

**ASIGNACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE
EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Alonso Gómez Bernal
(Responsable)



Hugón Juárez García

Eduardo Arellano Méndez

Oscar González Cuevas

Jonathan de Anda Gil

REPORTE FINAL
UAM-A/DMAE-2020-05
Diciembre de 2020

El presente estudio de investigación se realizó dentro del **Convenio de Colaboración ISCDF/CEC-04/2020-05** entre el Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal y la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, el cual consta de 73 páginas.

CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 Antecedentes y Justificación
- 1.2 Curvas de Vulnerabilidad Sísmica
- 1.3 Objetivos

CAPITULO 2. EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE Y LAS TIPOLOGÍAS DE EDIFICIOS RESIDENCIALES

- 2.1 Intensidad del sismo del 19 septiembre de 2017 en la Ciudad de México
- 2.2 Clasificación por Grados de daño
- 2.3 Estadísticas por tipología estructural
- 2.4 Los espectros de diseño del Reglamentos de Construcciones para la Ciudad de México
- 2.5 Mapas de cocientes resistentes (MCR) y mapas de demanda de ductilidad (MDD)

CAPITULO 3. ESPECTROS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

- 3.1 Características de los espectros en el suelo firme de la Ciudad de México
- 3.2 Características de los espectros en el suelo blando de la Ciudad de México
- 3.3 Metodología para asignar el Peligro Sísmico
- 3.4 Curvas de peligro Sísmico en Suelo Firme
- 3.5 Espectros de Diseño de las NTC para Diseño por Sismo, 2017
- 3.6 Espectros de Peligro en terreno blando

CAPITULO 4. VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS EN CIUDAD DE MÉXICO

- 4.1 Metodología utilizada
- 4.2 Edificios estudiados
- 4.3 Análisis estáticos no-lineales y curvas de capacidad
- 4.4 Espectros de capacidad
- 4.5 Definición de umbrales de daño
- 4.6 Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

4.7 Recomendaciones para reducir la vulnerabilidad de las tipologías estudiadas

4.8 Curvas de fragilidad para edificios construidos después de 1985

4.9 Conclusiones

APENDICE A. CLASIFICACIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

APENDICE B. DETALLES ESTRUCTURALES DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS

APÉNDICE C. UNA EXPRESIÓN PARA ESTIMAR EL PERIODO FUNDAMENTAL DE TIPOLOGÍAS SE2

REFERENCIAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Mapa de intensidades PGA del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la CIUDAD DE MÉXICO

Figura 2.2. Definición de Grados de Daño según la escala EME 98

Figura 2.3. Porcentaje de edificios según su Grado de Daño

Figura 2.4. Localización de edificios con Grado de Daño 3-5

Figura 2.5. Clasificación de daño (GD 3-5) por zonas de la CIUDAD DE MÉXICO

Figura 2.6. Estadísticas de Daños según el número de niveles

Figura 2.7. Estadísticas de Grado de Daño según su sistema estructural

Figura 2.8. Estadísticas de edificaciones dañadas (GD3-GD5) con ubicación en esquina

Figura 2.9. Espectros de respuesta del 5% del sismo 19/09/2017, y espectros de diseño de los Reglamentos R1976, R1987 y R2004.

Figura 2.10. Espectros demanda de ductilidad en SCT ($\mu=1,2,4$). R1976, sobrerresistencia: 1.5.

Figura 2.11. Espectros de demanda de ductilidad en CI05 y GR27 ($\mu=1, \mu=2, \mu=3$). R-1976 sobrerresistencia: 1.5

Figura 2.12. Espectros de respuesta del sismo 19/09/2017 y de diseño (R-1976, 2004, 2017) de la Zona I, II, III A y III B

Figura 2.13. Estaciones de la red acelerográfica de la Ciudad de México

Figura 2.14. Mapas de ductilidad y cociente sísmico correspondientes al sismo del 19/09/2017 para intervalos de periodo $T=0.60-0.84$ s

Figura 2.15. Mapas de ductilidad y de cociente sísmico correspondientes al sismo del 19/09/2017 para intervalos de periodo $T=1.08-1.32$ s

Figura 3.1. Variación de PGA esperada y registradas (a) Arriba: componentes horizontales; (b) Abajo: componente vertical.

Figura 3.2 (a) Formas Espectrales en estaciones de la Zona I de Ciudad de México por tipo de fuente; (b) Espectros de respuesta (5%) del sismo 19 de septiembre de 2017, con el espectro estimado.

Figura 3.3 Espectros de respuesta normalizados en la estación CO56 (Col Roma), no se detectan diferencias espectrales debido al origen.

Figura 3.4. Espectros de respuesta normalizados en la estación TH35 (Tláhuac), mostrando las diferencias espectrales dependiendo del origen del sismo en la fuente y de la distancia.

Figura 3.5. Formas espectrales a) Intraplaca b) Interplaca c) Corticales

Figura 3.6. Curva de Peligro Sísmico para PGA en Tacubaya, Ciudad de México.

Figura 3.7. Curva de Peligro Sísmico para PGA en Tlalpan, Ciudad de México.

Figura 3.8 Espectros de Peligro Uniforme en sitios de Ciudad de México y Estado de México

Figura 3.9. Comparación de EPU y SASID a) Tlalpan b) Tacubaya

Figura 3.10. Espectro de Diseño Transparente Ixtapaluca, EDO. MÉX. y Tacubaya, CMDX

Figura 3.11 Espectros de Peligro en estación CO56, comparación de espectros con las NTC sismo (SASID).

Figura 4.1. Metodología desarrollada para calcular funciones de vulnerabilidad

Figura 4.2. Plantas estructurales de los edificios estudiados. Arriba: SE2-5N y SE2-7N, Abajo: SE2-8N, SE2-10N y SE2-12N respectivamente.

Figura 4.3. Curvas de capacidad de los edificios estudiados

Figura 4.4. a) Espectros de Diseño (ED) R-1976. b) afectados por una Sobrerresistencia (SBR) de 1.5 y coeficientes resistentes “Cs” para los edificios estudiados

Figura 4.5. Espectros de capacidad de edificios estudiados de 5 a 12 niveles.

Figura 4.6. Espectros de Capacidad y umbrales de daño para dos grupos de edificios.

Figura 4.7. Izquierda: curvas de fragilidad, y desplazamientos S_d para cada edificio según su periodo, en las estaciones SI53 y AO24. Derecha: Histograma de Probabilidad de Daño para cada edificio.

Figura 4.8. Curvas de fragilidad, se indican con línea discontinua los desplazamientos S_d para cada edificio según su periodo, calculados en las estaciones SI53 y AO24 respectivamente.

Figura 4.9. Histograma de Probabilidad de Daño para edificios SE2-8N, SE2-10N y SE2-12N.

Figura 4.10. Histograma global de probabilidades de daños estudiados.

Figura 4.11. Curvas de fragilidad para edificios con periodos entre 0.60-0.84 s y 1.32-1.56 s.

Figura 4.12. Curvas de capacidad del grupo de modelos SE-10N.

Figura 4.13. Curvas de capacidad del grupo de modelos SE-5N.

Figura 4.14. Espectros de Capacidad determinados a partir de los espectros de diseño de las NTC2004 para la zona IIIb y usando un factor de sobrerresistencia de 1.5.

Figura 4.15. Curvas de fragilidad para edificios con un factor $Q=2$ y periodos T de 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 y 2.0 s.

Figura 4.16. Espectros de respuesta de desplazamientos, S_d , elásticos ($Q=1$) y reducción de ductilidad ($Q=2$) en 11 estaciones de la Zona IIIb del sismo 19/09/2017. Se incluye el promedio y el percentil 84%.

Figura B1. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-5N usadas en el análisis no-lineal.

Figura B2. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-7N usadas en el análisis no-lineal.

Figura B3. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-10N usadas en el análisis no-lineal.

Figura B4. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-12N usadas en el análisis no-lineal.

Figura B5. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-8N usadas en el análisis no-lineal.

Figura C1. Porcentaje de los Edificios en esquina con algún tipo de daño. Derecha, edificios con Grado de daño 3, 4 y 5 y con irregularidad en planta, dañados por el sismo del 19/09/2017.

Figura C2. Siete de los varios edificios en esquina y con sistema de piso a base de losa plana aligerada que resultaron dañados por el sismo 19/09/2017.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Relación entre Intensidad EME y aceleración máxima del suelo (PGA) en la Ciudad de México (Gómez Bernal et al., 2005).

Tabla 2.2. Distribución de intensidades en la Ciudad de México.

Tabla 2.3. Clasificaciones de daño en edificaciones,

Tabla 2.4. Edificios con Grado de Daño 3-5 en Ciudad de México.

Tabla 2.5. Estadísticas de daños (GD 3-5) de principales sistemas estructurales en la Ciudad de México.

Tabla 2.6. Tipologías Estructurales en función de su altura.

Tabla 2.7. Estadísticas de edificios con GD3-GD5 por tipología y año de construcción.

Tabla 3.1 Parámetros Espectro de Diseño Transparente Ixtapaluca, EDO. MÉX. y Tacubaya

Tabla 4.1. Características generales de los edificios estudiados.

Tabla 4.2 Puntos característicos de las curvas de la Figura 4.3

Tabla 4.3. Umbrales de daño para los dos grupos de tipologías

Tabla 4.4. Distribución de probabilidades de excedencia del 50% en cada estado de daño.

Tabla 4.5. Principales parámetros para la construcción de curvas de fragilidad.

Tabla 4.6. Relación de umbrales de daño con clasificación EME-98.

Tabla 4.7. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-5N.

Tabla 4.8. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-7N

Tabla 4.9. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-8N

Tabla 4.10. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-10N.

Tabla 4.11. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-10N

Tabla 4.12. Resultados obtenidos para la tipología SE2 de 5-12 niveles

Tabla 4.13. Parámetros de las curvas de fragilidad de los modelos de la Figura 4.15.

Tabla C1. Características de edificios SE2, ocho en esquina (E) y siete con planta alargada (L)

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y Justificación

El martes 19 de septiembre de 2017, a las 13:14:40 PM, hora local, ocurrió un fuerte terremoto de Magnitud $M=7.1$; las coordenadas del epicentro según el Servicio Sismológico Nacional, SSN, son 18.40 latitud N y -98.72 longitud W; a menos de 5 km de la línea divisoria de los estados de Puebla y Morelos, cerca de la población de Tlancualpican Puebla. El sismo de originó a más de 50 km de profundidad, dentro de la placa de Cocos, que se desplaza con un ángulo prácticamente horizontal en el centro del país, por debajo de la placa continental. El Sismo afectó el área central del país, ocasionando daños severos, principalmente a la Ciudad de México y a los estados de Morelos, Puebla, Guerrero y México; dejando como consecuencias un total de 369 muertos, de los cuales 228 ocurrieron en la Ciudad de México; además de daños en construcciones y en la infraestructura, y una pérdida económica estimada en \$490 millones de dólares. Las regiones más afectadas cerca de la zona epicentral fueron Zacatepec y Jojutla Morelos, en esta última población se dañaron más del 40% de las construcciones. Debido a su gran cercanía con la zona urbana de la Ciudad de México, la intensidad del movimiento del suelo fue muy alta, alcanzando aceleraciones máximas absolutas, PGA, de hasta 23% de la aceleración de la gravedad.

La zona afectada con algún tipo de daño comprende un radio aproximado de 120 Km desde el epicentro, quedando encerrada dentro de la curva de iso-aceleraciones máximas del suelo, PGA, del 10% de la gravedad. Según SEDATU un total de 60,801 construcciones resultaron con daños por el movimiento del suelo. En Ciudad de México, más de 60 edificios sufrieron colapso o daño severo irreparable, alrededor de 380 resultaron con daño importante, 310 con daño medio y más de 2000 edificios con algún tipo de daño menor; aunque el número de inmuebles reportados excedió los 5000 inmuebles. La zona de mayor daño se localiza en la Zona III A y en la de Transición. Las altas irregularidades en la configuración estructural contribuyeron en gran medida a los daños en Ciudad de México y en otras poblaciones. El porcentaje de daños en edificios de esquina según la base de datos recopilada llega al 36%. El daño por golpeteo debido a la cercanía entre edificios vecinos fue bastante común (Gómez-Bernal y otros, 2018).

Los Reglamentos de construcciones para la Ciudad de México han evolucionado desde hace 75 años en parte debido a importantes eventos sísmicos que han afectado a la ciudad, como por ejemplo los sismos de 1957 y 1985 que impulsaron las Normas de Emergencia de 1957 y 1985 respectivamente, y posteriormente las versiones de 1966 y 1987; después de 1987 se han emitido varias versiones como las del año 1993, 2004 hasta las vigentes emitidas en el año 2017. Se pueden comparar estos espectros que se usaron en la construcción de los edificios dañados con algunos espectros de respuesta en varios lugares específicos en diferentes zonas.

