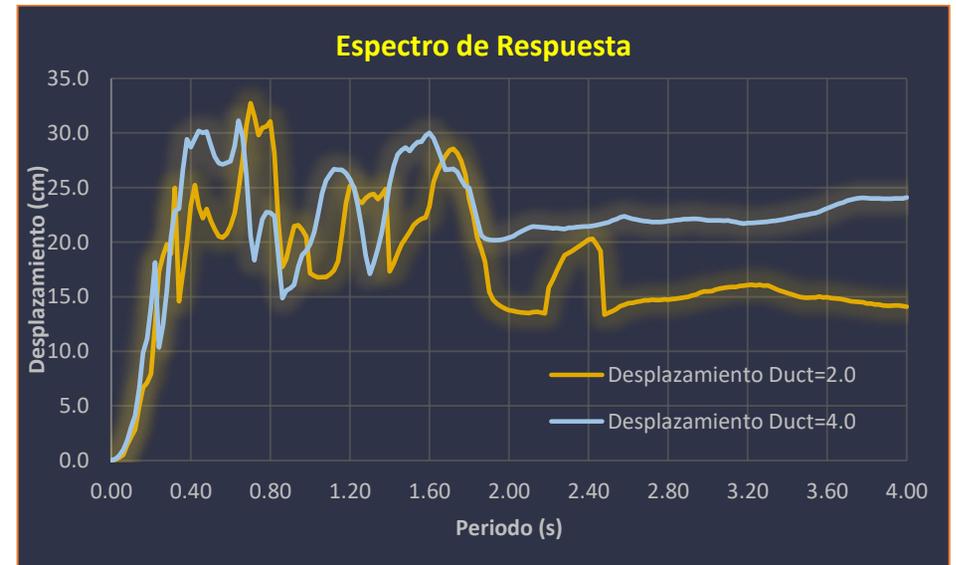


Figura 133. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2003.

# INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

## Sismo 5



Figura 134. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 13/08/2006.



Figura 135. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 13/08/2006.

## Sismo 6



Figura 136. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 31/01/2009.

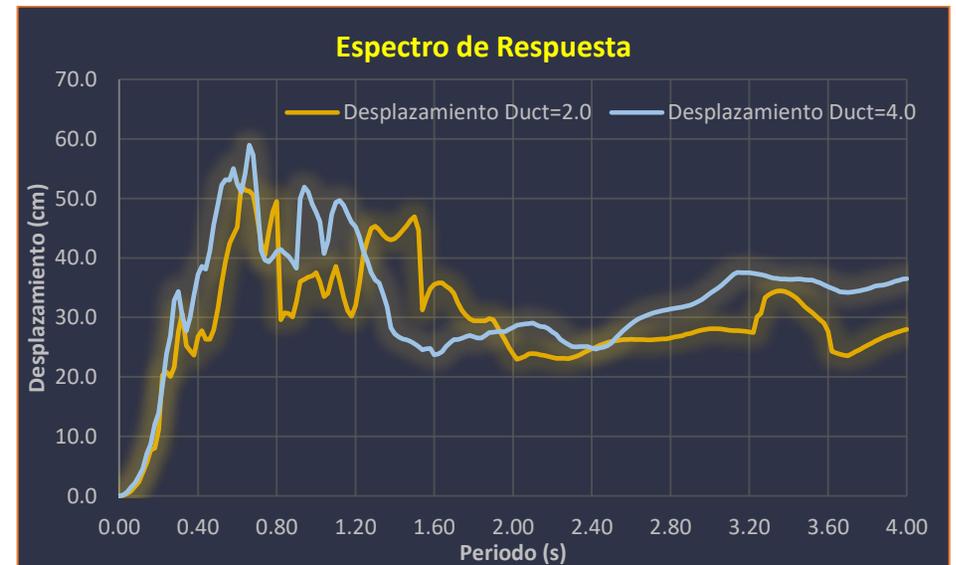


Figura 137. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 31/01/2009.

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Sismo 7



Figura 138. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 27/03/2009.



Figura 139. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 27/03/2009.

Sismo 8



Figura 140. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 12/04/2013.



Figura 141. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 12/04/2013.

Sismo 9



Figura 142. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 29/09/2015.

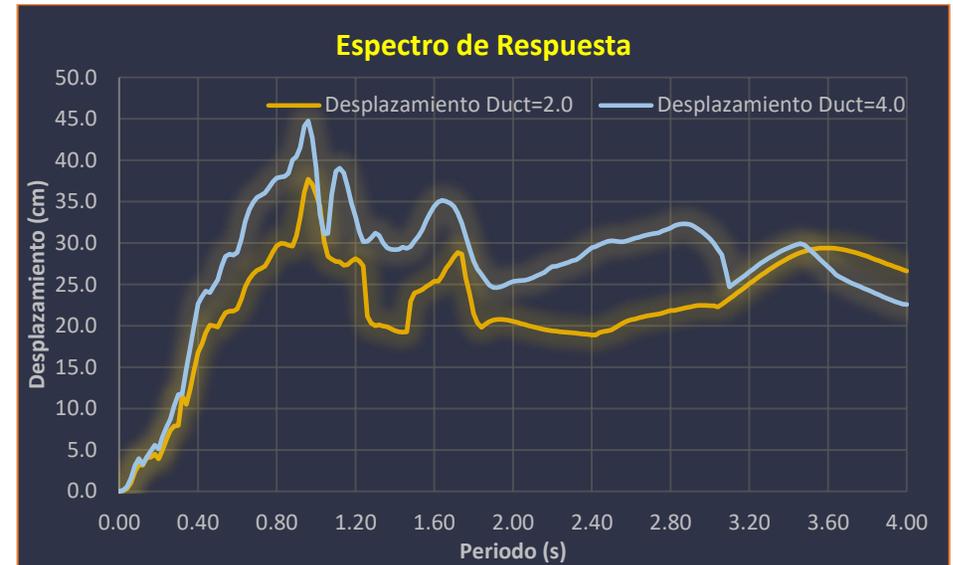


Figura 143. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 29/09/2015.

Sismo 10

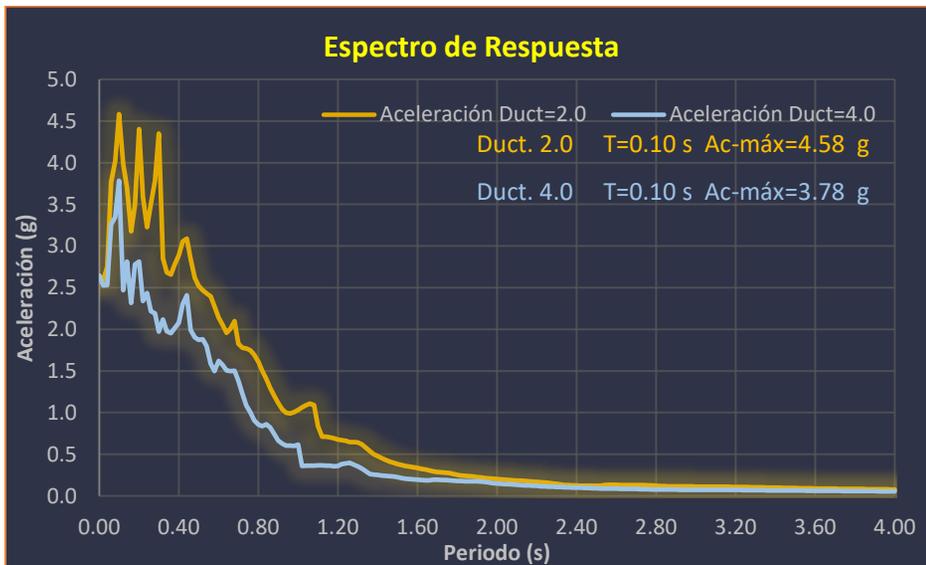


Figura 144. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 30/09/2015.

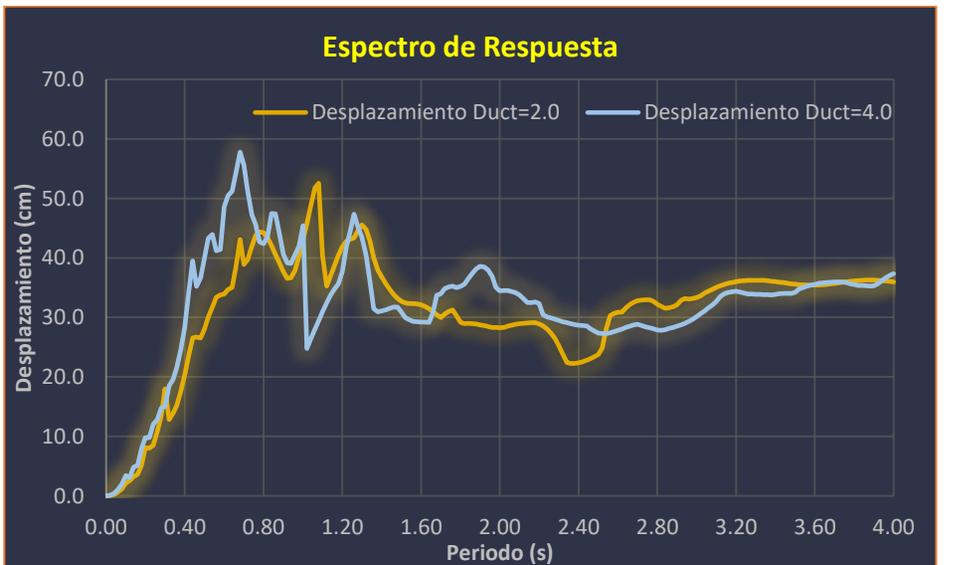


Figura 145. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 30/09/2015.

Sismo 11



Figura 146. Espectro de respuesta de aceleración del sismo 25/10/2015.

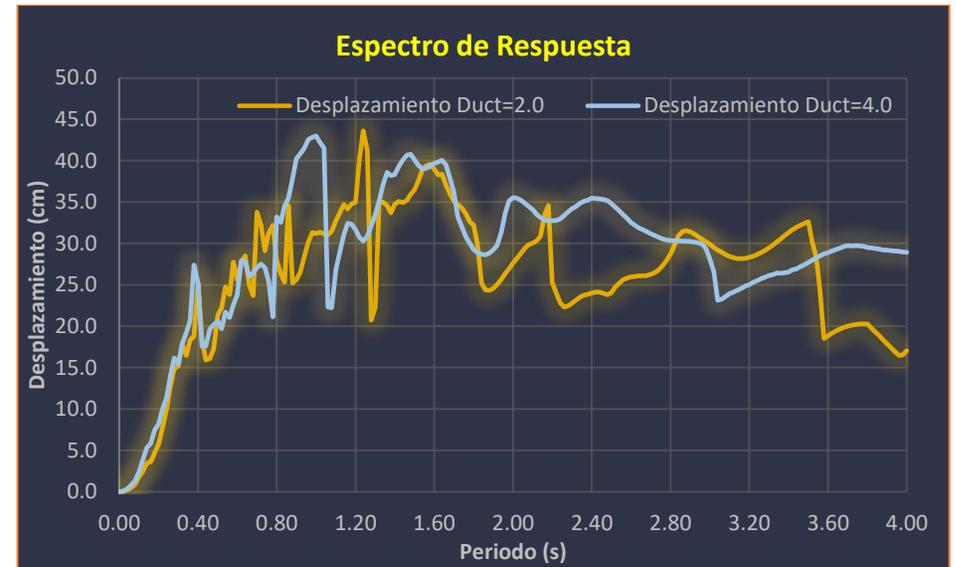


Figura 147. Espectro de respuesta de desplazamiento del sismo 25/10/2015.

## CAPÍTULO 5.

# CONTRIBUCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA

## CAPÍTULO 5.

### **CONTRIBUCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA**

Para obtener estadísticamente resultados representativos se trabajó con el promedio de las respuestas. Para ello, se sumaron todos los resultados ya escalados de los sismos pequeños de cada estación y se dividieron entre el número de sismos por estación correspondiente. De la figura 148 a la 165 se muestran el espectro elástico de pseudoaceleración de los promedios escalados con el del sismo de Michoacán del 19/09/1985 con  $M=8.1$ , así como los espectros inelásticos de aceleraciones con un factor de ductilidad (F.D.) de 2.0 y un tercer espectro con un factor de ductilidad (F.D.) de 4.0.

Las tablas 9 a la 17 muestran el intervalo de periodos de la técnica de escalamiento que representa mejor al sismo de gran magnitud.

