



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PELIGRO SISMICO EN ZONA DE LAGO
DE LA CIUDAD DE MEXICO: CASO DE
CENTRAL DE ABASTOS
OBSERVACIONES VERSUS CALCULOS**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Esteban Castañeda Macías

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este trabajo tan arduo y lleno de dificultades como es la elaboración de una tesis de licenciatura, donde culmina mi etapa como estudiante para marca el comienzo de mi etapa como profesionista, aprendo que la elaboración de la misma se extiende a la participación de personas e instituciones que sin su aporte hubiese sido imposible este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para reconocerlos y expresarles mis agradecimientos.

A mis padres Irma Macías Martínez y Raúl Castañeda Pacheco por dotarme de una educación ética y su apoyo incondicional durante mi formación como profesionista, deportista y ser humano. Por sus consejos durante cada proyecto emprendido, y por su enorme amor.

A mi hermano Alfonso Castañeda Macías que me guio en la selección de ingeniería para mi formación profesional, por su contribución durante mis estudios y sus enseñanzas de vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi alma máter, por formarme desde mi bachillerato hasta la profesional. Aplaudo los diferentes sistemas educativos por los que pase, la diversidad científica, cultural y deportiva que viví durante mi estancia como estudiante.

A mi tutor el Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez por proponerme este tema de tesis, por su enseñanza y guía en el aspecto metodológico como de calidad profesional. Por su paciencia y responsabilidad mostrada al desarrollo de mi tesis.

Debo agradecer de forma especial y sincera a mi cotutor Dr. Eduardo Reinoso Ángulo por aceptarme como becario dentro del Instituto de Ingeniería para realizar esta tesis. Por darme una visión práctica y concreta de mí tesis, y por sus consejos durante su elaboración.

A mis sinodales los Dres. Martín Cárdenas Soto, Jorge Aguirre González y Gerardo Suárez Reynoso por sus valiosos consejos para finaliza la elaboración de mi tesis y por brindar el enfoque geofísico que necesitaba mi tema de tesis.

A Ketzallina Flores que ha sido mi mayor apoyo durante la carrera y la elaboración de esta tesis, por regalarme las palabras indicadas para no decaer, por sus consejos como colega, por abrir las puertas de su hogar en las noches de desvelo y trabajo continuo, por ser parte de mi vida y por compartir las actividades y momentos que me hacen más feliz.

A todos mis colega de generación 2010 con los que curse materias y salimos a prácticas de campo. En especial a Raymundo, Jonathan, Geovanni, Aideliz, Betty, Ceci M, Javier A., con los que forme muy buenos equipos de trabajo.

RESUMEN

La Central de Abastos forma parte esencial de la infraestructura comercial de la Ciudad de México, en donde se venden diversos productos de origen nacional. La central se encuentra, de acuerdo a la zonificación geotécnica, construida sobre zona de lago. La zona de lago experimenta mayor duración del movimiento y amplificación de la energía durante un sismo respecto a la zona de lomas. La Central de Abastos es un sitio de interés para estimar el peligro sísmico por su valor económico y ubicación.

En esta tesis se utilizaron dos métodos para estimar el peligro sísmico en la Central de Abastos, con la finalidad de comparar las estimaciones entre sí, y corroborar los resultados obtenidos con el Espectros para Diseño Sísmico y el Espectro de Servicio de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS) del 2004.

El primer método es denominado método directo (Método 1), en este se estiman las tasas de excedencia de intensidades sísmicas (peligro sísmico) de forma empírica. Para su aplicación, se usó el amplio catálogo de movimientos fuertes del suelo registrados en la estación acelerométrica CDAO, estación que registro durante un periodo de 25 años.

El segundo método es indirecto (Método 2), en este se estiman las tasas de excedencias de intensidades sísmicas con el producto de dos funciones: (1) el análisis probabilista de peligro sísmico (APPS) estimado en Ciudad Universitaria, y (2) la función de amplitud del sitio, calculada utilizando cociente espectral de respuesta (CER). Para este método se toma Ciudad Universitaria como referencia, idealizándola sobre suelo firme para despreciar los efectos de sitio.

El método 1 es un estimador limitado a sitios instrumentados con un catálogo amplio de sismos, y el método 2 es un estimador para periodos de retorno mayores a los observables. Los resultados de ambos presentaron muy buena aproximación a los espectros de las NTCDS a pesar de sus limitantes, simplicidad de cálculo e incertidumbre presentada, por tal razón estos métodos pueden ser utilizados de forma práctica para la estimación del peligro sísmico en sitio instrumentados de forma prolongada.

Abstract

The “Central de Abastos” is an essential part of the commercial infrastructure of Mexico City because various products of national origin are sold there. According to the geotechnical zoning the supply center is built on a lake. This lake zone experiences greater duration of movement and amplification of energy during an earthquake with respect to the zone of hills. The “Central de Abastos” is a site of interest to estimate seismic hazard due to its economic value and location.

In this thesis two methods were used to estimate the seismic hazard in the “Central de Abastos”, in order to compare the estimates with each other, and corroborate the results obtained with the Spectra for Seismic Design and the Service Spectrum of the Complementary Technical Norms for Earthquake Resistant Design (CTN) of 2004.

The first method is called the direct method (Method 1), in which the rates of exceedance of seismic intensities (seismic hazard) are estimated empirically. For its application, the extensive catalog of strong soil movements were registered in the CDAO accelerometer station, a station that registered during a period of 25 years, was used.

The second method is indirect (Method 2), in which the rates of excesses of seismic intensities are estimated with the product of two functions: (1) probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) estimated at “Ciudad Universitaria”, and (2) Site amplitude function, calculated using Spectral Response Ratio. For this method, “Ciudad Universitaria” is used as a reference, idealizing it on firm ground to disregard the effects of site.

Method 1 is an estimator limited to sites instrumented with a large catalog of earthquakes, and method 2 is an estimator for return periods greater than observables. The results of both presented very good approximations to the CTN spectra in spite of their limitations, simplicity of calculation and uncertainty presented. For that reason these methods can be used as a practical way to estimate seismic hazard in instrumented sites of prolonged form.

ÍNDICE

Agradecimientos

Resumen

1.	Introducción	0
1.1	Justificación	1
1.2	Objetivo general.....	2
1.2.1	Metas	2
2.	Peligro Sísmico	3
2.1	Definición de peligro sísmico	3
2.2	Sismicidad	4
2.2.1	Instrumentación sísmica en México.....	6
2.2.2	Estaciones de medición sísmica	7
2.3	Análisis sísmico y espectros.....	9
2.4	Geología de la cuenca del Valle de México	11
2.5	Ubicación del área de estudio	14
2.5.1	Antecedentes de la construcción en Central de Abastos.....	15
2.6	Métodos utilizados para estimar el peligro sísmico.....	17
2.6.1	Antecedentes	17
2.6.2	Metodologías para calcular el peligro sísmico	18
2.6.3	Método probabilista	19
2.6.4	Método determinista.....	20
2.6.5	Método empírico	20
2.6.1	Método híbrido	21
2.7	Consideraciones al estimar el peligro sísmico.....	21
2.7.1	Caracterización de la fuente sísmica.....	21
2.7.2	Tasas de recurrencia de temblores	23
2.7.2.1	Modelo estándar Gutenberg-Richter (G-R).....	23
2.7.2.2	Modelo truncado Gutenberg-Richter (G-R).....	24
2.7.2.3	Modelo de temblor característico	24
2.7.2.4	Recurrencia de sismos mediante Poisson	25
2.8	Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte o leyes de atenuación	25

2.9	Estimación del espectro de respuesta	26
2.10	Herramientas computacionales para el cálculo de peligro sísmico.....	28
3.	Métodos para estimar el peligro sísmico en CDAO	29
3.1	Método 1: Estimación empírica del peligro sísmico en CDAO.....	29
3.1.1	Procedencia de los datos	29
3.1.2	Tratamiento del catálogo de CDAO.....	29
3.1.3	Aplicación del método empírico	29
3.1.4	Tasas de excedencia de pseudoaceleración para diferentes periodos estructurales	31
3.2	Método 2: Estimación del peligro sísmico en CDAO con referencia en CU	34
3.2.1	Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (APPS)	34
3.2.1.1	Procedimiento para obtener las tasa de excedencia de pseudoaceleración en CU	35
3.2.2	Cocientes Espectrales de Respuesta (CER)	36
3.2.2.1	Procedimiento para calcular los cocientes espectrales de respuesta ...	37
3.2.3	Espectro de Peligro Uniforme (EPU) en CU	42
3.2.4	Aplicación del Método 2: Peligro sísmico en CDAO respecto a CU	43
3.2.5	Espectro para Diseño Sísmico (EDS) en CDAO.....	46
4.	Resultados	48
4.1	Tasas de excedencia en CDAO	48
4.2	Espectros de peligro uniforme en CDAO.....	52
5.	Conclusiones	55
	Referencias	56
	Anexo I	60
	Anexo II	64
	Anexo III.....	77

1. INTRODUCCIÓN

Una de las actividades que enlazan a las ingenierías en sísmica, sismológica y estructural, es la ocurrencia de temblores con cierta intensidad para provocar movimientos fuertes del suelo, con potencial de afectar la infraestructura y causar daños a los contenidos y elementos no estructurales de gran valor; en el peor de los casos estas intensidades sísmicas podrían generar el colapso de estructuras y causar pérdidas humanas.

Gran parte del territorio nacional mexicano se encuentra bajo la influencia de la actividad sísmica, pueden ocurrir desde microsismos $M < 3$, hasta grandes sismos de $M > 8$, un ejemplo es el sismo ocurrido el 19/Sep/1989 de magnitud de momento $M_w=8.1$, causó pérdidas y daño en la Ciudad de México, y su registro en diferentes estaciones de medición detonando investigaciones para entender el comportamiento de las ondas sísmicas en el valle de México y prevenir el riesgo sísmico. Algunas investigaciones han reconocido la probabilidad de que ocurra otro terremoto de igual o mayor magnitud (Rosenblueth y Arciniega, 1991; Suárez, 2007).

Vale la pena hablar brevemente de la historia de la Ciudad de México porque esta área geográfica ha sido afectada de manera reiterada al ocurrir sismos de $M \geq 5$ de fuentes sísmicas alrededor de los 220 (km) (Rosenblueth y Arciniega, 1991). En la ciudad se alojan agentes vulnerables, debido al crecimiento demográfico, concentración de poderes políticos, aporte económico al Producto Interno Bruto (PIB), y geología particular de la cuenca del Valle de México. En consecuencia, existen sectores dentro de la ciudad que se encuentran en riesgo sísmico.

Remontados al desarrollo y modificación del hábitat en los alrededores de la cuenca del Valle de México por asentamientos humanos. En 1324 fue fundada Tenochtitlan por el pueblo mexica, repudiados y relegados por otras culturas, permaneciendo en un pequeño islote inhóspito del señorío tepaneca de Azcapotzalco, subsistieron por medio de pesca, y la recolección, después mediante la construcción de chinampas, terreno de cultivo ganado al lago. A la caída de Azcapotzalco los mexicas pudieron afianzar su desarrollo urbano, construyeron un complejo sistema de acequias, albarradones, calzadas y acueductos para dominar hidráulicamente el medio de la cuenca (Purche, 1990).

A partir de las primeras poblaciones, después de la conquista española en 1521, y hasta nuestros días, soportar la Ciudad de México es cosa de grandes retos. Los temas más relevantes que influyen en el peligro sísmico son: (1) construcción de la ciudad sobre zonas de suelo blando o lago, (2) sobreexplotación de los mantos acuíferos debajo de la ciudad, (3) crecimiento poblacional de forma acelerada por la implementación de modelos económicos centralizados, (4) alta concentración de poderes políticos en la ciudad de México, y (5) cambio de usos del suelo (Purche, 1990).

Una consecuencia inimaginable para los primeros pobladores asentados en la Ciudad de México, es la amplificación del movimiento sísmico por los efectos de sitio (Chávez-García y Montalva, 2014), que en conjunto con el bombeo del agua del subsuelo que genera subsidencia (Santoyo *et al.*, 2005), aumenta la vulnerabilidad de las edificaciones e infraestructura situadas sobre la zona de lago.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los eventos sísmicos son impredecibles e inevitables y su ocurrencia puede causar severos daños en la infraestructura y víctimas debido al movimiento fuerte del terreno. El registro de los eventos sísmicos es muy valioso para el cálculo del peligro sísmico y en la determinación del comportamiento dinámico de las estructuras.

El evento sísmico del 19 de septiembre de 1985 de magnitud $M_w=8.1$, el cual generó daños catastróficos en la Ciudad de México fue registrado por diez estaciones acelerométricas dentro de la ciudad con claves CDAO, SCT1, CDAF, TLHB, TLHD, SWVI, CU01, CUPI, CUMV y TACY, de esta lista, las primeras seis colocadas sobre zona de lago (sito blando) y las restantes sobre zona de lomas (sito firme), las primeras cinco registraron aceleraciones máximas del suelo (A_{max}) mayores a 80 (cm/s^2), las primeras dos tienen un catálogo de registros igual y mayor a 25 años, respectivamente, y la primera tiene el registro de mayor duración con 314.72 (s).

De lo antes mencionado, se escogió estudiar el peligro sísmico en un sitio de interés público, instrumentado sobre suelo blando, con un extenso catálogo de mediciones, y evidencia de efectos de sitio (amplificación en la duración del movimiento sísmico). Tomado esas consideraciones se seleccionó la estación CDAO en la Central de Abastos.

En esta tesis se compara el peligro sísmico en Central de Abastos calculado con dos métodos: (1) Método 1 que es un método directo, que utiliza los datos registrados durante un periodo de $t=25$ (años) en la estación CDAO y (2) Método 2 que es un método indirecto, donde se aplica tanto la metodología de Esteva-Cornell (McGuire, 2007) como un cociente espectral de respuesta (amplitud del movimiento) obtenido entre el sitio blando CDAO y el sitio de referencia CU. Los resultados fueron comparados contra los espectros para diseño sísmico y de servicio del apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 2004 del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general es comparar las curvas de peligro sísmico estimadas para un sitio de zona de lago de la Ciudad de México: Central de Abastos (CDAO).

1.2.1 Metas

- Representar el peligro sísmico en términos de tasa de excedencia de pseudoaceleraciones del suelo ($v(Sa)$), y espectros de peligro uniforme (EPU).
- Determinar la función de amplitud de la respuesta estructural en Central de Abastos (CDAO) respecto al suelo firme de Ciudad Universitaria (CU), aplicando cocientes espectrales de respuesta (CER).
- Comparar el espectro de diseño sísmico (EDS) y el espectro de servicio (ES) del apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño Sísmico (NTCDS, 2004) del Reglamento de Construcción del Distrito Federal 2004 (RCDF-2004) para zona de lago y los EPU en CDAO.

2. PELIGRO SÍSMICO

2.1 DEFINICIÓN DE PELIGRO SÍSMICO

El peligro sísmico hace referencia a una intensidad sísmica potencial que amenaza nuestra sociedad, economía y capital natural, que puede tratarse a escala de comunidad, región o país. El interés de estudiar la amenaza sísmica, radica en la guía de la selección de fuerzas de diseño sísmico en obras civiles, en la actualidad se refleja en el reglamento de construcción (Reinoso, 2016).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres en México (CENAPRED) define el **riesgo sísmico** como, el producto de tres factores: El valor de los **bienes expuestos (C)**, tales como vidas humanas, edificios, carreteras, puertos, tuberías, etc.; **la vulnerabilidad (V)**, que es un indicador de la susceptibilidad a sufrir daño, y **el peligro (P)** que es la probabilidad de que ocurra un sismo de cierta intensidad en un lugar determinado; así de forma simplificada **R=C x V x P**.

De manera formal, el riesgo sísmico se estima mediante el Análisis Probabilista de Riesgo expresado de la siguiente forma:

$$v(p) = \sum_{\text{fuentes}} \int_{M_0}^{M_u} -\frac{d\lambda(M)}{dM} Pr(P > p|M,R)dM \quad (2.1)$$

Donde las cantidades a estimar son las tasa de excedencia de valores de pérdida $v(p)$, $-d\lambda(M)/dM$ representa el peligro sísmico, $Pr (P>p|M,R)dM$ hace referencia a la vulnerabilidad estructural y P es la pérdida, esta ecuación es una extensión del método Esteva-Cornell (1986) para el cálculo de peligro sísmico (Reinoso, 2016).

Udías (1999) divide el riesgo asociado a la ocurrencia de un sísmico en dos partes, la primera como el peligro sísmico, que representa la probabilidad de que ocurra un movimiento del suelo con cierta amplitud en un lugar dado durante un cierto periodo de tiempo t . La segunda, llamada vulnerabilidad, representa la probabilidad de que cierta estructura presente daños contables debido a la acción de un sismo. Ambos incluidos en el cálculo del riesgo (*Ec. 2.1*), separando el aspecto puramente sismológico de la amenaza sísmica de las consideraciones de ingeniería con respecto a la vulnerabilidad de diversas estructuras.

De los párrafos anteriores se concluye que, el **análisis de peligro sísmico** describe el potencial dañino, relacionado con el movimiento del suelo por un sismo. Este análisis se realiza con el propósito de averiguar qué tan frecuente ocurren sismos con cierta intensidad en un sitio. Los resultados del peligro sísmico se muestran en términos de **tasas de excedencia** de intensidades sísmicas, normalmente aceleraciones del suelo.

La **tasa de excedencia** o su inverso **el periodo de retorno** refleja la energía que acumula la estructura de una edificación por el efecto de una o varias fuentes sísmicas, indicando el número de veces que se excede una intensidad sísmica para un periodo de tiempo de interés.

2.2 SISMICIDAD

El fenómeno sísmico es parte intrínseca de la actividad geotectónica, la ocurrencia de este fenómeno se da en estructuras geológicas denominadas fallas, descritas como superficies o bloques de la corteza terrestre que se mueven una respecto a la otra, a menudo a nivel superficial se vuelve visible el rompimiento causado por el movimiento, en las profundidades el movimiento ocurre en la frontera intraplacas.

Existen otros mecanismos que provocan la propagación de ondas sísmicas, por mencionan algunos ejemplos, inducidos de manera natural existen los fenómenos volcánicos, colapso de suelos por presencia de cavidades en el subsuelo, impacto de meteoritos, e inducidos de manera antropogénica está el uso de explosivos, uso de camiones vibradores, fracturación hidráulica, entre otros.

Las principales fuentes sísmicas que afectan la Ciudad de México (figura 1), se han clasificado en cuatro grupos: 1) Temblores locales ($M \leq 5.5$), originados dentro o fuera de la cuenca; 2) Temblores tipo Acambay ($M \leq 7.0$), que se originan en el resto de la placa de Norteamérica; 3) Temblores de profundidad intermedia de falla normal, causados por rompimientos de la placa de Cocos ya subducida, pudiendo llegar hasta $M=6.5$ debajo del Valle de México; y 4) Temblores de subducción ($M \leq 8.2$) (Rosenblueth *et. al.*, 1989; Reinoso, 2007).

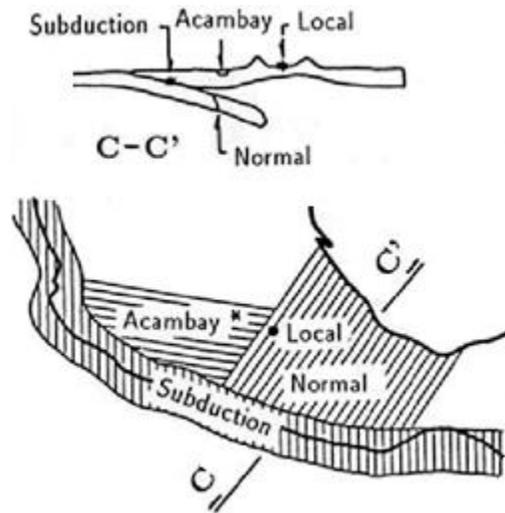


Figura 1. Cuatro tipos de fuentes sísmicas que afecta a la ciudad de México. Copyright 2007 por Reinoso con permiso.

Las ondas sísmicas de baja frecuencia llegan a desplazarse a mayor distancia en forma radial, capaces de recorrer grandes distancias con poca atenuación en su trayectoria, llegando a sitios como la Ciudad de México a distancias epicentrales mayores a 250 km, en particular estos eventos tiene una gran amplificación y duración al atravesar las arcillas del Valle de México (Reinoso, 2007). Los sismos de subducción presentan esa característica, típicamente muy extensos (área de ruptura) cuyo proceso toma lugar en segmentos de las fronteras de las placas a través de cientos de miles de años.

En trabajos de investigación (Esteva, 1970; Zúñiga *et al.*, 1996) se ha dividido la República Mexicana principalmente en tres tipos de regiones sismogénicas: subducción, profundidad intermedia (inslab) y superficiales. Estos tres tipos de fuentes rigen el peligro sísmico en el país (Suárez, 2013).

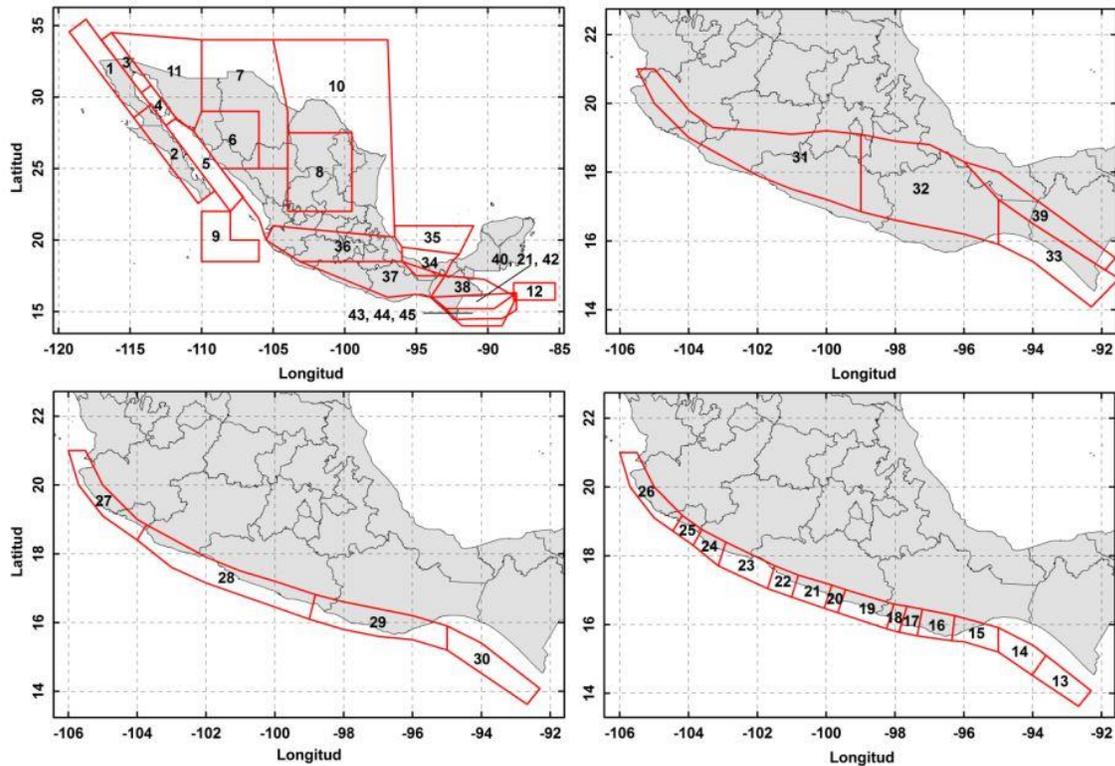


Figura 2. Regiones sismogénicas de la República Mexicana. Fuentes superficiales (esquina superior izquierda), fuentes de profundidad intermedia (esquina superior derecha), y fuentes de subducción (recuadros de debajo de lado izquierdo para $M_w= 4.5$ a 7.2 y lado derecho $M_w > 7$) Copyright 2013 por Suárez.

En la figura 2, se muestran los límites y ubicación de 45 regiones sismogénicas, que ejemplifican tres tipos, en la esquina superior izquierda se muestran fuentes superficiales, esquina superior derecha se muestran fuentes de profundidad intermedia, esquina inferior izquierda se muestran fuentes de subducción para magnitudes (M_w) bajas a moderadas entre 4.5 a 7.2, y esquina inferior derecha fuentes de subducción para magnitudes altas, superiores a $M_w 7$.

2.2.1 Instrumentación sísmica en México

A inicios del siglo XX, México junto con dieciocho países crean la Asociación Sismológica Internacional, el objetivo era mejorar la instrumentación sísmica a nivel mundial, ese fue el comienzo de los primeros observatorios en el país. El Servicio Sismológico Nacional (SSN) fue fundado por decreto del gobierno mexicano en 1910, en la actualidad se cuenta con un aproximado de 102 equipos de registro de temblores organizados en diferentes subredes:

Red de Banda Ancha, Red del Valle de México, Red del Volcán Tacaná y Red Convencional.

En la década de los sesenta se despertó un gran interés por estudiar los eventos sísmicos en respuesta a los graves daños causados a la infraestructura y viviendas. En 1960 fue inaugurada la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería con la colocación de dos acelerógrafos en la ciudad de México; uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria. El acervo cuenta con sismos de magnitud mayor a $M=5$ desde 1964. En la actualidad, se tiene un catálogo de alrededor de 6,400 acelerogramas de tres componentes cuyas magnitudes van de $M=5$ a $M=8.1$ producto de 420 terremotos identificados. En la ciudad de México existen 146 acelerógrafos (figura 3) bajo la operación de diferentes instituciones.

Gracias al libre acceso de la base de datos sísmicos, esfuerzo conjunto del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Servicio Sismológico Nacional de México, y el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), se han tenido avances en materia de investigación científica e ingeniería para la comprensión de los procesos que involucran la ocurrencia de sismos y las zonas más afectadas del país.

2.2.2 Estaciones de medición sísmica

Utilizando sismógrafos y acelerógrafos se puede registrar la respuesta del suelo durante un temblor. Dependiendo del propósito de las mediciones será el tipo de instrumento utilizado. Los sismómetros sirven para el monitoreo y registro continuo o intermitente de la actividad sísmica, puede detectar terremotos de gran magnitud hasta pequeños movimientos sísmicos. Los acelerógrafos también sirven en monitoreo continuo o intermitente. Los acelerógrafos fijos están calibración para grabar a partir de un umbral de aceleración determinado, el periodo de grabación puede abarcar el pre sismo, durante el movimiento fuerte del suelo y el post sismo, registrando esencialmente movimientos fuertes del suelo.

Con fines de diseño estructural para sismo, se utiliza algún parámetro que describa el movimiento del suelo, para tal propósito los acelerómetros son de mayor uso, relacionando la intensidad del movimiento sísmico medida (aceleración) en su componente horizontal con la fuerza lateral que afectara la estructura.