Como se ha mencionado, las consecuencias de los daños en la infraestructura del país son muchas y costosas, por lo que se requiere realizar más estudios sobre la vulnerabilidad de los edificios de la Ciudad de México.

1.2 Curvas de Vulnerabilidad sísmica

La capacidad de evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura civil a los daños inducidos por terremotos es sin duda uno de los desafíos más importantes a los que se enfrentan los ingenieros estructurales. Por lo general, se utilizan dos métodos para predecir el daño por sismos: el análisis de elementos finitos (EF) no lineales y las curvas de vulnerabilidad sísmica. El análisis con EF no lineal es particularmente aplicable cuando se requiere una estimación detallada de daños sólo para un pequeño número de estructuras. Sin embargo, si se requiere una estimación para numerosas estructuras, el proceso se vuelve lento e ineficiente. Las curvas de vulnerabilidad sísmica proporcionan un método más eficiente para predecir el daño a una clase de estructuras similares. Estas curvas suelen relacionar el movimiento del suelo y las propiedades estructurales con el daño. Estas curvas se construyen generalmente a partir de análisis estadísticos de datos históricos de campo (Hassan y Sozen 1997) o datos simulados analíticamente (Lang y Bachmann 2004). Sin embargo, el número de parámetros considerados al crear curvas de vulnerabilidad suele ser muy limitado. La investigación sobre métodos generalizados de predicción de daños ha sido escasa. Ejemplos notables incluyen Yúccemen et al. (2004) y Yakut et al. (2006) que utilizaron el análisis discriminador para predecir el daño de las construcciones en una clasificación de dos o tres estados de daño. Recientemente se han realizados estudios de vulnerabilidad utilizando redes neuronales artificiales (Lautour y Omenzetter, 2009; y Yuan et al, 2020), donde se correlaciona el parámetro de intensidad del movimiento del suelo con los estados de daño de estructuras tipo. para análisis de riesgos a gran escala. En un estudio de vulnerabilidad, Villar-Vega et al (2017) definieron conjuntos de osciladores de un solo grado de libertad y los sometieron a una serie de registros de movimiento del suelo utilizando análisis de historias de tiempo no lineal, y las distribuciones de daño resultantes se utilizaron para derivar conjuntos de funciones de fragilidad.

A partir del análisis de las estadísticas de edificios dañados durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, se pudieron identificar los grupos de edificios que resultaron más vulnerables. Una de estas tipologías corresponde a edificios estructurados a base de columnas de concreto reforzado sin trabes y con losas planas, que fueron construidos antes de septiembre de 1985. Se cuenta con información detallada de una muestra de edificios dañados por el sismo de 2017. Este estudio se enfoca en la evaluación de la vulnerabilidad de dos grupos de edificios, el primero las estructuras construidas antes de 1985 cuando era aplicable el Reglamento de Construcciones de 1976, y el segundo comprende los construidos posterior a esa fecha.

Para poder asignar la vulnerabilidad estructural a la población de edificios de una ciudad, es necesario aplicar una metodología analítica para la evaluación de la respuesta sísmica de una clase de edificios, que se combina con un modelo de daño con el fin de derivar conjuntos de funciones de fragilidad para diferentes niveles de comportamiento sísmico. En este artículo, se aplica una metodología propia desarrollada con base en conceptos que han publicado el HAZUS del FEMA2003, el RISK-UE y la escala EME98. La metodología desarrollada se compone en general de los siguientes pasos: (1) Definición de las curvas de capacidad de los sistemas estructurales, en este caso se usaron datos de edificios dañados representativos de la tipología más vulnerable ante los sismos del 19 de septiembre, de 1985 y de 2017, pero también se usaron modelos analíticos representativos de otras tipologías comunes de estructuras construidas después de 1985; (2) Definición de los criterios de daño adoptados y elaboración de los espectros de capacidad; (3) Estimación de las curvas de capacidad media, mismas que son representadas en su forma bilineal para definir los umbrales de daño y con ello construir las curvas de fragilidad y sus matrices de probabilidad de daño; (4) cálculo de daño global de la estructura de manera analítica. Las curvas de fragilidad resultantes de este estudio se calibraron con dos escenarios, con los dos eventos del 19 de septiembre de 2017.

La presente investigación tiene la finalidad de evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mediana altura (4-12 niveles) localizados en la Ciudad de México, a raíz de lo observado el 19 de septiembre de 2017, donde el daño más severo se concentró en edificios construidos antes de 1985, cuando era aplicable el Reglamento de Construcciones de 1976 (debido a las amplificaciones causadas por las ya famosas condiciones locales del subsuelo). En este trabajo se correlacionan los daños, los espectros de peligro uniforme y los mapas de demanda de ductilidad, en los que se observa que en algunos casos se exceden las demandas de las resistencias. Además, se identificará la vulnerabilidad con curvas de fragilidad para las tipologías más comunes de edificios de mediana altura.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Asignar la Vulnerabilidad Sísmica a las diferentes tipologías de edificios en función de los periodos de construcción marcados por las diferentes versiones del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México.

Objetivos específicos

1. Analizar y verificar la información existente sobre las estadísticas de daños de los sismos del 19 de septiembre de 1985 y del 19 de septiembre de 2017.

2. Generar mapas de Iso-ductilidades (demandas de ductilidad), así como mapas de cocientes de coeficiente resistente (con sobre-resistencia) para las diferentes versiones del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, desde 1976 a la fecha.
3. Calcular Espectros de Peligro Uniforme (EPU) en terreno firme y en suelo blando para diferentes zonas de la Ciudad de México.
4. Generar curvas de vulnerabilidad para las principales tipologías de edificios con base en la información existente de los planos de los edificios dañados por el sismo de 2017.
5. Proponer recomendaciones para cada grupo de edificios estudiado, que posteriormente se puedan incorporar al diseño de acuerdo a la reglamentación vigente.

CAPITULO 2

EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE Y LAS TIPOLOGÍAS DE EDIFICIOS RESIDENCIALES

2.1 Intensidad del sismo del 19 septiembre de 2017 en la Ciudad de México

Es posible relacionar a la intensidad medida, en términos de aceleración máxima del suelo (PGA), con otro tipo de escalas que representan la severidad de la sacudida del suelo basada en los efectos observados en un área limitada, es decir, es una forma de medición de los efectos y daños producidos por un sismo. Algunas de estas escalas son: Escala de Mercalli Modificada (EMM), Escala Macrosísmica Europea (EME), Escala de Rossi-Forel, Escala Japonesa. Existen varios autores que proponen relaciones entre intensidad y aceleración máxima del terreno (PGA), sin embargo, la mayoría están basados en la EMM, que, aunque tiene características similares a la EME, la aceleración con la que se relacionan ambas escalas difiere una de la otra.

En este trabajo de investigación se hace una relación de las aceleraciones máximas del suelo de la Ciudad de México con la Escala Macrosísmica Europea (EME), dado que la asignación de grado de daño es la utilizada por esta metodología, además de que con esta escala es posible manejar incrementos de intensidad para tomar los efectos locales. La relación con la EME se realiza según Gómez Bernal et al. (2005), donde se plantea una relación entre la intensidad EME y la aceleración máxima del suelo basada en estudios previos y en las observaciones de los daños del sismo de septiembre de 1985.

Tabla 2.1. Relación entre Intensidad EME y aceleración máxima del suelo (PGA) en la Ciudad de México (Gómez Bernal et al., 2005).

Intensidad EME	5.0 (V)	6.0 (VI)	6.5 (VI-VII)	7.0 (VII)	7.5 (VII-VIII)	8.0 (VIII)
AMS (g)	0.035	0.100	0.133	0.165	0.200	0.230

Curvas de isoaceleraciones (PGA) en la Ciudad de México

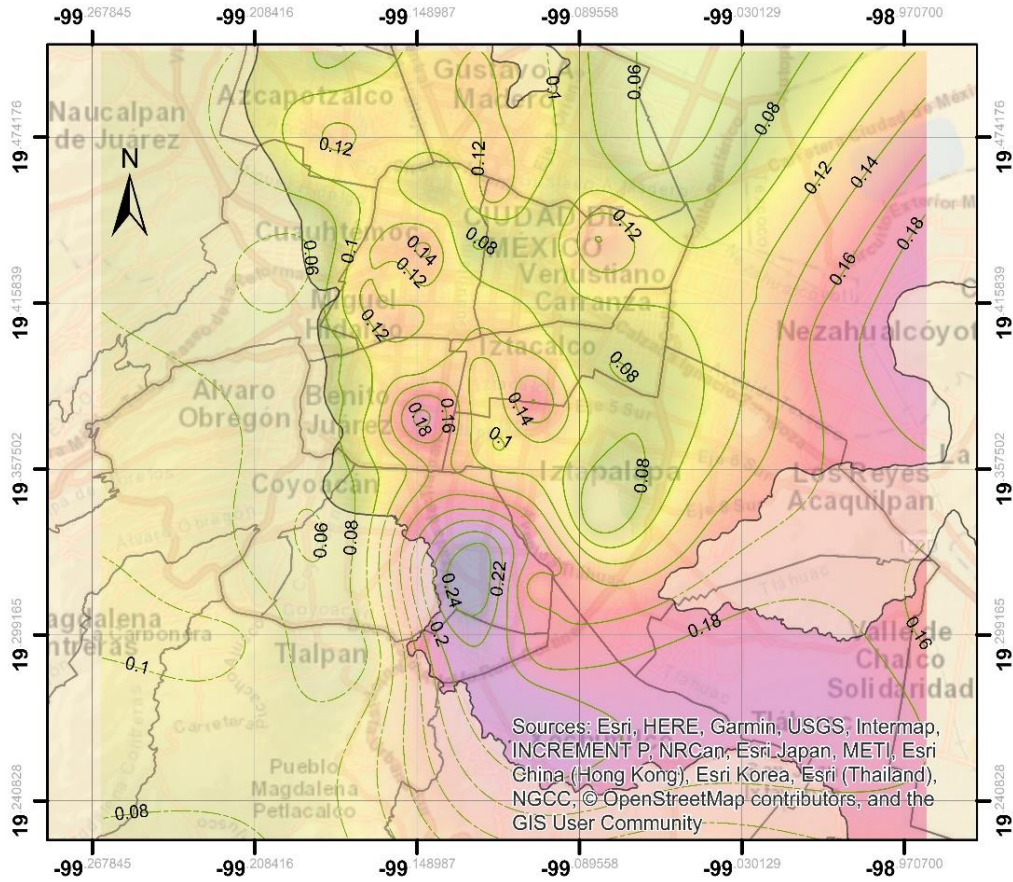


Figura 2.1. Mapa de intensidades PGA del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México

Tabla 2.2. Distribución de intensidades en la Ciudad de México

Clave	Delegación	PGA (g)	EME
AOB	Álvaro Obregón	0.08-0.10	VI
AZC	Azcapotzalco	0.08-0.12	VI
BJU	Benito Juárez	0.10-0.19	VI-VIII
COY	Coyoacán	0.16-0.24	VII-VIII
CUA	Cuauhtémoc	0.10-0.14	VI-VIII
GAM	Gustavo A. M.	0.06-0.125	VI-VII
IZC	Iztacalco	0.08-0.14	VI-VII
IZT	Iztapalapa	0.08-0.14	VI-VII
MGC	Magdalena C.	0.08-0.10	VI
MHI	Miguel Hidalgo	0.08-0.10	VI
MPA	Milpa Alta	0.090	VI
TLH	Tláhuac	0.18-0.20	VII-VIII
TLA	Tlalpan	0.08-0.10	VI
VCA	Venustiano C.	0.10-0.14	VI-VII
XOC	Xochimilco	0.16-0.22	VII-VIII

Si se relacionan las aceleraciones máximas del suelo (PGA) observadas de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 con la escala de la EME, las intensidades correspondientes varían entre VI, VII y VIII respectivamente, estas asignaciones se hacen de acuerdo a la Tabla 2.1 y al mapa de aceleraciones máximas del suelo mostrada en la Figura 2.1, donde claramente se observa las zonas con mayores intensidades, parte de ellas son las delegaciones Benito Juárez, Coyoacán, Tláhuac, Xochimilco y Cuauhtémoc; siendo el valor de esta última ajustado, dado que si bien le correspondería una intensidad de VII debido a su aceleración máxima, es bien sabido que esta zona es muy vulnerable debido a sus efectos locales de sitio, así mismo como se verá más adelante en cierto sector de esta delegación ocurrieron colapsos (GD5), mismos que no son considerados en una intensidad de VII de acuerdo a la EME.