**5.1 ESPECTROS ESCALADOS COMPARADOS CON EL ESPECTRO DEL SISMO DE 1985 DE LA ESTACIÓN UNIO.**

**5.1.1 ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN ELÁSTICO.**

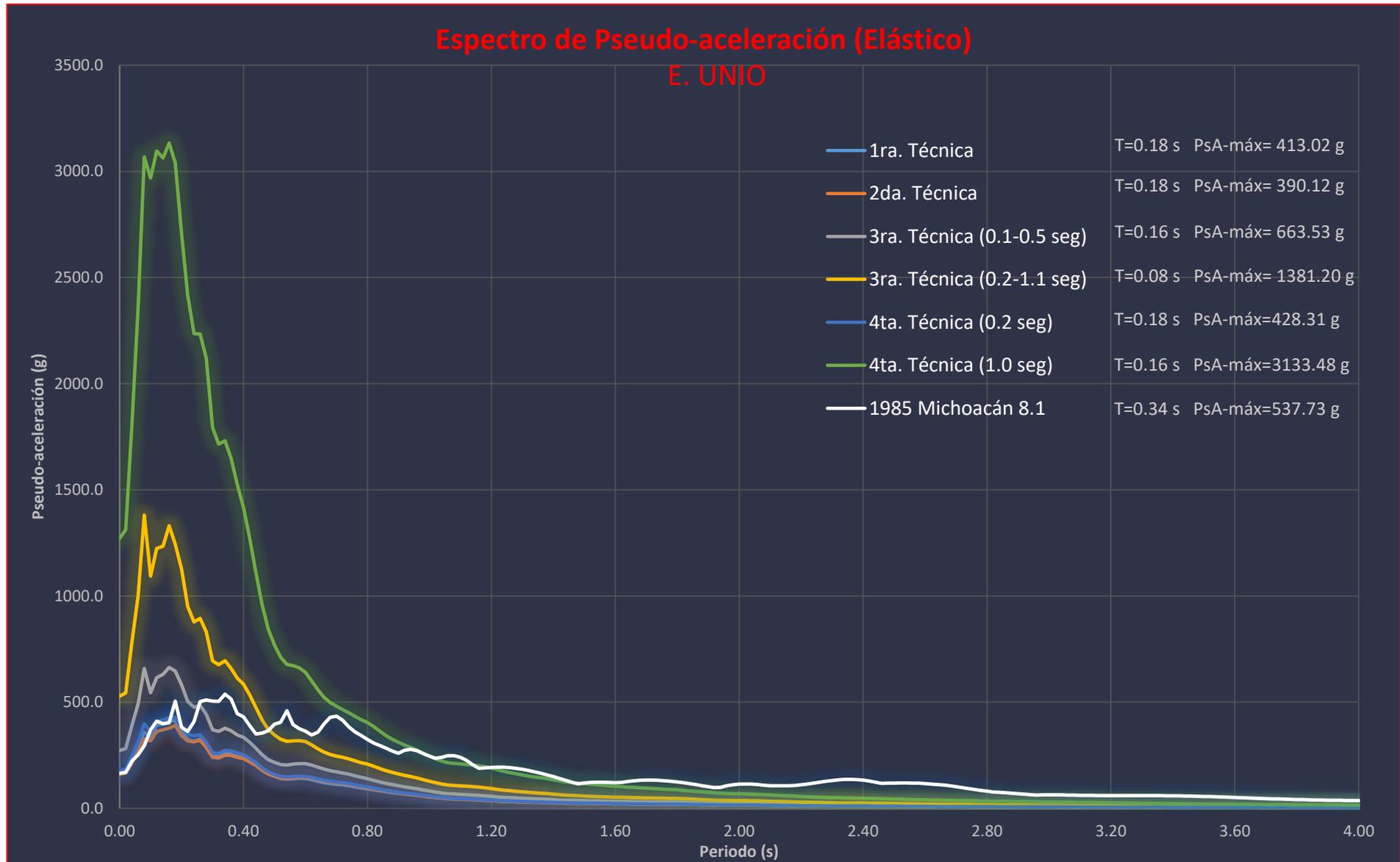


Figura 148. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 elástico.

5.1 ESTACIÓN UNIO

5.1.2 ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=2.0

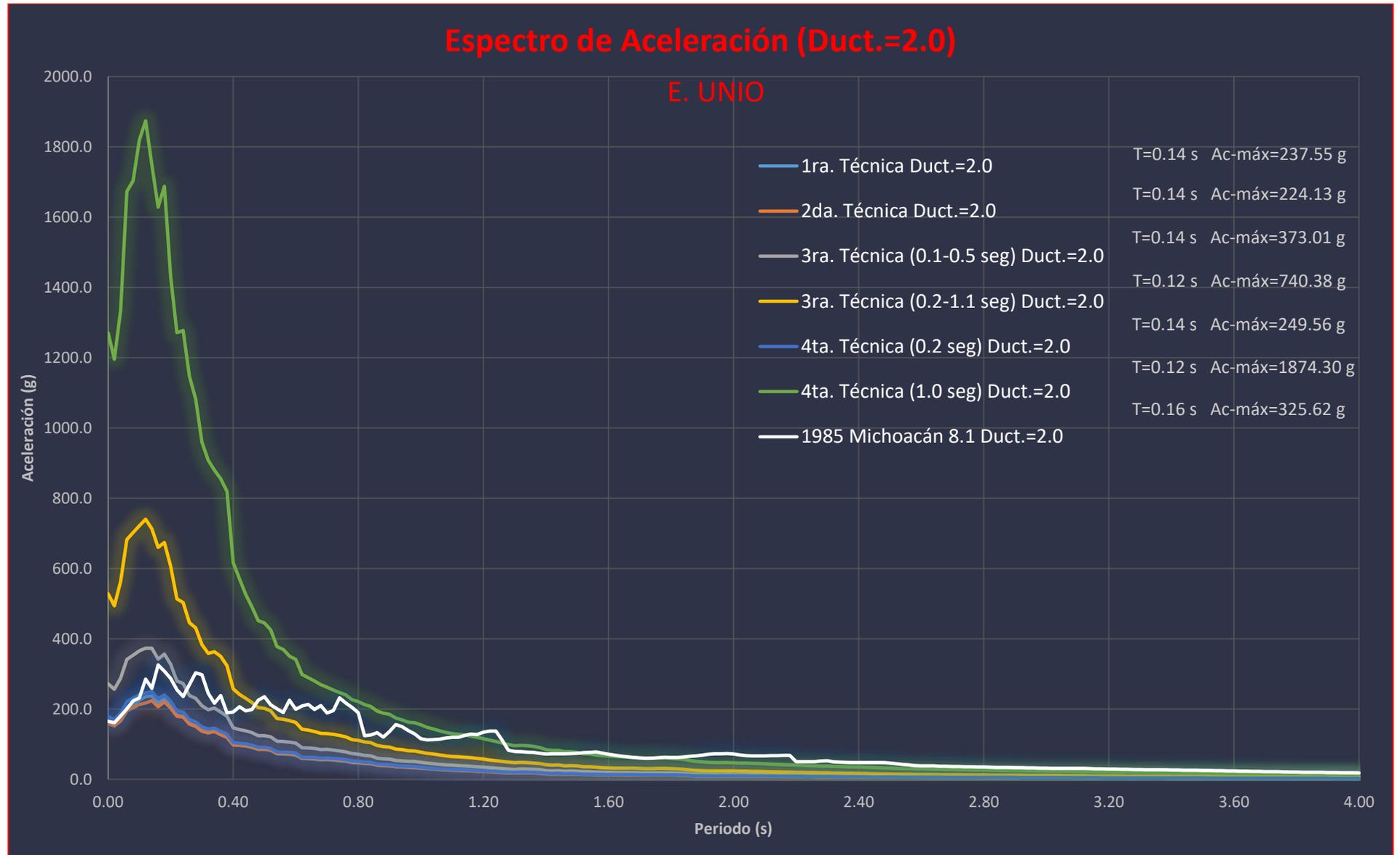


Figura 149. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico.

5.1 ESTACIÓN UNIO

5.1.3 ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=4.0

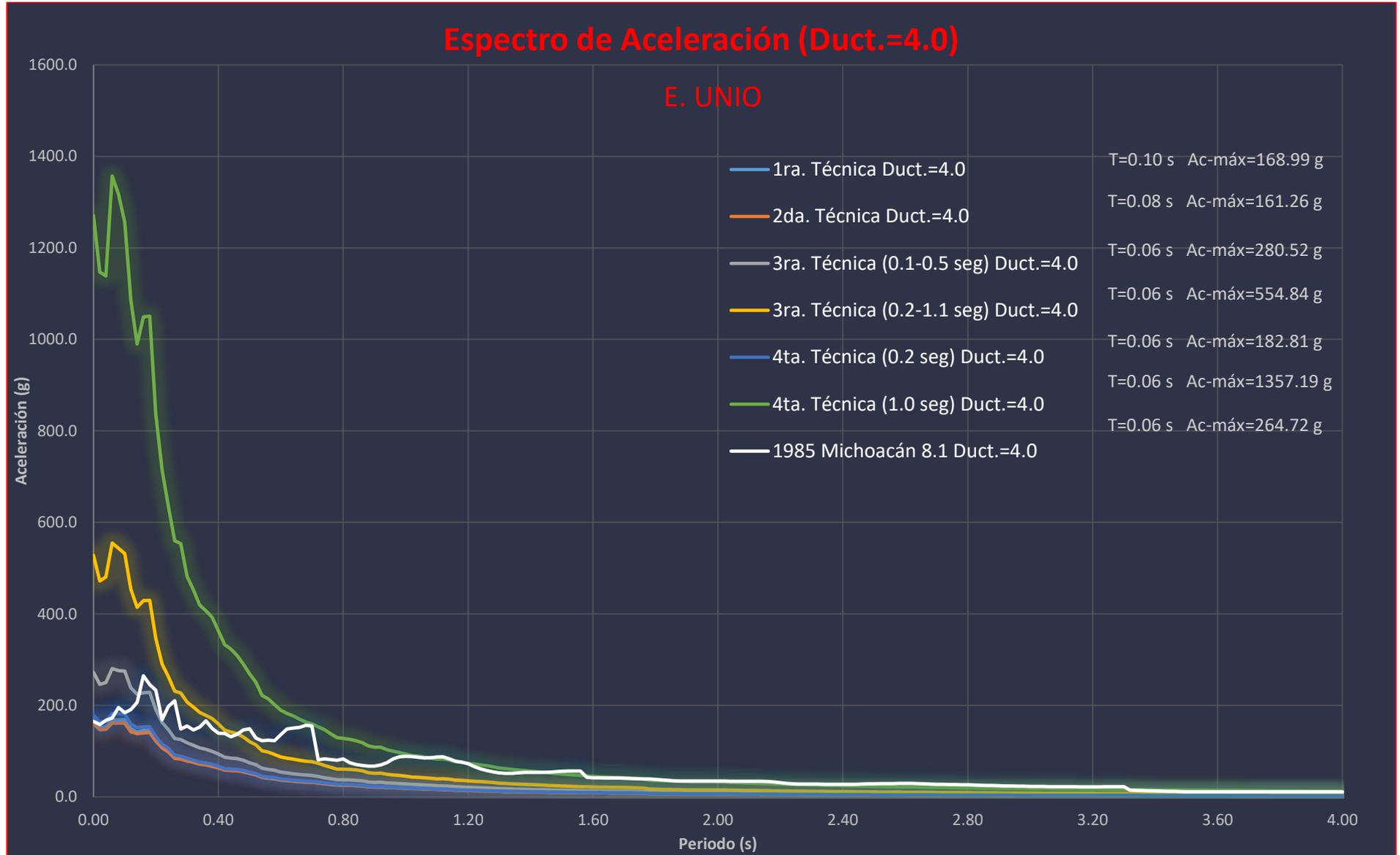


Figura 150. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico.

## RESULTADOS (ESTACIÓN UNIO)

Como se observa la tercera técnica que se describe en este trabajo (ASI 0.1-0.5 seg) supera la respuesta máxima del sismo de Michoacán del 19/09/1985 para un periodo más corto en los espectros elásticos e inelásticos, sin que exista mucha diferencia. Se podría considerar la mejor técnica, dejando claro que en un promedio de 0.25 de periodo, este cruza y pasa por debajo de la línea del sismo de mayor magnitud.

Tabla 9. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (elástico).