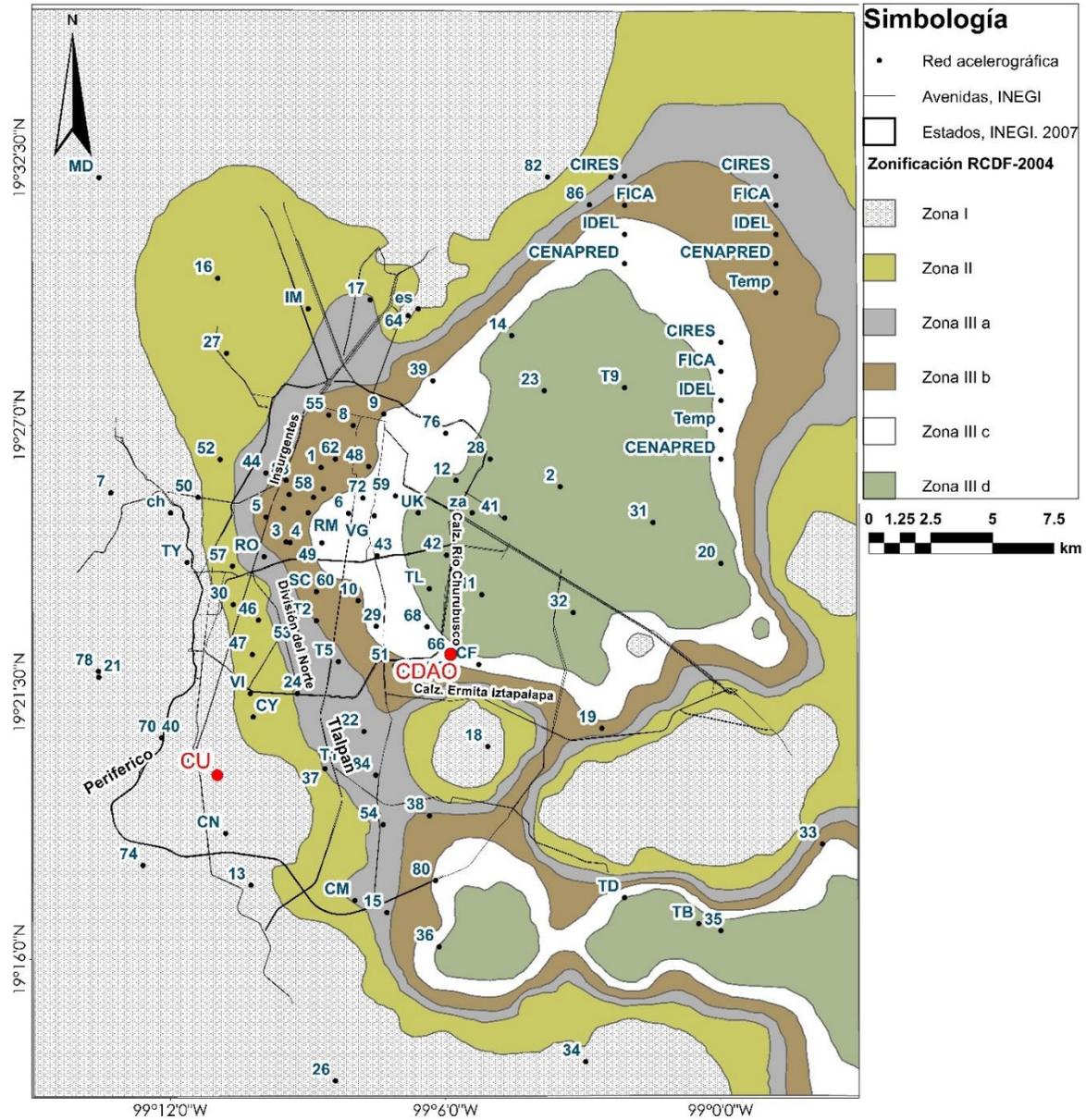


Figura 3. Red principal de estaciones acelerográficas en la Ciudad de México ubicadas respecto a la zonificación geotécnica del artículo 170 del Reglamento de Construcción para el Distrito Federal 2004.

2.3 ANÁLISIS SÍSMICO Y ESPECTROS

El desarrollo industrial y el crecimiento demográfico del mundo moderno hacen necesaria la toma de decisiones sobre la seguridad y confiabilidad de unidades habitacionales, de instalaciones industriales y de la infraestructura crítica de una nación, como puentes, presas y plantas nucleares, entre otras (García y Suárez, 1996).

Un objetivo de la ingeniería sísmica y estructural, en el diseño sísmico, es proporcionar a cada estructura las características que le permitan desarrollar el comportamiento óptimo, comparable con la economía de su diseño, ante los temblores que actúen sobre ella desde que se inicia su construcción hasta que se demuela o abandone, intervalo llamado vida útil (Esteva, 1968).

Para conseguir el objetivo mencionado el ingeniero estructural debe conocer y aplicar los requisitos estipulados en los reglamentos de construcción, y de manera indispensable debe tener claros los conceptos sobre la naturaleza de las acciones sísmicas, y las características de los materiales y de los miembros y sistemas estructurales que definen la respuesta sísmica de los edificios (Bazan y Meli, 1983).

La acumulación de daños que sufre una estructura de características conocidas, por un evento sísmico, puede ligarse directamente a la máxima amplitud de la respuesta estructural. Para un temblor dicha amplitud máxima se tomaría igual a la ordenada del espectro de respuesta del evento y las propiedades (periodo dominante, amortiguamiento y ley carga-deformación) para dicha estructura (Esteva, 1968).

El espectro de respuesta es la base en la mayoría de los reglamentos de diseño sísmico en el mundo para establecer las fuerzas de diseño con las que se proporciona la rigidez y resistencia a las estructuras (Reyes *et. al.*, 2002). La formulación matemática del espectro de respuesta se le atribuye a Biot en 1932 (Trifunac y Todorovska, 2008).

El espectro de respuesta es la representación de manera resumida de las ordenadas máximas (desplazamiento, seudovelocidad, o pseudoaceleración) de todos los posibles osciladores simples de un grado de libertad (1GDL) con un porcentaje de amortiguamiento (ζ), y una fuerza que acciona los sistemas. En la figura 4 se ejemplifica la construcción del espectro de respuestas de desplazamientos, al reproducir el paso de un registro del terreno $\ddot{u}_g(t)$ sobre los osciladores de 1GDL, cada uno asociado a uno periodo estructural T , para

registrar la respuesta del oscilador $u(t)$ del cual se obtendrá la ordenada máxima del movimiento estructural asociada a un T . Una de las desventajas que presentan en este proceso es la pérdida de información respecto a la duración del movimiento del suelo, el número y la distribución de las amplitudes del movimiento (Bolaños y Monroy, 2004).

De forma espectral se suele graficar el valor absoluto del desplazamiento; la pseudovelocidad, que representa una medida de la máxima energía de deformación almacenada en la estructura durante el movimiento; la pseudoaceleración, que permite calcular la fuerza cortante máxima que se produce en la estructura durante un sismo, todas respecto al periodo estructural $T(s)$.

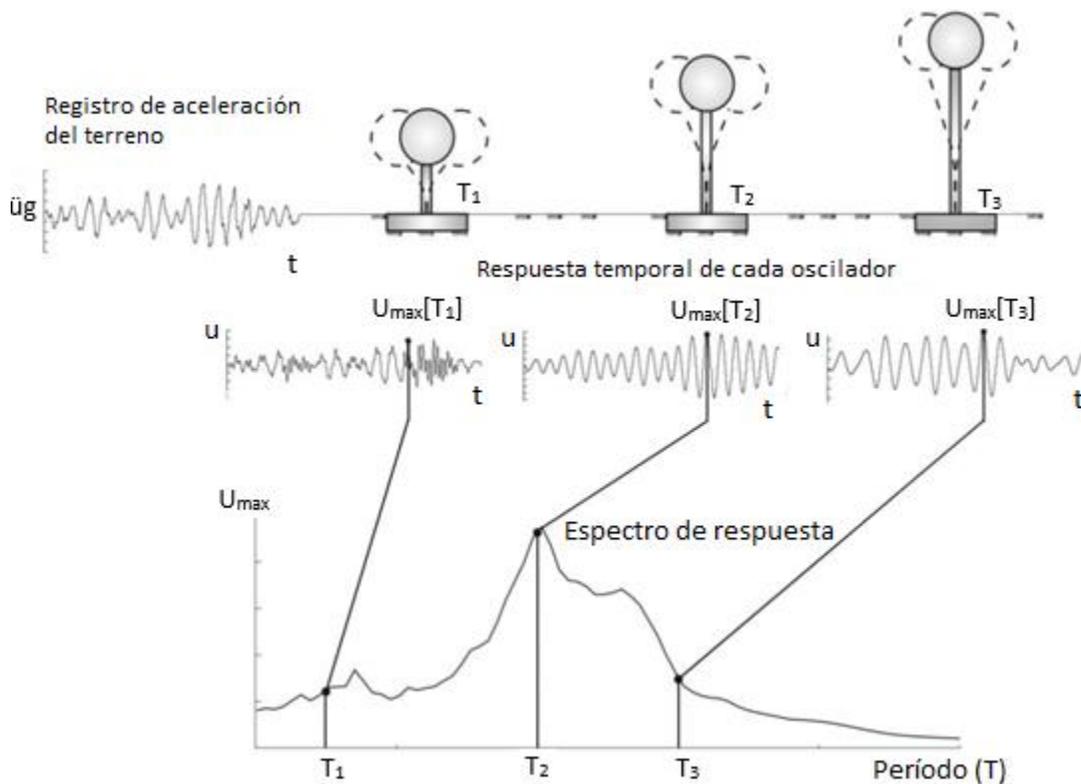


Figura 4. Modelo dinámico para obtener el espectro de respuesta de desplazamientos Modificada de Medrano (2009). Sistemas simples de 1GDL bajo la acción de un registro de aceleración, del que se obtiene una respuesta temporal del oscilador, para tomar la ordenada máxima de cada registro correspondiente a un periodo estructural, y poder construir el espectro de respuesta.

De las curva de peligro sísmico se puede representar una curva cuyas ordenadas están asociadas a la misma tasa de excedencia o periodo de retorno, en función del periodo (o frecuencia) estructural, y un coeficiente de amortiguamiento crítico (normalmente del

5%). A esta curva se le denomina **espectro de peligro uniforme (EPU)**, y representa la envolvente de todas las fuentes sísmicas que contribuyen al sitio asociada a un periodo de retorno (T_R).

Previo a la realización de un proyecto constructivo es indispensable contar con la mayor cantidad de información del lugar de cimentación, para ello se realizan estudios de exploración geofísica y geotécnica, que ayudaran a definir la competencia del suelo donde se desplantara la estructural, en general se busca definir los parámetros sísmicos como la frecuencia fundamental del sitio, amplificación dinámica en estratos de arcilla, estimación de modelos de velocidad de onda de corte, y las propiedades mecánicas del suelo, entre otros.

La Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo 2004 (NTCDS-2004), y el Reglamento de Construcción para el Distrito Federal 2004 (RCDF-2004), describen los lineamientos a considerar para un proyecto constructivo que soportará la ocurrencia de eventos sísmicos. En ellos se puede encontrar el mapa de zonificación geotécnica, mapa de iso-períodos naturales y los espectros para diseño sísmico. Los espectros para diseño sísmico toman en cuenta todas las fuentes que contribuyen al peligro sísmico y las condiciones geotécnicas, para envolver el espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de $T_R = 125$ años.

2.4 GEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

La Ciudad de México se encuentra al sureste de la cuenca del Valle de México, cuenca delimitada por el Eje Volcánico Transversal ubicado en la parte central de la República Mexicana. Pasaron un poco más de cien millones de años para conjugar la configuración desde el origen de la cuenca del Valle de México hasta nuestras fechas (Purche, 1990). La formación de la cuenca es el resultado de un conjunto de procesos tectónicos, de origen volcánico, régimen climático y sedimentación.

Mediante una serie de trabajos de investigación publicados a partir de la mitad del siglo XX, se ha podido entender mejor los procesos geológicos que causaron la evolución de la cuenca. La Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1989), realizo un compendio de trabajos para determinar la génesis de la Cuenca de México, donde:

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera proponen un modelo estratigráfico-estructural-petrogenético que abarca del Cretácico al Cuaternario, obteniendo correlaciones estratigráficas, mapas litoestratigráficos y secciones geológicas; mediante análisis estratigráfico-estructural Aguayo-Camargo y colaboradores definen tres sectores de riesgo sísmico en la cuenca del Valle de México, atribuido a la manifestación de altos estructurales y depresiones locales a diferentes niveles estratigráficos, originadas por la influencia regional de fallas y fracturas conjugadas en direcciones SW-NE y SE-NW que afectan toda la República Mexicana; Peralta y Fabi describe las características microestructurales de los materiales del suelo, particularmente la Formación Arcillosa Superior y la capa superficial más dura, usando análisis fisicoquímicos determina el origen de algunas propiedades mecánicas útiles para describir la deformabilidad, retención de agua, consolidación, efectos de amplificación de ondas sísmica y procesos de falla microestructural; Mooser y Montiel analizan líneas de reflexión sísmica para reconocer el fondo del relleno Post-Chichinautzin de la cuenca; Morales y otros, utilizaron un conjunto de técnicas geofísicas en la Zona Federal del Ex-lago de Texcoco aportando información representada en mayor medida por perfiles geoelectrónicos, y mapas de anomalías gravimétricas y magnéticas.

El evento más importantes que configuro la cuenca del Valle de México fue la obstrucción definitiva del desagüe por la intensa actividad volcánica que edifico la Sierra Chichinautzin y genero estructuras sólidas, quedando una cuenca endorreica con ambiente lacustre que favoreció el depósito de sedimentos que dio un material que integra una alta proporción de agua, estratos más superficiales, Mooser (2000) resume la geología y geomorfología de la cuenca del Valle de México en vista tridimensional (figura 5).

Considerando que los primeros 150 (m) superficiales son los más relevantes para determinar los efectos más importantes de amplificación (capa arcillosa) (Reinoso, 2007), y las estructuras volcánicas funcionan como focos de reflexión y refracción de las ondas sísmicas de periodos largos, en la ocurrencia de un sismo se genera un gran flujo de energía dentro del Valle que al incidir en los estratos sedimentarios más superficiales tiene un comportamiento como gel (Peralta y Fabi, 1989).

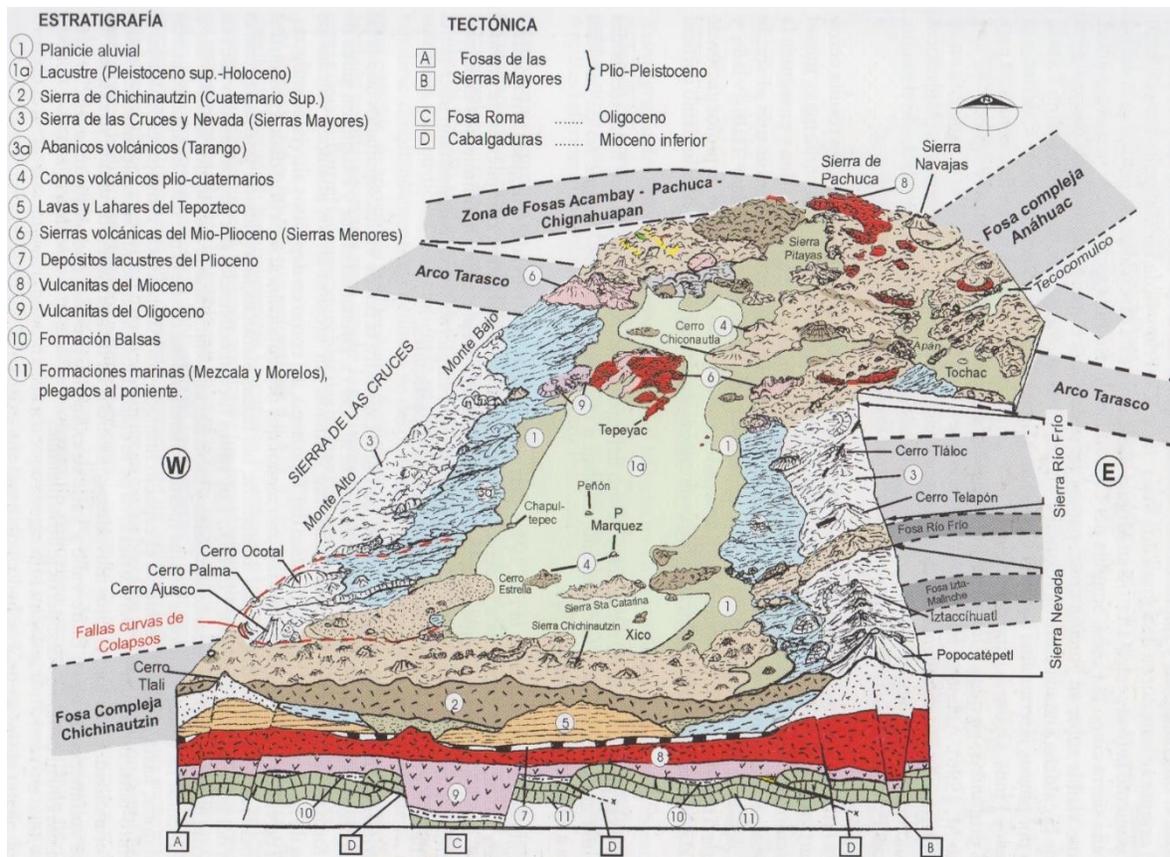


Figura 5. Geología y morfología de la Cuenca, creación de Mooser (2000) tomada de (Santoyo *et. al.*, 2005).

2.5 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La estación acelerográfica identificada con el nombre Central de Abastos Oficinas con clave CDAO, se localizó en el punto con coordenadas 19.37 latitud norte y -99.09 longitud oeste a una altitud de 2240 metros sobre el nivel medio del mar sobre suelo catalogado como arcilla. En la figura 6 se ubican en un mapa local la estación CDAO y la estación de referencia CU separadas entre ellas 10.65 (km), y en vista regional se muestra la red acelerométrica del Valle de México. CDAO y CU forman parte de la red de instrumentos monitoreados por el Instituto de Ingeniería en la UNAM. CDAO inicia registros en 1985 y es desinstalada en 2010.

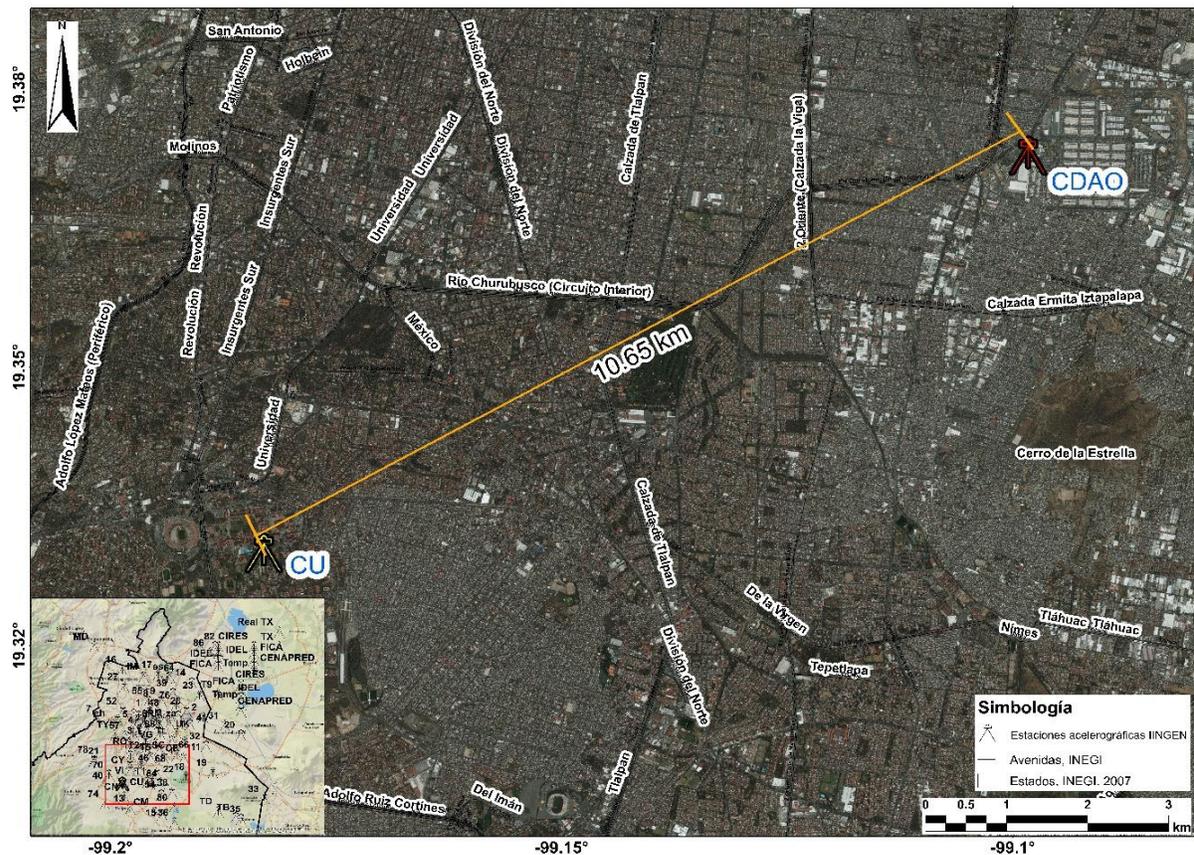


Figura 6. Ubicación de las estaciones acelerométricas Central de Abastos Oficinas (CDAO) en rojo y Ciudad Universitaria (CU) en amarillo a una distancia de 10.6 (km) de separación.

El movimiento sísmico del suelo de un punto a otro a metros de distancia es sensible al cambio de las propiedades litológicas de los estratos en el subsuelo. Los resultados de estudio para ambos métodos, en un sentido geoespacial, se otorgan a la contribución de los estratos debajo de la estación CDAO. En el caso del método 2, la estación CU se toma como referencia de estación base (se desprecia efectos de sitio). CU y CDAO se ubican en dos zonas geotectónicas distintas en el mapa de zonificación geotécnica del RCDF-2004 (figura 3), CDAO se localiza en la zona IIIc (zona de lago) y CU en la zona I (zona de loma). Para este último método la contribución de los estratos del subsuelo se extiende de CU a CDAO.

2.5.1 Antecedentes de la construcción en Central de Abastos

Heredando un legado de comercio histórico en la cuenca del Valle de México, la construcción de la Central de Abastos fue declarada de utilidad pública para la ciudad de México el 17 de abril de 1970, siendo hasta marzo de 1981 el inicio de los trabajos de construcción. El diseño del proyecto quedó a cargo del arquitecto Abraham Zabudovsky, que propuso un diseño hexagonal, determinando con precisión el número de bodegas a construirse y su superficie.

El terreno donde se edificó la Central, conocido como “Chinampería”, fue una zona elevada con lodo y material orgánico a partir de un suelo húmedo y cenagoso antiguamente cubierto por el lago de Texcoco (figura 7), ubicada en la delegación Iztapalapa con una extensión aproximada de 324 hectáreas (Central de Abastos).

Los estudios de mecánica de suelos recomendaron cimentar a base de cajones de compensación de cargas y, en la zona norte respaldar éstos con pilotes de fricción. La cimentación fue de dos metros de profundidad, tendiendo una plancha de concreto, y se dispuso de un sistema de gatos hidráulicos capaces de amortiguar los efectos de cualquier movimiento sísmico.



Figura 7. Antiguo Valle de México en 1519. Ubicación aproximada de la Central de Abastos (CD) (estrella roja) en el antiguo lago de Texcoco, imagen digital tomada desde el Cerro de la Estrella. Modificado de Flisinger (2005).

2.6 MÉTODOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR EL PELIGRO SÍSMICO

2.6.1 Antecedentes

Diferentes escuelas en los Estados Unidos de América y el mundo, con fines de diseño sísmico desarrollaron algoritmos para calcular el peligro sísmico. En *Stanford University* aplicaron sus modelos en Centro América, en *Massachusetts Institute of Technology* aplicaron sus modelos en el oriente de E.U.A. en *University of Illinois* elaboraron modelos más complejos de ruptura de falla, en la Universidad Nacional Autónoma de México utilizaron métodos Bayesianos como el de Esteva (1970) que propuso el primer mapa de riesgo sísmico nacional a nivel mundial. En Europa oriental un grupo de Moscú desarrollo mapas históricos de intensidades máximas desarrollando con detalle modelos de peligro y riesgo sísmico, en Europa occidental diferentes grupos desarrollaron estadística con valores extremos (Sousa *et. al.*, 2008).

En los años noventa, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) realizo el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN), reunió alrededor de quinientos científicos de diversas partes del mundo, y organizaciones como *the European and the International Association for Earthquake Engineering (EAEE, IAEE)*, *the Associations of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI)*, *the European Seismological Commission (ESC)*, etc., jugaron un rol muy importante para la evaluación del peligro sísmico (Olivera y Campos-Costa, 2008). Planteando proyectos enfocados a reducir el impacto de desastres, entre estos se evaluó el peligro sísmico a nivel mundial con la creación en 1999 del Mapa Global de Peligro Sísmico, el cual representa la aceleración máxima del suelo en estratos rocoso (ONU, 1999).

El Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (APPS) se convirtió en el método de mayor uso para obtener el peligro sísmico para el diseño sísmico de instalaciones de ingeniería, desde edificios comunes diseñados de acuerdo con los códigos de construcción sismo-resistentes hasta instalaciones críticas como las centrales eléctricas nucleares (McGuire, 2007), aunque también se utiliza para aspectos públicos y de políticas financieras relacionadas con la mitigación de la amenaza sísmica. Basados en el APPS, se hacen mapas nacionales de peligro, siendo estos la base para reglamentos y códigos de diseño, así como estudios particulares de sitio (Oliviera y Campos-Costa, 2008).

En regiones urbanizadas se ha visto la necesidad de simular efectos sísmicos generando eventos artificiales para el cálculo del peligro sísmico, lo cual desarrollo el concepto de escenario sísmico, la idea se amplió dejando atrás el concepto de desagregación sísmica. También, se consideró la probabilidad conjunta de más de una variable, como la aceleración máxima del suelo y la duración (Sousa *et. al.*, 2008). También, se ha optado por el uso de método de exploración no destructivos como la medición de vibración ambiental para el cálculo del periodo natural del suelo y efectos de sitio (Santoyo-Villa *et. al.*, 2005).

En la actualidad, se puede representar bases de datos de amenaza y riesgo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), brindando disponibilidad de datos, actualización de información, y despliegue de resultados finales del peligro sísmico de zonas urbanas (Reinoso, 2016).

2.6.2 Metodologías para calcular el peligro sísmico

En vista a la diversidad de ideas y acciones científicas, las características particulares del subsuelo y sismogénesis alrededor del mundo, es de esperarse que existan diferentes metodologías para determinar el peligro sísmico en uno o varios sitios. Para determinar el peligro de un sitio, usualmente en términos de movimiento del terreno, se utiliza ecuaciones de predicción del movimiento, aceleraciones pico, velocidad pico y ordenadas del espectro de respuesta.

Esencialmente hay dos tipos de incertidumbres en los métodos que se utilizan para el cálculo del peligro sísmico, a) incertidumbre inherente, que es parte del proceso y no puede ser reducido sin mayores avances tecnológicos, e b) incertidumbre epistémica, que puede verse reducida con una mejor calidad de adquisición de datos.

Para analizar una amenaza sísmica, de acuerdo con Reinoso (2016) se debe cumplir con cuatro requisitos mínimos, aunque se puede considerar un procedimiento de análisis más complejo (DOF, 2012), los requisitos mínimos a considerar son:

- 1) Descripción exhaustiva de todas las maneras en que podría ocurrir un evento dañino.
- 2) Determinación de la frecuencia de ocurrencia de cada evento.