Por otro lado, podemos notar que las Alcaldías que se encuentran en terreno firme tuvieron una intensidad de VI según la Tabla 2.2, mismas que alcanzan aceleraciones de 0.10 g, estas Delegaciones son: Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Miguel Hidalgo y Milpa Alta. Además, se observa cierta diferencia entre las zonas en suelo duro con respecto a las zonas de suelo blando del doble, es decir mientras las intensidades en suelo blando son de VI en suelo duro alcanzan hasta una intensidad de VIII. La Tabla 2.2 muestra la relación de PGA con la EME, en donde se presentan intervalos de aceleraciones máximas del suelo (PGA) con sus respectivas escalas según la EME y las relaciones de la Tabla 2.1.

La delegación Coyoacán es sin lugar a dudas la zona que resulto con mayor intensidad en la Ciudad de México, seguida por las Delegaciones Xochimilco, Tláhuac, Benito Juárez y Cuauhtémoc. Dentro de esta última Delegación puede notarse que existe un sector donde se generó una intensidad considerable, la cual corresponde las Colonias Roma-Condesa-Hipódromo (0.10-0.12g).

2.2 Clasificación por Grados de daño

La asignación se hizo de acuerdo a los daños observados por el sismo del 19 de septiembre de 2017, y no considerando los daños ajenos al mismo, sin embargo, es conveniente mencionar que en la base de datos desarrollada también se consideró un grado de daño previo en caso de que lo tuviera, debido a que algunas edificaciones, ya habían sido dañadas por sismos anteriores como el sismo del 85, inclusive existen otras causas de daños, como lo es la falta de mantenimiento de la estructura a lo largo de su vida útil, asentamientos diferenciales, deficiencia en la construcción o diseño de una edificación, etc. Otras de las causas de daño que se hicieron presentes por el sismo del 19/09/17, son clasificadas y descritas de manera más completa por Gómez Bernal et al., 2019.



Figura 2.2. Definición de Grados de Daño según la escala EME 98

Tabla 2.3. Clasificaciones de daño en edificaciones

Plataforma CDMX		EME98		Risk-UE	
Clave	Clasificación	Clave	Clasificación	Clave	Clasificación
RB	Riesgo Bajo	GD1	Grado de Daño 1	SD	Sin Daño
RM	Riesgo Medio	GD2	Grado de Daño 2	DL	Daño Leve
RA	Riesgo Alto	GD3	Grado de Daño 3	DM	Daño Moderado
ARC	Alto Riesgo de Colapso	GD3-GD4	Grado de Daño 3-4	DM-DS	Daño Moderado-Severo
CP-CT	Colapso Parcial y Total	GD5	Grado de Daño 5	DC	Daño Completo

El sismo del 19 de septiembre de 2017 provocó daños estructurales significativos en una gran cantidad de edificios de la Ciudad de México, siendo reportados más de 8,000 inmuebles. Sin embargo, este estudio considera el inventario de la base de datos desarrollada por el Área de Estructuras de la UAM-A, la cual incluye información recopilada por la misma y otras dependencias para un mejor análisis de datos, siendo un total de 1094 edificios registrados con algún tipo de daño en toda la ciudad.

En la gráfica de la Figura 2.3 se observa que, de esas 1094 estructuras clasificadas, el 28% corresponde a edificios con Grado de Daño importante (GD 3-5), es decir aproximadamente un cuarto de las estructuras dañadas, mientras que el 72% tiene un daño menor (GD 1-2). El total de las estructuras colapsadas (GD 5, 32) y con daño grave (GD 4, 45) debido al sismo del 19 de septiembre de 2017 fueron 77, mismas que corresponden a un 7% de las edificaciones registradas en la base de datos.

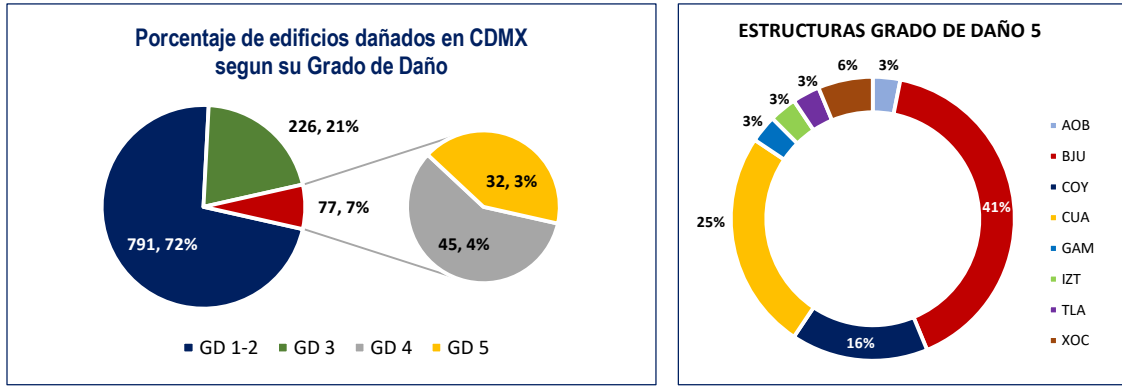


Figura 2.3. Porcentaje de edificios según su Grado de Daño

Las estructuras con Grado de Daño 3-5 se distribuyen en las diferentes Delegaciones de la Ciudad de México, sin embargo, existen ciertas zonas donde ocurrieron los mayores porcentajes de daño. Los sectores más afectados por el sismo fueron las Delegaciones Cuauhtémoc con 146 edificios, Benito Juárez con 68 edificios y Coyoacán con 32 edificios dañados, cabe señalar que estas 3 Delegaciones se encuentran entre las zonas de transición (Zona II) y lacustre (Zona III). En la Figura 2.4 se puede observar la localización de los edificios que resultaron con daño significativo, siendo la simbología de color naranja los edificios con GD 3, los de color rojo pertenecen a estructuras con GD 4 y finalmente los de color negro representan GD 5 o colapso.

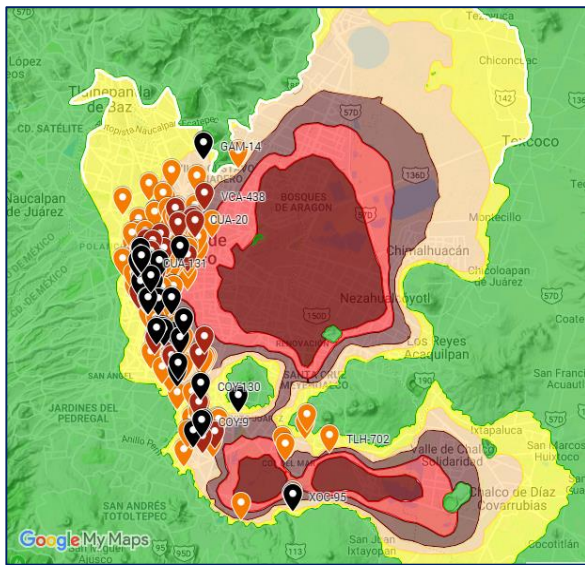


Figura 2.4. Localización de edificios con Grado de Daño 3-5

Tabla 2.4. Edificios con Grado de Daño 3-5 en Ciudad de México

Clave	Delegación	Edificios	Porcentaje
AOB	Álvaro Obregón	1	0.33%
AZC	Azcapotzalco	1	0.33%
BJU	Benito Juárez	68	22.44%
COY	Coyoacán	32	10.56%
CUA	Cuauhtémoc	146	48.18%
GAM	Gustavo A. Madero	9	2.97%
IZT	Iztapalapa	8	2.64%
MGC	Magdalena Contreras	1	0.33%
MHI	Miguel Hidalgo	6	1.98%
TLH	Tlhuac	6	1.98%
TLA	Tlalpan	14	4.62%
VCA	Venustiano Carranza	7	2.31%
XOC	Xochimilco	4	1.32%
	Total general	303	100%

El presente estudio también clasifico de manera independiente el número de edificaciones por Grado de Daño, centrándose en los Grados de Daño 3, 4 y 5. Los resultados de este análisis indican que de los 32 edificios con Grado de Daño 5, la delegación Benito Juárez presento 13 edificios con colapso total o colapso parcial, Cuauhtémoc 8 y Coyoacán 5, mientras que las estructuras con daño grave (GD 4), la delegación Cuauhtémoc es la que mayor número de estructuras cuenta con esta clasificación de daño, teniendo 22 edificaciones dentro de este rubro, seguida por Benito Juárez con 9 estructuras y Coyoacán con 5. Finalmente, de los 226 edificios con un grado de daño moderado (GD 3), la delegación Cuauhtémoc representa la zona con el mayor porcentaje con 116 estructuras, Benito Juárez con 46 y Coyoacán con 22.



Figura 2.5. Clasificación de daño (GD 3-5) por zonas de la Ciudad de México

De acuerdo a las estadísticas que se presentan en la Figura 2.6, las estructuras que sufrieron daño severo o tuvieron algún tipo de colapso, ya sea parcial o total, se sitúan dentro del grupo de edificaciones que cuentan de 3-9 niveles, ocupando un 75% del inventario de edificios que sufrieron un GD 3-5. Tan solo un 6% de los edificios de 10-15 niveles se encuentran dentro de esta clasificación, mientras que las edificaciones que cuentan de uno a dos niveles representan un 19% de las estructuras clasificadas con GD 3-5. Cabe destacar que aproximadamente la mitad de las edificaciones que cuentan con dos niveles, ya habían registrado un daño previo.

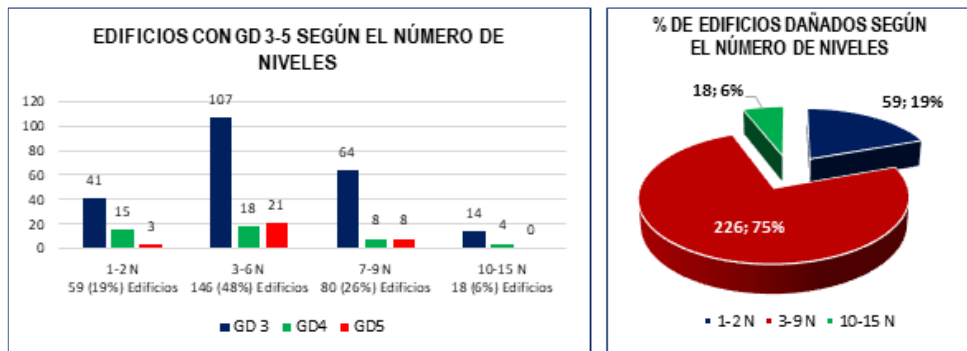


Figura 2.6. Estadísticas de Daños según el número de niveles

Si consideramos que las estructuras menores o iguales a 3 niveles ya contaban con algún daño previo, el porcentaje de este tipo de estructuras se reduce a las que realmente fueron afectadas por el sismo considerablemente, por lo que los mayores daños se concentran en edificios con niveles superiores a 3, tomando en cuenta esto, si agrupamos los edificios con 4 niveles o superiores se tienen los siguientes porcentajes de daño: Grado de Daño 3: 75% (160 estructuras), Grado de Daño 4: 13% (27) y Grado de Daño 5: 12% (26), teniendo un total de 213 estructuras con niveles mayores a 3, mientras que el total de las edificaciones con niveles inferiores a 4 que presentan un grado de daño severo a destrucción (GD3-5) es de 90 estructuras, tomando en consideración que parte de estas últimas ya contaban con un antecedente de daño ya sea por sismo o por falta de mantenimiento.

2.3 Estadísticas por tipología estructural

En la Ciudad de México existen diversos sistemas estructurales, los cuales varían principalmente a las técnicas de construcción y sus normas o reglamentos, según el año en que fueron diseñados o construidos. Según las estadísticas obtenidas, el material que resulto predominante en las estructuras dañadas fue el concreto reforzado, el cual representa un 53% de las 303 estructuras analizadas con GD3-GD5, seguido por la mampostería con un 32%, mientras que el material con menor porcentaje dentro de estas edificaciones fue el acero con apenas un 2%. Finalmente, el porcentaje de estructuras a base de concreto y mampostería (mixtas) resulto ser del 13%.

Se desarrollaron e identificaron las principales de las tipologías existentes en la Ciudad de México que resultaron con algún tipo de daño, mismas que se encuentran en la Tabla 6, donde claramente se puede observar que el mayor número de estructuras con GD3-GD5 corresponde a edificaciones con sistemas a base de columnas de concreto reforzado y losa plana (35.3%), que representa más de una cuarta parte de las estructuras analizadas, por lo que resultan ser las estructuras más vulnerables ante movimientos sísmicos en la Ciudad de México, seguido a esto se encuentran los marcos rígidos de concreto reforzado (15.8%) y edificios a base de mampostería no confinada (13.5%); mientras que las edificaciones menos vulnerables resultaron ser estructuras de acero (2.3%) y estructuras mixtas a base de marcos de concreto reforzado y muros de concreto (1.0%). Aunque se observa un número considerable de estructuras dañadas de edificios de marcos de concreto reforzado, la mayoría de estos se encuentran clasificados con GD3.