ELÁSTICO	
TÉCNICA	INTERVALO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra. Técnica	0.0-0.20
2da. Técnica	0.0-0.17
3ra. Técnica (0.1-0.5 seg.)	0.0-0.25
3ra. Técnica (0.2-1.1 seg.)	0.35-0.50
4ta. Técnica (0.2 seg.)	0.0-0.23
4ta. Técnica (1.0 seg.)	0.65-1.65

Tabla 10. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (inelástico duct.=2.0).

INELÁSTICA 2.0	
TÉCNICA	INTERVALO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra. Técnica	0.0-0.12
2da. Técnica	0.0-1.0
3ra. Técnica (0.1-0.5 seg.)	0.0-0.25
3ra. Técnica (0.2-1.1 seg.)	0.30-0.55
4ta. Técnica (0.2 seg.)	0.0-0.13
4ta. Técnica (1.0 seg.)	0.65-1.90

Tabla 11. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (inelástico duct.=4.0).

INELÁSTICA 4.0	
TÉCNICA	INTERVALO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra. Técnica	0.0-0.08
2da. Técnica	0.0-0.05
3ra. Técnica (0.1-0.5 seg.)	0.0-0.22
3ra. Técnica (0.2-1.1 seg.)	0.2-0.5
4ta. Técnica (0.2 seg.)	0.0-0.10
4ta. Técnica (1.0 seg.)	0.6-4.00

Para los resultados de la primera estación (UNIO) se omitirán dos de las técnicas de escalamiento empleadas ya que sobreestiman de manera excesiva el promedio de los espectros correspondientes de los sismos de menor magnitud, estas técnicas son: la tercera en el intervalo de 0.2 a 1.1 segundos y la cuarta técnica en 1 segundo. A continuación se muestran el espectro elástico y los inelásticos omitiendo las técnicas mencionadas para tener un mejor panorama de las demás técnicas que se ajustan mejor (figuras 151-153).

**5.1 ESPECTROS ESCALADOS COMPARADOS CON EL ESPECTRO DEL SISMO DE 1985 DE LA ESTACIÓN UNIO.**

ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN ELÁSTICO.

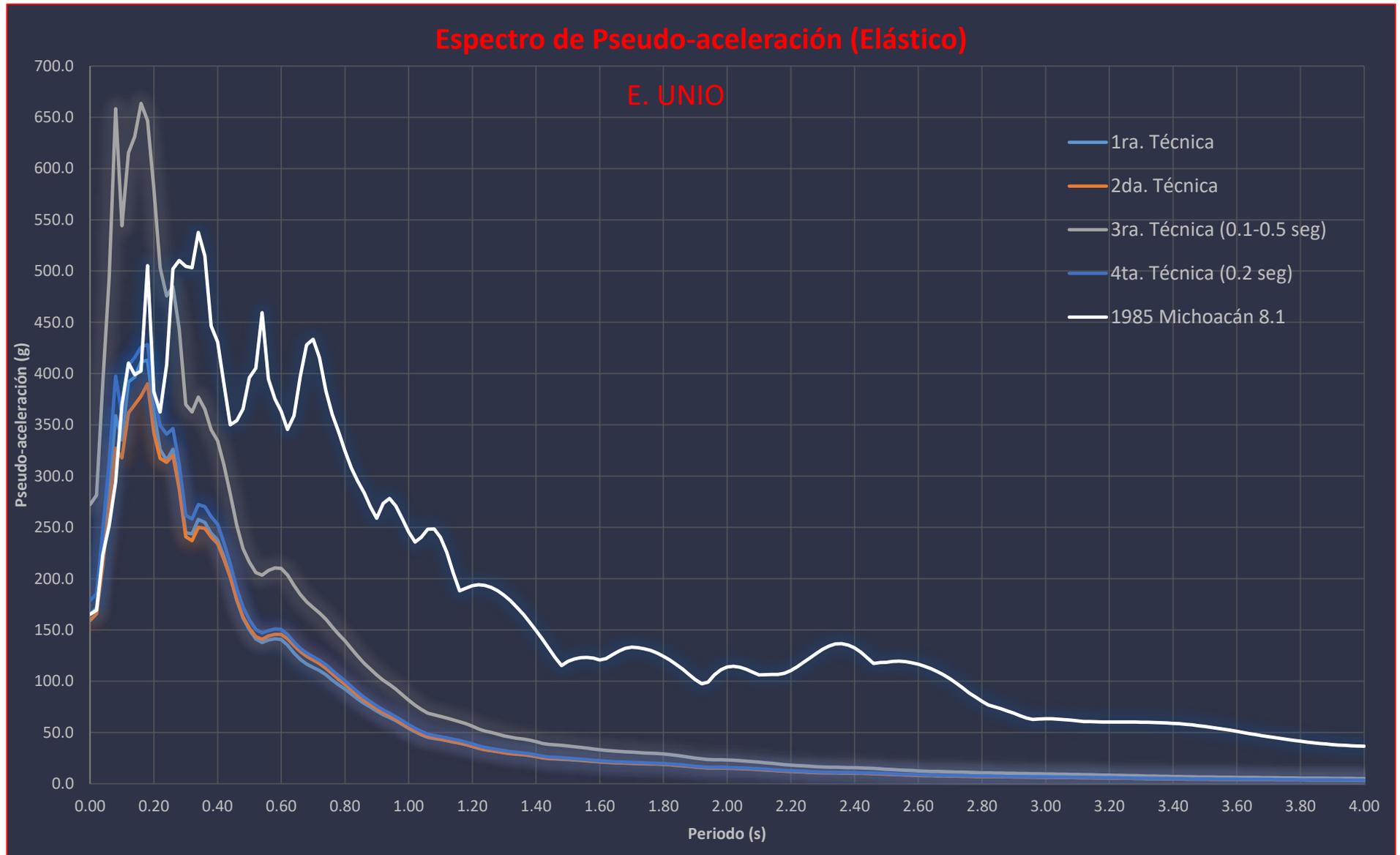


Figura 151. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 elástico omitiendo 3ra. técnica en 0.2 a 1.1 seg y la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

5.1 ESTACIÓN UNIO

ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=2.0

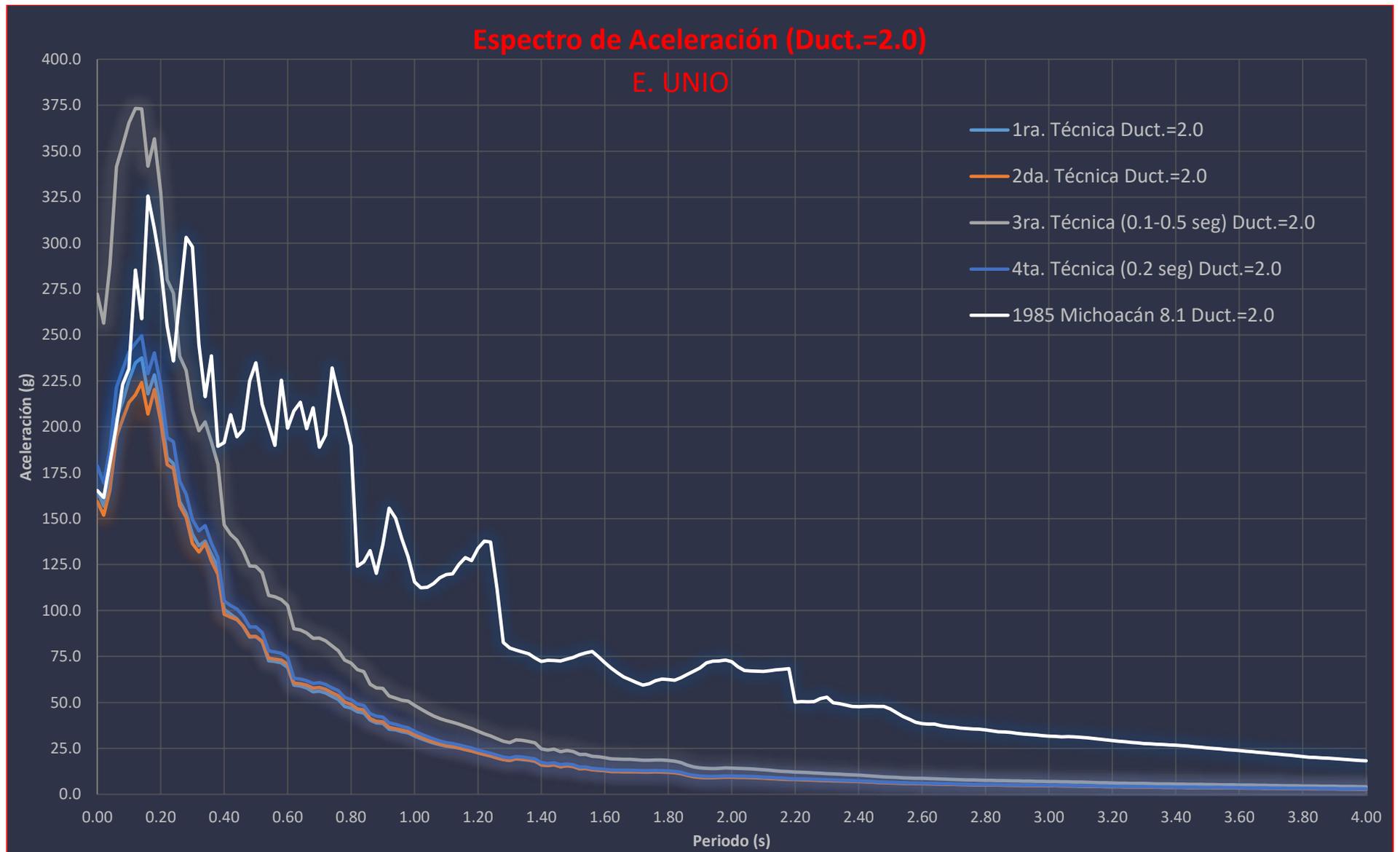


Figura 152. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico omitiendo 3ra. técnica en 0.2 a 1.1 seg y la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

5.1 ESTACIÓN UNIO

ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=4.0

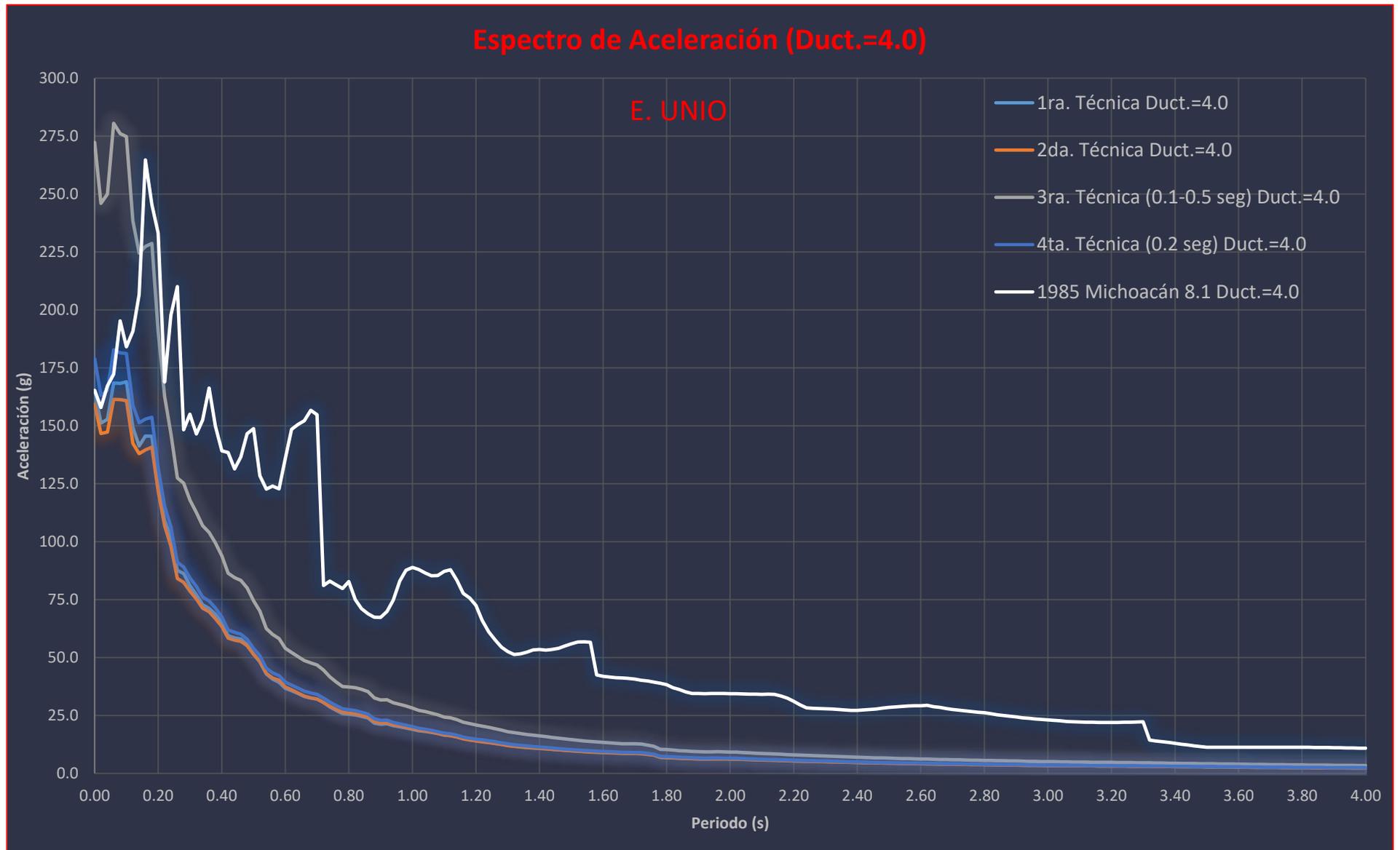


Figura 153. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico omitiendo 3ra. técnica en 0.2 a 1.1 seg y la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

**5.2 ESPECTROS ESCALADOS COMPARADOS CON EL ESPECTRO DEL SISMO DE 1985 DE LA ESTACIÓN AZIH**

5.2.1 ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN ELÁSTICO.