- 3) Caracterización de la intensidad con alguna medida ingenierilmente relevante, susceptible de ser relacionada con los daños.
- 4) Inclusión de incertidumbres.

2.6.3 Método probabilista

El método probabilista utiliza una distribución estadística para representar la actividad sísmica de una región con base a la ocurrencia de sismos en el pasado. El resultado determina la probabilidad de ocurrencia, de un cierto nivel de movimiento del suelo o intensidad sísmica, durante un intervalo de tiempo. Permitiendo asignar zonas sismogénicas y agrupar los sismos a un mismo origen tectónico (Udias, 1999).

El Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (APPS) asume la ocurrencia de tiempo de Poisson, donde la sismicidad en un sitio en el futuro será la misma que en el pasado, el peligro sísmico es dado por las amplitudes máximas del movimiento del suelo. Siendo esencial contar con un catálogo de sismos del pasado.

El establecimiento del APPS inicio con la colaboración de Esteva y Cornell en 1960 al juntar sus trabajos teóricos para el establecimiento del método en 1968 (McGuire, 2007). Este análisis involucra tres pasos, representados en la ecuación (2.2), y resumidos como sigue:

1. Especificar el peligro sísmico de la fuente del modelo, representada por la tasa de excedencia de magnitudes de cada fuente.
2. Especificar la ecuación de predicción del movimiento de terreno para el sitio de estudio.
3. Calcular la probabilidad de excedencia de intensidades, al integrar todas las posibles fuentes sísmicas que contribuyen al peligro del sitio.

$$v(a) = \frac{1}{V} \int \int_{M_o}^{M_u} \left(-\frac{d\lambda(M)}{dM} \right) P(A > a|M, R(x, y, z)) dM dV \quad (2.2)$$

Donde $v(a)$ es la tasa de excedencia de aceleraciones, M_o y M_u son la magnitud menor y mayor, respectivamente, generadas por las fuentes sísmicas consideradas en el análisis, $P(A > a|M, R(x, y, z))$ es la probabilidad de que la aceleración máxima del suelo sea

excedida e incluye la ecuación de predicción del movimiento fuerte del suelo, M es la magnitud de sismo, V es el volumen sobre el cual se integra y $d\lambda(M)$ es la tasa de excedencia de magnitudes.

2.6.4 Método determinista

El Análisis Determinista de Peligro Sísmico (ADPS) se basa en el desarrollo de un escenario sísmico particular del movimiento sísmico del suelo (evento de control). De forma que el análisis consta de cuatro pasos (DOF, 2012):

1. Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas, incluye información de la geometría de las fuentes y potencial sísmico.
2. Seleccionar el parámetro distancia de la fuente al sitio para cada zona. Generalmente se selecciona la menor distancia existente entre la fuente y el lugar de análisis.
3. Selección de un sismo de control, el cual represente el potencial sísmico de la fuente en consideración, en términos de la intensidad en el sitio.
4. Selección de la ecuación de predicción del movimiento que permitirán caracterizar por completo la amenaza.

Este análisis puede estimar la mayor intensidad que afectara una estructura de interés. Sin embargo, no toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia, si es probable que ocurra o no en el sitio, que tan probable es que ocurra en un período determinado, ni cuál es el grado de incertidumbre asociado a las variables involucradas. Por lo tanto, no se emplea ni se recomienda como herramienta única del análisis de la amenaza sísmica (DOF, 2012).

2.6.5 Método empírico

El peligro sísmico se estima de forma directa utilizando la definición de la tasa de excedencia de intensidades sísmicas. Para su cálculo es necesario contar con registros históricos de sismos, lo que hace que este método raramente puede ser realizado y solo sea posible en sitios instrumentados.

Este método se realiza contando el número de veces que las intensidades (parámetro que describe el movimiento horizontal del suelo) de los eventos registrados en el sitio han excedido un intervalo de intensidades de interés en un periodo de tiempo observado, años de medición.

2.6.1 Método híbrido

Los métodos híbridos consisten en simular un catálogo de sismos de acuerdo con ciertas leyes preestablecidas que reproducen los procesos históricos e instrumentales de la región. Una de las ventajas de este método, es la consideración de un conjunto de series en lugar de uno solo, y puede incorporar cualquier tipo de información de la tectónica, geología, o la naturaleza de sismología (Sousa *et al.*, 2008).

2.7 CONSIDERACIONES AL ESTIMAR EL PELIGRO SÍSMICO

La selección de los parámetros del movimiento del suelo (valores máximos, tiempos históricos o espectros de respuesta) para simplificar un análisis deben ser guiados por el entendimiento y conocimiento de varios factores que afectan el peligro sísmico. Adquirir registros sísmicos históricos mediante la colocación de estaciones distribuidas espacialmente en una región se vuelve esencial para el reconocimiento de fuentes sísmicas y conocer las características del comportamiento del suelo al paso de las ondas sísmicas. A continuación, se menciona las consideraciones que se toman en cuenta para estimar el peligro sísmico en un sitio en particular.

2.7.1 Caracterización de la fuente sísmica

Para realizar un modelo de amenaza sísmica es esencial describir y caracterizar las fuentes sismogénicas principales, esto se realiza a partir de información geológica y neotectónica. Una clasificación de las fuentes sísmicas fue elaborada por Cornell (1968), en esta tesis se mencionan brevemente los tipos y las consideraciones tomadas para definir la geometría de la fuente, y en Suárez (2013) se puede ver el cálculo de la función de densidad de probabilidad de la distancia de la fuente al sitio para cada uno de los tipos.

Fuente sísmica como un punto geométrico, representa el foco o hipocentro a profundidad, o el epicentro en la superficie terrestre. Útil cuando fallas es de área pequeña, la fuente está alejada a gran distancia del sitio, cuando existe alta concentración de sismos en un área pequeña o por la falta registros sísmicos. El modelo asume la propagación del frente de onda desde la fuente en forma de esferas concéntricas y viajando en un medio homogéneo de la corteza. Modelo valido cuando las ondas de cuerpo dominan el movimiento del suelo. Este modelo no considera los efectos de la falla o dirección de la ruptura y propagación cercana a la zona de falla.

Fuentes sísmica como línea, cuando la profundidad de un plano de falla es lo suficientemente pequeña de tal manera que la profundidad a la que ocurren los sismos dentro de la falla puede ser simplificada, con una mínima pérdida de precisión, mediante la aproximación de la fuente plana como una fuente lineal.

Fuente sísmica como un área plana, se considera así cuando se observa una gran dispersión de epicentros sísmicos originados con características similares (mecanismos focales y patrones de fallamiento) en una zona determinada. Los cálculos realizados asumen que la propagación de la energía es radiada en trenes de ondas uniformes en todas direcciones con un coeficiente de amortiguamiento.

2.7.2 Tasas de recurrencia de temblores

Definida la geometría de la fuente interesa conocer el tamaño y ocurrencia de los sismos, los sismos ocurren en forma aleatoria respecto al espacio y tiempo, distribuidos de alguna manera agrupada, lo que demuestra un patrón de energía liberada (Sousa et. al., 2008). En zonas con alta concentración de energía, las características de la ocurrencia se pueden dar en periodos cortos de tiempo (décadas o centenarios), en cambio en regiones de baja o muy baja energía, requiere de periodos muy largos de observación (varios de miles de años o cientos de miles de años o más) para completar un proceso que represente los eventos.

La energía transmitida mediante ondas elásticas desde la fuente a un sitio, la cual representa un peligro potencial, puede ser estimada. Para determinar la sismicidad se requiere información de los catálogos sísmicos ocurridos en la geometría definida, y toda la posible información paleosismología de la fuente. Una hipótesis importante de la cual parten los estudios para definir la sismicidad de una fuente es la relación de recurrencia sísmica (magnitud vs frecuencia) obtenidas a partir de observaciones del pasado, correcta para predecir la sismicidad futura de la fuente (Suárez, 2013).

A continuación, se mencionan las tasas de recurrencia de mayor uso:

2.7.2.1 Modelo estándar Gutenberg-Richter (G-R)

En este modelo se divide el número de excedencias de cada magnitud por la longitud del periodo de tiempo, para definir una tasa de excedencia media anual λ_m de un sismo de magnitud m . Su recíproco (T_R) representa los sismos que exceden esa magnitud. La relación lineal de dibujar el logaritmo de la tasa anual de excedencia contra magnitud sísmica se expresa de la siguiente manera:

$$\log \lambda_m = a - bm \quad (2.3)$$

Donde el coeficiente a representa el logaritmo del número total de sismos que tiene magnitud mayor o igual a cero y el coeficiente b describe la probabilidad relativa de ocurrencia de sismos grandes o pequeños. Ahora se sabe que la tasa media anual de excedencia de sismos pequeños, es más grande que para sismos mayores como se verá más tarde en este trabajo.

2.7.2.2 Modelo truncado Gutenberg-Richter (G-R)

Este modelo es una adecuación del modelo estándar G-R, expresado de forma exponencial:

$$\lambda_m = 10^{a-bm} = e^{a-\beta m} \quad (2.4)$$

Donde $a=\ln(10)a$ y $\beta=\ln(10)b$. Las magnitudes tiene una distribución exponencial, cubriendo un rango desde $+\infty$ hasta $-\infty$. Con propósitos de ingeniería se realiza la limitación las magnitudes a considera, tomando como m_0 la magnitud inferior capaz de producir daños significativos, y m_u la magnitud mayor que es capaz de generar la fuente. La inclusión de los límites al modelo estándar G-R da lugar al modelo truncado G-R, cuya tasa de excedencia puede ser calculada con la expresión:

$$\lambda_m = v \times \frac{e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_u-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}} \quad (2.5)$$

Donde λ_m es la tasa anual de excedencia de la magnitud m ; m_0 es la magnitud mínima relevante; m_u es la magnitud máxima que puede generarse en la fuente; v y β son parámetros que define la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas.

2.7.2.3 Modelo de temblor característico

Surgió por el cuestionamiento de utilizar la ley de Gutenberg-Richter y sus variantes para estimar tasa de excedencia de magnitudes para sismos grandes, en Singh *et al.* (1983) concluyen que no se puede predecir la tasa de excedencia de sismos grandes (zona de subducción) con el modelo de G-R, demostrando que cuando se extrapolan las tasa de excedencia de sismos pequeños para predecir la de sismos grandes, estos últimos son sobreestimados.

Estudios paleosísmicos indican que puntos individuales sobre fallas y segmentos de fallas tienden a moverse aproximadamente la misma distancia en cada sismo, sugiriendo que fallas individuales generan sismos de similar tamaño, esta similitud se conoce como sismos característico, sobre o cerca de su magnitud máxima (Gama-García *et al.*, 2009). Los sismos de gran magnitud (7.0-8.4) generados por fuentes de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Colima, Jalisco y Michoacán (Suárez, 2013) no presentan distribución

exponencial, para ello se asume una distribución Gaussiana de magnitudes para la zona de subducción (Ordaz y Reyes, 1999), dando la tasa de excedencias de magnitudes $M > 7$ de la siguiente forma:

$$\lambda_m = \lambda(7) \left[1 - \Phi \left(\frac{M - EM}{\sigma_M} \right) \right] \quad (2.6)$$

Donde $\lambda(7)$ es la tasa de excedencia para sismos con $M > 7$, EM y σ_M son la media y la desviación estándar de las magnitudes, respectivamente, y $\Phi(.)$ es la función de distribución normal acumulada.

2.7.2.4 Recurrencia de sismos mediante Poisson

La recurrencia de sismos de Poisson asume la ocurrencia aleatoria de sismos, sin considerar el tiempo, la magnitud y la localización del evento o la acumulación de los eventos en una sola fuente sísmica, siendo apropiada para regiones con diversas fuentes sísmicas. También, se asume que dada la ocurrencia de un sismo con una magnitud M , podrá repetirse un sismo con la misma magnitud M en el futuro (Srbulov, 2008).

2.8 ECUACIONES DE PREDICCIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE O LEYES DE ATENUACIÓN

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber que intensidad se presentaría en el sitio en cuestión si en la i -ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada. A las relaciones entre magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad se le conoce como ecuaciones de predicción del movimiento fuerte (leyes de atenuación).

Es común utilizar las leyes de atenuación espectrales, es decir que toman en cuenta el hecho de que la atenuación es diferente para ondas de distinta frecuencia, por lo que se tiene parámetros de atenuación específicos para cada periodo de vibración considerado. Ejemplos de leyes utilizadas para calcular el espectro de respuesta dadas una magnitud y una distancia son:

1. Temblores costeros. Para la aceleración máxima del terreno provocada por temblores generados en las costas del Pacífico.

2. Temblores de profundidad intermedia. Se trata de un modelo teórico fuente-trayecto, con parámetros ajustados para reproducir los pocos registros de aceleración disponibles para este tipo de sismos.
3. Temblores superficiales. Temblores que ocurren en fallas cercanas al sitio del proyecto.

Existen incertidumbres que causan problemas en el proceso de ajuste del modelo para obtener una ecuación de predicción del movimiento, entre ellas esta: 1) la forma de la ecuación, 2) el tipo de ajuste, 3) el algoritmo numérico, 4) el uso de valores medios y la consideración por separado de un error general estandarizado, y 5) el uso de percentiles o la supresión del error estándar. Para la Ciudad de México se han desarrollado ecuaciones utilizando regresión Bayesiana para predecir el espectro de respuesta en diferentes tipos de suelo (Jaimes *et. al.*, 2015).

2.9 ESTIMACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

El espectro de repuesta (ER) es una pieza clave para estimar el comportamiento dinámico de una estructura civil en un sitio de interés ante los efectos de un sismo. La construcción del ER se realiza tomando la respuesta máxima de las intensidades sísmicas registradas por sistemas de 1GDL con amortiguamiento (comúnmente del 5%), excitados por una fuerza externa en sentido horizontal (acelerogramas), y dibujados en forma gráfica en función del periodo estructural (T)

El espectro de repuesta se estima de forma determinista con la ecuación del movimiento. En esta tesis, se usó el programa Degtra A4 para estimar el ER de cada evento sísmico (ilustración 1 anexo II y tabla C anexo I), este programa resuelve la ecuación del movimiento con el método paso a paso y el sistema de ecuaciones de 8 constantes mostrado en el anexo III apéndice B (Chopra, 2014).

Existen diferentes métodos para estimar el espectro de repuesta. Para temblores futuros en terreno firme, terreno blando, o considerando efectos de sitio en lugares instrumentados (Reyes, 1999; Reyes *et al.*, 2002; Jaimes *et al.* 2006; Contreras, 2001). De forma resumida se tiene:

1. **Escalar una forma espectral normalizada**, esta se realiza al promediar varios espectros de distintos sismos. Este método desprecia la variación del contenido de frecuencias del movimiento respecto a cambios en distancia y magnitud, ya que al escalar la forma espectral normalizada ésta permanece constante. En caso de corresponder la forma espectral normalizada a un intervalo de distancia y magnitudes congruentes con los espectros de repuesta, la amplitud del error se distribuye disminuyendo la incertidumbre. Funciona bien en lugares donde el efecto de sitio domina la forma del espectro de repuesta, permaneciendo constante ante cualquier sismo.

La regresión bayesiana es una aproximación que combina datos observados con los resultados de los modelos. Un sismo se define por su magnitud y distancia focal, con esos parámetros es posible estimar el espectro de respuesta de aceleraciones por medio de regresiones semiempíricas. Los métodos basados en regresiones bayesianas para la Ciudad de México, descritos por Jaimes *et al.*, (2006) son:

2. **Regresión del espectro de respuesta observado**; se construye con una ley de atenuación espectral para estimar el espectro de aceleración; se computariza a través de un método de regresión, donde se obtiene una serie de coeficientes para cada periodo estructural.

3. **Regresión del espectro de amplitud de Fourier y uso de teoría de vibraciones aleatorias para estimar el espectro de respuesta**; se computariza la relación de la atenuación del espectro de amplitud de Fourier para estimar más tarde el espectro de respuestas utilizando teoría de vibraciones aleatorias. Utilizado para predecir el espectro de respuesta en sitios con grandes efectos de sitio y poca o nula información acelerométrica.

Los siguientes métodos, también de regresión bayesiana, se basan en estimar el espectro de respuesta de un sitio de zona de lago utilizando una estación de referencia en terreno firme.

4. **Regresión del espectro de respuesta observado en una estación de referencia de terreno firme multiplicado por el cociente espectral de respuesta**; requiere de computarizar el cociente espectral de respuesta, estos cocientes no tiene un significado físico, ellos logran representar la amplificación en el dominio del espectro de respuesta (Rosenblueth y Arciniega, 1992; Reyes, 1999; Jaimes *et al.*, 2006). Este procedimiento se explica con detalle más adelante para el caso de CDAO respecto a CU.

5. Regresión del espectro de amplitudes de Fourier en una estación de terreno firme, función empírica de transferencia y teoría de vibraciones aleatorias.

Consiste en computariza el espectro de amplitud de Fourier del sitio de lago como el producto del espectro de amplitudes de Fourier de la estación de referencia y la función empírica de transferencia de Fourier (Reinoso y Ordaz, 1999) empleando teoría de vibraciones aleatorias y la duración del movimiento fuerte para obtener el espectro de respuesta.

La ventaja de este método es que cada paso tiene un significado físico y pueden ser analizados y mejorados por separado (Jaimes *et al.* 2006).

2.10 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL CÁLCULO DE PELIGRO SÍSMICO

Las herramientas computacionales para el cálculo del peligro sísmico son utilizadas en mayor medida para el diseño sísmico, aunque el sector asegurador utiliza estas herramientas, con el objetivo de conocer el peligro sísmico para calcular el riesgo sísmico y determinar la prima de riesgo y perdida máxima probable (DOF, 2012). La mayoría de estas aplicaciones (tabla 1) se basan en modelos de amenaza probabilista (APPS).

Tabla 1. Algunas herramientas computacionales para estimar el peligro sísmico, tomado del DOF (2012).

Programa	Descripción	Método de cálculo	Referencia
EZ-FRISK	Programa de cálculo para estimar amenaza sísmica, repuesta local manipulación de señales sísmicas, obtención de señales consistentes con espectro de respuesta determinados. Cuenta con archivos predeterminados de fuentes sísmica, sismicidad y atenuación.	-Amenaza sísmica: APPS -Respuesta local de suelos: Método lineal equivalente	Risk Engineering Inc. http://www.ez-frisk.com
HAZUS-MH	Programa de cálculo de riesgos de diversas amenazas naturales	APPS	FEMA http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/
OpenSHA	Sistema en código Open Source para el cálculo de amenaza sísmica.	APPS	USGS-SCEC http://www.opensha.org/
CRISIS2007	Sistema para la integración de la amenaza sísmica en una zona determinada. Permite la definición de fuentes, sismicidad, atenuación y sitios de análisis.	APPS/ADPS	Instituto de Ingeniería UNAM

3. MÉTODOS PARA ESTIMAR EL PELIGRO SÍSMICO EN CDAO

3.1 MÉTODO 1: ESTIMACIÓN EMPÍRICA DEL PELIGRO SÍSMICO EN CDAO

3.1.1 Procedencia de los datos

En CDAO se instaló un acelerómetro digital modelo DCA-333 manufacturado en los E.U.A por Terra Technology Inc., acelerómetro de componente triaxia de 12 bit de resolución con reloj interno, sensibilidad a la aceleración lineal de escala completa ± 2 (g), memoria de 5 (s) para el pre evento, intervalo de muestreo cada 0.01 (s), puesto en movimiento para tiempo corto promedio y tiempo largo promedio (*SLALTA trigger*). El catálogo de la estación es de 75 eventos de movimientos fuertes de terreno, comprendidos durante el periodo de 1985 al 2010.

3.1.2 Tratamiento del catálogo de CDAO

El programa Degtra A4-XP (Ordaz y Montoya-Duché, 2002) se utilizó para visualiza los 75 acelerogramas de la estación CDAO. Se identificó registros con anomalías de adquisición (aspecto cuadrado en la serie de tiempo) y eventos sísmicos repetidos, eliminando del catálogo aquellos con problemas, conservando 45 acelerogramas (tabla A del anexo I).

3.1.3 Aplicación del método empírico

El método empírico es una herramienta útil y de fácil acceso para estimar el peligro sísmico, siempre y cuando se cuente con un catálogo amplio de mediciones para una o más estaciones acelerométricas fijas.

La ecuación que se utiliza para calcular esta metodología se obtienen de la definición del análisis de peligro sísmico (subtema 2.1), y se expresa como sigue:

$$v(y) = \frac{\# \text{Veces } A > a}{t} \quad (3.1)$$

Dónde $v(y)$, es la tasa de excedencia de intensidad sísmica, a , es la aceleración máxima del suelo o periodo estructural; A , es la intensidad con la que se quiere comprar la aceleración; t , el periodo de observación en años.

A continuación, se describe el procedimiento realizado para obtener la tasa de excedencia de intensidad para la aceleración máxima del suelo (A_{max}) en CDAO.

1. De cada evento sísmico se obtuvo la media geométrica de la A_{max} del suelo de ambos componentes del movimiento horizontal (direcciones NS y EW). Los datos se muestran en la tabla A del anexo I.
2. Considerando la aceleraciones $A=5$ (cm/s²) el primer movimiento sísmico del suelo perceptible, se propone como límite inferior del rango a evaluar. De las medias geométricas (tabla A anexo I) se sabe que $A=74.97$ (cm/s²) es la aceleración máxima registrada (19/09/85), se propone $A=75$ (cm/s²) como límite superior. Así, el rango va de $A= [5,75]$ (cm/ s²) con aumento de 10 unidades.
3. Una vez determinadas las A_{max} promedio, el rango de aceleraciones a evaluar, y el periodo de observación en CDAO $t=25$ (años), se utilizó la ecuación (3.1) para construir la tabla 2 de resultados. En la figura 8 se representa la tasa de excedencia de la aceleración máxima del suelo obtenida.

Tabla 2. Rango, cálculos y resultados de la tasa de excedencia de aceleraciones máximas del suelo para el método empírico.

t = 25 años		
A = Amax	Número de eventos que exceden a	v (Amax),
>5	26	1.04
>15	12	0.48
>25	6	0.24
>35	2	0.08
>45	1	0.04
>55	1	0.04
>65	1	0.04
>75	1	0.04

En la tabla 2 y la curva de peligro sísmico (figura 8) se puede ver que 26 eventos exceden la $A=5$ (cm/s^2), lo que significa que 19 eventos registrados fueron imperceptibles para las personas a nivel de piso, y tan solo 1 evento excede la $A= 45$ (cm/s^2). Por lo tanto, la aceleración máxima a nivel del suelo en CDAO es poco representativa del peligro sísmico.

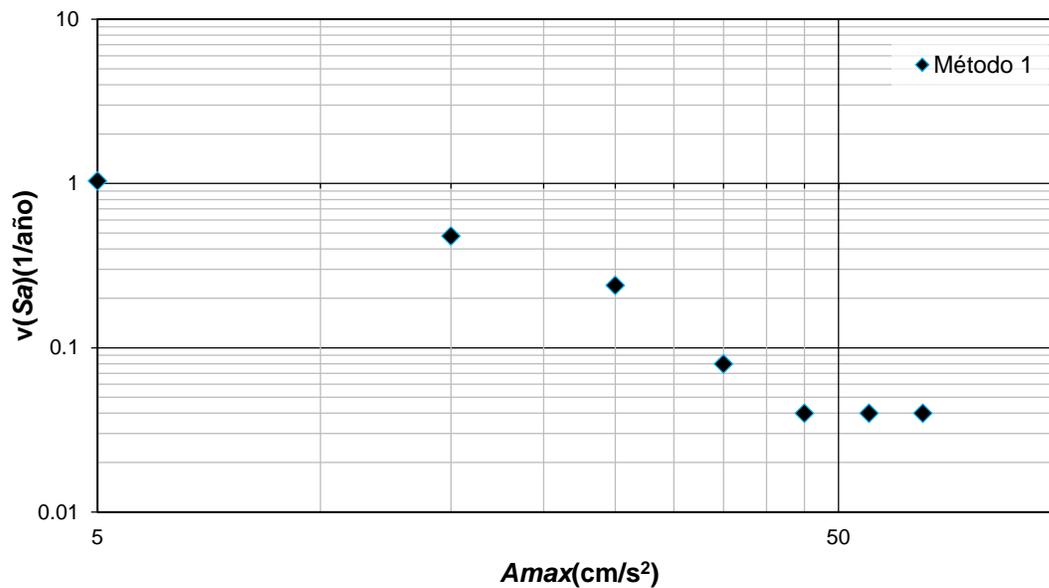


Figura 8. Tasa de excedencia de la aceleración máxima del suelo (A_{max}) en la estación CDAO. Método 1.

3.1.4 Tasas de excedencia de pseudoaceleración para diferentes periodos estructurales

El programa Degtra A4-XP se utiliza nuevamente, ahora con el objetivo de calcular los espectros de respuesta estructurales de pseudoaceleración de los 45 acelerogramas útiles en CDAO (anexo II ilustración 1). Este proceso se realiza con el fin de representar el peligro sísmico en CDAO con respecto a diferentes periodos estructurales (T).

Los espectros de respuesta fueron operados en hojas de cálculo (Microsoft Excel) y para calcular las tasas de excedencia de pseudoaceleraciones para periodos estructurales de interés. De forma gráfica se muestran los 45 espectros de respuesta en la ilustración 1 del anexo II.

A continuación, se describen los pasos realizados para obtener la tasa de excedencia de pseudoaceleración en CDAO para diferentes periodos estructurales:

1. Los parámetros de entrada al programa Degtra A4 es el rango del periodo estructural $T = [0.01, 5]$ (s) con incremento de 0.01 (s), amortiguamiento de los sistemas simples de 1GDL, por convención se utilizó el 5% (Ordaz y Reyes, 1999), dirección del canal (NS o EW) del registro sísmico a utilizar. Con estos parámetros se obtuvieron los espectros de respuesta de la pseudoaceleración ($Sa(T)$) para ambos componentes del movimiento (NS y EW).
2. Las componentes ortogonales $Sa(T)_{NS}$ y $Sa(T)_{EW}$, de cada evento, fueron operadas para obtener la media geométrica de la pseudoaceleración espectral $Sa(T)_i$ utilizando la ecuación (3.2). Con base a en las NTC para diseño por sismo 2004, las fuerzas que resulten de las componentes horizontales de la aceleración deben combinarse entre sí.

$$Sa(T)_i = \frac{Sa_{NS} + Sa_{EW}}{2} \quad (3.2)$$

3. De las ordenadas de pseudoaceleración promedio se seleccionan los periodos estructurales $T = [0.01, 0.3, 1, 2, 3, 3.5, 4 \text{ y } 5]$ (s) para representar las curvas de peligro en CDAO. Los resultados se muestran en la tabla C del anexo I.
4. Utilizando los datos de la tabla C y la ecuación (3.1) se obtuvo la tasa de excedencia de pseudoaceleraciones ($Sa(T)$) para representar los periodos estructurales propuestos.
5. Los resultados obtenidos se representada de forma gráfica en las ilustraciones de la 2 a la 9 del anexo II. En la figura 9 se ejemplifica la tasa de excedencias en CDAO para un periodo estructural de $T=3$ (s), se escoge este periodo porque tiene la mejor representación del peligro sísmico en el sitio. De forma práctica este periodo estructural se liga a una estructuras de aproximadamente 30 pisos.