En el gráfico de la Figura 2.7 se puede observar que los sistemas a base de columnas y losa plana (SE2) resultaron más vulnerables, ya que dentro del grupo de edificaciones con clasificación de GD5 resultaron tener 12 edificios con colapso de los 32 dentro de este rubro, esta tendencia se repite en los edificios con GD3 y GD4. Otro de los sistemas estructurales que sufrieron mayor número de colapsos resulto ser la tipología mixta (S5) a base de columnas de

concreto reforzado principalmente en planta baja y muros de mampostería confinada, donde generalmente se llega a presentar también la llamada planta débil. Referente al GD4 los sistemas que tuvieron mayor afectación después de la tipología SE2 (14 edificios), fueron las estructuras a base de muros de mampostería confinada (10 edificios), seguido de las estructuras que cuentan con marcos de concreto reforzado (7 edificios).

Tabla 2.5. Estadísticas de daños (GD 3-5) de principales sistemas estructurales en la Ciudad de México.

Clave	Sistema Estructural Principal	Sistema de piso	Edificios GD3-GD5	% Edificios
SE1	Marcos rígidos de concreto reforzado	Losa maciza Losa plana Losa con vigueta y bovedilla	48	15.8%
SE2	Columnas de concreto reforzado	Losa plana	107	35.3%
SE17	Marcos de concreto reforzado Muros de concreto	Losa maciza Losa plana	3	1.0%
SE3	Mampostería confinada	Losa maciza Losa con vigueta y bovedilla	38	12.5%
SE6	Mampostería parcialmente confinada	Losa maciza Bóveda catalana	18	5.9%
SE4	Mampostería no confinada	Bóveda catalana Losa con vigueta y bovedilla	41	13.5%
SE9	Acero	Losa maciza Losacero	7	2.3%
SE5	Columnas de C.R. Mampostería confinada	Losa plana Losa maciza	18	5.9%
SE13	Marcos de C.R. Mampostería confinada	Losa maciza	16	5.3%
		Otros	7	2.3%
		Total	303	100%

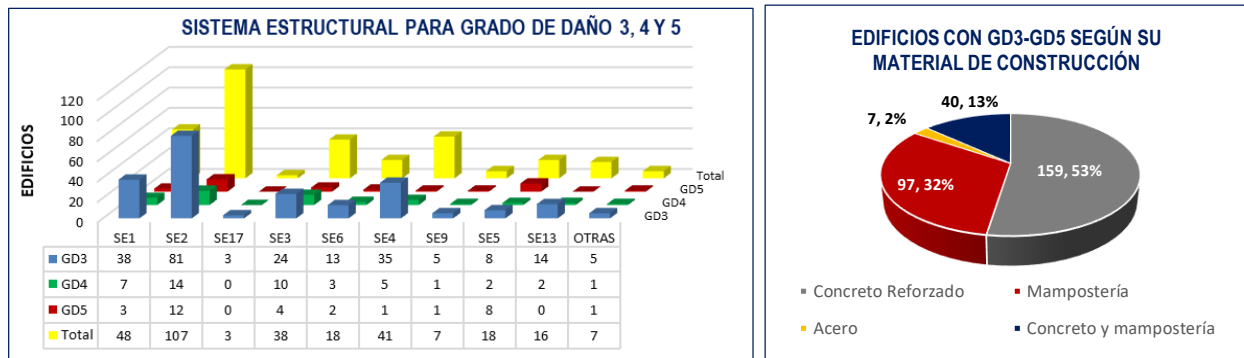


Figura 2.7. Estadísticas de Grado de Daño según su sistema estructural

Otro sistema que resulto vulnerable ante el sismo del 19 de septiembre de 2017, fueron los construidos con muros de mampostería no confinada que representa un 13.5% del total de las estructuras estudiadas, donde la mayoría de los edificios con este sistema se vio reflejado con un grado de daño 3, es decir daños que van de importantes a graves.

En la Tabla 2.6 se presentan estadísticas de daño en función de su altura, donde se puede apreciar que los edificios de baja altura, es decir aquellos que cuentan de 1-2 niveles, la mayoría son de tipología SE3 (14 edificios, 23.7%) y SE4 (23 edificios, 39%), considerando un total de 59 edificios estudiados correspondientes a ese rango de niveles y clasificados con GD3-GD5, en cuanto a estructuras de mediana altura, la mayor parte de los edificios está estructurado en primer lugar por sistemas a base de columnas y losa plana (SE2) y en segundo lugar por edificaciones con marcos de concreto reforzado (SE1).

Tabla 2.6. Tipologías Estructurales en función de su altura

Niveles	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE9	SE13	SE17	OTRAS	Total
1-2 N	2	4	14	23	1	11	3	1	0	0	59
3-6 N	21	45	24	18	14	7	2	12	0	3	146
7-9 N	19	47	0	0	3	0	2	3	2	4	80
10-15 N	6	11	0	0	0	0	0	0	1	0	18
TOTAL	48	107	38	41	18	18	7	16	3	7	303

El mayor número de edificios con GD3-GD5 corresponde a estructuras construidas antes de 1985, es decir un 73.3% de las estructuras estudiadas, y la mayoría de estas corresponden a la tipología a base de columnas de concreto reforzado y losa plana (SE2), por lo que es de interés su estudio para entender mejor su comportamiento ante movimientos sísmicos; en este estudio se desarrolla una evaluación de vulnerabilidad de este tipo de edificaciones. Por otro lado, las estructuras construidas después del 85 tan solo representan un 5.9% de las edificaciones en este estudio y el 20.8% se desconoce su fecha de construcción.

Tabla 2.7. Estadísticas de edificios con GD3-GD5 por tipología y año de construcción

Año	Otras	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE9	SE13	SE17	Total	%
<1958	1	7	4	9	35	1	11	1	2	0	71	23.4%
1958-1976	4	14	43	3	1	9	2	2	3	1	82	27.1%
1977-1985	1	11	34	8	1	8	1	0	4	1	69	22.8%
>1985	1	3	5	3	1	0	0	3	2	0	18	5.9%
Desconocidos	0	13	20	15	4	0	4	1	5	1	63	20.8%
Total	7	48	106	38	42	18	18	7	16	3	303	100%

Finalmente, en la Figura 2.8 se muestran estadísticas relacionadas con edificios de esquina, ya que gran parte de los edificios con daños considerables eran de esta índole. El porcentaje de

edificios de esquina con daño significativo fue del 31%, es decir un poco más de la cuarta parte de los edificios estudiados con GD3-GD5, así mismo, también se puede apreciar que las estructuras que sufrieron colapso, casi la mitad de ellas era de esquina (47%), mientras que aquellas que sufrieron daños graves o colapso parcial, el 38% se encontraba en esquina. Si nos centramos en edificios mayores a 2 niveles clasificados con GD3-GD5, se encontró que un número significativo de edificios presentaba planta baja flexible, es decir el 60.66% de las construcciones estudiadas, dentro de las cuales prevalecieron entre los edificios con grado de daño 4 y 5.

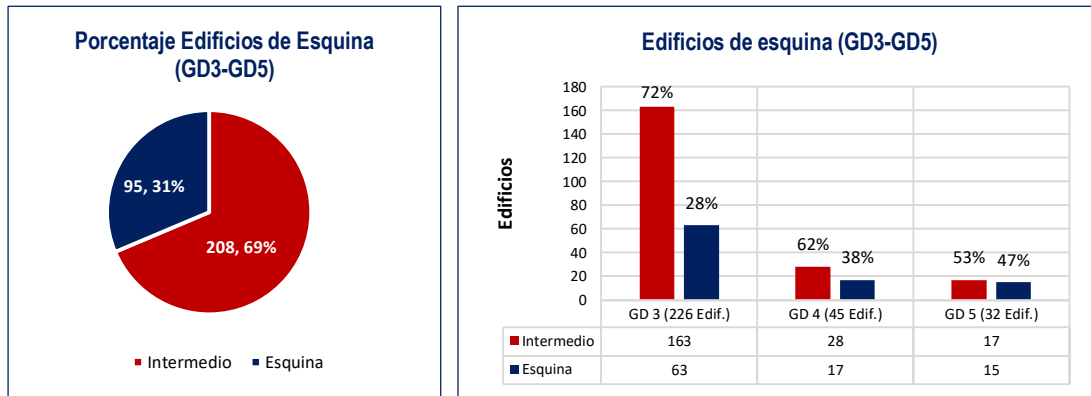


Figura 2.8. Estadísticas de edificaciones dañadas (GD3-GD5) con ubicación en esquina

2.4 Los espectros de diseño del Reglamentos de Construcciones para la Ciudad de México

Los Reglamentos de construcciones para la Ciudad de México han evolucionado desde hace 75 años en parte debido a importantes eventos sísmicos que han afectado a la ciudad, como por ejemplo los sismos de 1957 y 1985 que impulsaron las Normas de Emergencia de 1957 y 1985 respectivamente, y posteriormente las versiones de 1966 y 1987; después de 1987 se han emitido varias versiones como las del año 1993, 2004 hasta las vigentes emitidas en el año 2017. A continuación, se describen algunos aspectos relevantes de las diferentes versiones desde la de 1966 hasta la 2004, con el fin de comparar estos espectros que se usaron en la construcción de los edificios dañados con algunos espectros de respuesta en seis lugares específicos que corresponden a diferentes zonas.

Reglamento de construcciones de 1966

Sólo dos tipos de suelo fueron adoptados: Alta y Baja compresibilidad. Se identificaron dos grupos de edificios, tipo A y Tipo B, en el primero se consideran estructuras con grandes concentraciones de gente. Mientras que los edificios se clasificaron en tres tipos de estructuras, el tipo 1 correspondía a estructuras que se deformaban en flexión (marcos con o sin elementos rigidizantes como muros o contravientos); el tipo 2 eran estructuras que se deformaban bajo la

acción de esfuerzos o cargas axiales constantes (edificios con muros de carga); y el tipo 3 era para péndulos invertidos y estructuras sin diafragmas rígidos. Los coeficientes sísmicos para estructuras del grupo B eran para suelo firme: 0.04, 0.08 y 0.10 para estructuras tipo 1, 2 y 3 respectivamente, mientras que para suelo blando: 0.06, 0.08 y 0.15. Para estructuras tipo A se amplifican los coeficientes por 1.3.

Reglamento de construcciones de 1976

Incluye las Normas Técnicas Complementarias para diversos tipos de materiales, pero no para sismo. Se regresó a 3 zonas, la zona I: profundidad de estratos compresibles < 3 m, zona II: 3-20 m, y zona III: >20 m, a las que se les asignó un coeficiente de 0.16, 0.20 y 0.24 respectivamente, se reconoce por primera vez la ductilidad Q, con valores entre 1 y 6, por ejemplo los edificios a base de losa plana aligerada (*waffle*) se diseñaban normalmente con un Q=4. La revisión de desplazamientos se realizaba al multiplicar los desplazamientos elásticos por el factor de ductilidad Q utilizado. Los límites de distorsiones se incrementaron a 1.6 % para edificios con elementos no estructurales desligados, y 0.8% para otro caso. Se incrementó la excentricidad accidental al 10%.

Reglamento de construcciones de 1987

Aparecen las NTC por sismo. Los coeficientes sísmicos para cada zona son: 0.4 (III), 0.27(II) y 0.16 (I). Se limita el valor de Q a un máximo de 4.0, con requisitos más estrictos para Q=4. Se agregó Q=3, para aplicarse en edificios losas planas y de acero con vigas de alama abierta. Se modifica el factor de reducción por resistencia, FR de 0.75 a 0.5 para diseño de columnas con Q > 2, se fija una dimensión mínima de la sección de 30 cm. Carga Viva de 90 a 180 m/m². Se limita el Método simplificado de 13 a 8m. Limitación del 20% en la excentricidad. Se incluyen normas sobre pilotes, hundimientos, separaciones, detallado de conexiones. Clasificación de construcciones en 2 tipos A y B (B1 y B2), factor de 1.5. Revisión de desplazamientos 0.006 y 0.012 (comparado con 1976 0.008 y 0.016). Separaciones entre edificios. Aparece la figura del Corresponsable de seguridad Estructural. Se incluyen Condiciones de regularidad. Apéndice para considerar interacción suelo estructura (ISE).

Reglamento de Construcciones 2004

Después de la versión del año 1987, hubo otras más, sin embargo, no se considera que tuvieran cambios significativos en la parte de los espectros de diseño. La versión de las Normas por Sismo de 2004 contemplaba la subdivisión de la zona III, en tres zonas, es decir, la zona IIIa, IIIb y IIIc, para cada una de las cuales se asignó un espectro de diseño diferente.