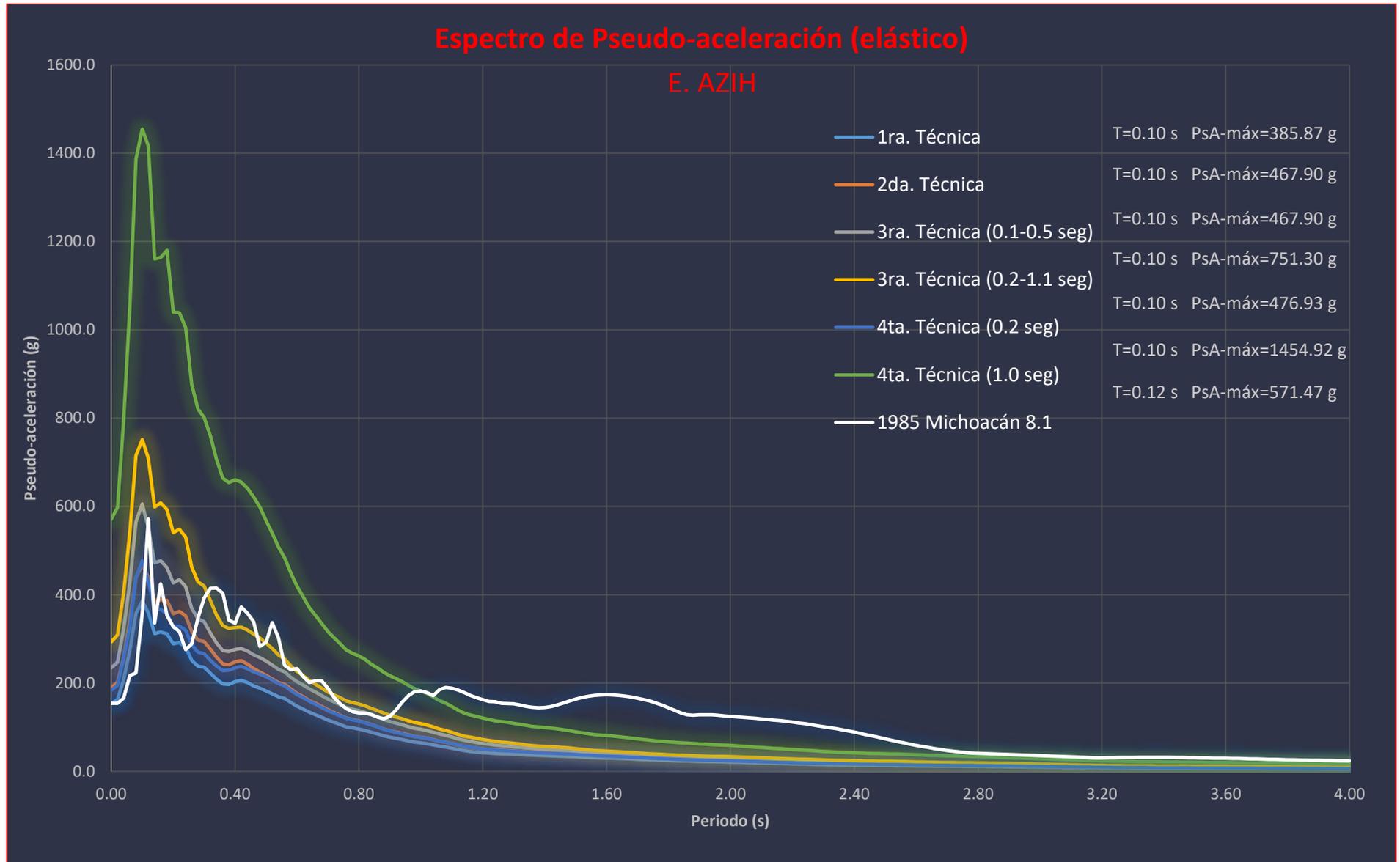


Figura 154. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 elástico.

**5.2 ESTACIÓN AZIH**

**5.2.2 ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=2.0**

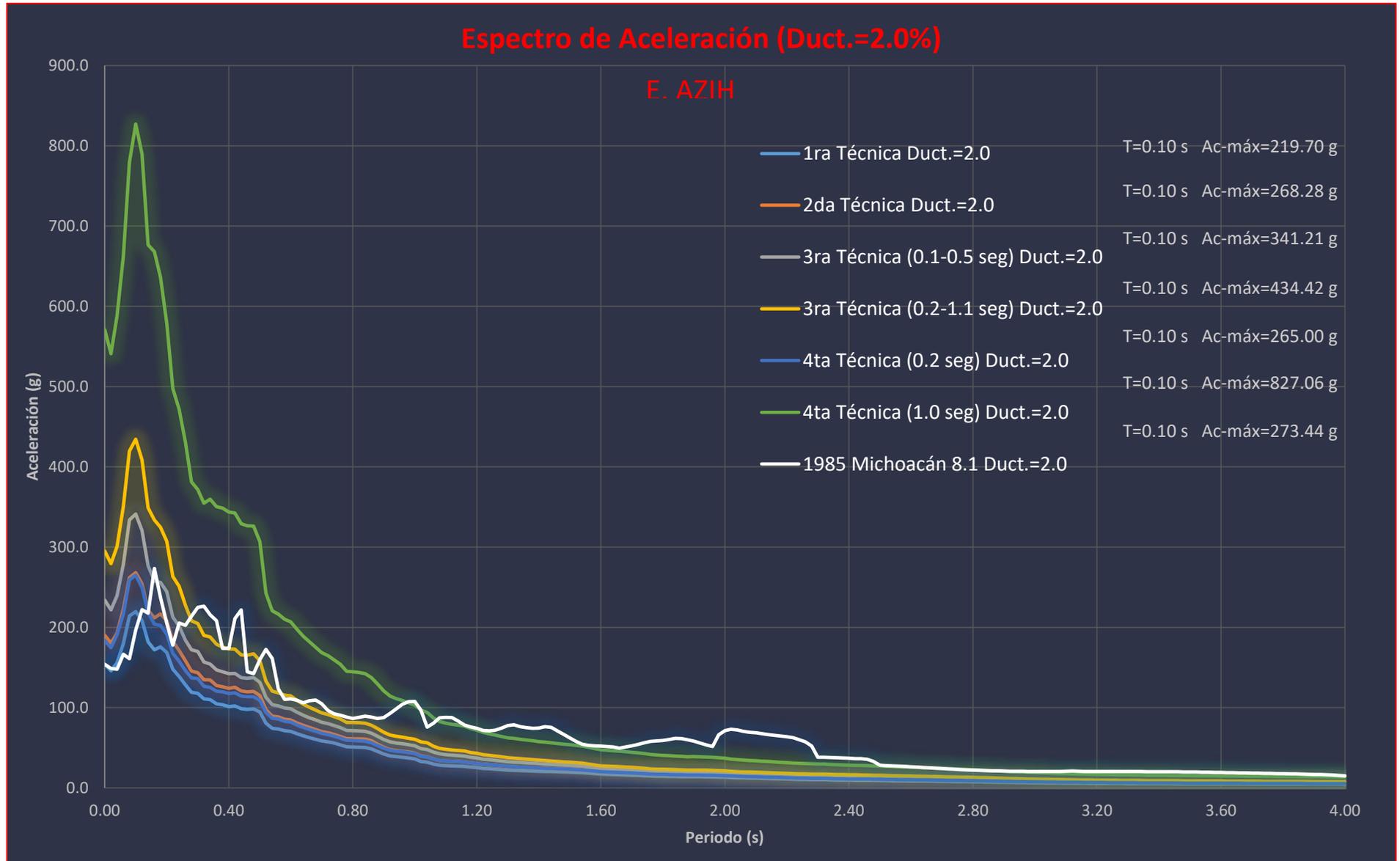


Figura 155. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico.

5.2 ESTACIÓN AZIH

5.2.3 ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=4.0

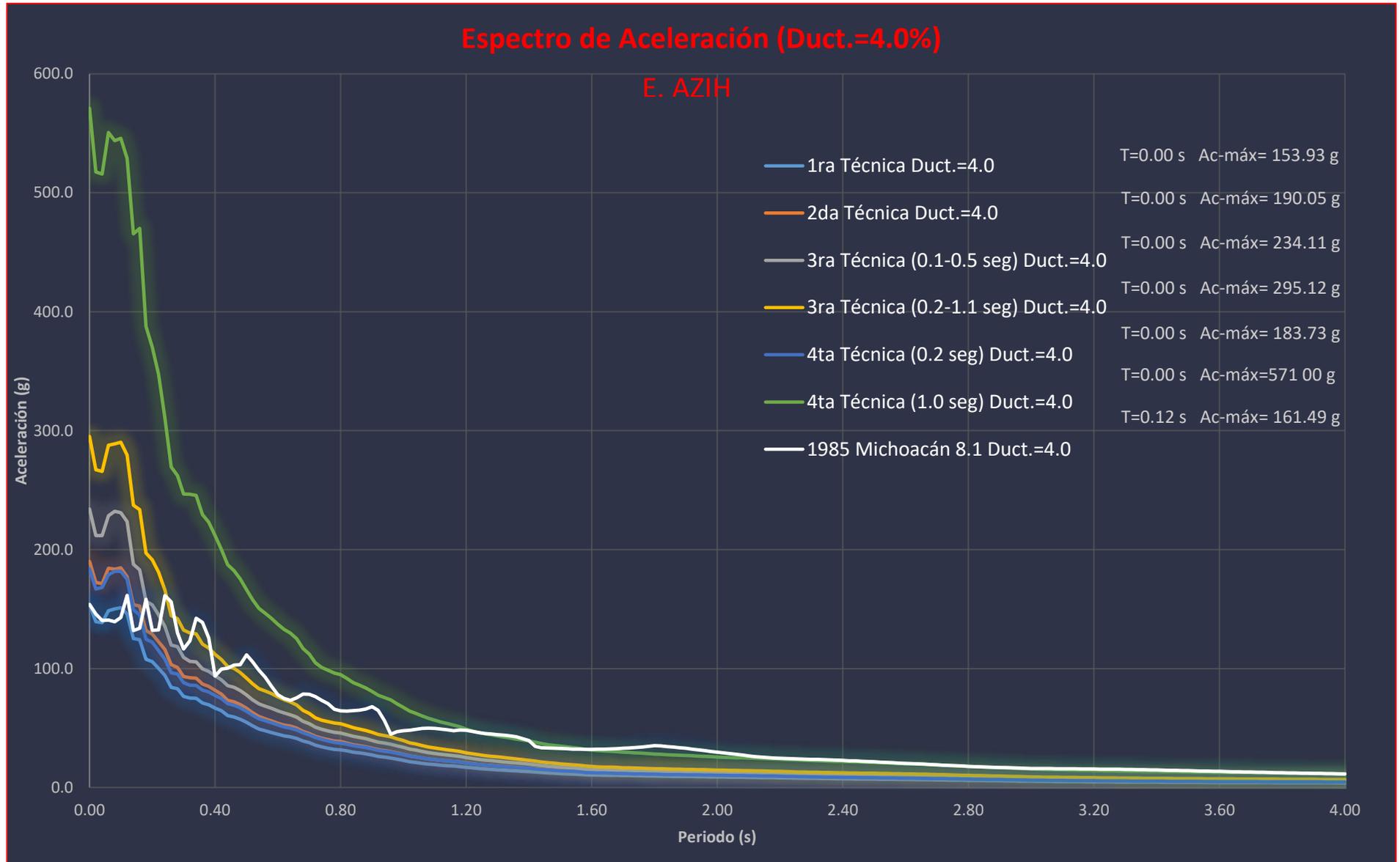


Figura 156. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico.