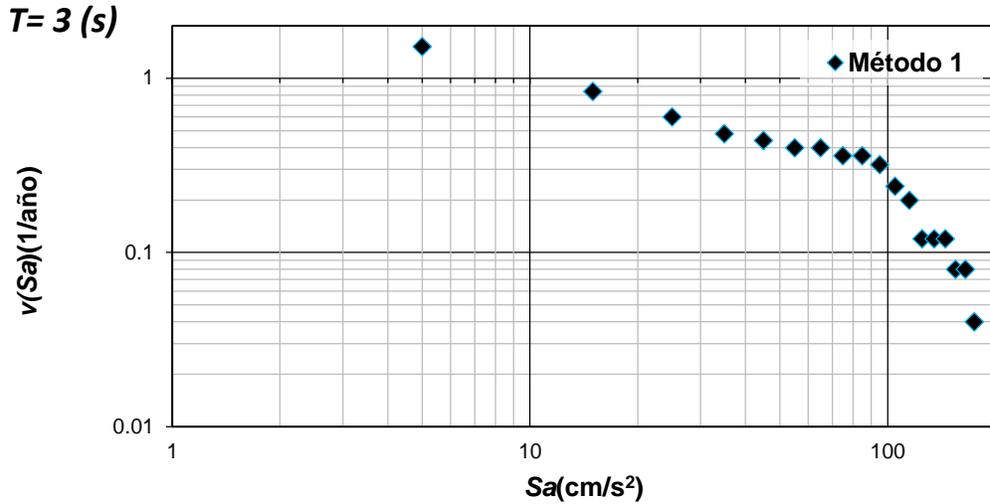


Figura 9. Tasa de excedencia de pseudoaceleración para el periodo estructural $T=3$ (s). Método 1.

Lo interesante de comparar las tasas de excedencia de pseudoaceleración para diferentes periodos estructurales en CDAO (anexo II) es la evidencia del comportamiento de estructuras simples de 1GDL ante todos los eventos sísmicos registrados durante una ventana de observación de 25 años. Por ejemplo, para un periodo estructural de $T=5$ (s), asociado a un edificio de 50 pisos, la $v(Sa(T))$ muestra menores pseudoaceleraciones que sobre terreno libre (A_{max}). Otra evidencia a destacar es el incremento en la pseudoaceleración acerca del periodo dominante del sitio $T_s=3$ (s), y su decremento al alejarse.

3.2 MÉTODO 2: ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN CDAO CON REFERENCIA EN CU

La estación de CU, por ser la estación de mayor antigüedad en la ciudad de México, operada desde 1965, permite reducir sustancialmente las incertidumbres al estimar el espectro de respuesta. El valor que se le otorga radica en los más de 20 registros provenientes de fuentes sísmicas localizadas en las costas del Pacífico mexicano que exceden los 2 (cm/s²), la construcción específica de ecuaciones de predicción del movimiento para CU, y la aproximación de terreno firme sin efectos de sitio.

El método 2 combina dos metodologías para obtener el peligro sísmico en CDAO, la primera es el Análisis Probabilista de Peligro Sísmico y la segunda el Cociente Espectral de Respuesta. A continuación, se explican los elementos empleados y los procedimientos de obtención.

3.2.1 Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (APPS)

El Análisis Probabilista de Peligro Sísmico consta de dos componentes esenciales para realizar los cálculos del peligro sísmico. La primera es la caracterización de la sismicidad que afecta al sitio de estudio, y la segunda es el comportamiento del movimiento sísmico en el sitio debido a las fuentes sísmicas, descritas en la primera componente.

La sismicidad que afecta al sitio se caracteriza dividiendo el territorio nacional en fuentes sísmicas de acuerdo a las consideraciones geotectónicas. Para cada fuente sísmica la tasa de excedencias de magnitud λ (M), es estimada mediante el análisis estadístico del catálogo de sismos y las consideraciones mencionadas en el subtema 2.7.2.

La respuesta del movimiento sísmico en el sitio es estimada mediante una ecuación de predicción del movimiento fuerte del terreno y una distribución de probabilidad de excedencia de la intensidad sísmica. Las ecuaciones relacionan la magnitud, distancia e intensidad sísmica, véase el subtema 2.8 para mayor información, y la distribución considera la incertidumbre.

La tasa de excedencia de pseudoaceleración del APPS debido a una fuente sísmica es calculada con la siguiente ecuación:

$$v(Sa) = \frac{1}{V} \int_V \int_{M_o}^{M_u} \left(-\frac{d\lambda(M)}{dM} \right) P(SA > Sa | M, R(x, y, z)) dM dV \quad (3.3)$$

Donde:

M_o y **M_u** son, la magnitud menor y mayor, respectivamente, **$P(SA > Sa | M, R(x, y, z))$** es la distribución de probabilidad que incluye la ecuación de predicción del movimiento fuerte, **$R(x, y, z)$** , es la distancia más cercana del área de ruptura al sitio, **M** la magnitud del sismo, y **V** el volumen general sobre la que se realiza la integración.

La tasa de excedencia **$v(Sa)$** , es computarizada utilizando la distribución de probabilidades apropiada para **las ecuaciones de predicción del movimiento**, la cual se debería derivar utilizando los datos acelerográficos del sitio. Finalmente, la contribución de todas las fuentes de peligro sísmico del sitio se suman.

3.2.1.1 Procedimiento para obtener las tasa de excedencia de pseudoaceleración en CU

Las tasas de excedencia de pseudoaceleraciones para el sitio de referencia CU fueron tomadas de los resultados de Ordaz y Reyes (1999). Ellos hacen las siguientes suposiciones para computarizar la tasa de excedencia en CU:

1. Ocurrencia de sismos en proceso de tiempo Poissoniano
2. El número anual y distribución de sismos obedecen, para $M < 7$ al modelo Gutenberg-Richter (Ec. 2.5) y para $M > 7$ al modelo de temblor característico (Ec. 2.6).
3. Todos los puntos dentro del área de una fuente sísmica tiene la misma probabilidad de ocurrir que los hipocentros.
4. La ecuación de atenuación de las ondas sísmicas y parámetros considerados se encuentran descritos en Ordaz y Reyes (1999).
5. En la figura 10 se ejemplifica la tasa de excedencia en CU para la *Amax*, en el anexo II se incluyen los gráficos de las tasas de excedencia de pseudoaceleración en CU para los periodos estructurales $T = [1, 2, 3]$ (s).

La aceleración máxima (A_{max}) promedio registrada por la estación acelerométrica en CU para el evento máximo (19/09/1985) fue de $A_{max} = 29.7$ (cm/s^2), mientras que la tasa de excedencia de pseudoaceleración en CU computarizada para la A_{max} (figura 10) indica mayores pseudoaceleraciones probables, por lo tanto, este método sirve para considerar sismos de intensidades mayores a los observables actualmente.

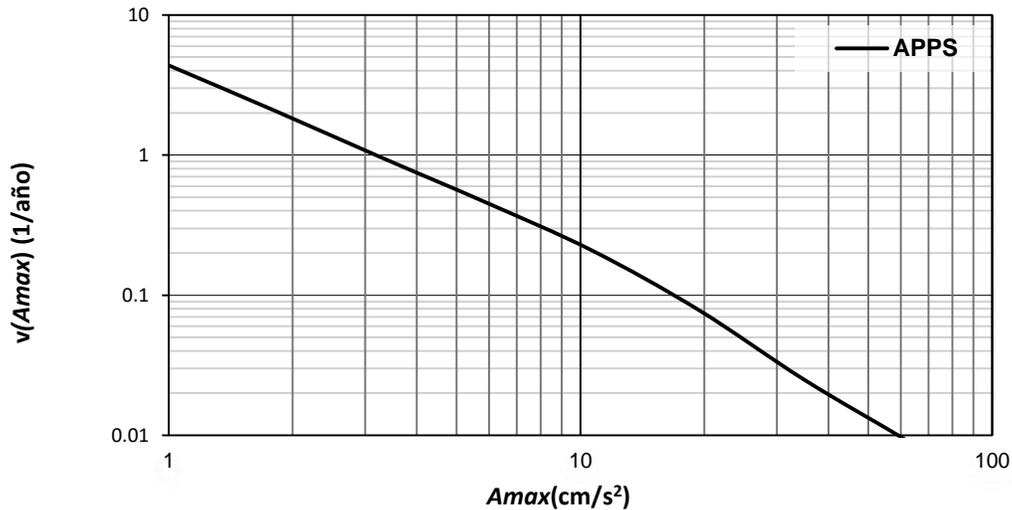


Figura 10. Tasa de excedencia de intensidades en CU para el movimiento del suelo. Tomada de Ordaz y Reyes (1999), del método de Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (APPS).

3.2.2 Cocientes Espectrales de Respuesta (CER)

El cociente espectral o función de transferencia es la relación entre un espectro de zona blanda y uno de zona firme; representa una estimación de la amplificación de la intensidad espectral en terreno blando respecto a la de terreno firme (Reyes *et al*, 2002). El cociente puede calcularse usando tanto el espectro de Fourier como el espectro de respuesta. La ventaja del primero es que cada paso tiene un significado físico, mientras que el segundo es una aproximación empírica sin un significado físico. El CER se utiliza de forma práctica por calcularse de forma directa, rápida y dar buenos resultados (Jaimes *et al.*, 2006).

El CER tiene limitaciones físicas entre ellas suponer, implícitamente, un modelo de amplificación del movimiento del suelo unidimensional (Reyes *et al.*, 2002). Mientras que

su ventaja es computarizar el cociente con un amortiguamiento de interés evitando recurrir a la teoría de vibraciones aleatorias. Utilizar teoría de vibraciones aleatorias y duración del movimiento del suelo introduce incertidumbre y errores en los cálculos (Jaimes, *et al.*, 2006).

Emplear cocientes espectrales de Fourier demanda una mayor cantidad de cálculos matemáticos y conocimiento de teoría de vibraciones aleatorias mientras que emplear cocientes espectrales de repuesta demanda menor cantidad de cálculos numéricos. Rosenblueth y Arciniega (1992) compararon la estabilidad del estimador de ambos métodos concluyendo la obtención de resultados similares.

Las ventajas de cálculo y buenos resultados de aplicar el CER, y gracias al catálogo de registros sísmicos en CDAO se decidió aplicar esta metodología para estimar la amplitud de la repuesta de CDAO repuesto a CU.

3.2.2.1 Procedimiento para calcular los cocientes espectrales de repuesta

La información utilizada se extrajo de la base de datos de la red acelerográfica del Instituto de Ingeniería (IINGEN). Para el cálculo del CER fue importante utilizar eventos sísmicos coincidentes entre CDAO y CU. Dentro de Ciudad Universitaria se han colocado 11 acelerómetros, por su cercanía >2 (km) todos se asumen representativos del movimiento en CU (Reyes *et al.*, 2002), siendo adecuada la selección de los eventos coincidentes aunque pertenezcan a diferentes estaciones dentro de CU.

A continuación, se describen los pasos realizados para calcular el CER y su incertidumbre:

1. Selección de eventos coincidentes entre la estaciones CDAO y CU. Se obtuvieron 18 eventos dentro de un periodo de observación de $t=21$ años (tabla 3).
2. El programa Degtra A4 XP se utilizó para calcular los espectros de repuesta de la pseudoaceleración en direcciones EW y NS, de cada evento sísmico en CU. Para CDAO se realizó este paso para el método 1 (3.1.3).
3. En hojas de cálculo (Microsoft Excel) fueron operadas las componentes horizontales de los espectros de repuesta. El cociente espectral de repuesta para cada componente (CER'_i (EW o NS)) se calculó siguiendo la ecuación (3.4). Para obtener la contribución

horizontal de la pseudoaceleración de cada sismo (CER_i) se realizó la media geométrica de los cocientes espectrales en ambas componentes horizontales, aplicando la ecuación (3.5).

$$CER'_i (EW \text{ o } NS) = \frac{S_a(T)_{CDAO(EW \text{ o } NS)}}{S_a(T)_{CU(EW \text{ o } NS)}} \quad (3.4)$$

$CER'_i (EW \text{ o } NS)$ es el cociente espectral de respuesta para una de las direcciones Este-Oeste o Norte-Sur del evento sísmico i .

$S_a(T)_{CDAO(EW \text{ o } NS)}$ y $S_a(T)_{CU(EW \text{ o } NS)}$ son las pseudoaceleraciones en cada estación medidas en (cm/s^2), en las dos direcciones.

$$CER_i = \frac{CER_{iEW} + CER_{iNS}}{2} \quad (3.5)$$

CER_i es la media geométrica para cada evento sísmico i , adimensional.

4. La función de amplitud para CDAO (CER) se calcula con el promedio de los valores CER_i , la ecuación (3.6) es el promedio de los 18, denominado $CER 18$. En la figura 11 se representan los CER_i y el $CER 18$.

$$CER = \frac{\sum_{i=1}^n CER_i}{n} \quad (3.6)$$

La figura 11 representa gráficamente las curvas de los CER_i . En color negro están los cuatro eventos sísmicos (subducción) de mayor magnitud, en color gris todos los menores a $M < 6.7$ (en su mayoría de fuente normal), y en color rojo el $CER 18$. El evento de mayor amplitud es el del 2/04/89 con $M_w = 5.9$, esto se explica porque en CU registro una

Tabla 3. Eventos sísmicos coincidentes en las estaciones CDAO y CU. R, es la distancia de la estación al área de ruptura y Mw, la magnitud de momento.

Fecha	CU (Amax)	CDAO (Amax)	Tipo de sismo	Mw	R	Profundidad (km)
19/09/1985+	29.7	75.0	Subducción	8.1	-	15
21/09/1985+	13.9	39.2	Subducción	7.6	-	15
25/04/1989-	12.0	31.3	Subducción	6.9	-	19
24/10/1993+	4.6	13.4	Subducción	6.7	-	19
23/05/1994*	0.6	8.3	Falla normal	6.2	209.0	23
10/12/1994*	5.4	16.4	Falla normal	6.4	300.0	20
14/09/1995+	10.0	34.6	Subducción	8.0	-	22
11/01/1997*	5.0	25.1	Falla normal	7.1	377.0	16
22/05/1997*	2.1	4.9	Falla normal	6.5	300.0	59
20/04/1998*	1.4	4.7	Falla normal	5.9	246.0	66
21/06/1999*	2.7	6.8	Falla normal	6.3	310.0	54
21/07/2000*	13.6	17	Falla normal	5.9	146.0	48
08/10/2001	3.6	5.2	Falla normal	5.4	-	4
13/04/2007*	5.0	11.8	Falla normal	5.3	244.0	41
28/04/2008*	2.9	5.7	Falla normal	5.8	195.0	52
27/04/2009	2.3	5.4	Falla normal	5.7	-	7
22/05/2009*	8.5	20.1	Falla normal	5.6	168.0	45
30/06/2010	2.3	8.1	Falla normal	6	-	8

*Jaimes *et al.*, (2006); +Jaimes *et al.*, (2015)

5. La incertidumbre del método aplicado se representa con la desviación estándar (σ) del logaritmo natural del *CER 18*, las ecuaciones (3.7) y (3.8) son funciones que representan el grado de dispersión del método. En la figura 12 se muestran el pico máximo de la amplitud para el periodo estructural $T=2.8(s)$ con un rango de incertidumbre de 24 a 6, para un segundo pico dominante en $T=1(s)$ el rango de incertidumbre va de 9 a 2.

$$CER\ 18 + \sigma \times CER\ 18 \quad (3.7)$$

$$CER\ 18 - \sigma \times CER\ 18 \quad (3.8)$$

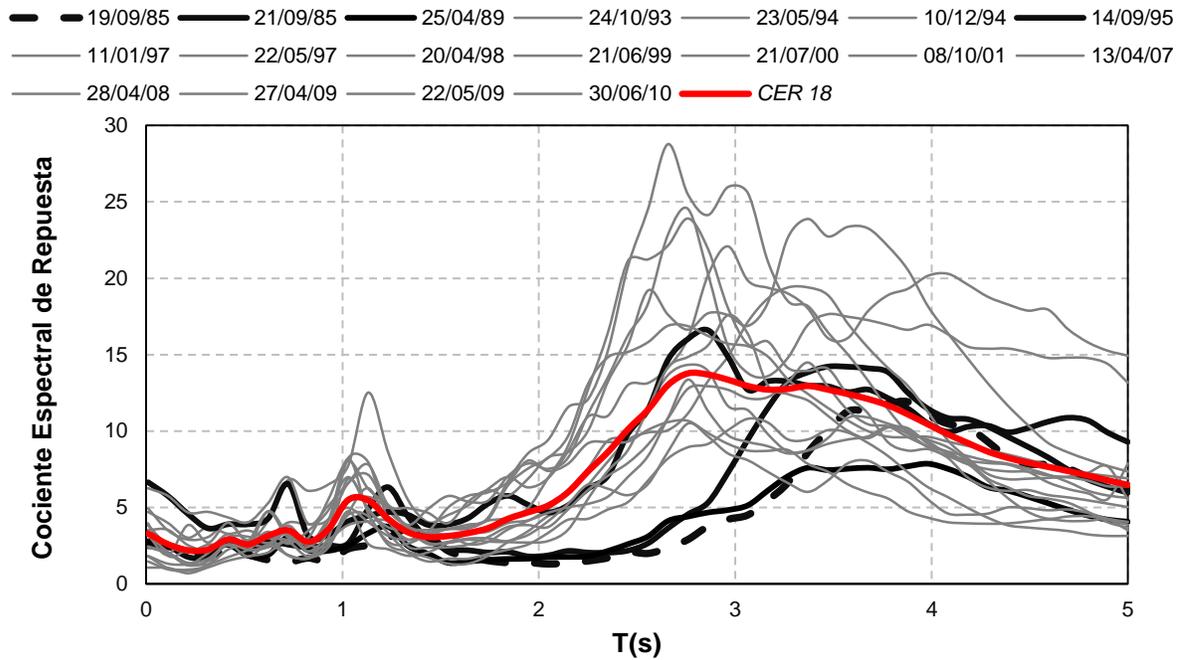


Figura 11. Representación gráfica de los cocientes espectrales de repuesta para cada evento marcado en la leyenda (CER_i), resaltando el promedio de estos cocientes (línea roja) denominado como función de amplitud espectral (CER_{18}).

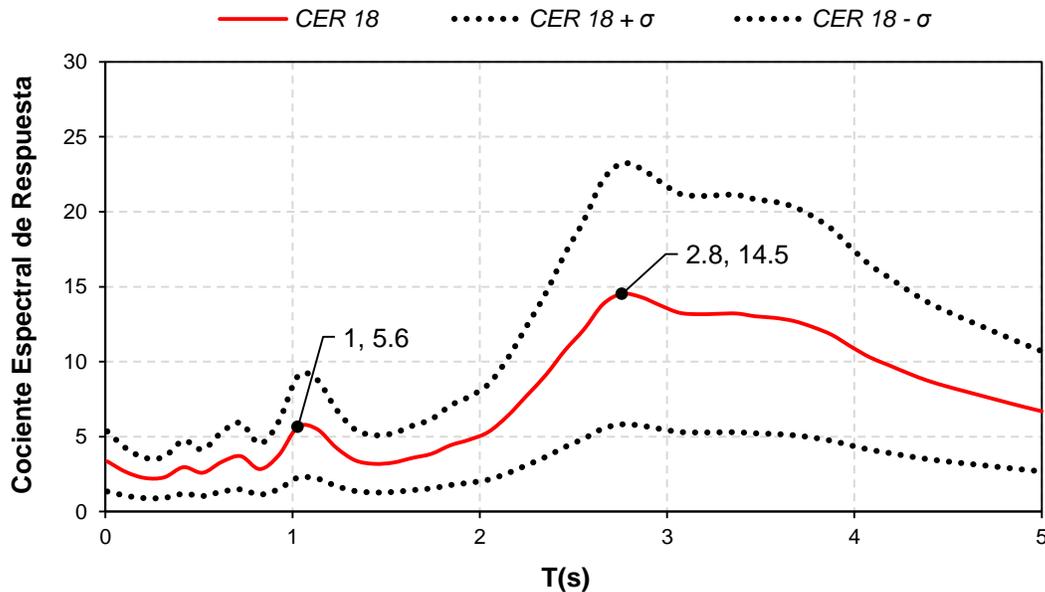


Figura 12. Función de amplitud espectral (CER_{18}) en función del periodo estructural T (línea roja) y su grado de incertidumbre.

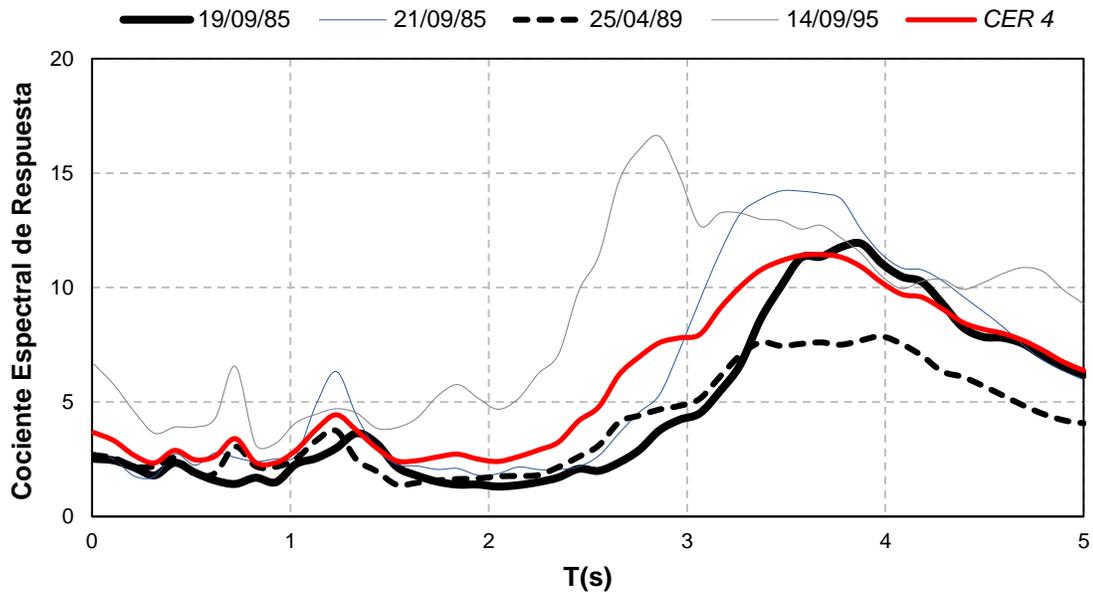
Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS) 2004, el análisis dinámico denominado paso a paso, debe considerar un mínimo de cuatro movimientos representativos del sitio, con intensidades compatibles con los criterios de las Normas, comportamiento lineal de la estructura y consideración de las incertidumbres.

De forma complementaria se realiza el procedimiento para obtener el CER y su incertidumbre con los 4 eventos sísmicos de mayor magnitud de la tabla 2 (resaltados con negrillas, cursiva y de mayor tamaño). La función de amplitud obtenida se denomina *CER 4*, en la figura 13 se representan los 4 eventos máximos y el CER 4, y en la figura 14 la incertidumbre del método.

El pico máximo de la amplitud para el CER 4 (figura 14) pertenece al periodo estructural $T=3.7$ (s) con $A=11.4$ y rango de incertidumbre $A_{max}=18.2$ y $A_{min}=5$, con un segundo pico representativo en $T= 1.2$ (s) con su rango de incertidumbre entre $A_{max}=7$ y $A_{min}=2$.

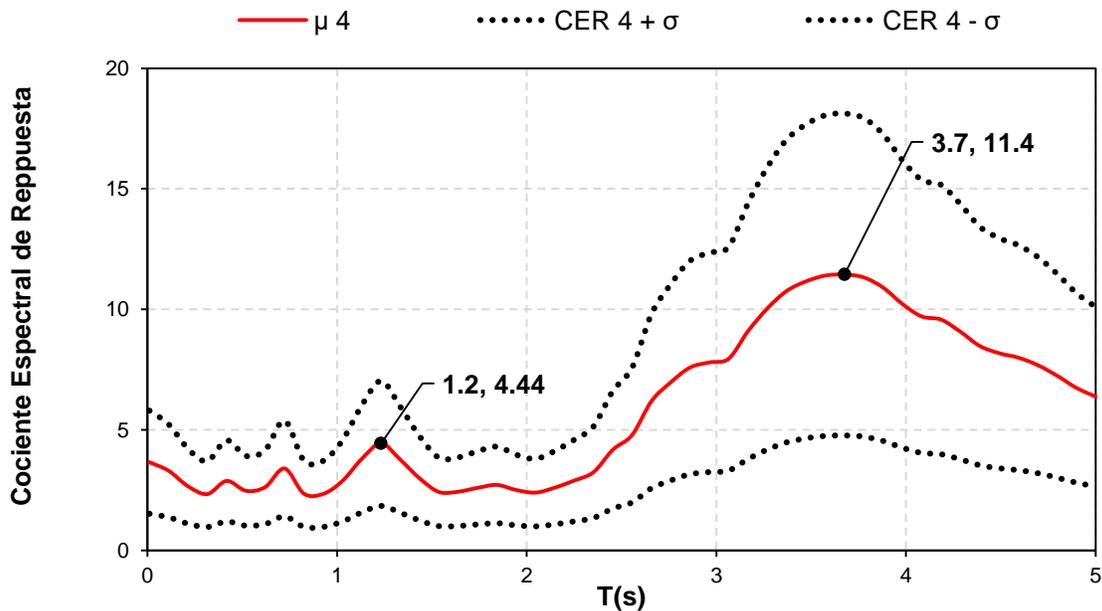
Los cocientes obtenidos se comparan de forma gráfica en la ilustración 13 del anexo II, concluyendo que ambos muestran periodos dominantes diferentes. El periodo dominante del CER 18 se encuentra en el periodo estructural $T=2.8$ (s) y para el CER 4 en $T=3.7$ (s). La variación aproximada de $T=1$ (s) es considerable y reafirma las suposiciones del comportamiento no lineal del suelo en CDAO (Roseblueth y Arciniega, 1992; Reinoso y Ordaz, 1999; Jaimes, 2002). También se muestra el CER18 envolviendo al CER 4 hasta su cresta más alta por su mayor amplitud, dando la pauta para darle más peso al uso del CER18 para realizar los procedimientos del método 2.

Utilizar el CER es suponer la comparación de la respuesta de dos sistemas simples de 1GDL, con amortiguamiento del 5 %, ambos sometidos a la misma fuerza de excitación (eventos sísmicos) sobre subsuelos litológicos diferentes. Para CU se tiene suelo de terreno firme y para CDAO suelo de terreno blando. De manera ideal, el terreno de roca firme es un suelo poco deformable con una amplitud del movimiento menor en el terreno (Esteve, 1968) y carece de efectos de sitio por considerarse roca basal; en terreno de lago se consideran efectos de sitio que amplificaran la respuesta del movimiento y duración del evento sísmico.