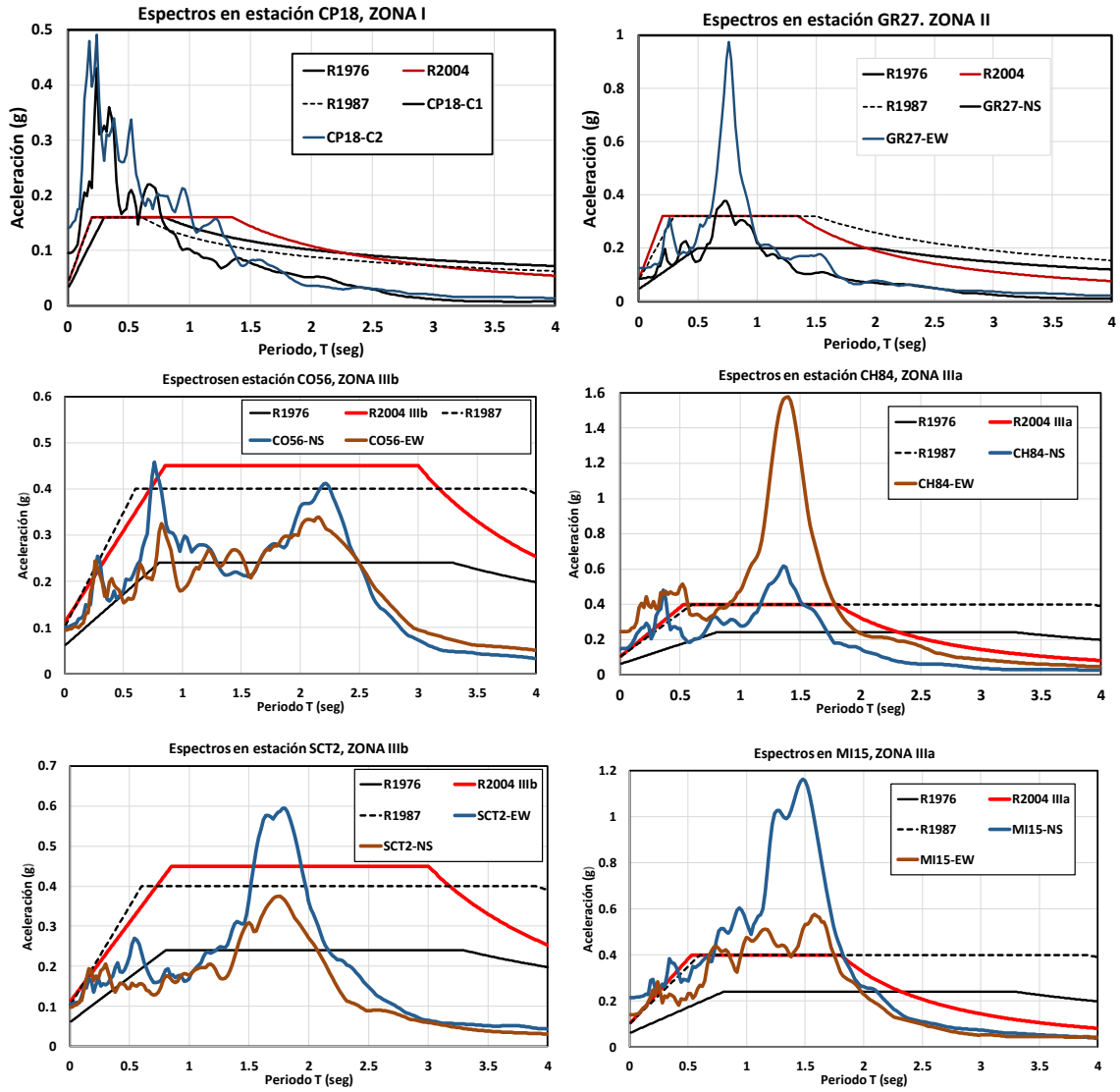


Figura. 2.9. Espectros de respuesta del 5% del sismo 19/09/2017, y espectros de diseño de los Reglamentos R1976, R1987 y R2004.

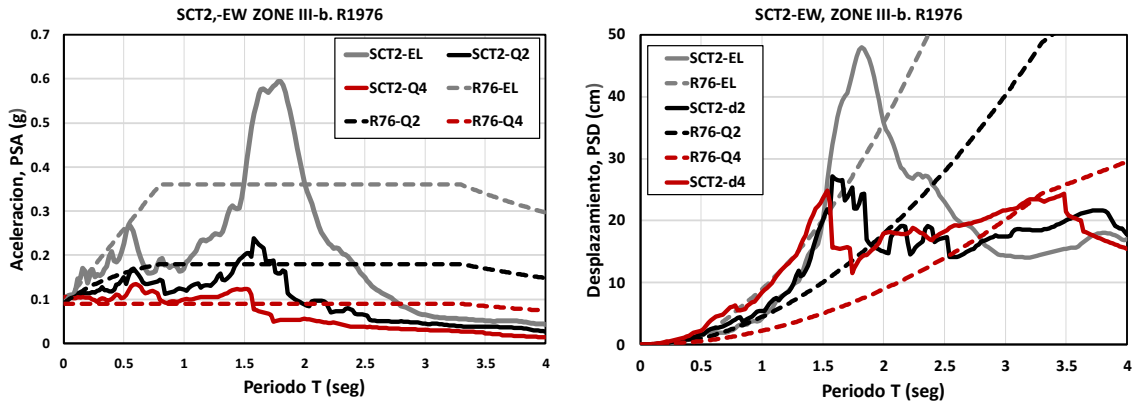


Figura. 2.10. Espectros de demanda de ductilidad en SCT ($\mu=1,2,4$). R1976, sobrerresistencia: 1.5.

2.5 Mapas de cocientes resistentes (MCR) y mapas de demanda de ductilidad (MDD)

Para medir la intensidad que afecta a las estructuras además de la aceleración máxima del suelo (PGA), existen otros parámetros para estimar la intensidad del movimiento fuerte del suelo. Otros parámetros involucran la frecuencia y la duración del sismo, que al combinarse con las propiedades dinámicas de las estructuras, como lo puede ser el periodo de vibración, y de acuerdo a las estadísticas desarrolladas en este trabajo, se ha observado que los edificios de mediana altura fueron los más vulnerables, y esto se debe principalmente al comportamiento de la misma en un determinado periodo, mismo que puede llevar a la resonancia.

La elaboración de mapas de curvas de ductilidad y cocientes resistentes forma parte importante del peligro sísmico de la zona de estudio, ya que representa la caracterización del movimiento del suelo, tomando como principal parámetro las aceleraciones máximas espectrales debidas al movimiento del suelo. En este caso en particular, se crearon mapas demandas de ductilidad, que permitieron definir las intensidades a la que se vieron sometidas las estructuras de la Ciudad de México. De manera paralela se crearon mapas de cocientes sísmico lo que permitió estimar el comportamiento de estructuras e identificar cuales superaron el espectro de diseño.

La metodología propuesta en este trabajo, se basa en el cálculo de las respuestas máximas del espectro de ductilidad derivadas de la respuesta no lineal de varios sistemas de un grado de libertad (SUGL), de diferentes periodos y características elastoplásticas, con un porcentaje específico de amortiguamiento crítico, donde es posible obtener, para cierto intervalo de periodos, una gráfica (espectro de isoductilidad) que represente las máximas respuestas asociadas una ductilidad fija y a un acelerograma dado.

El procedimiento que se siguió para la elaboración de estos mapas se basó principalmente en la recopilación de registros sísmicos del sismo del 19 de septiembre de 2017 (69 registros de la CIUDAD DE MÉXICO), los cuales fueron corregidos por línea base y filtrados para una buena obtención de resultados. Posteriormente se obtuvieron los espectros de respuesta elásticos e inelásticos de cada uno de estos registros en sus dos direcciones horizontales, esto se realizó para 4 ductilidades ($\mu=1$, $\mu=2$, $\mu=3$, $\mu=4$). Finalmente, cada espectro se dividió en 10 rangos de periodos; en cada uno de estos rangos fue seleccionado la máxima aceleración espectral de las dos componentes, misma que fue utilizada en cada estación para obtener las curvas de isoductilidad. En las Figuras 2.14 y 2.15 se muestran los mapas de ductilidad, donde se indica en alguno de ellos a los edificios con GD5 para mostrar la correlación entre los daños y las respuestas máximas de los espectros de ductilidad. Se puede notar que a pesar de que en las delegaciones Xochimilco, Tláhuac e Iztapalapa presentaron aceleraciones grandes, los daños corresponden a construcciones pequeñas.

Análogamente para la construcción de los mapas de curvas de cociente sísmico se usaron los espectros de ductilidad, sin embargo, a diferencia de los mapas de ductilidad donde solo se hace uso de la aceleración máxima espectral, en este caso se desarrolla una relación entre el espectro de respuesta y el espectro de diseño. En este caso el espectro de diseño que se utilizó fue

el correspondiente al reglamento de la Ciudad de México de 1976, ya que los resultados obtenidos de las estadísticas indican que el 73.3% de las estructuras que resultaron con daño grave fueron construidos antes del año de 1985, por lo que es de suma importancia estudiar este tipo de estructuras y conocer la relación que existe entre el comportamiento de estas edificaciones ante el sismo del 19/09/2017 y su espectro con las que fueron diseñadas para poder correlacionar los daños con estos mapas.

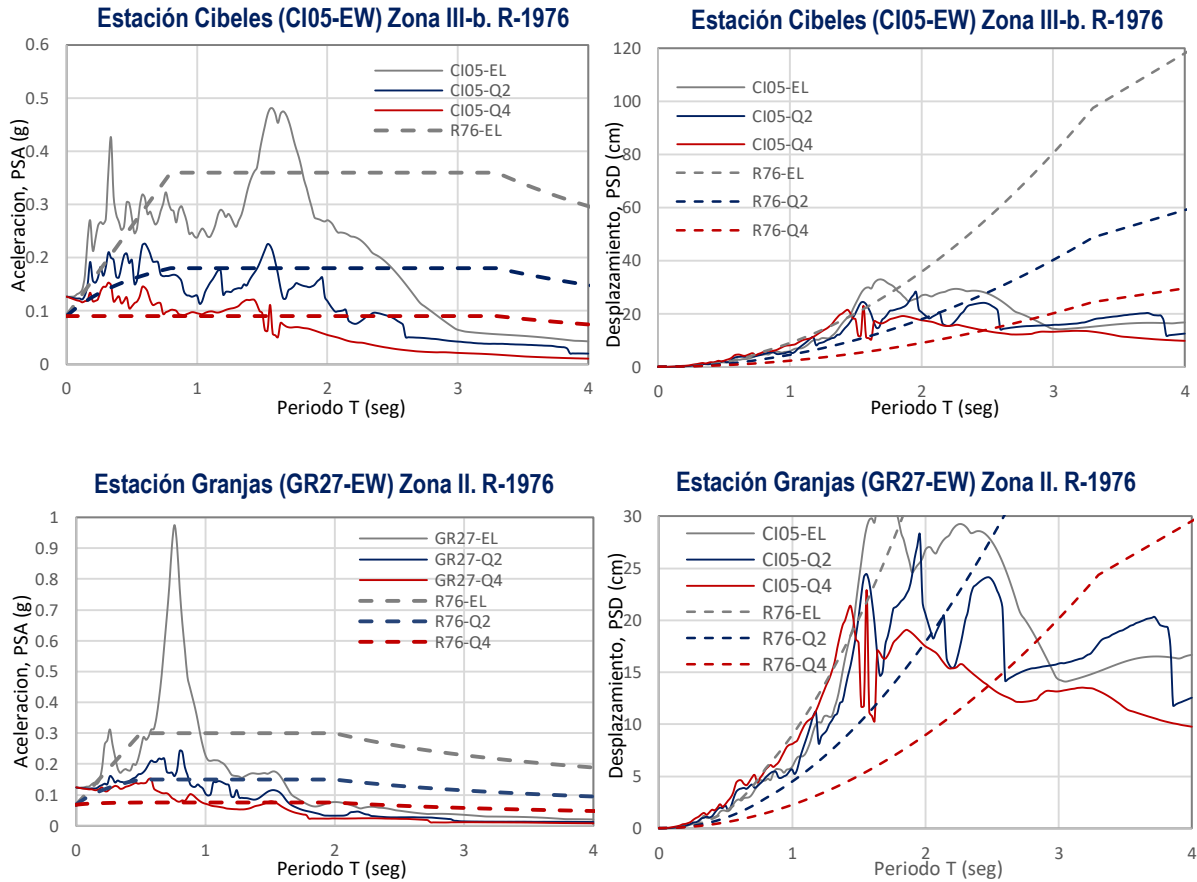


Figura 2.11. Espectros de demanda de ductilidad en CI05 y GR27 ($\mu=1$, $\mu=2$, $\mu=3$). R1976 SBR: 1.5

La Figura 2.14 muestra los espectros de respuesta de dos estaciones, que sirven como ejemplo para explicar de manera breve el método aplicado para la construcción de estos mapas. Si tomamos como referencia el espectro de respuesta de la estación de Cibeles (CI05) ubicada en la Colonia Roma, se puede observar que en ciertos periodos se supera el espectro de diseño correspondiente al Reglamento de Construcciones de 1976; es preciso enfatizar que en el espectro de diseño se consideró un valor de sobrerresistencia (SBR) de 1.5. Si se desea conocer el comportamiento de una estructura en un rango de periodo de $T=0.60-0.84$ s con una ductilidad de

$\mu=2$, se aprecia que la aceleración máxima espectral se da en la dirección E-W con un valor de 0.226 g en el periodo 0.60 s, mientras que en el espectro de diseño para este periodo se contempla un máximo de 0.167 g por lo que la respuesta de la estructura supero un 35% el valor contemplado por el de diseño, lo que puede traducirse en que dicha estructura con esos parámetros dinámicos tuvo daño.