## RESULTADOS (ESTACIÓN AZIH)

En el espectro elástico la 3ra técnica (0.1-0.5 seg) supera el máximo y cruza la línea en 0.28 seg de periodo. Hasta este periodo se mantiene superior sin mucha diferencia, considerándose para esta estación y espectro (elástico) la mejor técnica de escalamiento, aunque para el intervalo de periodo entre 0.3 y 0.9 la 3ra técnica (0.2-1.1) se considera aceptable, no obstante que no siempre se mantiene por encima de la línea del sismo de mayor magnitud.

Tabla 12. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (elástico).

ELÁSTICO	
TÉCNICA	RANGO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra. Técnica	0.0 a 0.10
2da. Técnica	0.0 a 0.10
3ra. Técnica (0.1-0.5 seg.)	0.0 a 0.28
3ra. Técnica (0.2-1.1 seg.)	1.10 a 0.9
4ta. Técnica (0.2 seg.)	0.0 a 0.10
4ta. Técnica (1.0 seg.)	0.70 a 1.30

Tabla 13. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (inelástico duct.=2.0).

INELÁSTICA 2.0	
TÉCNICA	RANGO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra. Técnica	0.0 a 0.10
2da. Técnica	0.0 a 0.14
3ra. Técnica (0.1-0.5 seg.)	0.0 a 0.22
3ra. Técnica (0.2-1.1 seg.)	0.15 a 0.90
4ta. Técnica (0.2 seg.)	0.0 a 0.14
4ta. Técnica (1.0 seg.)	0.9 a 1.70

Tabla 14. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (inelástico duct.=4.0).

INELÁSTICA 4.0	
TÉCNICA	RANGO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra Técnica	0.0 a 0.10
2da Técnica	0.0 a 0.18
3ra Técnica 0.1-0.5	0.10 a 0.20
3ra Técnica 0.2-1.1	0.20 a 0.66
4ta Técnica 0.2	0.0 a 0.18
4ta Técnica 1.0	0.80 a 4.0

En los resultados de la segunda estación (AZIH), también se eliminarán las mismas dos técnicas de escalamiento que se omitieron en la primera estación, estas son: 3ra. técnica con intervalo de 0.2 a 1.1 segundos y la 4ta. técnica en 1.0 segundo, ya que sobreestiman el escalamiento deseado (figuras 160-162).

5.2 ESPECTROS ESCALADOS COMPARADOS CON EL ESPECTRO DEL SISMO DE 1985 DE LA ESTACIÓN AZIH

ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN ELÁSTICO.



Figura 157. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 elástico omitiendo 3ra. técnica en 0.2 a 1.1 seg y la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

**5.2 ESTACIÓN AZIH**

**ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=2.0**

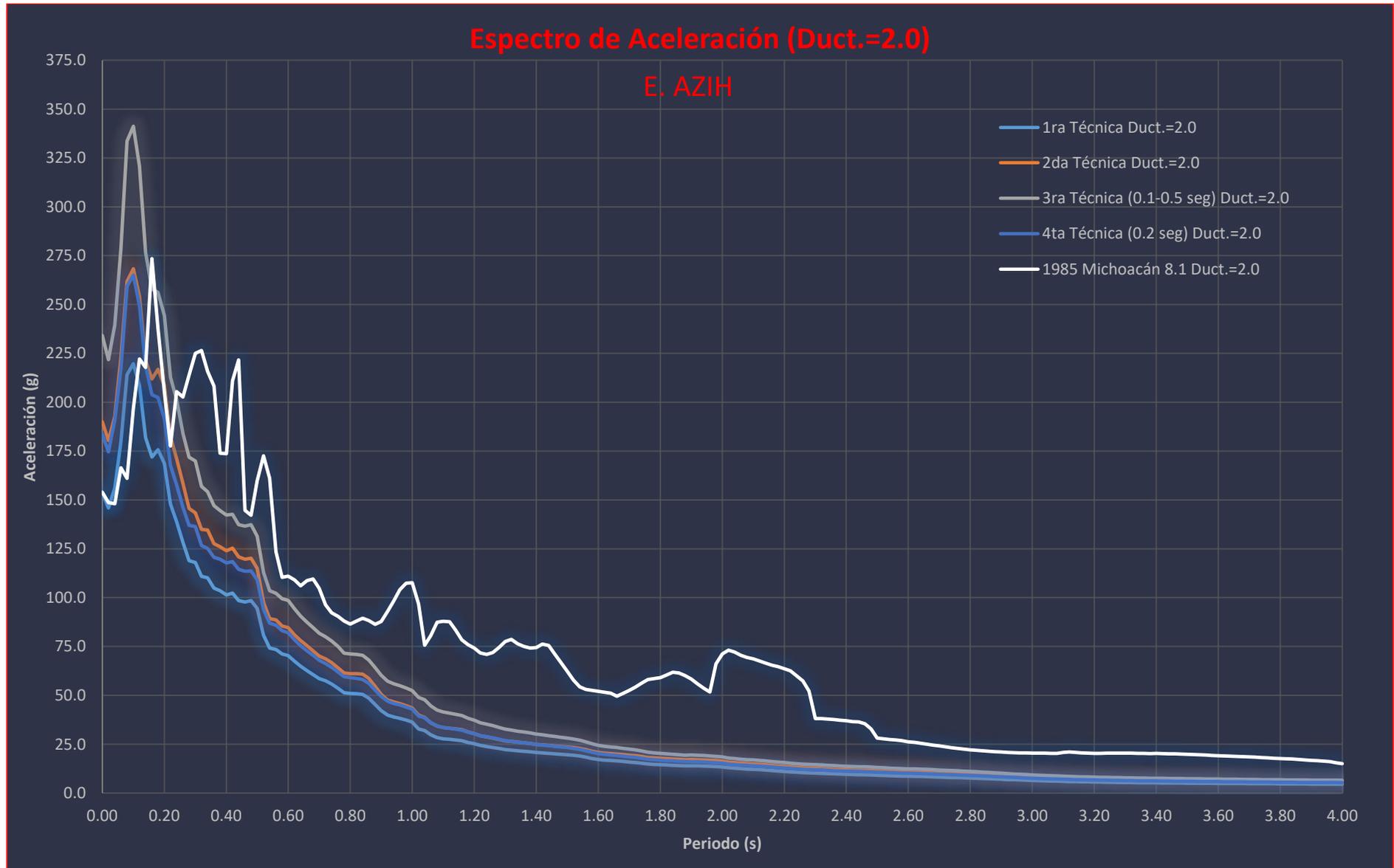


Figura 158. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico omitiendo 3ra. técnica en 0.2 a 1.1 seg y la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

**5.2 ESTACIÓN AZIH**

**ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=4.0**

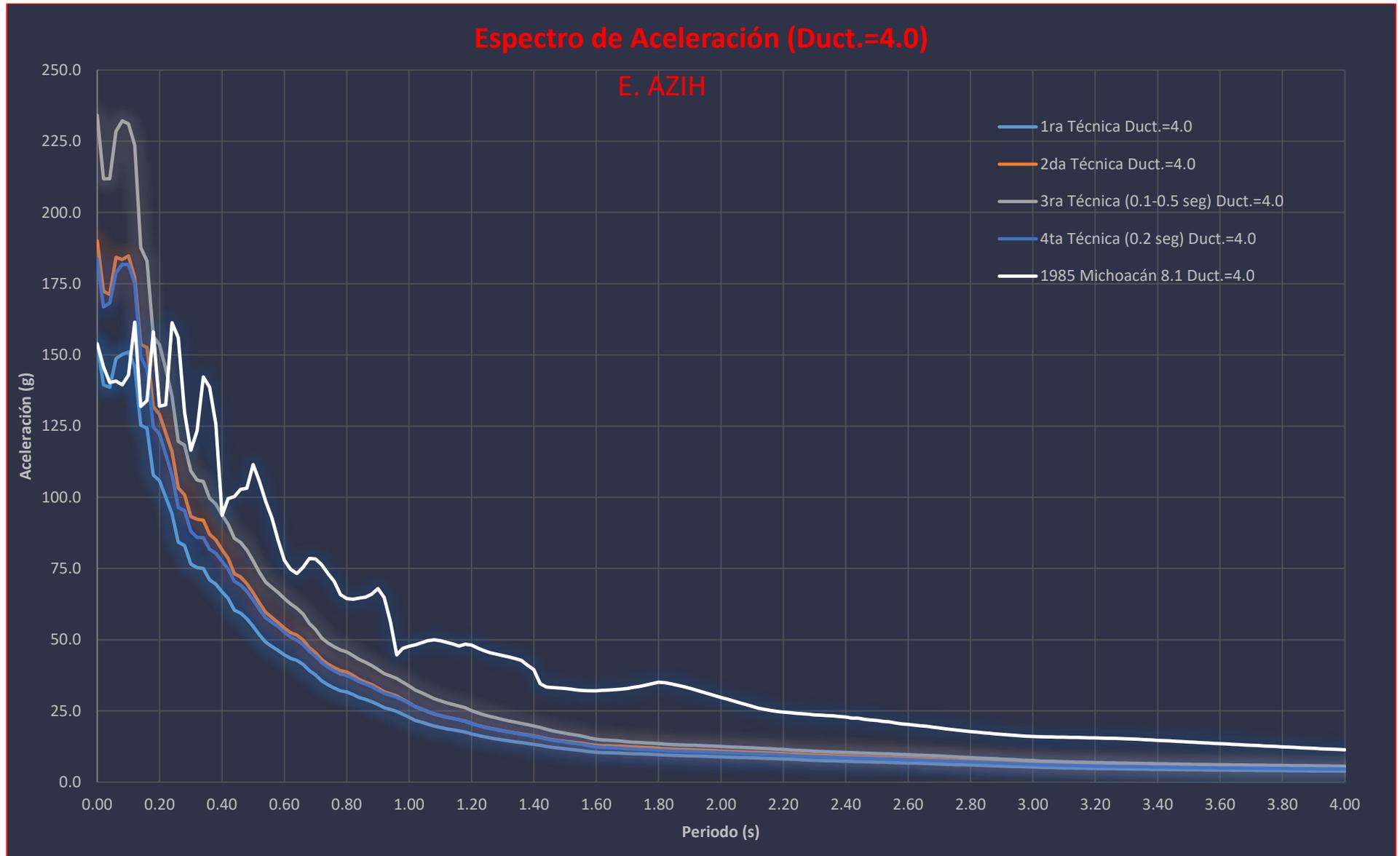


Figura 159. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico omitiendo 3ra. técnica en 0.2 a 1.1 seg y la 4ta. técnica en 1.0 seg.