3.2.3 Espectro de Peligro Uniforme (EPU) en CU

Del conjunto de tasas de excedencia de pseudoaceleraciones (v (Sa)) en CU, cada una asociada a un periodo estructural, es posible obtener el espectro de peligro uniforme (EPU) en CU. El EPU es la función que representa el peligro sísmico para el mismo periodo de *Figura 14*. Cocientes espectrales de respuesta para los 4 eventos sísmicos de mayor magnitud indicados en la leyenda, y el promedio su promedio en línea roja, conocido como función de amplitud espectral (CER 4).



retorno (T_R) (inverso de la tasa de excedencia) e incluye todas las fuentes sísmicas que afectan al sitio, sus ordenadas (S_a) están en función del periodo estructural (T).

El EPU se construye tomando de cada $v(S_a)$ la lectura de la S_a para el T_R de interés. Las S_a se dibujan de forma gráfica en función de su T , acumulados los valores al terminar se construye el EPU en función del periodo estructural con la misma probabilidad de ocurrencia, en otras palabras, con el mismo nivel de peligro sísmico.

En la figura 15 se muestran los EPU en CU para $T_R = [10, 125, 250 \text{ y } 450]$ (años) normalizados respecto a la gravedad ($g=981 \text{ cm/s}^2$) tal como se maneja en las NTCDS. Los EPU's tiene un periodo dominante en $T=0.2(\text{s})$.

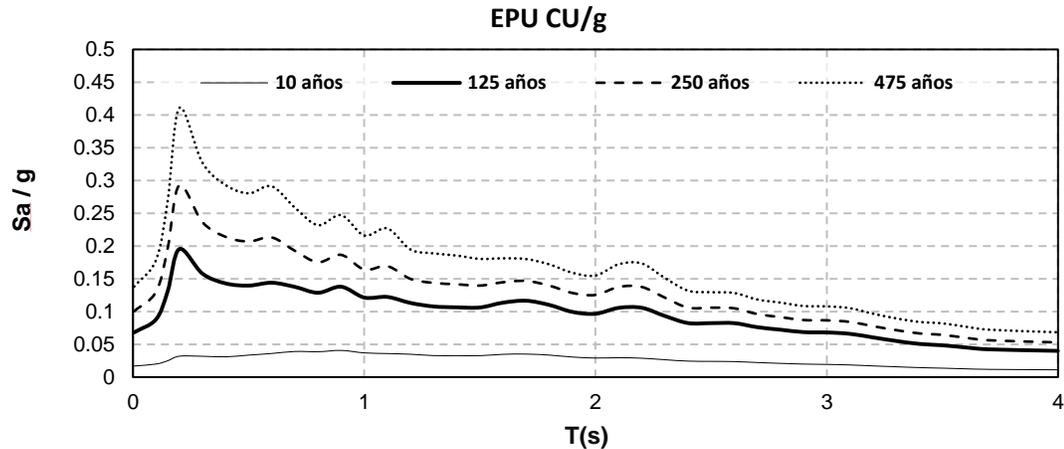


Figura 15. Espectros de Peligro Uniforme en CU para los periodos de retorno (T_R) de 10 años (línea delgada), 125 años (línea gruesa) , 250 años (línea discontinua) y 475 años (línea punteada), normalizados respecto a la gravedad $g=981(\text{cm/s}^2)$.

3.2.4 Aplicación del Método 2: Peligro sísmico en CDAO respecto a CU

Las curvas de peligro sísmico (tasas de excedencia de pseudoaceleraciones o espectros de peligro uniforme) en CU son operados por la función de amplitud CER 18 para obtener las curvas de peligro sísmico en CDAO. El CER18 es adimensional, en forma conceptual, puede operarse de forma directa con las funciones de peligro sísmico en CU. Este procedimiento se ilustra en las figuras 16 y 17.

En la figura 16 se muestra la obtención de la tasa de excedencia en CDAO para el periodo estructural de $T=3$ (s), multiplicado por la amplitud del CER18 en $T=3$ (s) $A=13.8$. En el anexo II se muestran las curvas obtenidas para $T= [Amax, 1, 2 \text{ y } 3]$ (s).

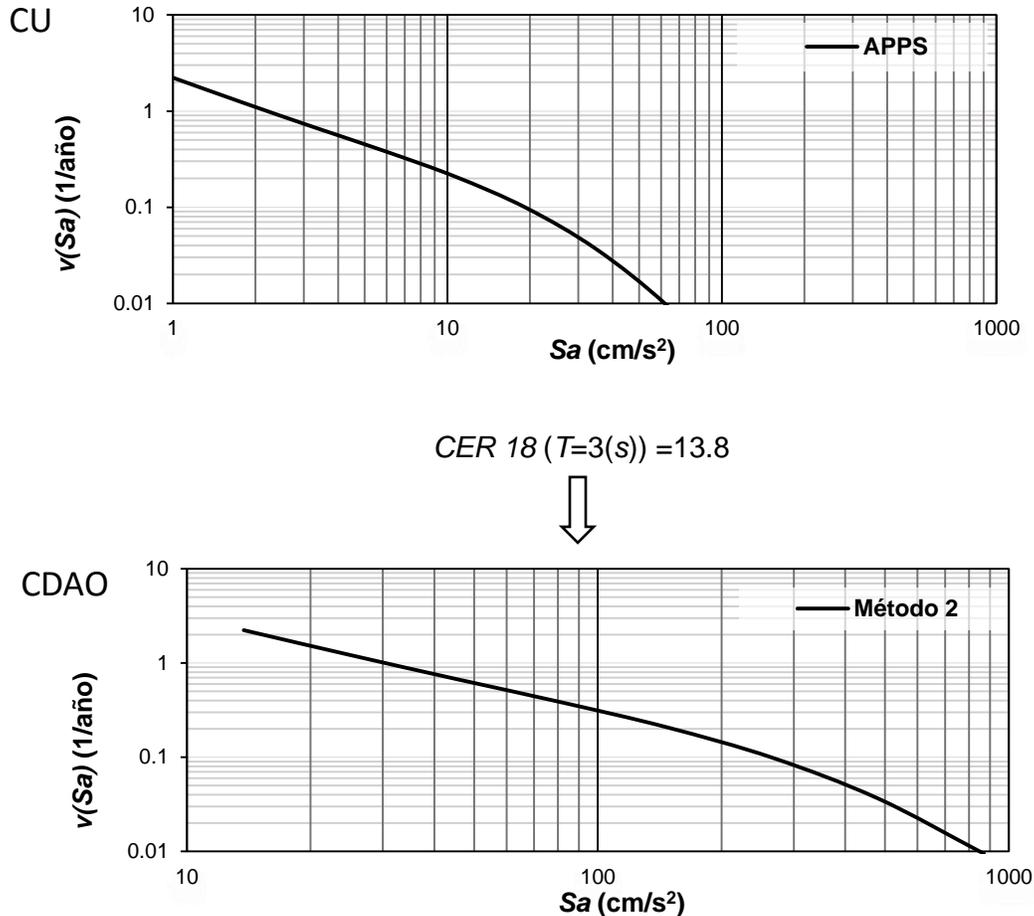


Figura 16. Procedimiento ilustrado del método 2 para obtener la curva de peligro sísmico en CDAO para el periodo estructural de $T=3$ (s). El grafico superior (tasa de excedencia en CU) es multiplicado por el valor de amplitud del CER 18 para el $T=3$ (s), resultado que da la tasa de excedencia en CDAO para $T=3$ (s).

Procediendo análogo al anterior, los EPU en CU se multiplican por la función de amplitud CER18, tanto el EPU como el CER18 están en función del periodo estructural (T), la operación se realiza de forma directa. En la figura 17 muestra la obtención del EPU en CDAO para un $T_R=125$ años. En la ilustración 19 del anexo II se muestran los EPU en CDAO para $T_R = [10, 125, 250 \text{ y } 450]$ (años).

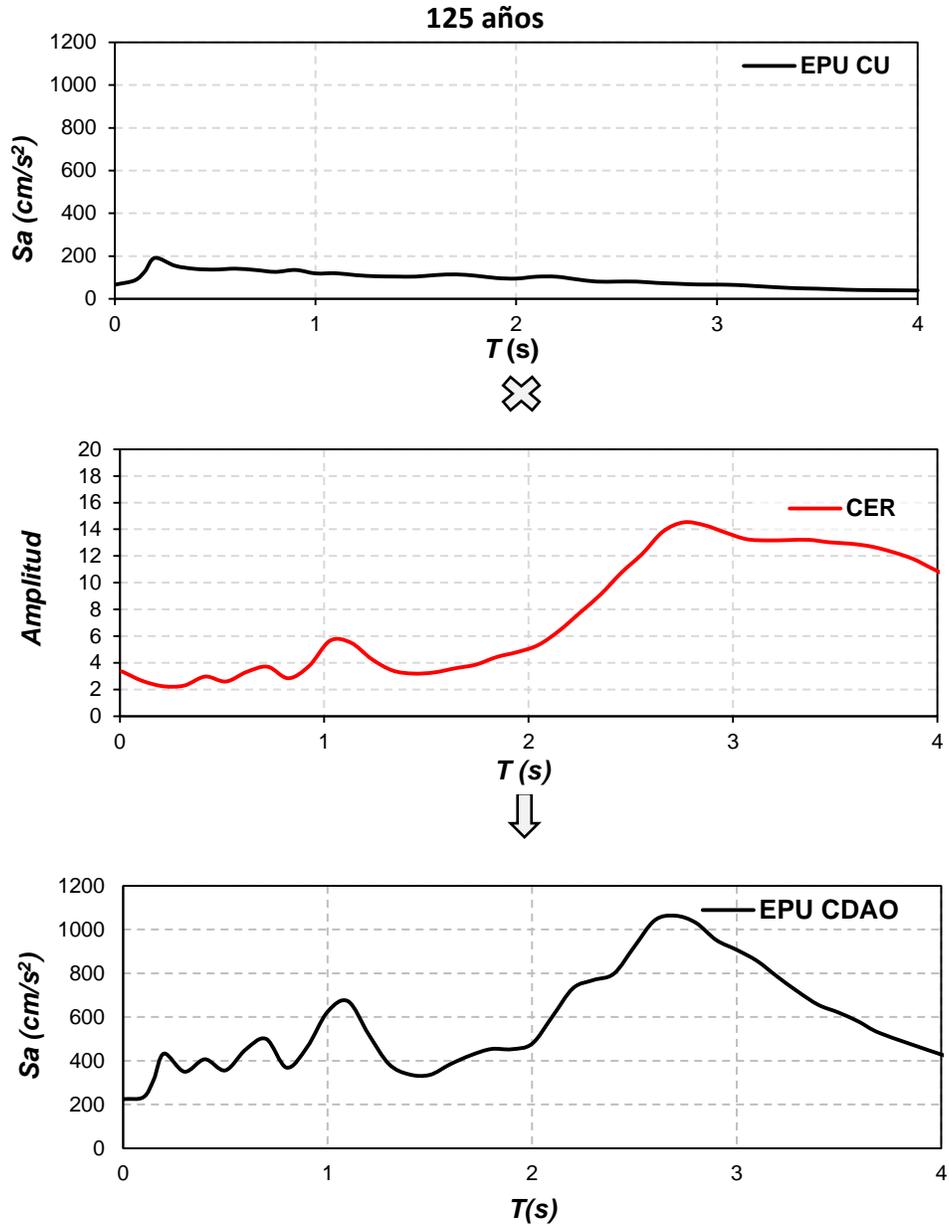


Figura 17. Procedimiento ilustrado del método 2 para obtener el espectro de peligro uniforme (EPU) en CDAO para un $T_R = 125$ años. Se realiza la multiplicación de la función de amplitud (CER 18) por el EPU en CU, resultado que da el EPU en CDAO.

3.2.5 Espectro para Diseño Sísmico (EDS) en CDAO.

Por enmienda el ingeniero en diseño sísmico tiene la labor de diseñar estructuras que cumplan dos fines principales ante la ocurrencia de sismos, (1) la estructura principal de la edificación no debe colapsarse ante cualquier intensidad presentada, y (2) la estructura se mantenga elástica con desplazamientos laterales limitados ante la ocurrencia de sismos de baja intensidad. La primera condición salva guarda la vida de las personas y la segunda condición pretende la disminución de daños en elementos no estructurales y contenidos de valor.

Tomando lo antes expuesto, para el cumplimiento de los fines las NTCDS 2004 especifican el uso del Espectro para Diseño Sísmico (EDS) para el primer fin y para el segundo el Espectro de Servicio (ES). En el caso de CDAO zona IIIc se utiliza los criterios del apéndice A. El EDS considera todas las fuentes que contribuyen al peligro sísmico y las condiciones geotécnicas en sitio, y el ES, prácticamente es una reducción del EDS por los factores de ductilidad Q' , y de sobrerresistencia, R entre 7. De acuerdo con Reyes (1999) cada estructura tiene un T_R óptimo de servicio, y Jaimes (2002) asocia el T_R óptimo de servicio de acuerdo al periodo de observación (t) de los datos registrados. Este ES fue calculado con el sismo del 25/04/1989 como se ve en la ilustración 21 y 22 del anexo II.

Los espectros de peligro uniformes (EPU) en CDAO fueron comparados con el espectro de diseño sísmico (EDS) del apéndice A, este último depende del periodo dominante del sitio (T_s). El periodo o frecuencia dominante de un sitio instrumentado en zonas de lago se realiza mediante la técnica de cocientes espectrales o función de transferencia empírica (Lermo y Chavez-Garcia, 1994; Reinoso y Ordaz, 1999). Este procedimiento obtiene la relación entre los promedios de los espectros de amplitudes de Fourier (EAF) en zonas de lomas y los EAF en zona de lago, reflejando la amplificación en el dominio de la frecuencia y las características dinámicas del sitio (Reinoso A, 2007).

Para CDAO en Singh *et al.* (1988) compararon 4 eventos sísmicos ($5.8 \leq M_s \leq 8.1$) concluyendo efectos no lineales y asignan un $T_s \sim 3.5$ (s); Lermo y Chavez-Garcia (1994) construyeron un mapa de periodos dominantes del valle de México, compararon la función de transferencia empírica en CDAO y una estación de referencia hipotética sin efectos de sitio utilizando 6 eventos ($4.9 \leq M_s \leq 8.1$) y asignan un $T_s \sim 3.3$ (s); Reinoso y Ordaz (1999) utilizan 12 eventos sísmicos coincidentes con CDAO ($4.9 \leq M_s \leq 8.1$) para realizar cocientes

espectrales tomando como referencia el promedio de las estaciones en terreno firme del SW del valle de México encontrando variación en el periodo dominante de $T_s=3$ (s) para microtemotres y pequeños sismos y para sismos mayores como el de 19/09/89 un $T_s=3.8$ (s); Jaimes (2002) utilizó 24 eventos sísmicos (subducción y de falla normal) entre 1985 al 2000 concluye un $T_s=3.2$ (s).

De los estudios mencionados se obtienen 4 EDS en CDAO que serán comparados con los EPU en CDAO en el siguiente capítulo.

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de aplicar Método 1 y 2, tratados en el capítulo 3. Los resultados se muestran de forma gráfica, el método 1 se representa con marcadores puntuales, concepto de adquisición discreta de datos respecto al espacio temporal en años, y el método 2 es representado con línea, concepto de modelar intensidades continuas.

4.1 TASAS DE EXCEDENCIA EN CDAO

En esta sección se comparan las tasas de excedencia en CDAO estimadas para ambos métodos. Las intensidades del método 1 se consideran base de comparación utilizando el error relativo norma L1 (Ec.4.1). Las curvas comparadas pertenecen a los periodos estructurales $T=A_{max}$ (s), $T=1$ (s), $T=2$ (s) y $T=3$ (s).

$$Error\ relavto = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\|U_e(i) - U_c(i)\|}{\|U_e(i)\|} \quad (4.1)$$

Donde U_e es la solución exacta, U_c es la solución calculada, N es el número de muestras i .

Para $T=A_{max}$ (figura 18) el método 2 muestra mayores pseudoaceleración sobre todos los valores del método 1. En valores de $S_a < 35$ (cm/s²) los métodos difieren entre 5 a 15 (cm/s²) con un error relativo del 58%. Para S_a mayores el incremento es casi el doble del método 2 respecto al método 1, pero solo representa un evento sísmico.

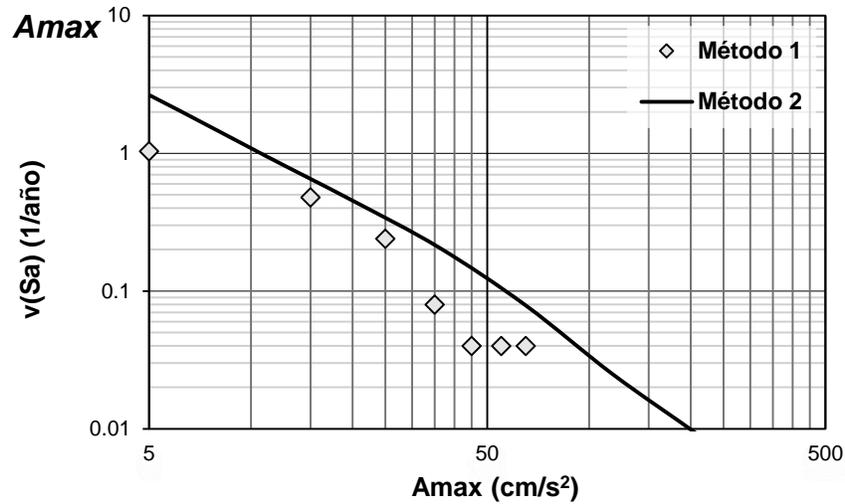


Figura 18. Tasa de excedencia en CDAO para la A_{max} del suelo asociada a un $T=0.01$ (s). Método 1 (rombos) y método 2 (línea).

Para $T=1$ (s) (figura 19) ambos métodos incrementan sus intensidades respecto a la figura 18. El método 2 sobreestima el método 1, para el intervalo de $15 \leq Sa \leq 35$ difieren menos del doble de su valor con error relativo de 65%. Las demás intensidades difieren más del doble de su valor. El incremento en las pseudoaceleraciones permitieron que el método 1 presentara tres eventos con $Sa > 75$ (cm/s^2), nuevamente el sismo del 19/09/85 destaca con $Sa = 178.2$ (cm/s^2) para el método 1, mientras que para el método 2 estima 300 (cm/s^2) en la misma tasa de excedencia $v(Sa)=0.04$ (1/año) con un error relativo del 69%.

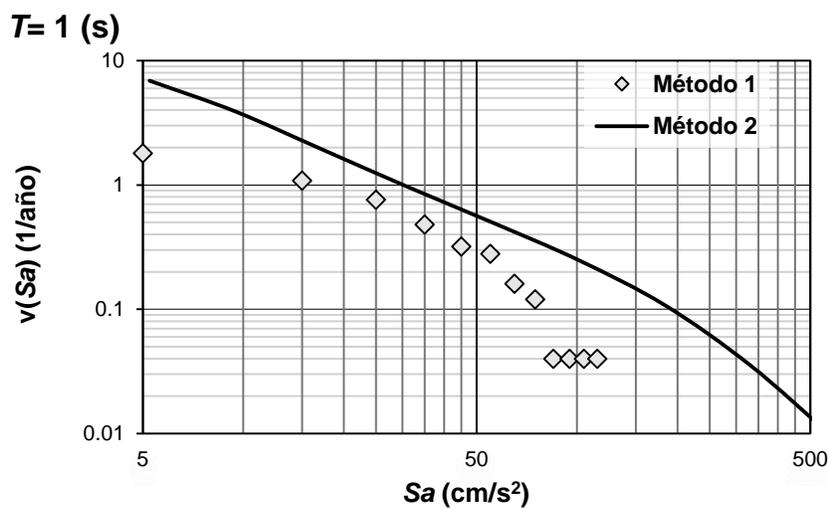


Figura 19. Tasa de excedencia en CDAO para el periodo estructural de $T=1$ (s). Método 1 (rombos) y método 2 (línea).

Para $T=2$ (s) (figura 20) las intensidades del método 1 siguen por debajo del método 2, la proximidad entre las pseudoaceleraciones estimadas para un rango entre $5 \leq Sa \leq 100$ (cm/s^2) es menos del doble. Entre $35 \leq Sa \leq 65$ el error relativo es del 33%. El incrementando de pseudoaceleraciones continua y las tasas de excedencia decrecen lo que significa un periodo de retorno mayor para pseudoaceleraciones mayores.

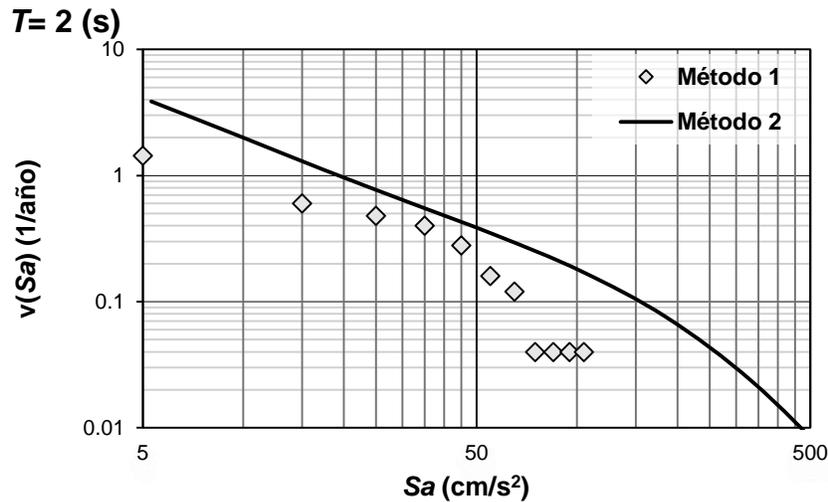


Figura 20. Tasa de excedencia en CDAO para el periodo estructural de $T=2$ (s). Método 1 (rombos) y método 2 (línea).

Para $T=3$ (s) (figura 21) se constata un aumento en la densidad de puntos que describen al método 1. Las intensidades de ambos métodos continua incrementando, el método 2 comienza en la $Sa=13$ (cm/s^2), y las tasas de excedencia aumentan, lo que significa la ocurrencia de intensidades mayores para un periodo de retorno más corto.

De forma práctica, los métodos para $T=3$ (s) presentan intensidades similares durante el rango de $65 \leq Sa \leq 125$ (cm/s^2) con un error relativo del 10%. En las tasa de excedencia $v(Sa)=0.36$ (1/año) y $v(Sa)=0.32$ (1/año) las intensidades de los métodos es la misma. Aunque la proximidad es muy buena el método 2 sigue sobreestimando las Sa del método 1.

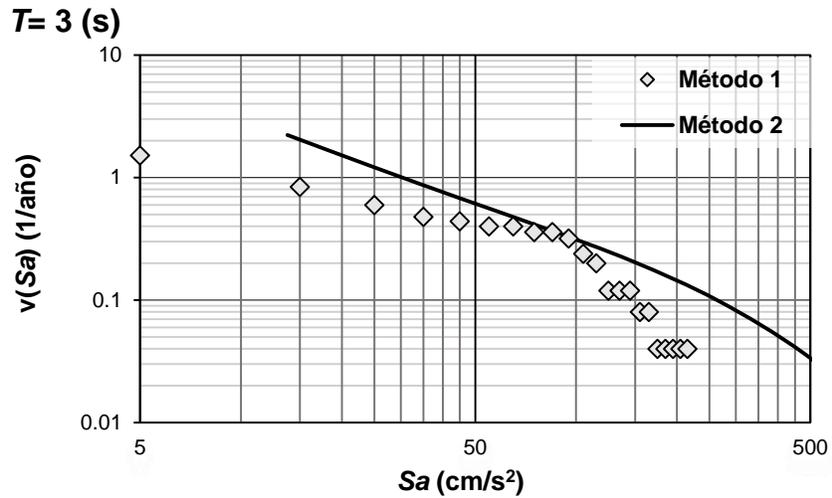


Figura 21. Tasa de excedencia en CDAO para el periodo estructural de $T=3$ (s). Método 1 (rombos) y método 2 (línea).

El incremento de las pseudoaceleraciones para el método 2 a cada periodo estructural está relacionado con la forma de la función de amplitud *CER18* (figura 12) que presenta su máxima amplitud alrededor del periodo estructural de $T=3$ (s). Periodo estructural que se relaciona con el periodo dominante del suelo $T_s=3$ (s) en CDAO.

4.2 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME EN CDAO

Los espectros de peligro uniforme (EPU) en CDAO para los $T_R=10$ (años), $T_R=125$ (años) y $T_R=250$ (años) fueron comparados con cuatro espectros para diseño sísmico (EDS) de las NTCDS 2004, uno para cada T_s mencionados en el subtema 3.2.4.

El EDS del apéndice A expresa las ordenadas del espectro de aceleraciones como fracción de la aceleración de la gravedad, tomando en cuenta lo anterior los EPU en CDAO son normalizados respecto a la aceleración de la gravedad ($g=981 \text{ cm/s}^2$) para ser comparados (figura 22).

El error relativo norma L1 (Ec. 4.1) se utilizó como medida comparativa considerando la diferencia que existe entre la meseta del EDS y la cresta que sobresale del EPU para un $T_R=125$ años. La cresta que se menciona interesa por pertenecer a periodos estructurales de $T=2.4$ a 3.5 (s), para esos periodos se tiene la mayor amplificación del cociente espectral de repuesta.

En la figura 22 se muestran los EDS para diferentes periodos dominantes del suelo, estos fueron: $T_s=3$ (s) (Reinoso y Ordaz, 1999) (línea roja) presenta diferencia del 12%; $T_s=3.2$ (s) (Jaimes, 2002) (línea amarilla) con diferencia de 18%; $T_s=3.3$ (s) (Lermo y Chávez-García, 1994) con diferencia de 21%; $T_s=3.5$ (s) (Singh *et al.*, 1988) tiene una diferencia de 28%.

Lo anterior constata que el EDS con menor error relativo respecto a la cresta del EPU para $T_R=125$ (años) es el de $T_s=3$ (s). Periodo que fue utilizado para obtener el espectro de servicio.

Reinoso y Ordaz (1999) estiman para el sismo del 19/09/85 un $T_s=3.8$ (s), el cual es concordante para el *CER 4* que estima la mayor amplificación en $T=3.7$ (s), se comparó el EDS del apéndice A para un $T_s=3.8$ (s) y los EPU en CDAO obtenidos mediante el *CER 4* (figura 23). El EPU calculado con *CER 4* no presenta error relativo respecto al EDS al ser envuelto. En la figura 23 se muestra el cumplimiento de los EPU respecto al EDS.