Otro ejemplo mostrado son los espectros de respuesta de la estación Granjas (GR27-EW), que casi alcanzo 1 g según su respuesta elástica en un periodo de 0.76 s, mientras que su espectro de diseño apenas alcanza 0.3 g. Ahora si se toma como referencia el espectro de respuesta con ductilidad $\mu=2$, la respuesta máxima es de 0.24 g con un periodo de 0.8 s, a diferencia del espectro de diseño para esta ductilidad que representa un valor de 0.15 g, calculando su cociente sísmico, el espectro de respuesta supero al de diseño un 60%, por lo que se supondría que las estructuras ubicados en la zona II cercana a la estación GR27 tuvieran algún tipo de daño, llegando a tener desplazamientos aproximados del orden de 5 cm. Por otro lado, para el espectro de respuesta de desplazamientos con $\mu=4$, relacionado con esta estación, se observan desplazamientos significativamente altos, en comparación con el espectro de diseño de Sd.

La Figura 2.15 muestra los espectros de respuesta más representativos del sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017 para cada zona geotécnica, así como los espectros de diseño construidos de acuerdo al reglamento de construcción de los años 1976, 2004 y 2017, en donde se aprecia que el espectro de diseño de 1976 fue rebasado por los espectros de respuesta del sismo 19/09/17, inclusive en algunos casos se rebasa el espectro de diseño correspondiente a las NTC-2017, tal es el caso de la Zona III A, donde la respuesta máxima se encuentra en la estación de Culhuacán (CH84), siendo esta 1.58 g en un periodo de 1.4 s, mientras que el espectro de diseño considera del SASID considera 1.209 g, lo que significa que la respuesta máxima estuvo 31% arriba de la considerada por las NTC-2017.

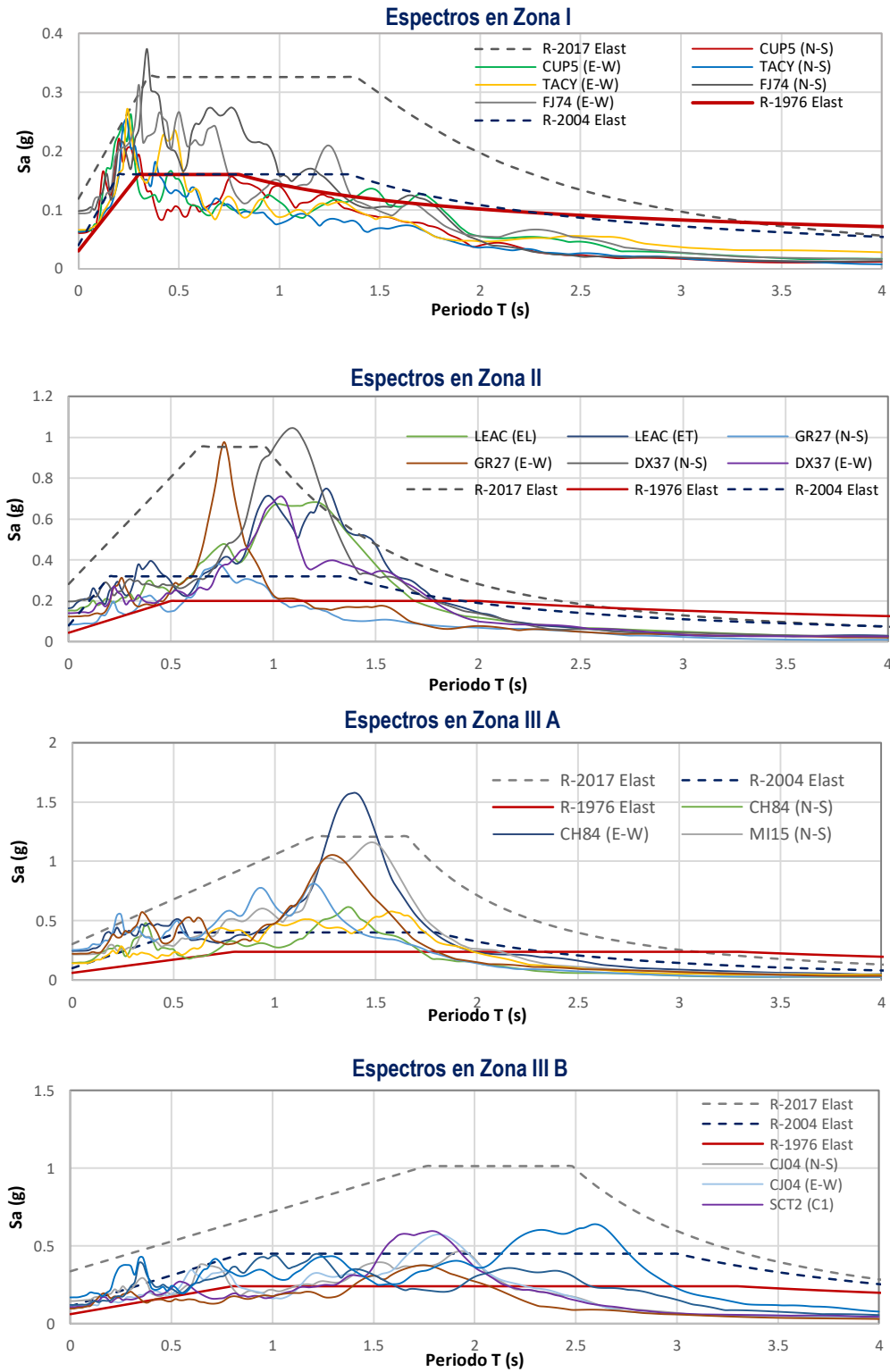


Figura 2.12. Espectros de respuesta del sismo 19/09/2017 y de diseño (R-1976, 2004, 2017) de la Zona I, II, III A y III B