**5.3 ESPECTROS ESCALADOS COMPARADOS CON EL ESPECTRO DEL SISMO DE 1985 DE LA ESTACIÓN CALE.**

**5.3.1 ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN ELÁSTICO.**

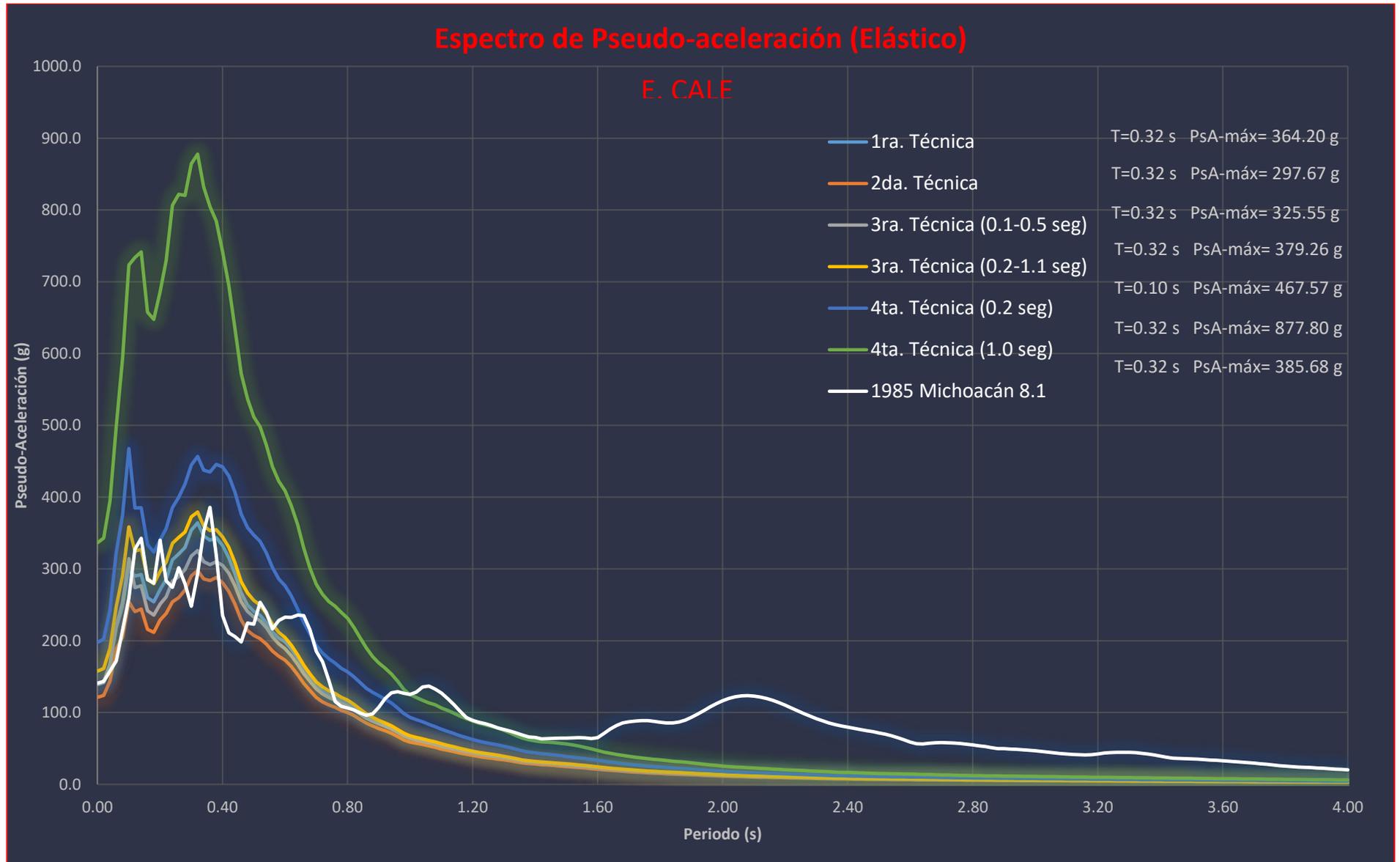


Figura 160. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 elástico.

**5.3 ESTACIÓN CALE**

**5.3.2 ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=2.0**

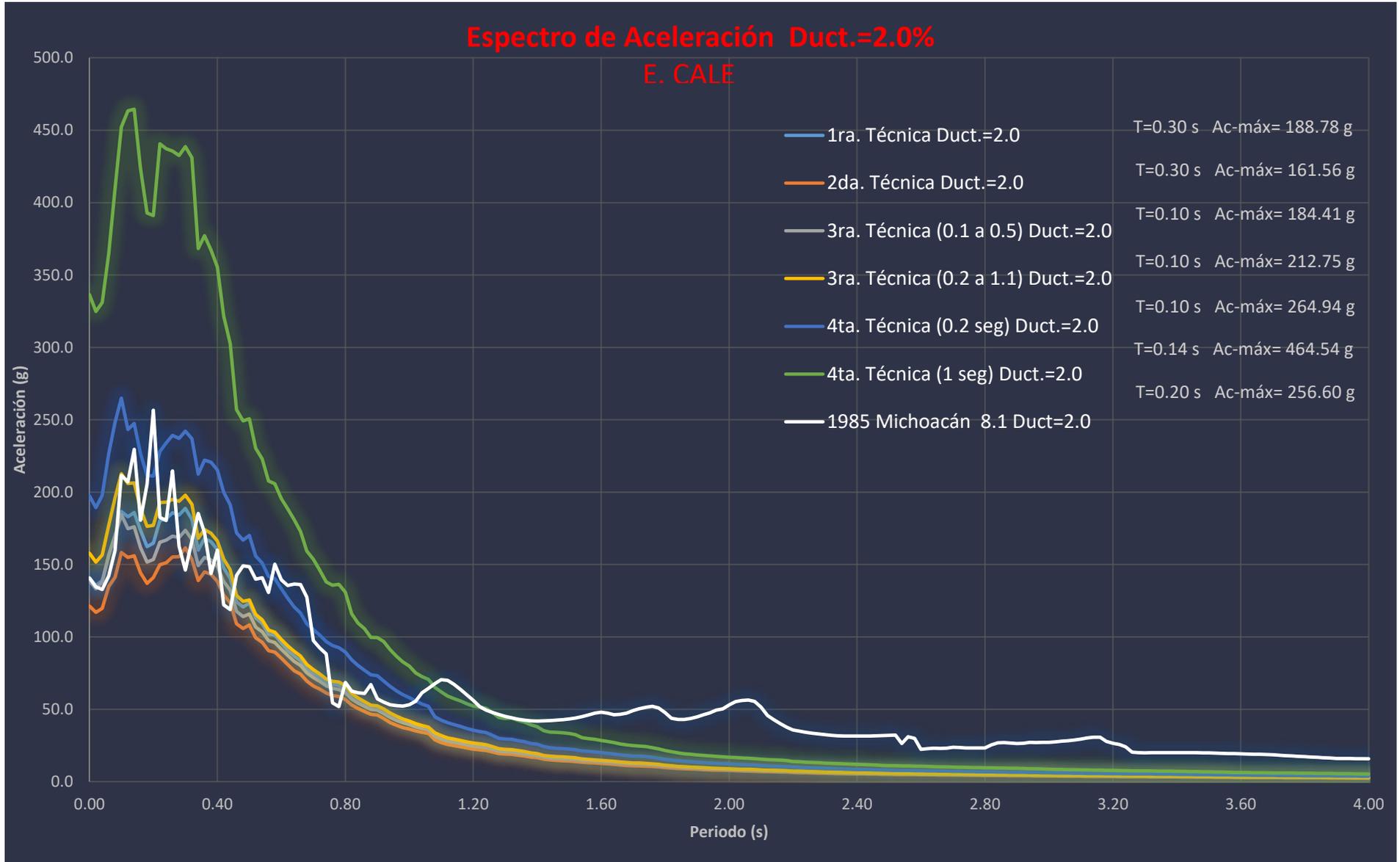


Figura 161. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico.

### 5.3 ESTACIÓN CALE

#### 5.3.3 ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=4.0

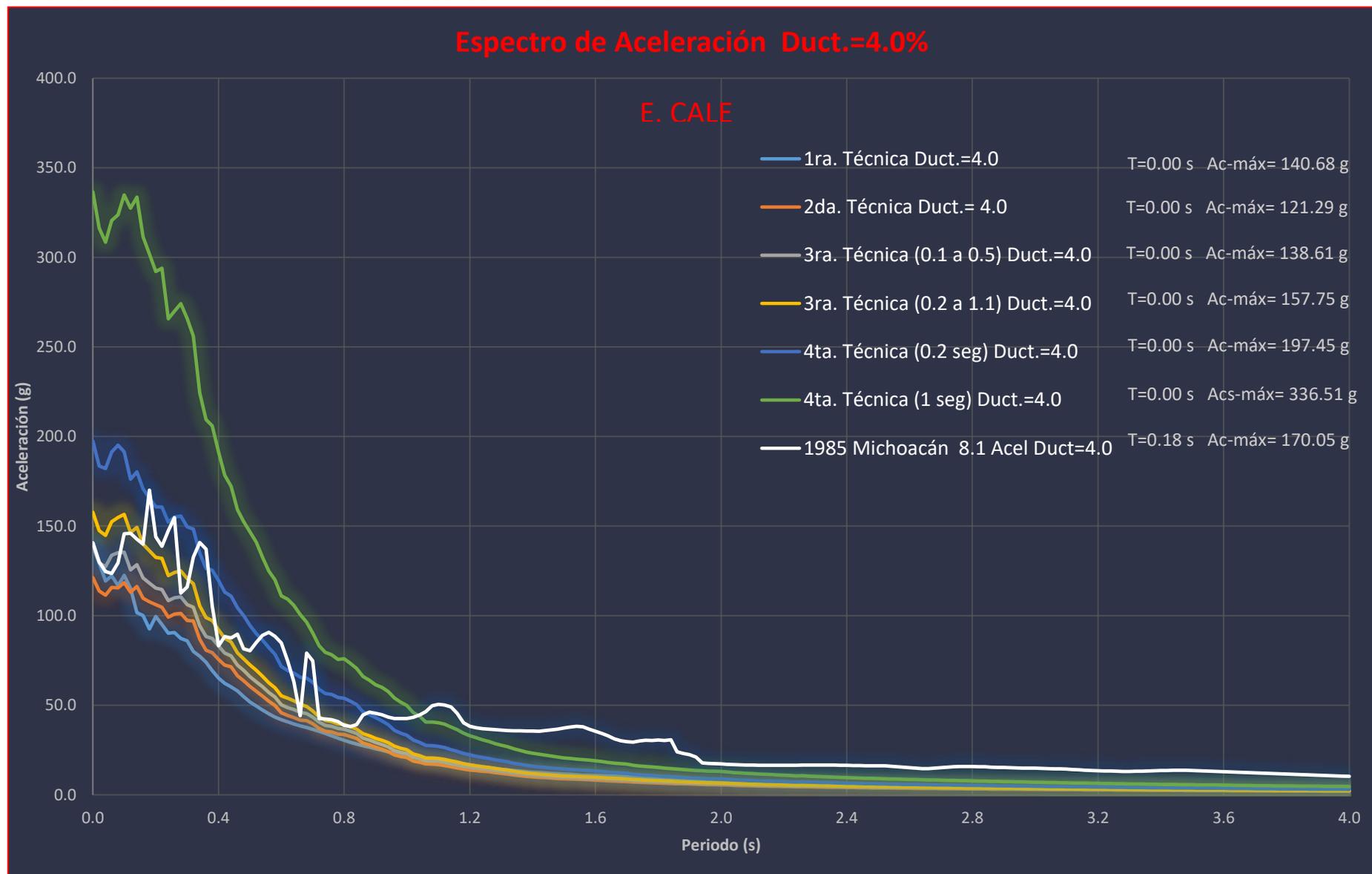


Figura 162. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico.

## RESULTADOS (ESTACIÓN CALE)

La cuarta técnica de escalamiento en 0.2 seg tiene un escalamiento muy parecido a la línea del sismo grande desde 0.0 hasta 0.55 seg de periodo. Aunque existen algunos picos del sismo grande que la supera, se considera como la mejor técnica que representa un sismo grande en el intervalo de periodo antes mencionado, tanto para la respuesta elástica como para la inelástica.

Tabla 15. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (elástico).

ELÁSTICO	
TÉCNICA	RANGO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra. Técnica	0.0 a 0.10
2da. Técnica	0.0 a 0.10
3ra. Técnica (0.1-0.5 seg.)	0.0 a 0.10
3ra. Técnica (0.2-1.1 seg.)	0.0 a 0.56
4ta. Técnica (0.2 seg.)	0.0 a 0.92
4ta. Técnica (1.0 seg.)	0.70 a 1.50

Tabla 16. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (inelástico duct.=2.0).

INELÁSTICA 2.0	
TÉCNICA	RANGO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra. Técnica	0.0 a 0.10
2da. Técnica	-
3ra. Técnica (0.1-0.5 seg.)	0.0 a 0.10
3ra. Técnica (0.2-1.1 seg.)	0.0 a 0.10
4ta. Técnica (0.2 seg.)	0.0 a 1.20
4ta. Técnica (1.0 seg.)	0.70 a 1.40

Tabla 17. Intervalo de periodo con mejor ajuste al sismo grande (inelástico duct.=4.0).

INELÁSTICA 4.0	
TÉCNICA	RANGO DE PERIODO ACEPTABLE (seg)
1ra Técnica	0.0 a 0.05
2da Técnica	-
3ra Técnica 0.1-0.5	0.0 a 0.10
3ra Técnica 0.2-1.1	0.0 a 0.14
4ta Técnica 0.2	0.0 a 0.90
4ta Técnica 1.0	0.70 a 1.04

En la tercera estación solo se omitirá la 4ta técnica en 1.0 segundo, debido a la sobreestimación que se obtiene (163-165).