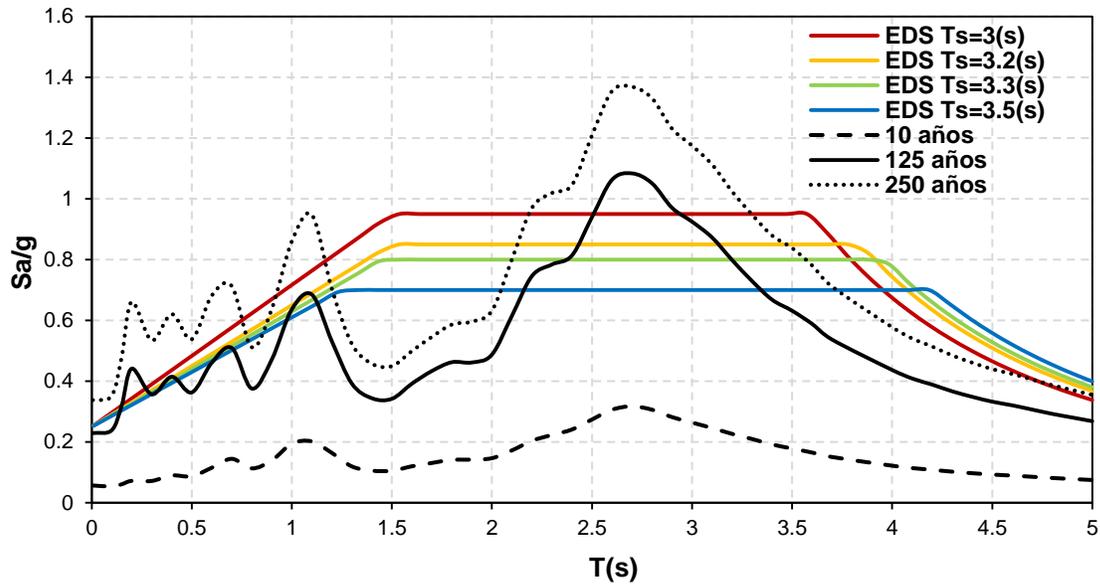


Figura 22. Espectros de peligro uniforme comparados contra espectros de diseño por sismo (EDS) en CDAO para diferentes periodos dominantes del suelo (T_s). De trabajos previos se tiene: $T_s=3.5$ (s) Singh *et al.* (1988); $T_s=3.3$ (s) Lermo y Cháves-Gracia (1994) $T_s=3$ (s) Reinoso y Ordaz (1999) y $T_s=3.2$ (s) Jaimes (2002). Los EPU se obtienen del método 2. EPU para 10 años (línea con guiones), 125 años (línea continua) y 250 años (línea punteada), y EDS (líneas de color).

Cumpliendo con el segundo fin del diseño sísmico (3.2.5), se obtiene el espectro de servicio (ES) al dividir entre 7 el EDS. Paso realizado para corroborar el periodo óptimo de servicio para CDAO. Con tal propósito se comparan los EPU para un $T_R=10$ años junto al los ES.

En la figura 24 se comparan los EPU de ambos métodos para un $T_R=10$ (años) con los ES. Del método 1 se obtuvo el EPU (*EPU M1*) de forma empírica, para el método 2 se obtiene dos EPU, el primero utilizando el *CER 18* (*EPU 18 M2*) y el segundo utilizando el *CER 4* (*EPU 4 M2*). En esta comparación se puede corroborar, de acuerdo con Jaimes (2002), los sismos de servicio en CDAO se dan en un periodo de retorno de 10 años, dado que el EPU M1 está envuelto por el ES.

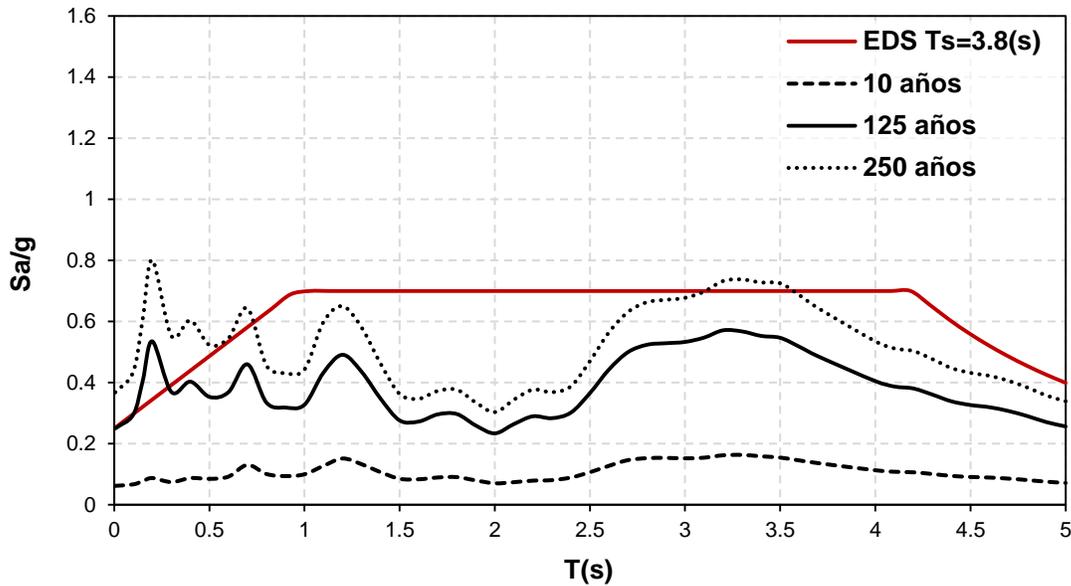


Figura 23. Espectros de peligro uniforme (EPU) calculados con el método 2 y el cociente espectral de repuesta para 4 eventos (*CER4*) contra el espectro para diseño por sismo en CDAO para $T_s=3.8$ (s) (Reinoso y Ordaz, 1999) que representa a los grandes sismos $M_w > 7$. Se representan los EPU para 10 años (línea con guiones), 125 años (línea continua) y 250 años (línea punteada), y EDS (líneas de color).

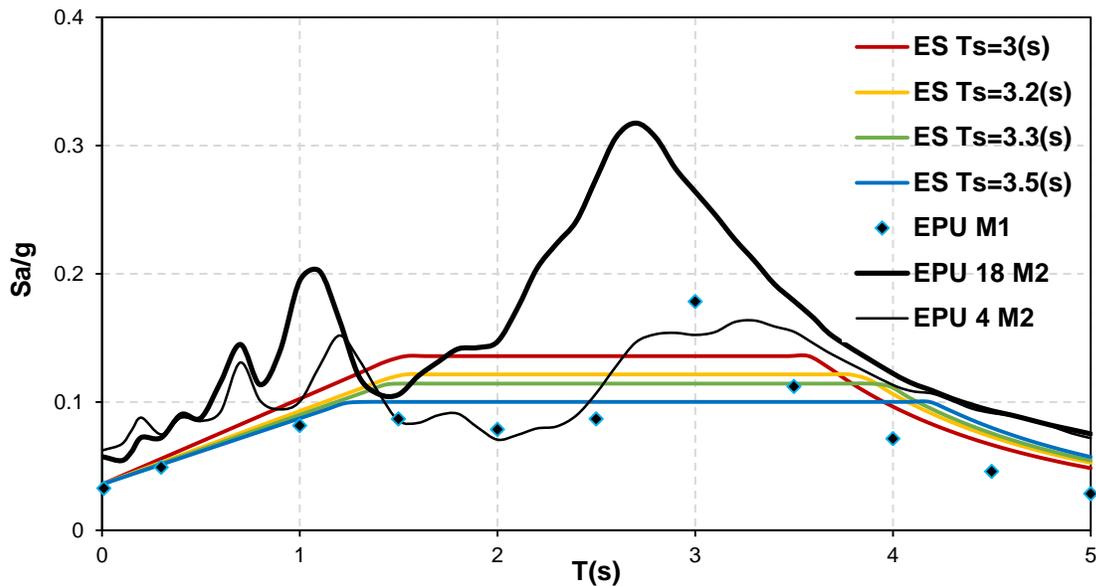


Figura 24. Espectros de peligro uniforme (EPU) para un periodo de retorno de $T_R=10$ años comparado con el espectro de servicio (ES) para un $T_s=3$ (s). Método 1 (rombos) EPU empírico envuelto por completo por el ES, para el método 2 utilizando cociente espectral de repuesta de 18 eventos (línea gruesa) sobre estima el ES, método 2 utilizando cociente espectral de repuesta con 4 eventos (línea delgada) sobre estima aunque para periodos estructurales entre $T=1.4-2.6$ (s) cumple con el ES.

5. CONCLUSIONES

En esta tesis se comparó el peligro sísmico estimado en un sitio blando de la Ciudad de México calculando con dos métodos. El primer método es denominado método directo (Método 1), el cual es basado en datos registrados durante un periodo de 25 años en la estación CDAO para calcular la tasa excedencia de intensidades de forma empírica. El segundo método es un método indirecto (Método 2), en el cual se aplica tanto la metodología Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (APPS) calculada en CU, como un cociente espectral de respuesta (amplitud del movimiento sísmico) calculada con el promedio de las medias geométricas de cada sismo entre el sitio blando CDAO y un sitio de referencia (CU). Para calcular el peligro sísmico se multiplica el cociente espectral de respuesta por las curvas de peligro sísmico en CU.

1. Los resultados de los métodos 1 y 2 tienen la menor diferencia entre sí para periodos de retorno entre 2 y 4 años en el periodo estructural de $T=3(s)$. Coincidiendo con la máxima amplificación del movimiento (CER18) y el periodo dominante del suelo $T_s=3(s)$. La mayor diferencia fue en los valores estimados para $T=A_{max}$.
2. El espectro de peligro uniforme (EPU) para un periodo de retorno de $T_R=125$ años, estimado con el método 2, presenta la menor diferencia respecto al espectro para diseño sísmico (EDS) estimado con $T_s=3(s)$ del 12%, y la mayor diferencia con el EDS estimado con $T_s=3.5(s)$ del 28%. Diferencias presentes entre $T=2.5(s)$ a $T=3.5(s)$ que representa edificaciones entre 25 y 30 pisos. Actualmente no existen construcciones de más de 10 pisos cercanos a CDAO pero en el futuro debe realizarse un buen diseño sísmico para construcciones dentro de ese rango.
3. El método 1 es un estimador que refleja resultados parciales de la historia de sismos, y el método 2 presenta incertidumbre en el cálculo de los cocientes espectrales de respuesta. A pesar de su variabilidad y simplicidad de cálculo ambos estimadores funcionan con fines de diseño sísmico, el método 1 corroboró el periodo de retorno $T_R=10$ años para el espectros de servicio, el método 2 difiere muy poco respecto al espectro para diseño sísmico.

REFERENCIAS

- Arciniega, A., Ordaz, M., Padilla, G., Pérez Rocha, L., y Rosenblueth, E. (1993). *Predicción de espectros de repuesta en el valle de México. Métodos simplificados y aplicaciones*. Reporte FJBS/CIS-93/04. Centro de Investigación Sísmica A.C., Fundación Javier Barros Sierra.
- Bazan , E., y Meli , R. (1983). *Manual de diseño sísmico de edificios* . Ciudad de México: Series del Instituto de Ingeniería.
- Bolaños , A., y Monroy , O. (2004). *Espectro de Peligro Sísmico* .(Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima , Perú.
- Central de Abastos . (2012). *Central de Abastos de la Ciudad de México* . Obtenido de <http://www.ficeda.com.mx/>
- Chávez-García, F., y Montalva , G. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle de Parkway. *Obras y Proyectos* , 16, 6-30.
- Chopra, Anil K.(2014) *Dinámica de estructuras* cuarta edición. Ciudad de México: PEARSON.
- Contreras Ruiz Esparza, M., (2001). *Obtención de espectro de repuesta considerando efectos de sitio obtenidos de registros por medio de la utilización de algoritmos genéticos*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería , UNAM. Ciudad de México, México.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1583-1606.
- Diario Oficial de la Federación (2012). Anexo 7.2.1. Bases técnicas para la determinación de la prima de riesgo y la pérdida máxima probable de los seguros de terremoto. *Capítulo 1: Amenaza sísmica1. Generalidades*. México: Gobierno de México .
- Esteva, L. (1968). *Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico*.(Tesis doctoral).Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México, México.
- Esteva, L. (1970). Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería . *Series del Instituto de Ingeniería* , No. 246.

- Gama García , A., Gómez Bernal, A., y Aguirre Gonzáles , J. (2009). Análisis de peligro sísmico para la ciudad de Chilpancingo, Guerrero. (pág. 19). Puebla: Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 1-17 .
- García Acosta , V., y Reynoso , G. (1996). *Los sismos en la historia de México, tomo I*. Ciudad de México: Ediciones Científicas Universitarias.
- Jaimes , M. A, Ramirez-Gaytán, A., and Reinoso , E. (2015). Ground-Motion Prediction Model From Intermediate-Depth Intraslab Earthquakes at the Hill and Lake-Bed Zones of Mexico City. *Journal of Earthquake Engineering* , 1-19.
- Jaimes , M. A, Reinosos , E., and Ordaz , M. (2006). Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake. *Journal of Earthquake Engineering* , 887-902.
- Jaimes, M. A. (2002). *Riesgo sísmico en el valle de México para varios periodos de retorno debido a sismos de subducción y falla normal*. (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México, México.
- Jaimes, M. A. (2007). *Acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas*. (Tesis doctoral) Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México, México.
- Jaimes, M. A. y Reinoso, E. (2015). Peligro Sísmico en Zona de Lago de la Ciudad de México: Observaciones versus Cálculos, XXXth Anniversary of the 19 September 1985 earthquake, Avances y retos en sismología y gestión de riesgos a 30 años del sismo de 1985, Septiembre Ciudad de México, México.
- Lermo, J., and Chavez-García, F. (1994). Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 413-423.
- McGuire, R. (2007). Probabilistic seismic hazard analysis: Early History . *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 329-338.
- Medrano R., V. H. (2009). *Estimación de espectros de respuesta en suelos de la ciudad de Puebla utilizando la teoría de vibraciones aleatorias*. (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México, México.

- Oliveira, C., and Campos-Costa, A. (2008). *Assessing and Managing Earthquake Risk: Geo-scientific and Engineering*. Springer.
- Ordaz, M., y Montoya Dulché, C. (1990-2002). Degtra A4 XP 5.1.0. Ciudad de México, México.
- Ordaz, M., and Reyes, C. (1999). Earthquake Hazard in Mexico City: Observations versus Computations. *Bull. Seism. Soc. Am*, 89, 1379-1383.
- Purche, M. C. (1990). *Problema de la cuenca de México*. Ciudad de México: El Colegio Nacional.
- Reinoso, E., and Ordaz, M. (1999). Spectral Ratios for Mexico City from Free-Field Recordings. *Earthquake Spectra*, 273-295.
- Reinoso A., E. (2007). *Riesgo Sísmico de la Ciudad de México*. Academia de Ingeniería Ciudad de México, México.
- Reinoso A., E. (2016). Presentaciones de clase: Ingeniería en Riesgos Naturales. Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Estructuras, UNAM.
- Reyes, C. (1999). *El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios*. (Tesis doctoral). Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México, México.
- Reyes, C., Miranda, E., Ordaz, M., and Meli, R. (2002). Estimación de espectros de aceleración correspondientes a diferentes periodos de retorno para las distintas zonas sísmicas de la ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 95-121.
- Roseblueth, E., and Arciniega, A. (1992). Response Spectral Ratios. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 483-492.
- Rosenblueth, E., M.EERI, Ordaz, M., Sánchez-Sesma, F., and Singh, S. (1989). The Mexico Earthquake of September 19, 1985- Design Spectra for Mexico's Federal District. *Earthquake Spectra*, Vol. 5 No. 1.
- Santoyo Villa, E., Ovando-Shelley, E., Mooser H., F., and León Plata, E. (2005). *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. Ciudad de México: tgc.
- Singh, S., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J., Mena, E., and Quaas, R. (1988). *The Mexico Earthquake of September 19, 1985- A Study of Amplification of*

Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site. Ciudad de México: Fundación Javier Barros Sierra.

Singh, S., Rodriguez, M., and Esteva, L. (1983). Statistics of Small Earthquake and Frequency of Occurrence of Large Earthquakes along the Mexican Subduction Zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1779-1796.

Sousa O., C., Roca , A., and Goula , X. (2008). *Assessing and managing earthquake risk* . Dordrecht, Países bajos : Springer.

Stbulov, M. (2008). *Geotechnical, geological and earthquake engineering*. United Kingdom: Springer.

Suarez, G. (Spring Meeting 2007). How Large can Mexican Subduction Earthquakes be? Evidence of a Very Large Event in 1787 (~8.5). *American Geophysical Union*.

Suárez, M. L. (2013). *PSM2012: Aplicación web para la difusión y consulta de datos de peligro sísmico*. (Tesis de maestría) Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México, México.

Trifunac, M., and Todorovska, M. (2008). Origin of the response spectrum method. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* . Beijing, China.

Unidades, N. (1999). Global Seismic Hazard Map. Global: Global Seismic Hazard Assessment Program.

Zúñiga, R., Suárez, G., Ordaz, M., and Acosta, V. (1996). *Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe*. Capítulo II: México : Organismo Especializado de la Organización de los Estados Americanos.

ANEXO I

Tabla A. Registros de la estación CDAO.

# de evento registrado	Fecha	Amax NS (s)	Amax EW (s)	Amax (s)
1	19/09/1985	65.32	84.61	74.97
2	21/09/1985	46.89	31.58	39.24
3	30/04/1986	15.773	32.272	24.02
4	08/02/1988	5.5	9.61	7.56
5	25/04/1989	28.15	34.38	31.27
6	31/03/1992	2.15	2.87	2.51
7	31/03/1993	2.87	2.15	2.51
8	15/05/1993	9.57	9.57	9.57
9	29/07/1993	1.91	2.39	2.15
10	24/10/1993	1.34	9.57	5.46
11	23/05/1994	8.14	8.38	8.26
12	10/12/1994	13.17	19.64	16.41
13	14/09/1995	37.08	32.13	34.61
14	09/10/1995	13.83	19.37	16.60
15	21/10/1995	2.31	3.19	2.75
16	25/02/1996	6.11	5.75	5.93
17	27/03/1996	3.43	3.17	3.30
18	23/04/1996	2.20	2.69	2.45
19	11/01/1997	24.67	25.59	25.13
20	22/05/1997	5.11	4.66	4.89
21	19/07/1997	3.55	5.07	4.31
22	03/02/1998	4.17	5.02	4.60
23	20/04/1998	4.74	4.64	4.69
24	09/05/1998	1.45	1.71	1.58
25	12/07/1998	2.01	2.02	2.02
26	21/06/1999	5.88	7.64	6.76
27	30/09/1999	32.30	29.70	31.00
28	29/12/1999	5.03	5.49	5.26
29	21/07/2000	17.00	12.28	14.64
30	09/08/2000	15.86	17.13	16.50
31	08/10/2001	5.55	4.89	5.22

Tabla A. Continuación.

# de evento registrado	Fecha	Amax NS (s)	Amax EW (s)	Amax (s)
32	10/11/2001	2.89	2.81	2.85
33	16/01/2002	2.08	3.30	2.69
34	18/04/2002	4.32	3.96	4.14
35	27/09/2002	2.36	1.94	2.15
36	10/12/2002	2.32	1.83	2.08
37	22/01/2003	18.35	20.11	19.23
38	14/06/2004	6.79	6.25	6.52
39	14/08/2005	2.58	2.38	2.48
40	13/04/2007	13.70	9.80	11.75
41	12/02/2008	3.76	2.68	3.22
42	28/04/2008	7.06	4.31	5.69
43	27/04/2009	4.64	6.09	5.37
44	22/05/2009	17.43	22.74	20.09
45	30/06/2010	7.75	8.53	8.14

Metodología Empírica para la determinación de la tasa de excedencia

Tabla B. Resultados del cálculo de la tasa de excedencia para la Amax suelo. t representa el periodo de observación en años, y Y es la aceleración máxima del suelo propuesta para evaluar.

$t=$	25 años	
	# de eventos	Tasa de excedencia
$Y=A_{max} >5$	26	1.04
>15	12	0.48
>25	6	0.24
>35	2	0.08
>45	1	0.04
>55	1	0.04
>65	1	0.04

Tabla C. Valores de ordenadas espectrales utilizadas para el cálculo de la tasa de excedencia para diferentes periodos estructurales en CDAO con el método 1.

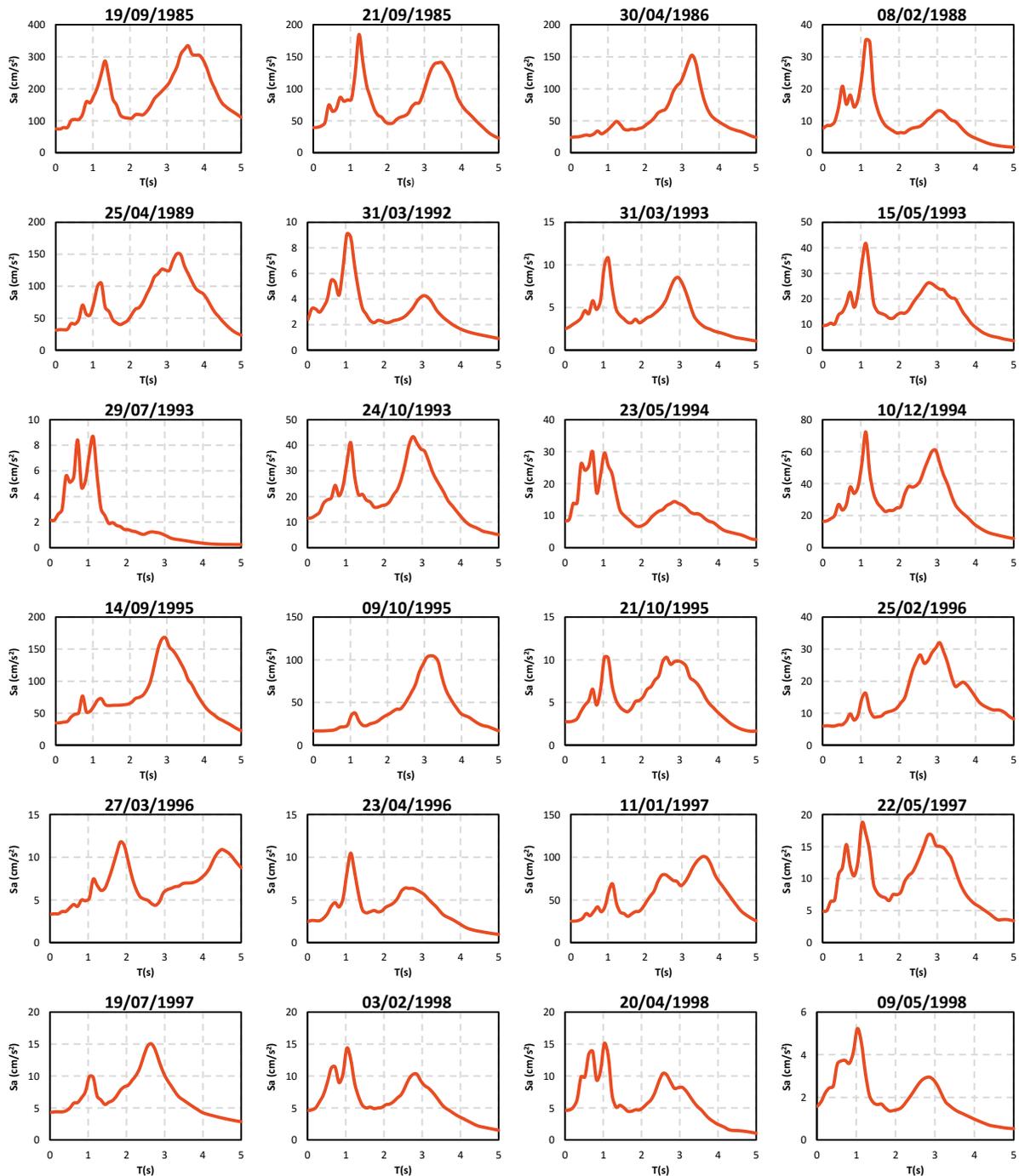
#	Fecha	Sa (0'.01)	Sa (0.3)	Sa (1)	Sa (2)	Sa (3)	Sa (3.5)	Sa (4)	Sa (5)
1	19/09/1985	74.90	78.88	178.29	107.77	219.56	334.34	261.95	110.88
2	21/09/1985	39.23	47.18	83.51	45.71	111.59	131.87	68.05	22.71
3	30/04/1986	24.02	26.39	37.45	44.41	124.29	86.92	45.16	24.00
4	08/02/1988	7.55	9.71	24.00	6.31	13.17	8.59	4.12	1.73
5	25/04/1989	31.26	32.70	74.53	55.50	124.76	119.36	79.71	23.64
6	31/03/1992	2.39	2.97	9.06	2.15	4.26	2.50	1.56	0.91
7	31/03/1993	2.51	3.34	9.85	3.45	7.85	2.97	2.02	1.07
8	15/05/1993	9.57	10.21	33.80	14.56	23.86	17.54	8.07	3.66
9	29/07/1993	2.15	2.99	7.30	1.40	0.89	0.53	0.32	0.24
10	24/10/1993	11.48	13.84	32.95	16.75	37.66	21.38	10.98	5.07
11	23/05/1994	8.26	13.96	29.55	7.07	13.31	10.00	5.96	2.57
12	10/12/1994	16.40	20.13	52.70	25.67	52.92	23.68	12.81	5.67
13	14/09/1995	34.60	37.04	60.73	66.92	153.46	102.10	56.15	22.58
14	09/10/1995	16.60	16.75	34.93	36.51	102.86	65.36	34.65	16.72
15	21/10/1995	2.75	3.10	10.27	5.69	9.68	6.40	3.49	1.65
16	25/02/1996	5.93	5.96	14.58	13.21	32.02	19.01	13.62	8.17
17	27/03/1996	3.30	3.63	5.20	9.53	6.19	6.98	8.12	8.78
18	23/04/1996	2.44	2.57	8.12	4.15	5.58	3.18	1.91	0.96
19	11/01/1997	25.13	28.41	60.61	48.25	70.15	100.87	66.83	25.49
20	22/05/1997	4.88	6.63	18.64	7.87	15.04	9.60	5.68	3.40
21	19/07/1997	4.31	4.40	9.90	8.57	9.40	5.89	4.09	2.87
22	03/02/1998	4.59	6.00	14.34	5.52	8.51	5.17	3.32	1.53
23	20/04/1998	4.64	6.33	15.11	5.11	8.23	4.65	2.24	1.07
24	09/05/1998	1.58	2.44	5.22	1.43	2.55	1.35	0.91	0.53
25	12/07/1998	2.01	2.38	9.56	2.22	3.43	1.57	1.10	0.67
26	21/06/1999	6.76	10.75	18.10	9.36	16.04	7.74	4.02	2.37
27	30/09/1999	31.00	35.86	83.51	65.13	165.21	102.09	49.00	23.11
28	29/12/1999	5.26	5.60	15.27	10.10	16.08	7.38	3.98	1.78
29	21/07/2000	14.63	24.06	39.30	13.82	14.20	9.44	4.26	2.57
30	09/08/2000	16.49	17.63	28.76	38.35	95.74	53.16	31.33	13.37
31	08/10/2001	5.22	9.90	26.13	9.97	10.53	5.69	3.11	1.52
32	10/11/2001	2.85	3.26	7.56	6.56	10.18	3.82	2.44	1.17
33	16/01/2002	2.69	2.83	6.50	5.95	7.95	4.13	2.20	1.52
34	18/04/2002	4.14	4.24	9.59	11.29	15.34	9.14	7.02	4.28

Tabla C. Continuación

#	Fecha	Sa (0'.01)	Sa (0.3)	Sa (1)	Sa (2)	Sa (3)	Sa (3.5)	Sa (4)	Sa (5)
35	27/09/2002	2.15	3.73	8.26	2.07	1.50	0.82	0.66	0.43
36	10/12/2002	2.07	2.74	7.07	2.52	2.11	1.22	0.71	0.40
37	22/01/2003	19.23	20.11	44.50	49.89	91.03	68.90	39.89	20.10
38	14/06/2004	6.52	7.80	22.90	20.29	18.48	6.53	3.33	2.17
39	14/08/2005	2.48	3.71	10.65	3.85	2.64	1.59	1.02	0.72
40	13/04/2007	11.75	13.69	43.17	33.75	27.81	18.49	11.66	5.17
41	12/02/2008	3.22	3.59	12.57	8.39	7.23	3.82	2.33	1.31
42	28/04/2008	5.68	8.06	22.17	8.88	7.45	7.09	4.92	2.40
43	27/04/2009	5.36	8.03	20.86	13.62	9.95	5.93	3.21	1.54
44	22/05/2009	20.06	42.18	56.73	13.59	12.02	6.51	3.25	1.89
45	30/06/2010	8.14	9.69	26.20	21.87	29.43	12.80	6.46	2.88

ANEXO II

Espectros de repuesta de los 45 eventos sísmicos registrados en la estación CDAO.
Uso del programa Degtra A4.