Red Acelerográfica de la Ciudad de México

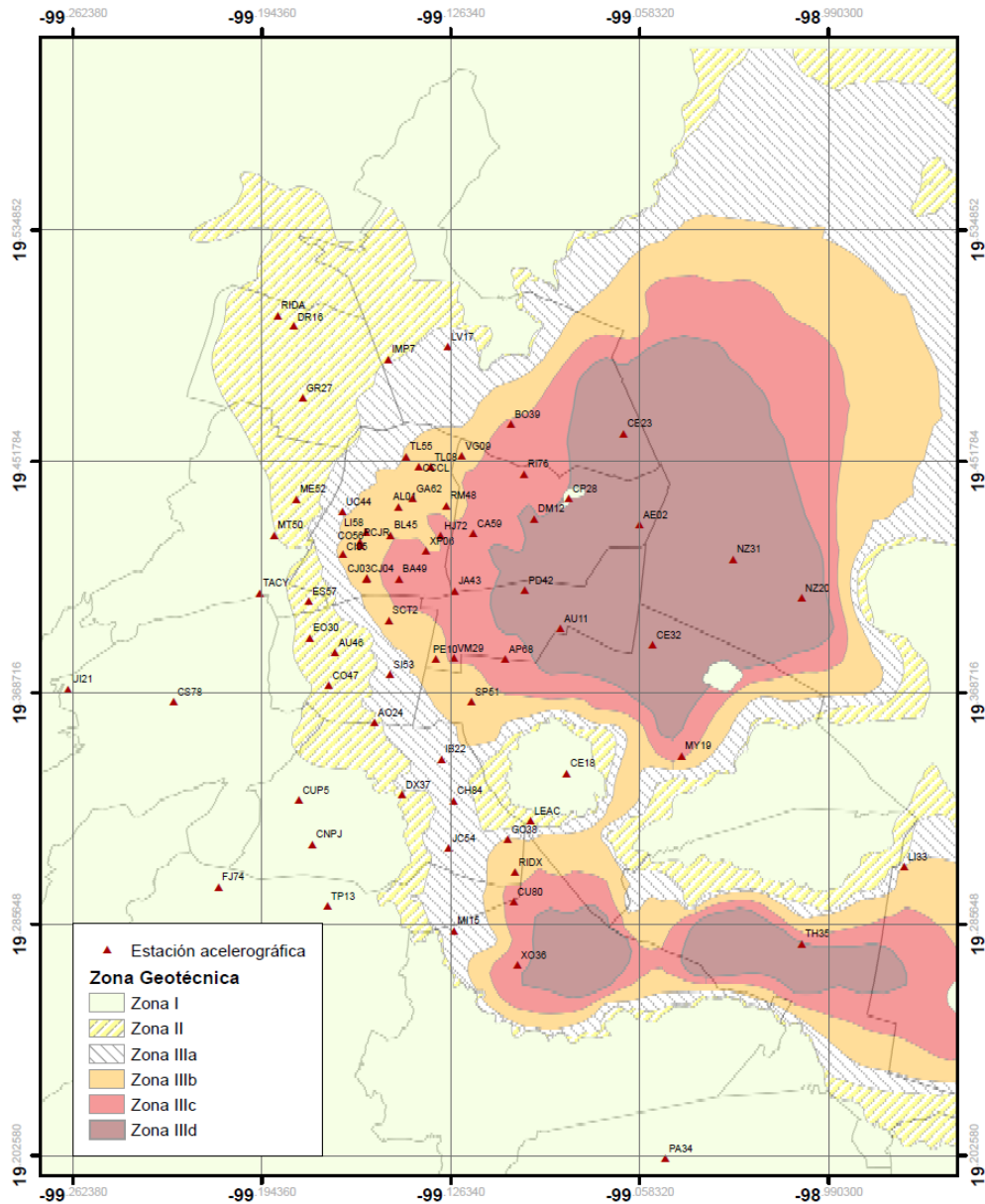


Figura 2.13. Estaciones de la red acelerográfica de la Ciudad de México

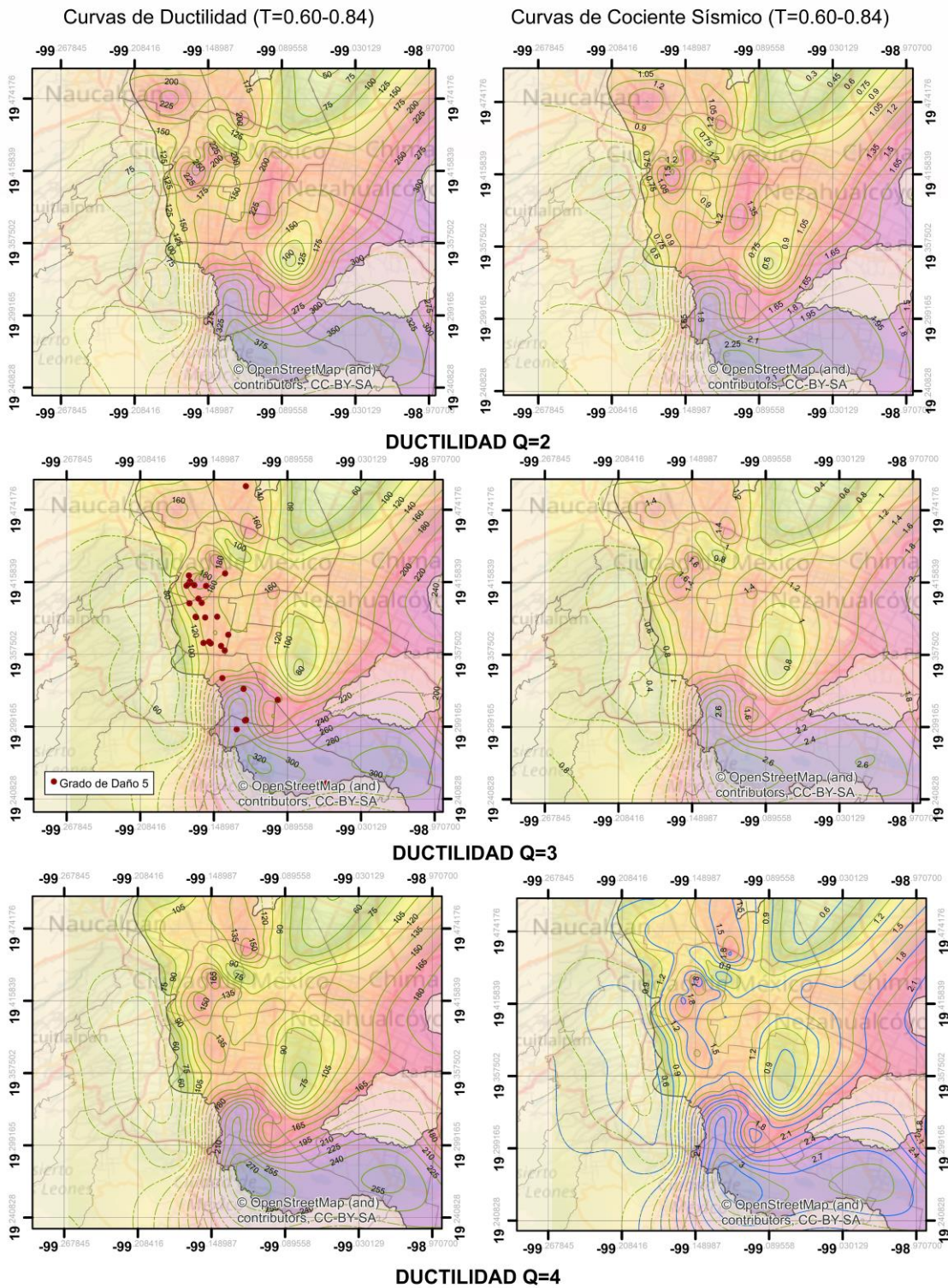


Figura 2.14. Mapas de ductilidad y cociente sísmico correspondientes al sismo del 19/09/2017 para intervalos de periodo T=0.60-0.84 s

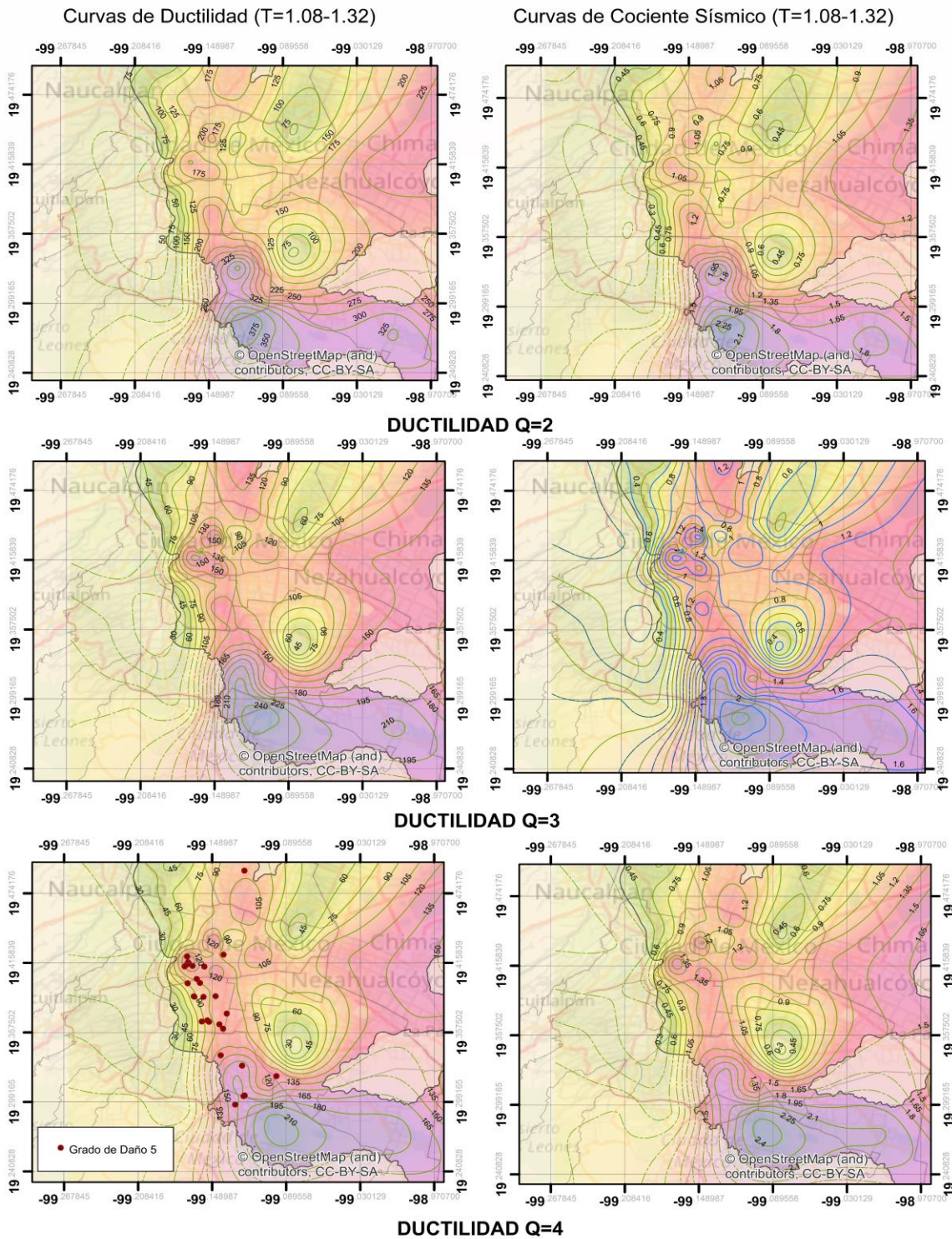


Figura 2.15. Mapas de ductilidad y de cociente sísmico correspondientes al sismo del 19/09/2017 para intervalos de periodo T=1.08-1.32 s

CONCLUSIONES

Como parte del estudio de la intensidad del sismo del 19 de septiembre de 2017, es posible concluir cuales fueron las zonas más vulnerables ante dicho evento, inclusive se puede observar que la Ciudad de México a pesar de no encontrarse muy cerca del epicentro, resultó con graves daños. Los daños en la zona centro de la República Mexicana, se concentraron principalmente dentro de la isolínea que representa una aceleración máxima del suelo de 100 cm/s^2 y abarcan los estados de Guerrero, Morelos, Puebla y la Ciudad de México. También se correlaciono la aceleración máxima del suelo (PGA) con la escala EME98, con la finalidad de medir los efectos y daños producidos del sismo, asignándole a la Ciudad de México una Intensidad de VIII, la cual involucra daños graves y colapso de edificios. En la Ciudad de México algunas de las zonas que tuvieron las mayores intensidades, fueron las delegaciones Coyoacán (0.23g), Benito Juárez (0.181g) y Cuauhtémoc (0.127g).

Paralelamente se obtuvieron estadísticas de daños, donde se pudo observar que los daños significativos ocurrieron en edificios construidos antes de 1985, los cuales representan un 73.3% del total de estructuras estudiadas en este trabajo, además se encontró que los edificios que resultaron más vulnerables, fueron edificios de mediana altura (3-9N), que presentaron GD4 y GD5. También se encontraron edificios que ya contaban con algún daño previo, mismo que se incrementó a raíz del sismo de 19 de septiembre de 2017, así como edificios que contaban con un alto grado de deterioro por falta de mantenimiento, sin embargo, este estudio considero los daños que solo fueron ocasionados por el sismo, más no por otros factores externos.

Se identificaron y clasificaron las principales tipologías estructurales, siendo aquellas a base de columnas de concreto reforzado y losa plana, las que resultaron un mayor porcentaje entre los edificios dañados, representando un 35.3% del total de edificios con GD3-GD5, es decir más de la cuarta parte de las estructuras analizadas. Se encontró que algunas irregularidades que presentan los edificios fueron causa principal de daños, siendo los más comunes, los edificios en esquina, edificios con planta baja flexible y edificios con irregularidad en planta.

Se desarrollaron mapas de ductilidades y cociente sísmico, encontrándose que existe cierta correlación con los daños en edificaciones, por ejemplo, en los rangos de periodos $T=0.60-0.84\text{s}$ con ductilidad de $Q=3$ y los rangos de periodos $T=1.08-1.32\text{s}$ con ductilidad $Q=4$, donde se observa que se rebaso el espectro de diseño del reglamento de 1976 considerando que la mayoría de las estructuras fueron construidas antes de 1985. Estos mapas pueden servir de referencia para identificar de alguna forma el peligro sísmico de ciertas zonas de la Ciudad de México.

CAPITULO 3

ESPECTROS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

El terremoto, $M_w 7.1$, que se produjo el 19 de septiembre de 2017, fue originado por fallas normales de profundidad intermedia en la placa de subducción de Cocos a 57 km de profundidad, con una distancia epicentral de 114 km de la Ciudad de México (Cruz-Atienza *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2018). La aceleración máxima del suelo (PGA) en el sitio de suelo firme de Ciudad Universitaria (CU) fue de 57 cm/s^2 , el doble del valor del PGA registrado en ese sitio durante el catastrófico terremoto, $M_w 8.1$, del 19 de septiembre de 1985 (29 cm/s^2). El terremoto provocó 369 muertes, de las cuales más de dos tercios perecieron en la capital, donde más de 30 edificios causaron un colapso total o parcial. La devastación producida por un evento de profundidad intermedia en el país no es inusual. Otros terremotos intraplaca ocurridos en el pasado también han causado grandes daños en otras regiones del país (Singh *et al.*, 2018).

El peligro sísmico es una medida de la frecuencia de la ocurrencia de sismos con cierta intensidad; se cuantifica con la frecuencia con que excede un cierto nivel de aceleración o desplazamiento espectral y depende de la tectónica del territorio y de la sismicidad de las fuentes que intervienen en una región (Pérez *et al.*, 2005). Un análisis de peligro sísmico envuelve una estimación cuantitativa de sismos ocurridos en un sitio en particular. Se obtiene mediante enfoques deterministas y probabilistas. Para este estudio se utilizó un enfoque probabilista el cual provee un marco de referencia donde las incertidumbres pueden ser identificadas, cuantificadas y combinadas. Se utilizó una metodología basada en la propuesta por Cornell (1968), y desarrollada por McGuire (2004).

La variación de la aceleración máxima del terreno (PGA) se muestra en la Figura 3.1 según la función de atenuación propuesta por Gómez-Bernal *et al.* (2003) para las componentes horizontales y vertical de PGA. En la misma Figura 3.1 se incluyen los valores de PGA registrados durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 ($M_w=7.1$) para 40 estaciones en suelo firme. Como se puede observar, la curva proporciona una buena estimación del valor esperado de la aceleración del suelo en los sitios de la República Mexicana.

3.1 Características de los espectros en el suelo firme de la Ciudad de México

Las características de las formas espectrales de los acelerogramas en Ciudad de México según el tipo de mecanismo en la fuente fueron ampliamente identificadas por (Gómez *et al.*, 2003). En estos trabajos, los espectros de respuesta de aceleración de los componentes verticales y horizontales se calcularon utilizando estaciones en Suelo Firme (Zona I) de la Ciudad de México

de todos los sismos registrados con magnitud mayor o igual a 6. Los espectros se calcularon por separado para cada uno de los conjuntos de movimiento de tierra estudiados (Gómez *et al* 2003). Todos los espectros se normalizaron con respecto a los valores máximos de aceleración del suelo. En la Figura 3.2(a), se comparan los espectros medios para cada componente de los terremotos: Intraplaca (C), Interplaca (A y B) y muy Superficiales o corticales (E). Las observaciones pertinentes de la comparación son: 1) eventos intraplaca, no producen amplitudes significativas en períodos superiores a 1 seg, pero en eventos superficiales e interplaca, se observan coordenadas espectrales significativas en períodos alrededor de 2 y 5 seg. 2) En el tipo A, eventos B o E, las coordenadas espectrales verticales son consistentes en períodos alrededor de 2.5 y 3.5 seg. 3) En terremotos poco profundos (E) hay altas amplitudes entre periodos de 4 y 6 seg, para las tres componentes del movimiento.