5.3 ESPECTROS ESCALADOS COMPARADOS CON EL ESPECTRO DEL SISMO DE 1985 DE LA ESTACIÓN CALE.

ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN ELÁSTICO.

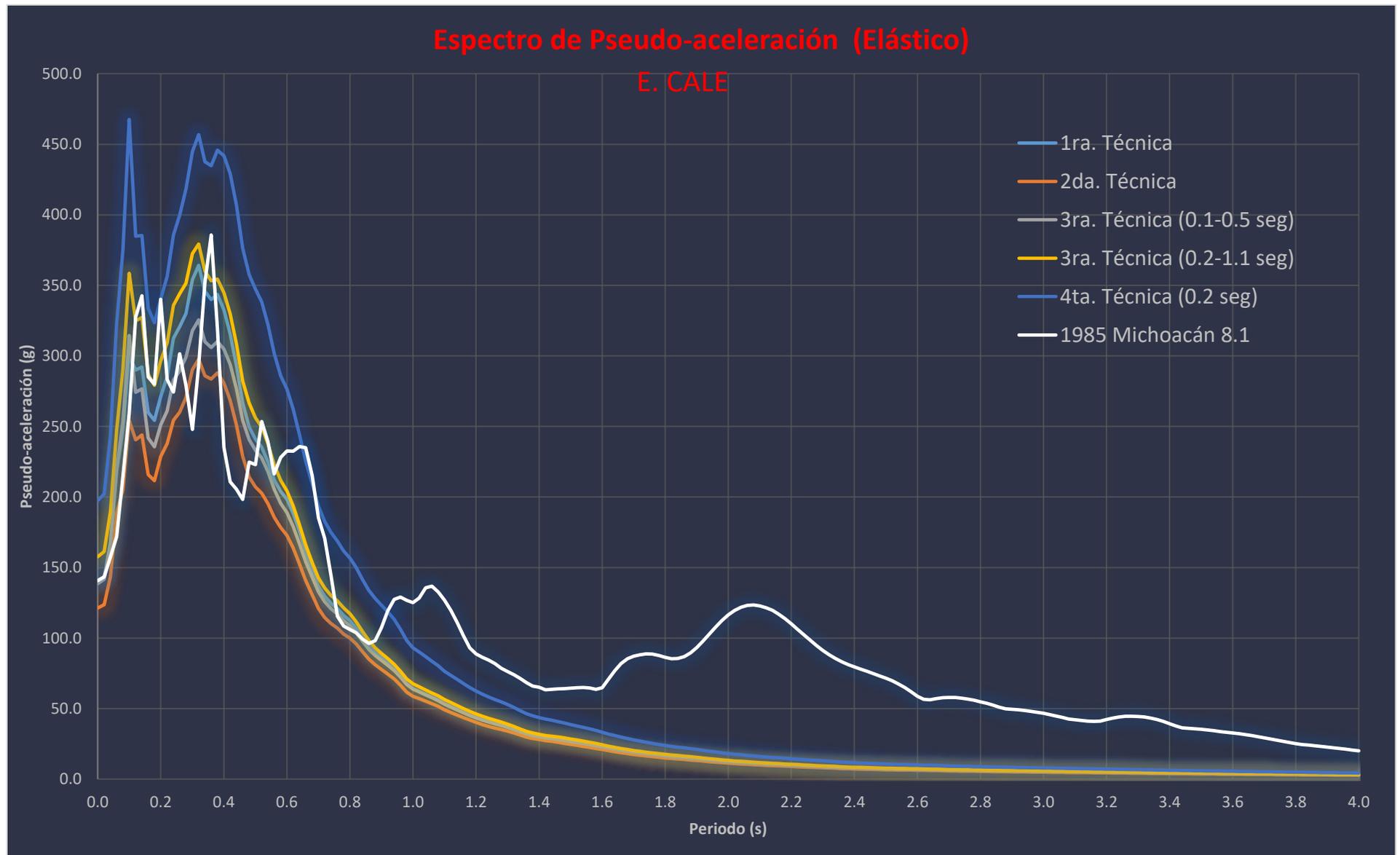


Figura 163. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 elástico omitiendo la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

**5.3 ESTACIÓN CALE**

**ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=2.0**

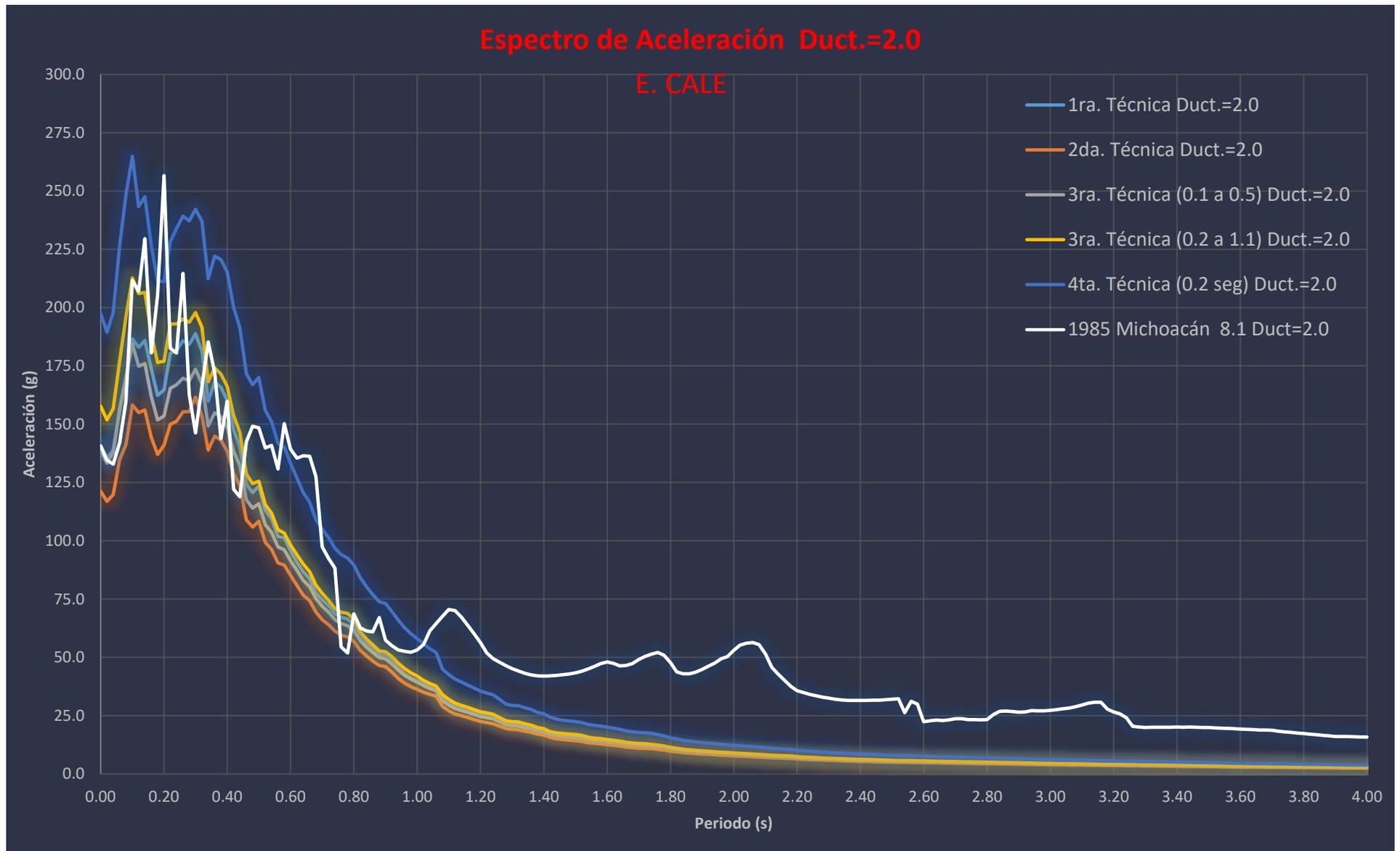


Figura 164. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico omitiendo la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

5.3 ESTACIÓN CALE

ESPECTRO DE ACELERACIÓN INELÁSTICO CON DUCT.=4.0

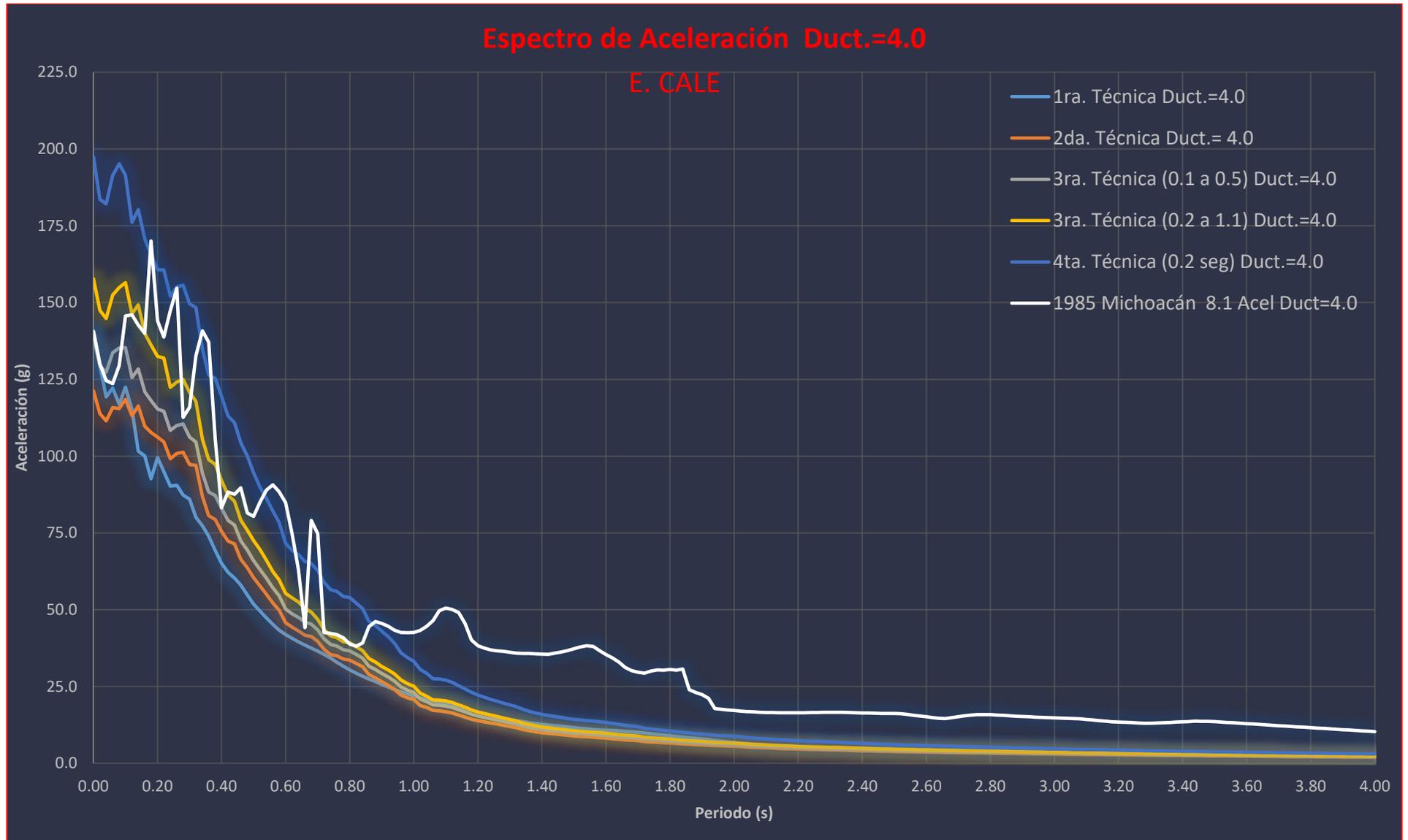


Figura 165. Espectros escalados y espectro del sismo de 1985 inelástico omitiendo la 4ta. Técnica en 1.0 seg.

### 5.4 FACTORES DE ESCALAMIENTO

Como se mencionó en el capítulo uno, para las técnicas de escalamiento se obtuvieron factores de escalamiento que se aplicaron a los registros de los sismos pequeños, de acuerdo a cada técnica. Las tablas de la 18 a la 20 muestran los factores de escalamiento que resultaron de cada técnica y que fueron aplicados para todos los sismos pequeños de cada estación.