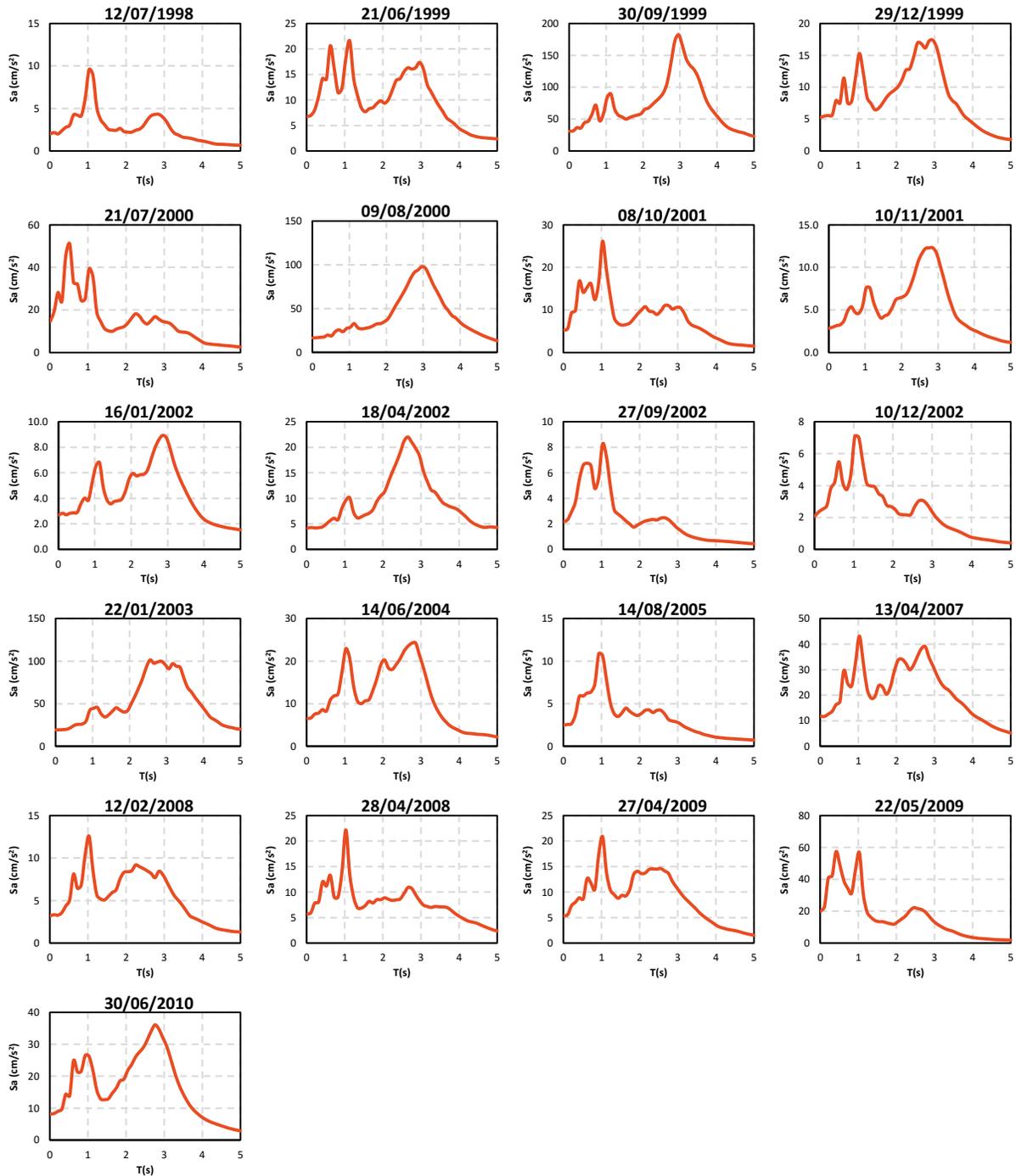


Ilustración 1. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=0.01$ (s), periodo asociado a la aceleración máxima del suelo (A_{max}) utilizando el método 1 (rombos)

Gráficos de las tasas de excedencia en CDAO: método 1.

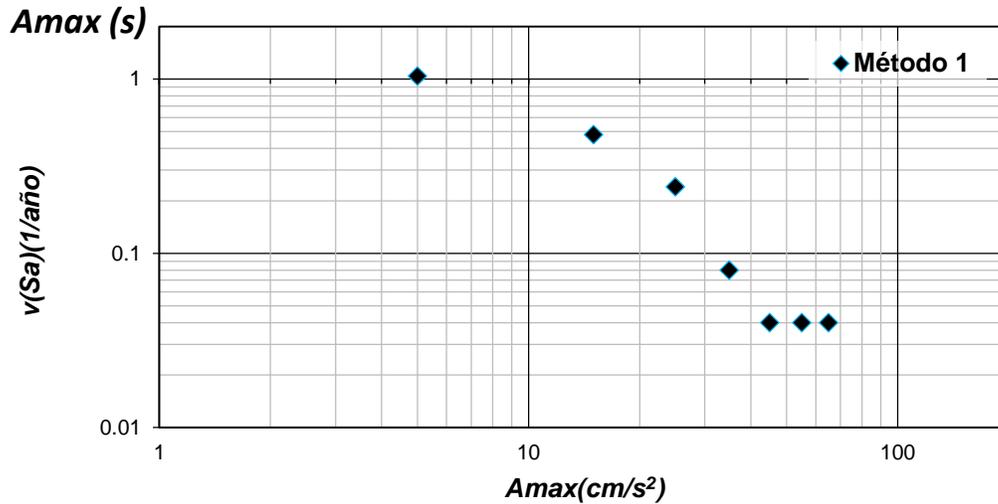


Ilustración 2. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=0.01$ (s), periodo asociado a la aceleración máxima del suelo (A_{max}) utilizando el método 1 (rombos).

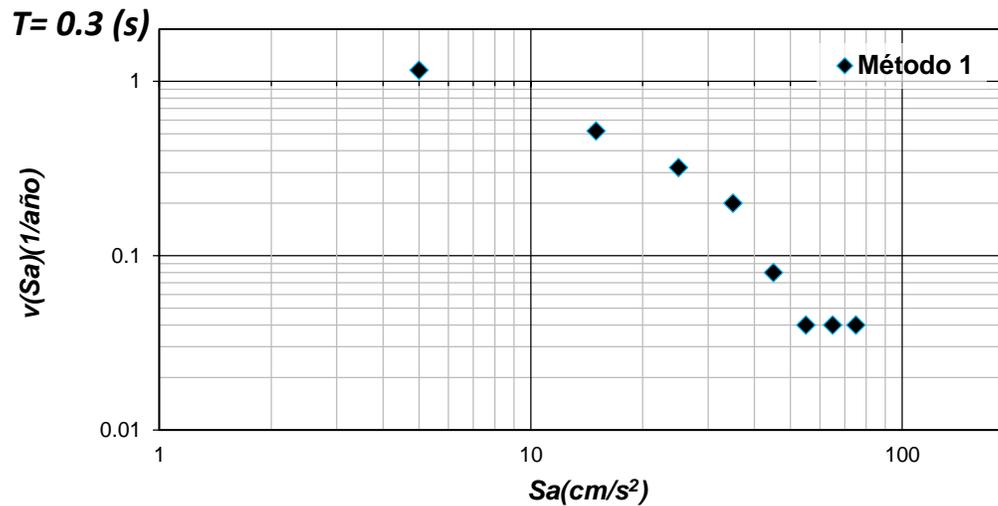


Ilustración 3. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=0.3$ (s) utilizando el método 1 (rombos).

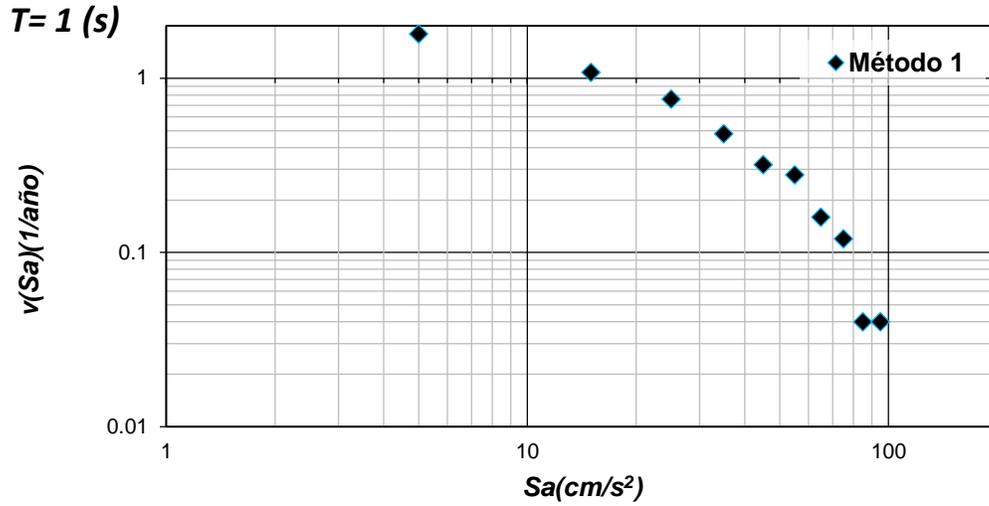


Ilustración 4. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=1$ s utilizando el método 1 (rombos).

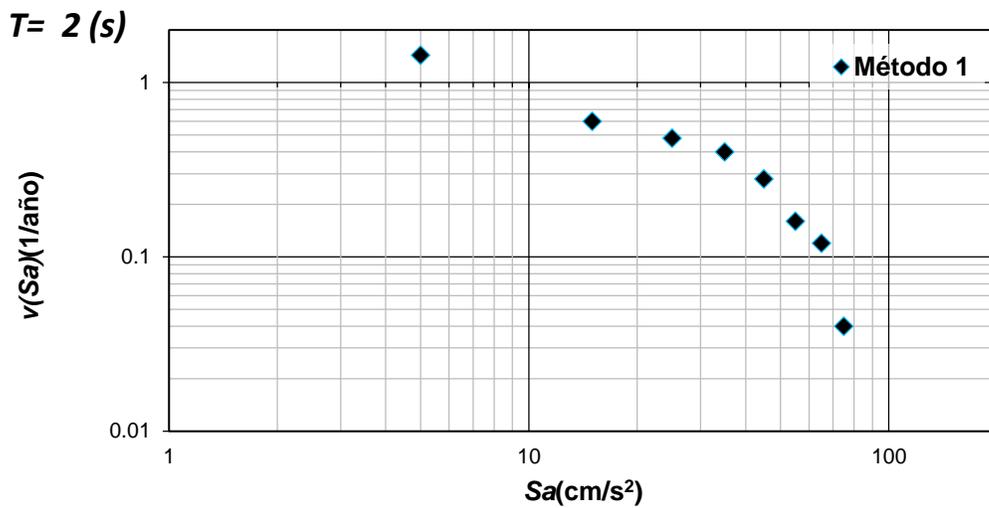


Ilustración 5. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=2$ (s) utilizando el método 1 (rombos).

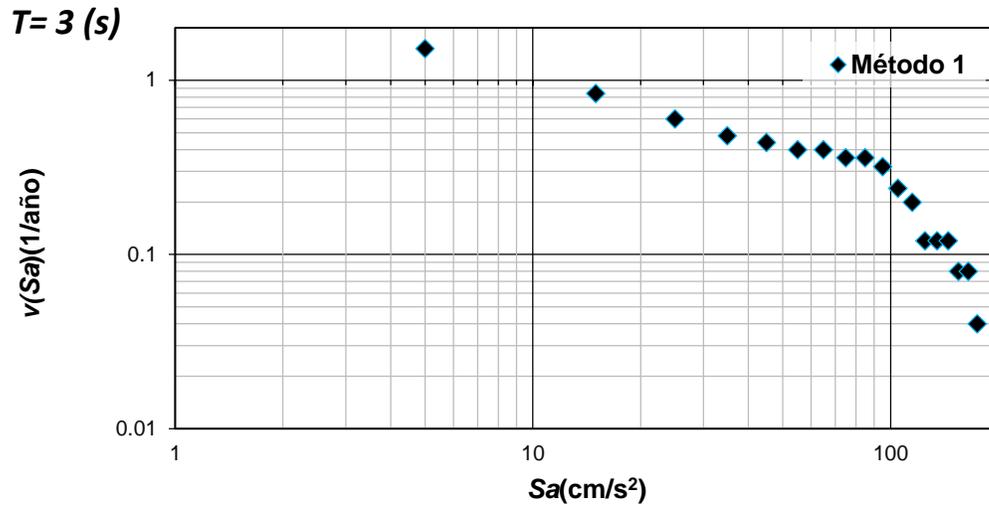


Ilustración 6. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=3 (s)$ utilizando el método 1 (rombos).

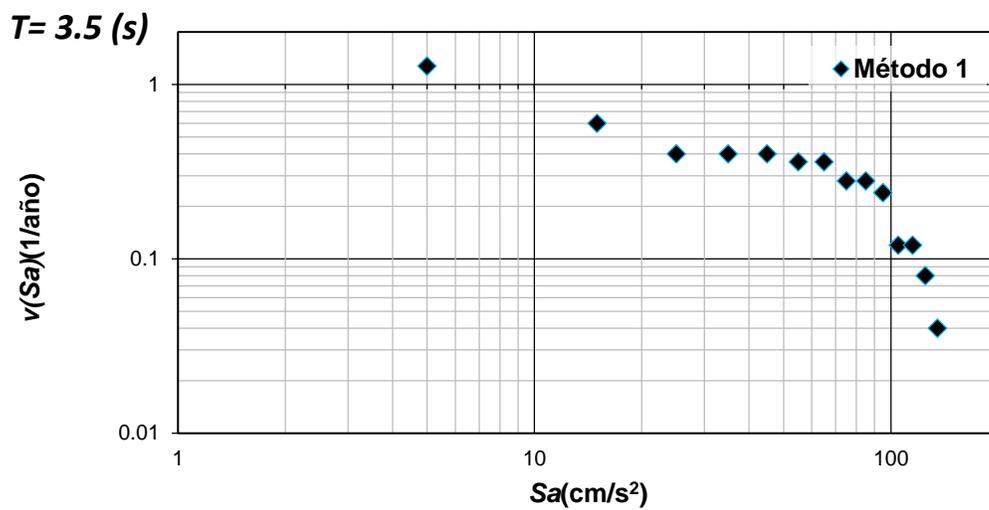


Ilustración 7. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=3.5 (s)$ utilizando el método 1 (rombos).

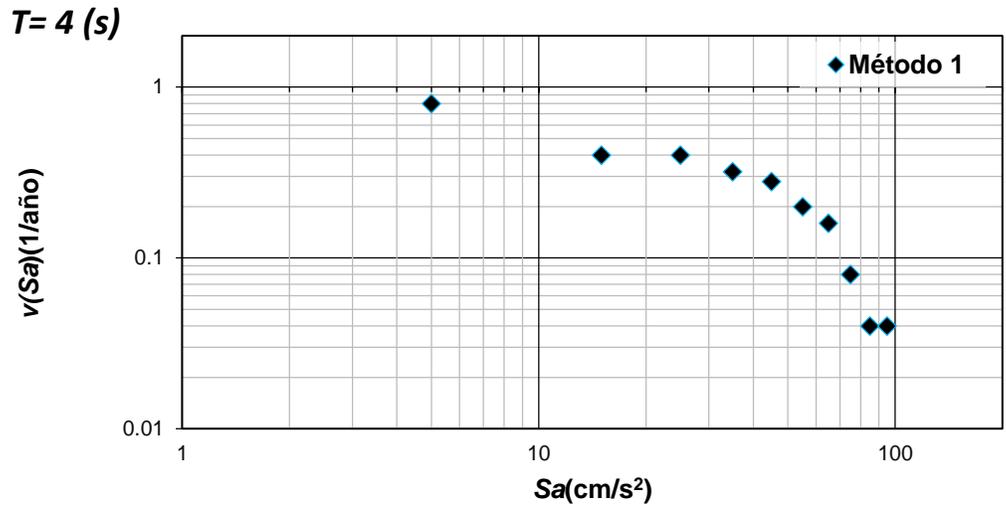


Ilustración 8. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=4$ (s) utilizando el método 1 (rombos).

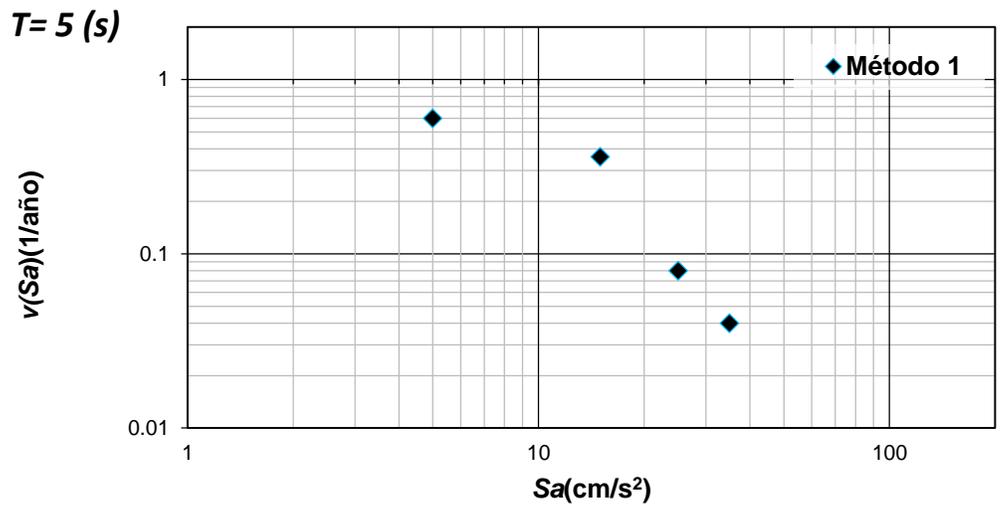


Ilustración 9. Cálculo de la tasa de excedencia para el periodo $T=5$ (s) utilizando el método 1 (rombos).

Gráficos de las tasas de excedencia en CU para cuatro periodos estructurales, tomadas de trabajo de Ordaz y Reyes (1999) calculadas con el Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (APPS).

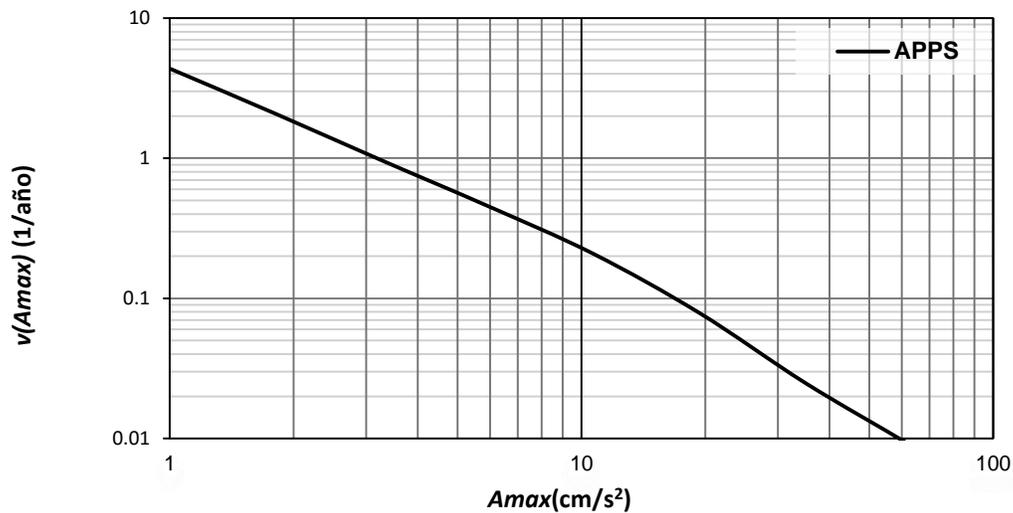


Ilustración 10. Tasa de excedencia en CU para la aceleración máxima del suelo (A_{max}) (línea)

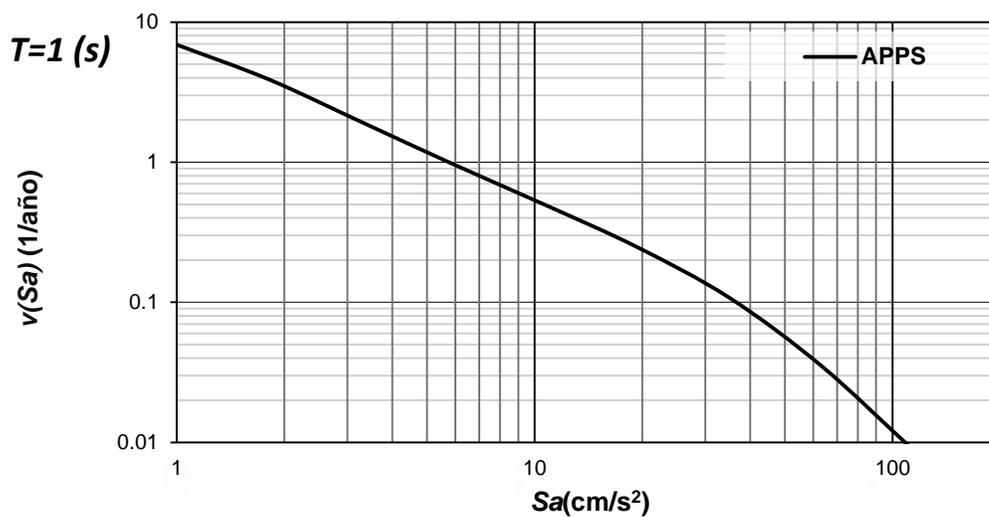


Ilustración 11. Tasa de excedencia en CU para el periodo estructural $T=1$ (s) (línea).

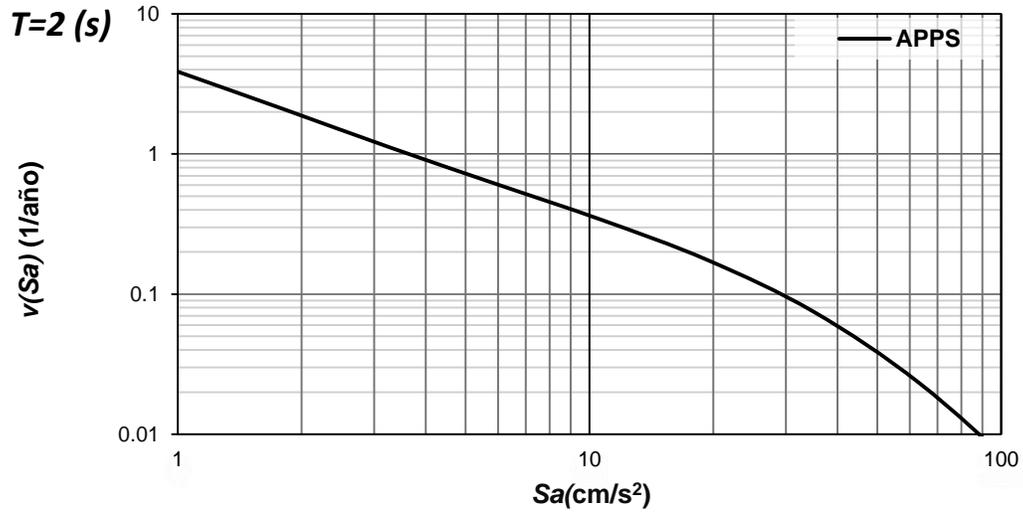


Ilustración 12. Tasa de excedencia en CU para el periodo estructural $T= 2$ (s) (línea).

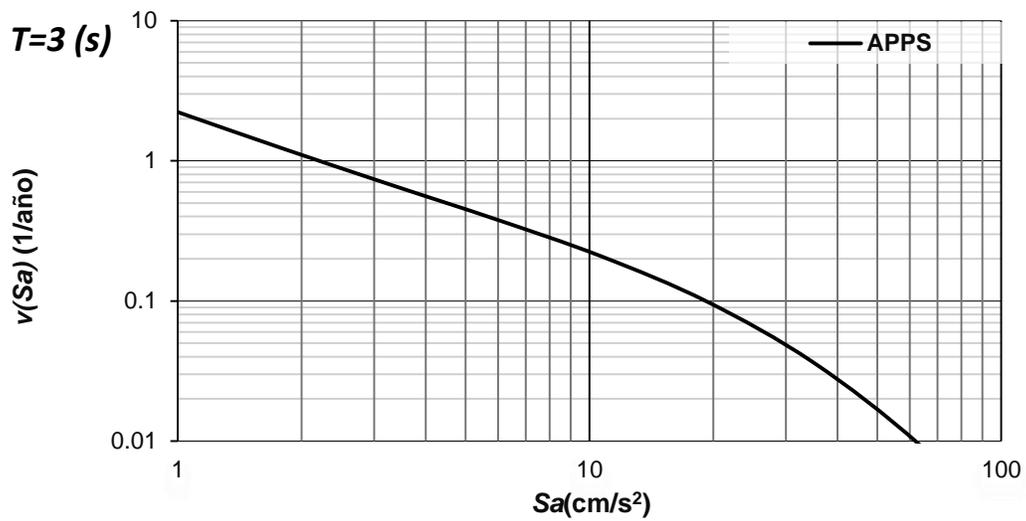


Ilustración 13. Tasa de excedencia en CU para el periodo estructural $T= 3$ (s) (línea).

Gráficos comparativos de los Cocientes Espectrales de Respuesta (CER) entre CDAO y CU.