Tabla 18. Factores de escalamiento de los sismos de la estación UNIO.

ESTACIÓN UNIO										
Sismo	Primera Técnica	Segunda Técnica	Tercera Técnica (0.1-0.5s)	Tercera Técnica (0.2-1.1s)	Cuarta Técnica (0.2s)	Cuarta Técnica (1.0s)	Promedio Horizontal	Promedio Sin 3ra. y 4ta. técnica	Desv. Est. Sin 3ra. y 4ta. técnica	CV Sin 3ra. y 4ta. técnica
1	3.140	3.249	3.391	5.125	3.428	11.374	4.95	3.30	0.13	0.04
2	50.179	46.709	61.103	100.978	51.119	225.150	89.21	52.28	6.18	0.12
3	18.867	14.987	23.885	55.001	17.374	199.041	54.86	18.78	3.76	0.20
4	2.249	2.036	4.152	10.627	2.605	49.863	11.92	2.76	0.96	0.35
5	53.693	37.007	85.208	205.556	44.806	372.532	133.13	55.18	21.15	0.38
6	119.689	100.371	141.374	215.178	100.168	281.694	159.75	115.40	19.59	0.17
7	24.929	30.950	37.409	44.444	33.600	69.848	40.20	31.72	5.25	0.17
8	80.586	98.641	143.394	132.480	87.267	179.934	120.38	102.47	28.28	0.28
9	2.791	3.727	5.536	12.291	3.527	33.925	10.30	3.90	1.17	0.30
10	7.237	4.695	21.918	52.027	9.156	69.221	27.38	10.75	7.67	0.71
<b>Promedio Vertical</b>	<b>36.34</b>	<b>34.24</b>	<b>52.74</b>	<b>83.37</b>	<b>35.30</b>	<b>149.26</b>				

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Tabla 19. Factores de escalamiento de los sismos de la estación AZIH.

ESTACIÓN AZIH										
Sismo	Primera Técnica	Segunda Técnica	Tercera Técnica (0.1-0.5s)	Tercera Técnica (0.2-1.1s)	Cuarta Técnica (0.2s)	Cuarta Técnica (1.0s)	Promedio Horizontal	Promedio Sin 3ra y 4ta técnica	Desv. Est. Sin 3ra y 4ta técnica	CV Sin 3ra y 4ta técnica
1	18.660	19.266	17.778	14.823	18.483	28.931	19.66	18.55	0.61	0.03
2	13.409	15.583	19.908	27.582	14.477	47.607	23.09	15.84	2.85	0.18
3	8.934	11.521	15.138	13.596	15.895	23.162	14.71	12.87	3.25	0.25
4	5.382	6.242	9.027	15.398	7.814	52.512	16.06	7.12	1.62	0.23
5	6.465	7.976	11.166	15.642	5.829	28.749	12.64	7.86	2.38	0.30
6	31.479	43.737	34.411	35.154	30.425	66.870	40.35	35.01	6.06	0.17
7	24.708	23.215	48.268	44.745	34.289	40.244	35.91	32.62	11.53	0.35
8	30.301	39.653	49.151	67.661	37.597	86.541	51.82	39.18	7.77	0.20
9	14.265	18.423	17.611	25.837	12.074	51.155	23.23	15.59	2.96	0.19
10	7.341	11.305	12.990	17.790	9.483	36.724	15.94	10.28	2.43	0.24
<b>Promedio Vertical</b>	<b>16.09</b>	<b>19.69</b>	<b>23.54</b>	<b>27.82</b>	<b>18.64</b>	<b>46.25</b>				

INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

Tabla 20. Factores de escalamiento de los sismos de la estación CALE.

ESTACIÓN CALE										
Sismo	Primera Técnica	Segunda Técnica	Tercera Técnica (0.1-0.5s)	Tercera Técnica (0.2-1.1s)	Cuarta Técnica (0.2s)	Cuarta Técnica (1.0s)	Promedio Horizontal	Promedio Sin 4ta técnica	Desv. Est. Sin 4ta técnica	CV Sin 4ta técnica
1	7.738	6.530	6.538	6.526	11.316	10.446	8.18	7.73	2.07	0.27
2	2.100	2.670	2.522	2.039	4.304	2.483	2.69	2.73	0.92	0.34
3	2.343	2.767	3.438	3.342	4.070	3.837	3.30	3.19	0.66	0.21
4	42.694	28.692	32.883	47.382	46.746	133.881	55.38	39.68	8.44	0.21
5	5.788	5.796	5.424	8.705	5.617	29.422	10.13	6.27	1.37	0.22
6	28.126	18.981	26.688	34.582	26.901	108.844	40.69	27.06	5.55	0.21
7	83.272	75.978	73.256	69.206	112.179	128.015	90.32	82.78	17.22	0.21
8	26.509	18.799	18.671	21.595	27.151	44.957	26.28	22.54	4.09	0.18
9	33.147	20.836	49.403	58.169	90.683	97.569	58.30	50.45	26.72	0.53
10	53.189	53.509	48.828	54.207	51.748	77.530	56.50	52.30	2.14	0.04
11	56.088	32.737	38.003	46.632	61.152	135.692	61.72	46.92	11.91	0.25
<b>Promedio Vertical</b>	<b>31.00</b>	<b>24.30</b>	<b>27.79</b>	<b>32.03</b>	<b>40.17</b>	<b>70.24</b>				

Como se observa en las tablas anteriores, en general se tienen incrementos importantes de los factores de escalamiento con la 3ra. técnica (0.2 a 1.1 seg.) y con la 4ta. técnica (1.0 seg.). En el caso de la estación CALE solo se presenta con la 4ta. técnica en (1.0 seg.), por tal motivo para el cálculo del promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación se omitieron estas técnicas correspondientes a su estación.

## INFLUENCIA DE LA TÉCNICA DE ESCALAMIENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS

A continuación se muestra la gráfica (figura 166) de los promedio de los factores de escalamiento, en la cual se observa una sobrestimación de los factores para la cuarta técnica que se basa en un factor de escalamiento para un periodo en específico, en este caso de 1.0 s. Lo mismo ocurre con la tercera técnica cuyo factor de escalamiento depende de la intensidad ASI para un intervalo de periodo de 0.2 a 1.1 segundos. Esto se debe a que varias de las pseudoaceleraciones máximas espectrales de los sismos pequeños se ubican fuera los intervalos que abarcan estas dos técnicas para obtener el factor de escalamiento.

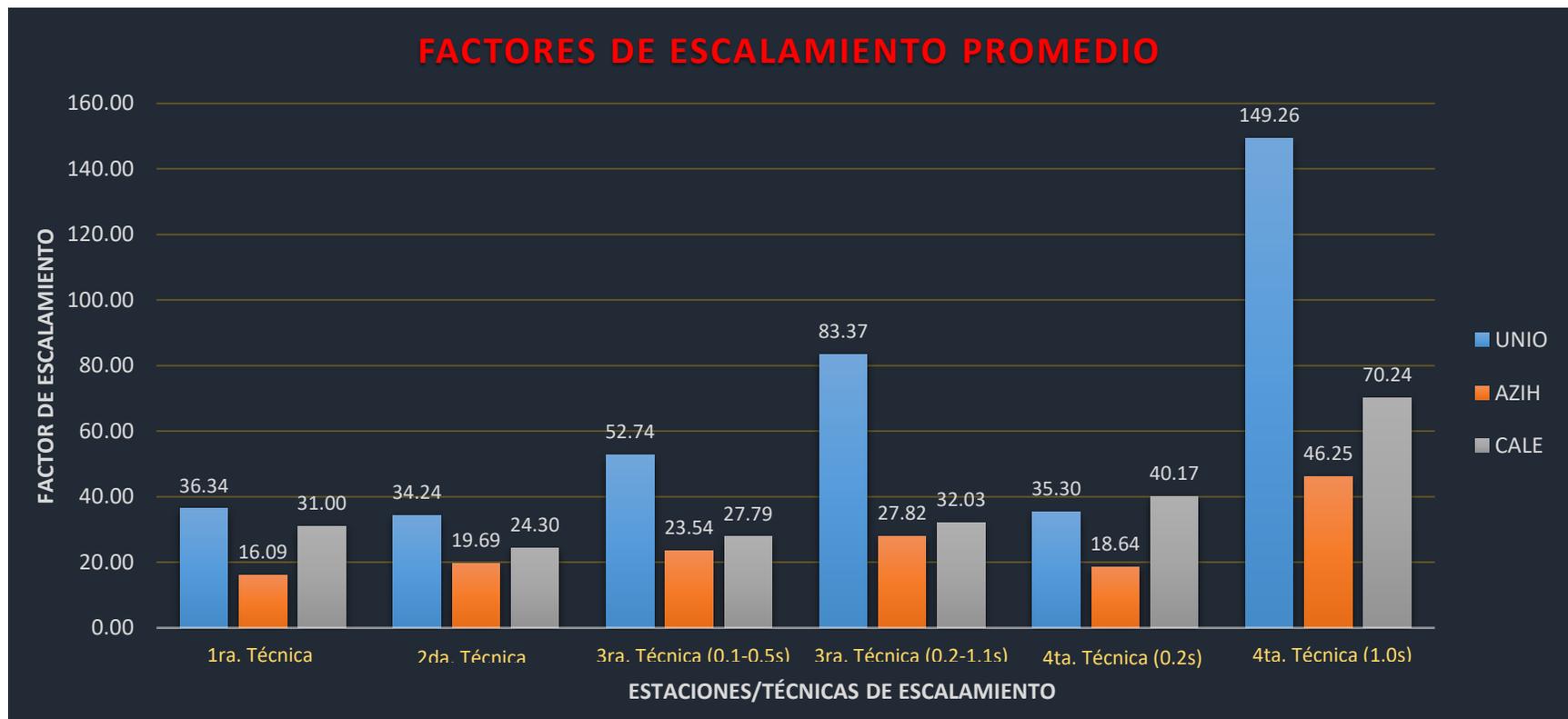


Figura 166. Factores de escalamiento promedio.

## CONCLUSIONES

En la opinión particular del autor de esta investigación y de los resultados obtenidos, la mejor técnica que logra adaptarse al objetivo en la respuesta elástica es la tercera técnica (ASI). Para suelos duros donde la pseudoaceleración y/o aceleración máxima espectral es encontrada generalmente entre 0.1 y 0.4 segundos es la mejor técnica ya que por definición utiliza una intensidad que depende del área en un intervalo de periodos en lugar de un punto o periodo específico que se usa en las demás técnicas.

También es importante señalar que la tercera técnica (ASI) para un intervalo de 0.2 a 1.1 segundos resultó como una de las más efectivas cuando la aceleración espectral máxima de los sismos a escalar no se encuentra entre 0.1 a 0.2 segundos, considerando un tipo de suelo duro.

Los resultados correspondientes a los espectros inelásticos indican que la tercera técnica de escalamiento (ASI) es también la que mejor representa el espectro del sismo de gran magnitud.

Es importante mencionar que la evaluación de las técnicas de escalamiento se basó en la respuesta de sistemas de un grado de libertad a través de sus espectros de respuesta elásticos e inelásticos. Para generalizar las conclusiones, es necesario determinar la vulnerabilidad sísmica de tipologías de estructuras modeladas en tres dimensiones y evaluando diversos estados límite de daños esperados.

## REFERENCIAS

Chopra, A. K., (2012). "Dynamics of structures." Ed. Pearson.

Kramer, S. L. (1996). "Geotechnical earthquake engineering." Ed. Prentice hall.

Jara, J., Lopez, M., Jara, M., Olmos, B., (2014). "Rotation and damage index demands for RC medium-length span bridges." Article, Engineering Structures No.74.

Jara, J., Reynoso, B., Olmos, B., Jara, M., (2015). "Expected seismic performance of irregular medium-span simply supported bridges on soft and hard soils." Article, Engineering structures No.95.

Mosleh, A., Razzagui, Mehran., Jara, J., Varum, H., (2016). "Development of fragility curves for RC bridges subjected to reverse and strike-slip seismic sources." Article, Earthquake and structures, vol. 11, No.3

Avsar, Ö., Yakut, A. (2010) "Evaluation of ground motion intensity measures for the fragility curves of ordinary highway bridges in Turkey." Article, ResearchGate.

Dhakal, P., Singh S., Mander, J., "Effectiveness of earthquake selection and scaling method in New Zealand."

Chan, S., Ruiz, S., Montiel, M. (2005) "Escalamiento de acelerogramas y número mínimo de registros requeridos para el análisis de estructuras." Artículo, Revista de Ingeniería Sísmica No. 72