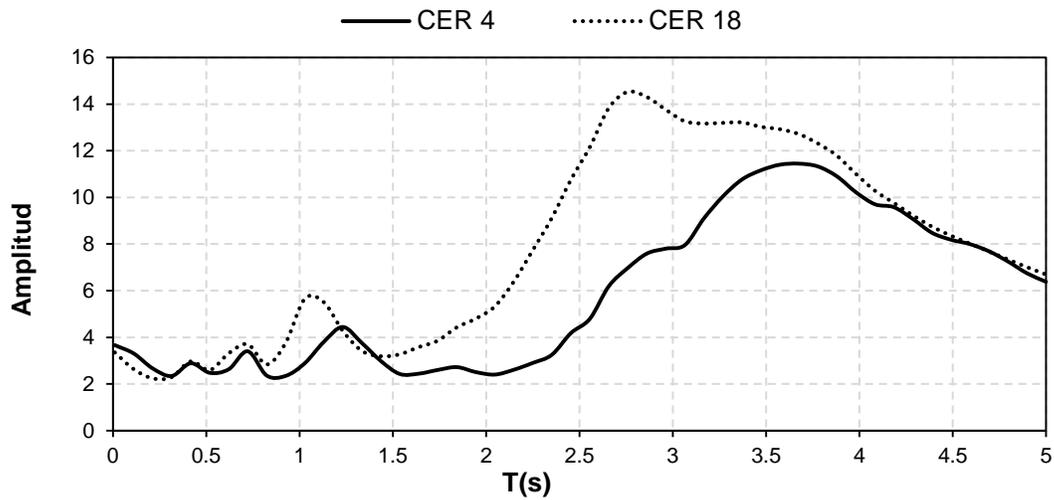


Ilustración 14. Cociente espectral de repuesta para 18 eventos (*CER 18*)(línea punteada) comparado con el cociente espectral de respuesta para 4 eventos (*CER 4*) (línea). Se muestra una mayor amplitud de la señal para *CER 18* en intensidades medias.

Gráficos de las tasas de excedencia en CDAO: método 2.

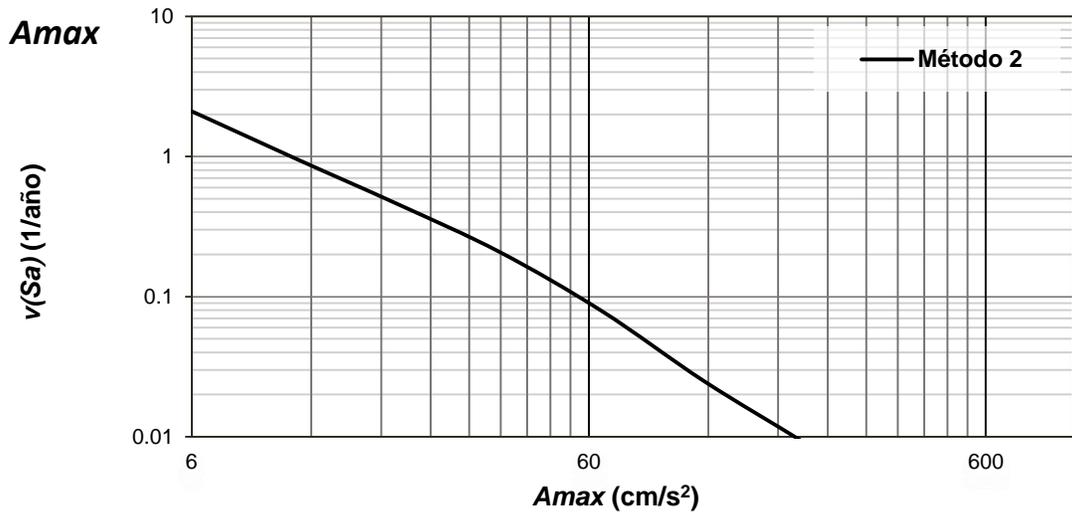


Ilustración 15. Tasa de excedencia en CDAO, calculadas de multiplicar la amplitud del movimiento de del periodo estructural $T=0.01(s)$ para $CER 18 = 3.46$ por la tasa de excedencia en CU.

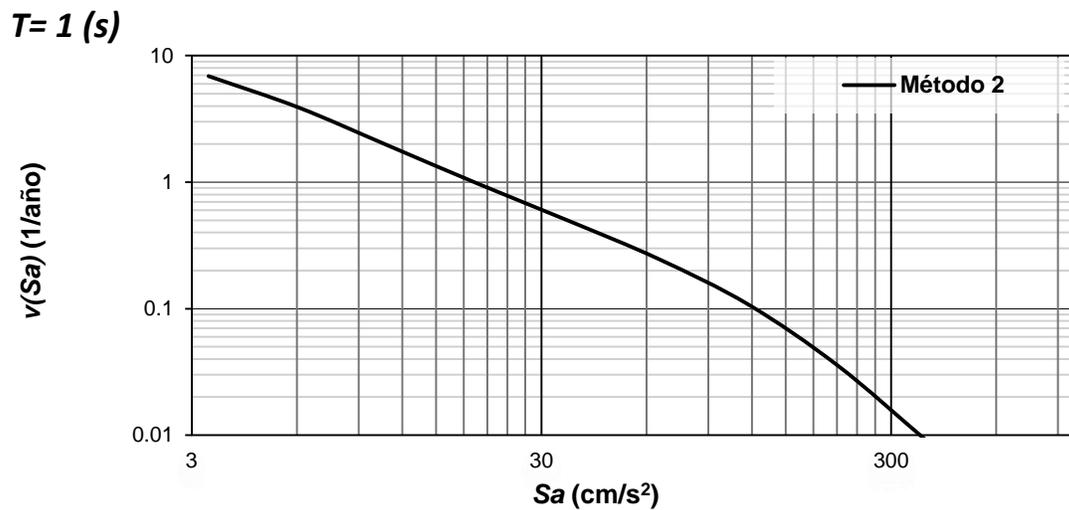


Ilustración 16. Tasa de excedencia en CDAO, calculadas de multiplicar la amplitud del movimiento del periodo estructural $T=1$ (s), $CER\ 18 = 6.14$ por la tasa de excedencia en CU.

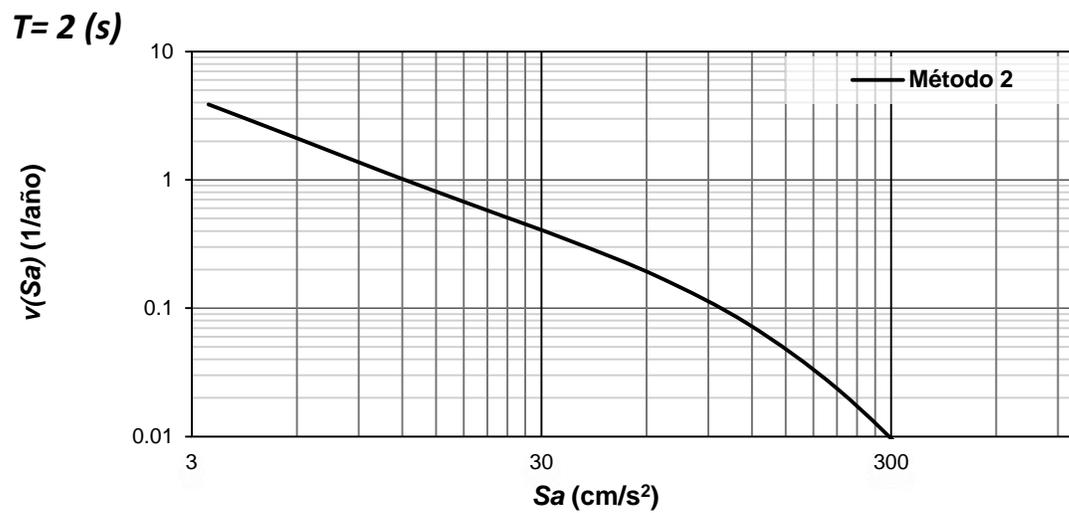


Ilustración 17. Tasa de excedencia en CDAO, calculadas de multiplicar la amplitud del movimiento del periodo estructural $T=2$ (s), $CER\ 18 = 5.74$ por la tasa de excedencia en CU.

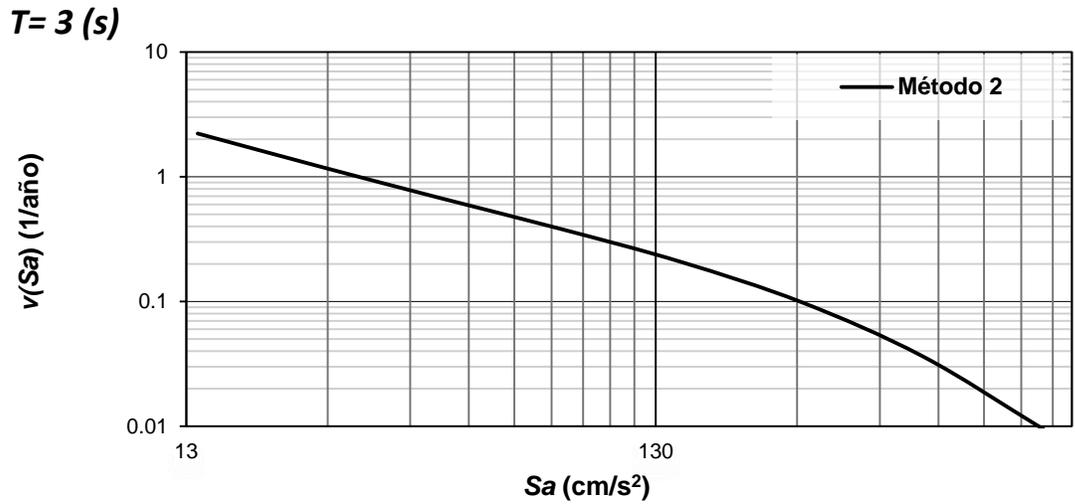


Ilustración 18. Tasa de excedencia en CDAO, calculadas de multiplicar la amplitud del movimiento del periodo estructural $T=3 \text{ (s)}$, $CER 18 = 13.10$ por la tasa de excedencia en CU.

Gráficos de los Espectros de Peligro Uniforme (EPU) en CU.

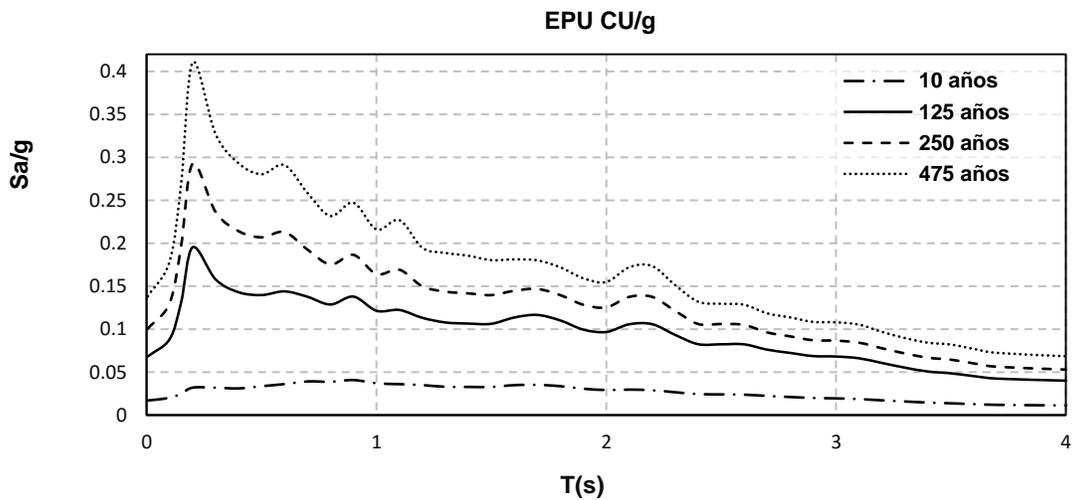


Ilustración 19 Espectros de peligro uniforme (EPU) en CU para cuatro periodos de retorno T_R , obtenidos del inverso de las tasa de excedencia en CU y normalizados entre la gravedad $g=981 \text{ (cm/s}^2\text{)}$, EPU de 10 años (línea guiones y puntos), EPU de 125 años (línea continua), EPU de 250 años (guiones) y EPU 250 años (puntos).

Gráficos de los Espectros de Peligro Uniforme en CDAO: método 2.

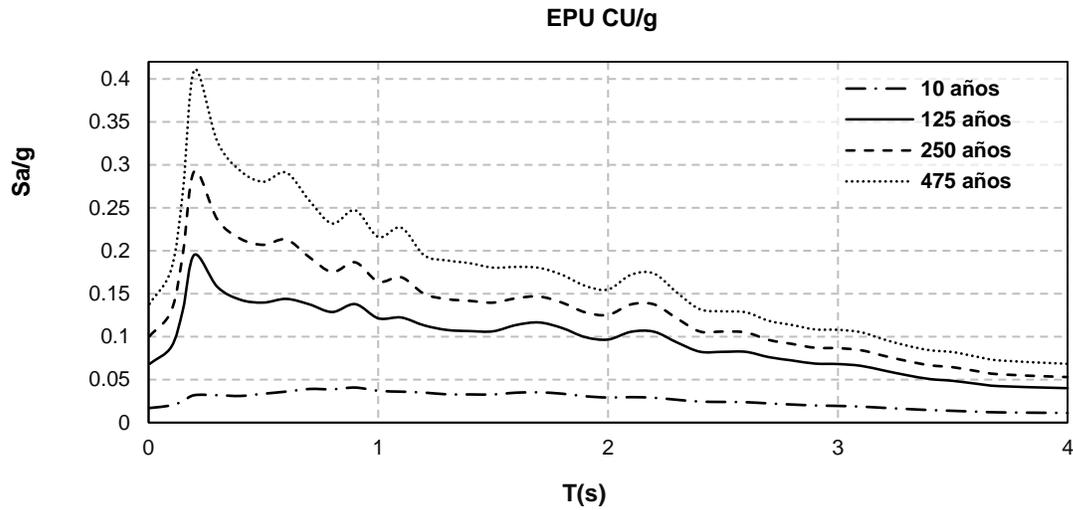


Ilustración 20. Espectros de peligro uniforme (EPU) en CDAO para cuatro periodos de retorno T_R , obtenidos con el método 2, multiplicando los EPU en CU y el *CER 18* y normalizados entre la gravedad $g=981(\text{cm/s}^2)$. EPU de 10 años (línea guiones y puntos), EPU de 125 años (línea continua), EPU de 250 años (guiones) y EPU 250 años (puntos).

Gráficos del espectros de servicio (ES) de las NTCDF 2004 comparado con el sismo de servicio 25/09/1989 (Jaimes, 2002), sismo propuesto para la construcción del ES.

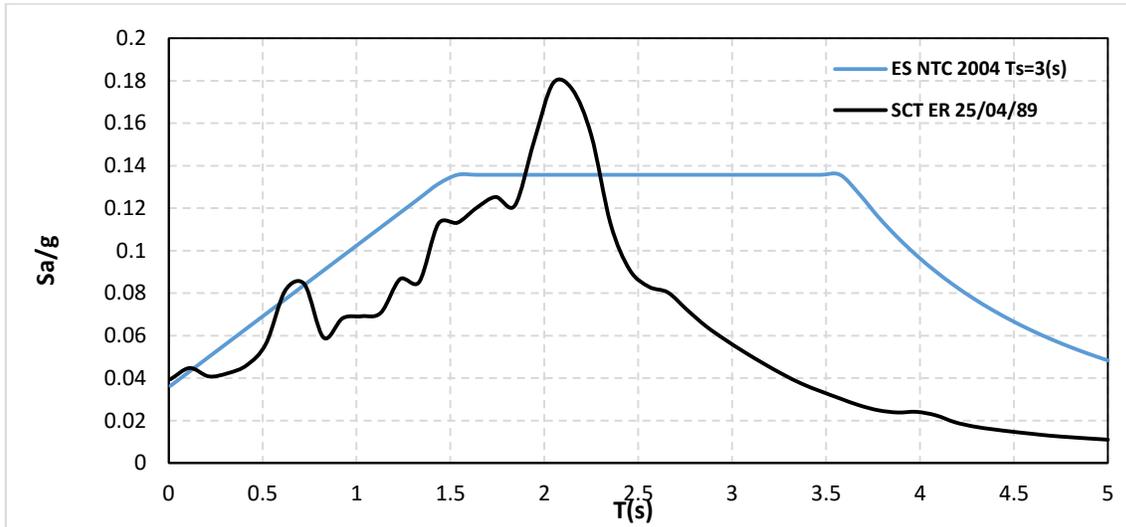


Ilustración 21. Espectro de servicio calculado dividiendo entre 7 el espectro para diseño sísmico para un periodo dominante de sitio $T_s=3(s)$ de CDAO, comparado con el espectro de repuesta en la estación SCT2 para el sismo del 25/04/89.

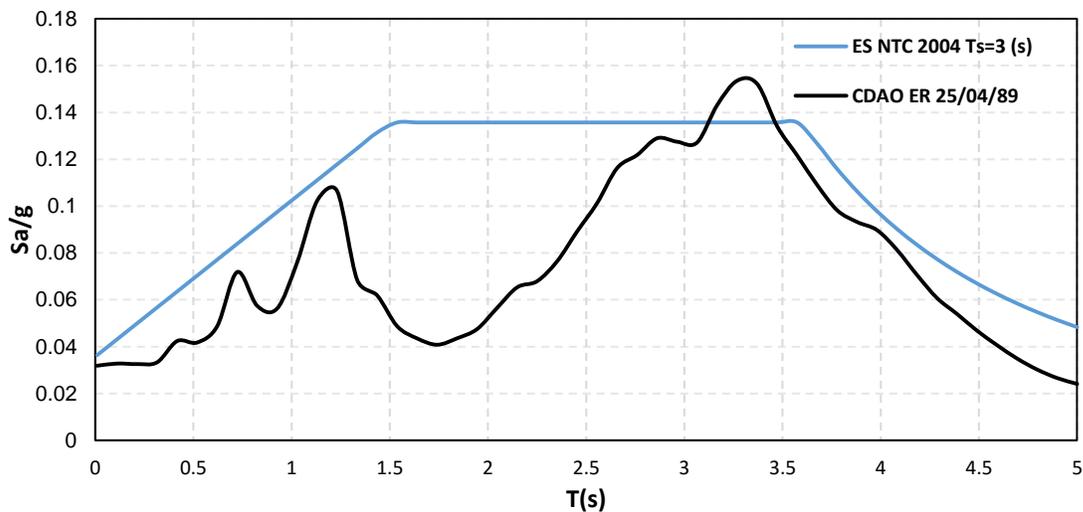


Ilustración 22. Espectro de servicio calculado dividiendo entre 7 el espectro para diseño sísmico para un periodo dominante del sitio $T_s=3(s)$ en CDAO, comparado con el espectro de repuesta en la estación CDAO para el sismo del 25/04/89.

A. Estado del arte: espectro de respuesta.

Para fines de diseño estructural, es importante conocer los valores máximos de respuesta de las estructuras. Si se grafica el valor absoluto del desplazamiento máximo de varias estructuras de un grado de libertad con igual grado de amortiguamiento, en función del período natural de cada una de ellas, se obtiene una curva llamada espectro de respuesta de desplazamientos. Definida como:

$$S_d = \max[u(t)] \quad (A.1)$$

Existen otros dos parámetros que se suelen graficar de forma espectral, es decir, en función del periodo o frecuencia de la estructura. Uno de ellos es la pseudovelocidad, definida como:

$$S_v = \omega_n S_d \quad (A.2)$$

Donde ω_n es la frecuencia natural circular de la estructura.

La pseudovelocidad también se puede expresar en función del periodo de la estructura T con la expresión:

$$S_v = \frac{2\pi}{T} S_d \quad (A.3)$$

El valor de S_v , recibe el nombre de pseudovelocidad, ya que tiene unidad de velocidad y representa una medida de la máxima energía de deformación almacenada en la estructura durante el movimiento.

$$E_{max} = (1/2)ku_{max}^2 = (1/2)kS_d^2 = (1/2)m\omega_n^2 S_d^2 \quad (A.4)$$

Por consiguiente:

$$E_{max} = \frac{1}{2}mS_v^2 \quad (A.5)$$

S_v en función del periodo de la estructura, para un valor constante de amortiguamiento, se denomina espectro de respuesta de pseudovelocidad.

Otro de los parámetros que se grafica en forma espectral, es la denominada pseudoaceleración S_a definida con las expresiones:

$$S_a = \omega_n^2 S_d \quad \text{o} \quad S_a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 S_d \quad (\text{A.6})$$

S_a recibe el nombre de pseudoaceleración por expresarse en unidades de aceleración. Este parámetro es muy útil, pues **permite calcular la fuerza cortante máxima que se produce en la estructura durante un sismo:**

$$V_{max} = k u_{max} = k S_d = m \omega_n^2 S_d \quad (\text{A.7})$$

Por lo tanto:

$$V_{max} = m S_a \quad (\text{A.8})$$

Ó

$$V_{max} = \left(\frac{W}{g}\right) S_a \quad (\text{A.9})$$

Donde W representa el peso de la estructura.

La pseudoaceleración es igual a la máxima fuerza cortante por unidad de masa inducida en la estructura por el movimiento sísmico en su base. El gráfico S_a en función del período de la estructura, para un determinado grado de amortiguamiento, se denomina espectro de respuesta de pseudoaceleración.

El uso de **espectros de respuesta** simplifica notablemente la estimación de **la respuesta estructural debida a excitaciones sísmicas**. La mayoría de los códigos de diseño sismorresistentes incluyen espectros de diseño, que tratan de representar un promedio de las características de las demandas sísmicas sobre las edificaciones.

B. Espectro de respuesta calculado mediante el software Degtra A4

La solución analítica de la ecuación del movimiento para un sistema de un grado de libertad no es posible si la excitación varía arbitrariamente con el tiempo o si el sistema no es lineal. Ese problema se abordó en este trabajo mediante un método numérico paso a paso en el tiempo para la integración de ecuaciones diferenciales.

Método paso a paso en el tiempo

Para un sistema inelástico, la ecuación de movimiento según el principio de D'Alembert (reformulación de la Segunda Ley de Newton) debe resolverse de manera numérica es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + fs(u) = p(t) \quad o \quad -m\ddot{u}_g(t) \quad (B.1)$$

Sometida a las condiciones iniciales

$$u_0 = u(0) \quad \dot{u}_0 = \dot{u}(0) \quad (B.2)$$

Suponiendo un sistema de amortiguamiento viscoso lineal, aunque podría considerarse otro amortiguamiento. La fuerza aplicada $p(t)$ está dada por un conjunto de valores discretos $p_i = p(t_i)$, $i = 0$ a N . El intervalo de tiempo

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \quad (B.3)$$

Suele tomarse como constante, aunque esto no es necesario. La respuesta se determina en los instantes de tiempo discretos t_i , indicados como el tiempo i ; el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del sistema de 1GDL son u_i , \dot{u}_i y \ddot{u}_i , respectivamente. Estos valores, que se suponen conocidos, satisfacen la ecuación en el instante i :

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + (fs)_i = p_i \quad (B.4)$$

Donde $(fs)_i$ es la fuerza restauradora en el momento i : $(fs)_i = ku_i$ para un sistema elástico lineal, pero si el sistema fuera no lineal, dependería de la historia previa del desplazamiento y la velocidad en el instante i .

C. Método basado en la interpolación de la excitación

El programa Degra que sirve para el procesado de señales y visualización de datos sísmicos, permitió obtener los espectros de respuesta de las pseudoaceleraciones con uno de los métodos analíticos paso a paso. A continuación, se explica las consideraciones de este método.

El procedimiento mediante la interpolación de la excitación en cada intervalo de tiempo y el desarrollo de la solución exacta. Si los intervalos de tiempo son cortos, la interpolación lineal es satisfactoria. La función de excitación está dada por:

$$p(\tau) = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (C.1)$$

Donde

$$\Delta p_{i+1} - p_i \quad (C.2)$$

La variable de tiempo τ varía de 0 a Δt_i . La ecuación a resolver es:

$$m\ddot{u}_i + ku = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (C.2)$$

Sometida a las condiciones iniciales $u(0) = u_i$ y $\dot{u}(0) = \dot{u}_i$. La respuesta $u(\tau)$ durante el intervalo $0 \leq \tau \leq \Delta t_i$ es la suma de tres partes: (1) la vibración libre debida al desplazamiento inicial u_i y la velocidad \dot{u}_i en $\tau=0$, (2) la respuesta a la fuerza de paso p_i con condiciones iniciales nulas y (3) la respuesta a la fuerza incremental $(\Delta p_i / \Delta t_i)\tau$ con condiciones iniciales nulas. Adaptando, se obtiene

$$u(\tau) = u_i \cos \omega_n \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \sin \omega_n \tau + \frac{p_i}{k} (1 - \cos \omega_n \tau) + \frac{\Delta p_i}{k} \left(\frac{\tau}{\Delta t_i} - \frac{\sin \omega_n \tau}{\omega_n \Delta t_i} \right) \quad (B.3)$$

Y la diferenciación de u

(τ) conduce a

$$\frac{\dot{u}(\tau)}{\omega_n} = -u_i \sin \omega_n \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos \omega_n \tau + \frac{p_i}{k} \sin \omega_n \tau + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} (1 - \cos \omega_n \tau) \quad (B.4)$$

Si se evalúan estas ecuaciones en $t=\Delta t_i$, se obtiene el desplazamiento u_{i+1} y velocidad \dot{u}_{i+1} en el instante $i + 1$:

$$u_{i+1} = u_i \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \sin(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} [1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} [\omega_n \Delta t_i - \sin(\omega_n \Delta t_i)] \quad (B.5)$$

$$\frac{\dot{u}_{i+1}}{\omega_n} = -u_i \sin(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} \sin(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} [1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] \quad (B.6)$$

Estas ecuaciones se pueden reescribir después de sustituir la ecuación (C.2) como fórmulas de recurrencia:

$$u_{i+1} = Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1} \quad (C.7)$$

$$\dot{u}_{i+1} = A'\dot{u}_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1} \quad (C.8)$$

Al repetir la deducción anterior para los sistemas amortiguados por debajo del nivel crítico (es decir, $\xi < 1$), se observa que las ecuaciones también son aplicables a los sistemas amortiguados con las expresiones para los coeficientes A, B, ..., D' dadas en la tabla 5.2.1 tomadas de Chopra sección 5.3 pag. 169. Los coeficientes dependen de los parámetros del sistema ω_n , k y ζ , y del intervalo de tiempo $\Delta t \equiv \Delta t_i$.

Formulas tomadas de Chopra

$$A = e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_D \Delta t + \cos \omega_D \Delta t \right) \quad (C.9)$$

$$B = e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left(\frac{1}{\omega_D} \sin \omega_D \Delta t \right) \quad (C.10)$$

$$C = \frac{1}{k} \left\{ \frac{2\zeta}{\omega_D \Delta t} + e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left[\left(\frac{1 - 2\zeta^2}{\omega_D \Delta t} - \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right) \sin \omega_D \Delta t - \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_D \Delta t} \right) \cos \omega_D \Delta t \right] \right\} \quad (C.11)$$

$$D = \frac{1}{k} \left[1 - \frac{2\zeta}{\omega_D \Delta t} + e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left(\frac{2\zeta^2 - 1}{\omega_D \Delta t} \sin \omega_D \Delta t + \frac{2\zeta}{\omega_D \Delta t} \cos \omega_D \Delta t \right) \right] \quad (C.12)$$

$$A' = -e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_D \Delta t \right) \quad (C.13)$$

$$B' = e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left(\cos \omega_D \Delta t - \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_D \Delta t \right) \quad (C.14)$$

$$C' = \frac{1}{k} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left[\left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} + \frac{\zeta}{\Delta t \sqrt{1-\zeta^2}} \right) \sin \omega_D \Delta t + \frac{1}{\Delta t} \cos \omega_D \Delta t \right] \right\} \quad (C.15)$$

$$D' = \frac{1}{k \Delta t} \left[1 - e^{-\zeta \omega_n \Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D \Delta t + \cos \omega_D \Delta t \right) \right] \quad (C.17)$$