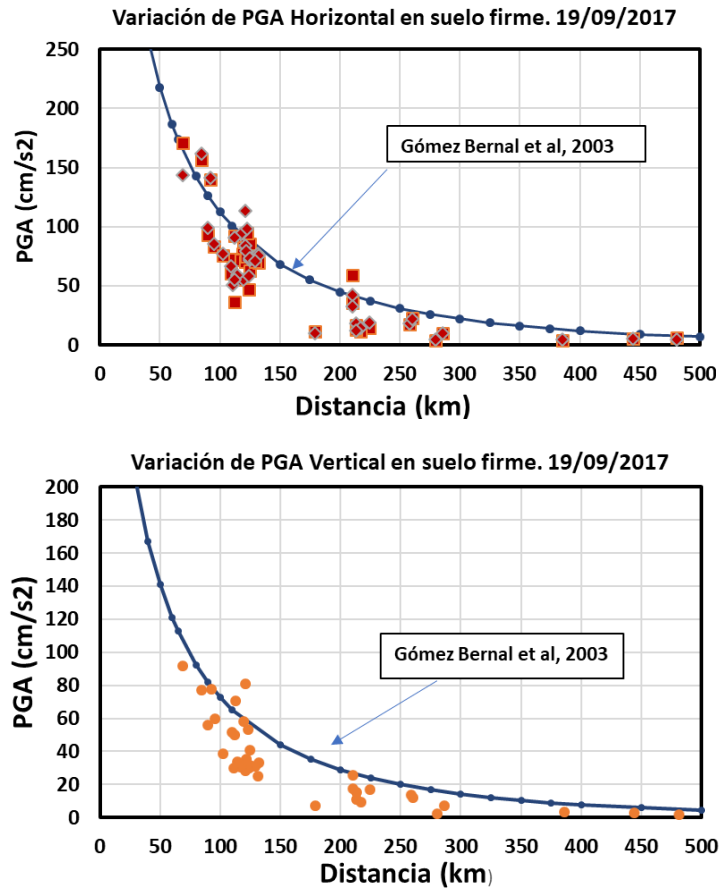


Figura 3.1. Variación de PGA esperada y registradas (a) Arriba: componentes horizontales; (b) Abajo: componente vertical

En la Figura 3.2(b), se presentan los espectros de respuesta observados (5% de amortiguación) para el terremoto del 19 de septiembre de 2017; los espectros observados se obtienen utilizando las componentes horizontales de diez estaciones en suelo firme de la red CIRES e II-UNAM, la mayor ordenada espectral se obtuvo en la estación del Cerro del Peñón

(CP28); se incluye en la Figura 1b el espectro promedio y el percentil 84.1 de los veinte acelerogramas registrados en zona I. Se comparan estos espectros del terremoto con el espectro esperado estimado utilizando la PGA obtenida con la relación de atenuación propuesta por Gómez-Bernal *et al.* (2003), y la forma espectral para los eventos intraplaca. Podemos observar una gran correlación entre el espectro estimado con los observados.

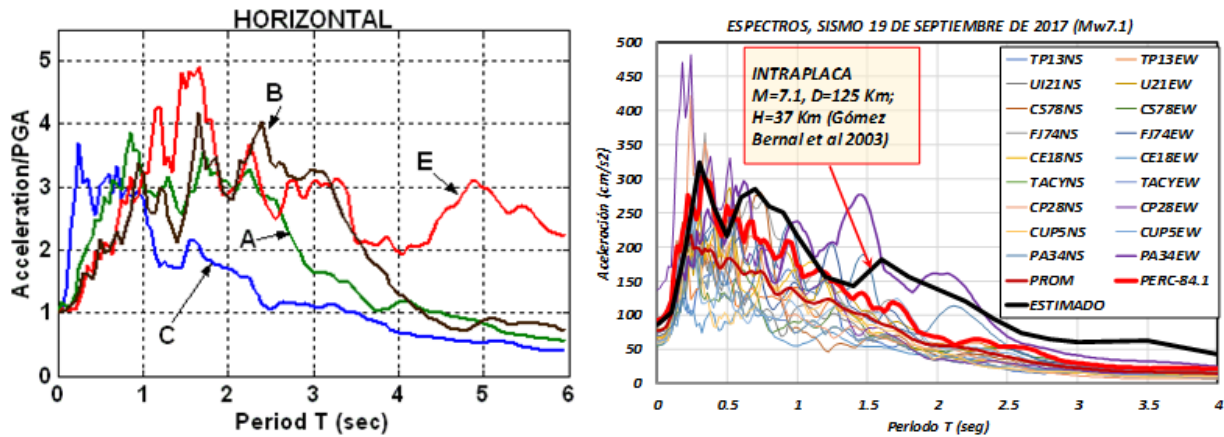


Figura 3.2 (a) Formas Espectrales en estaciones de la Zona I de Ciudad de México por tipo de fuente; (b) Espectros de respuesta (5%) del sismo 19 de septiembre de 2017, con el espectro estimado.

3.2 Características de los espectros en el suelo blando de la Ciudad de México

Después del terremoto de 1985, se observó una enorme diferencia entre las intensidades de temblores y los daños asociados a los edificios en diferentes áreas de la ciudad. La zona del lecho del lago (suelo blando, zona III) de la Ciudad de México es conocida mundialmente como uno de los subsuelos con las mayores amplificaciones de movimiento del suelo. Después de 1985, varios investigadores han estudiado los efectos del sitio local. En el terremoto del 19 de septiembre de 2017, se observó de nuevo una gran diferencia en las intensidades instrumentales entre el suelo firme y el suelo blando.

La estación Acelerográfica CO56, se encuentra en una de las zonas donde se han observado daños graves en el pasado durante terremotos intensos. El sitio de CO56 se encuentra sobre 35 m de suelos de arcilla blanda con un promedio de velocidad de onda de cortante S_v , de 70 m/seg; y más abajo por capas consolidadas de suelo arcilloso de 1200 m con valores de velocidad de onda S_v de 800 m/s. Los espectros de respuesta para los siete terremotos más intensos que se han producido después de 1985 se muestran en la Figura 3.3. Entre estos siete terremotos más grandes se encuentran: el 25 de abril de 1989 (Mw-6.9); el 14 de septiembre de 1995 (Mw-7.3); el 20 de marzo de 2012 (Mw7.2); y el 19 de septiembre de 2017 (M-7.1). Los terremotos de 1995 y 2012 ocurrieron en el llamado segmento Ometepe, que es un segmento que se activa cada

14 años aproximadamente. El terremoto de 1989 ocurrió en una fuente sísmica diferente dentro de Guerrero Gap, y es el que ha producido el PGA más grande en la estación de CO56 después del evento del 19 de septiembre de 2017. La Intensidad de Arias calculada (I_A) para la estación de CO56 para los siguientes cuatro eventos son: terremoto de 1989 ($I_A=42.2$ cm/s), 1995 ($I_A=23.9$ cm/s), 2012 ($I_A=22,7$ cm/s) y 2017 ($I_A=91.5$ cm/s). Estos valores son menores que el valor $I_A=224$ cm/s para la estación SCT-EW para el terremoto de 1985. Las características de los espectros de respuesta son muy consistentes para los eventos estudiados en la estación CO56.

Podemos concluir que el movimiento del suelo en suelo blando de la Ciudad de México, para terremotos moderados a grandes (6.9 a 7.4), es muy consistente en términos de duración, frecuencia y amplitud, como se observa a partir de historias y espectros de tiempo; esta característica se explica por el movimiento casi armónico observado en la zona del lecho del lago.

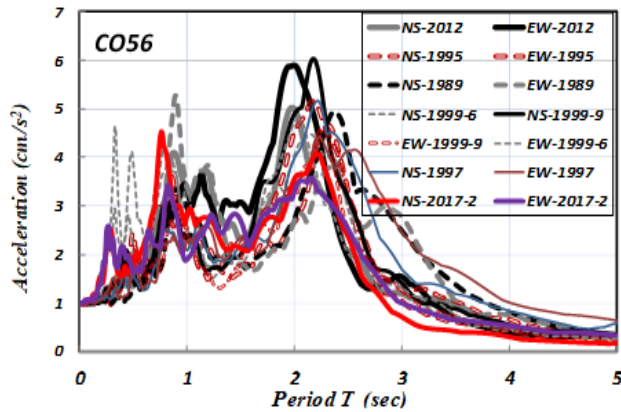


Figura 3.3 Espectros de respuesta normalizados en la estación CO56 (Col Roma), no se detectan diferencias espectrales debido al origen.

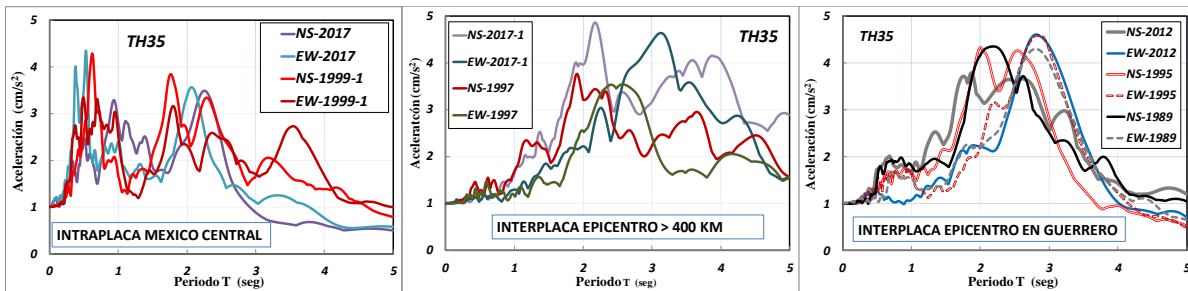


Figura 3.4. Espectros de respuesta normalizados en la estación TH35 (Tláhuac), mostrando las diferencias espectrales dependiendo del origen del sismo en la fuente y de la distancia.

Sin embargo, en otras zonas del Lago de la ciudad son más notables las diferencias de las formas espectrales, como por ejemplo en la zona de Tláhuac (Figura 3.4), donde los sismos de origen Intraplaca (de Tehuacán de 1999 y de Puebla-Morelos de 2017) generan ordenadas espectrales

máximas en periodos bajos sobre todo en alrededor del periodo de 0.5 seg, picos espectrales que no se manifiestan en los otros dos grupos de sismos de Interplaca; además, en sismos que exceden los 400 km (sismo de Caleta de Campos de 1997 y de Pijijiapan de 2017) las ordenadas máximas dominantes están en periodos de 3 y 4 seg, como sucedió durante el sismo de 1985 en la estación TLHB.

3.3 Metodología para asignar el Peligro Sísmico

En este trabajo para el cálculo de los espectros de peligro uniforme (EPU) se utilizó el criterio del análisis de peligro sísmico probabilista, donde la caracterización de los modelos sobre la ocurrencia de un sismo, las fuentes sísmicas, las relaciones de magnitud-recurrencia, y las leyes de atenuación se evalúan estadísticamente (ver, por ejemplo, Cornell, 1968; Esteva, 1968; McGuire, 2004). El análisis de peligro sísmico probabilista se caracteriza por cuatro etapas, según (Reiter, 1990) y (Kramer, 1996), estas se pueden resumir como sigue:

Primera etapa: Identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, descripciones históricas, catálogos sísmicos, mapas de isosistas e información instrumental. La descripción de la sismicidad debe incluir los parámetros sísmicos que evalúen el proceso en el foco (principalmente: mecanismo y caída de esfuerzos); el tamaño (intensidad, magnitud y momento sísmico) y los que dan la localización espacio-temporal (coordenadas hipocentrales y hora origen), (Henraiz, 1997)

Segunda etapa: Establecer relaciones de recurrencia, es necesario asegurar que los datos son homogéneos (están expresados en la misma escala de magnitud o intensidad), independientes (no replicas) y completos. Se toman generalmente los sismos de magnitudes mayores a $M > 5$ o intensidades mayores a V en Escala Mercalli Modificada. La relación de recurrencia, que especifica la tasa promedio sobre la cual un sismo de algún tamaño será excedido, se usa para caracterizar la sismicidad de cada zona de la fuente. La ley de recurrencia más utilizada es la de (Gutenberg *et al.*, 1944), donde λ_m expresa la tasa media anual de excedencia de la magnitud m , y está definida por la ecuación 3.1.

$$\log \lambda_m = a - b \cdot m \quad 3.1$$

Tercera etapa: Definición de relaciones predictivas: se obtienen de empíricamente, mediante regresiones de mínimos cuadrados, u otros métodos de un conjunto de parámetros que dependen de la magnitud-distancia. Generalmente los movimientos del suelo se asumen como distribución de probabilidad log-normalizadas y las características de estas relaciones de predicción se pueden explicar de acuerdo con (Gama, 2010) en la ecuación 3.2:

$$\ln Y = \underbrace{C_1}_{1} + \underbrace{C_2 \cdot M + C_3 \cdot M^{C_4}}_{2} + \underbrace{C_5 \cdot \ln(R)}_{3} + \underbrace{C_6 \cdot \exp(C_7 \cdot M)}_{4} + \underbrace{C_8 \cdot R}_{5} + \underbrace{f(\text{fuente}) + f(\text{sitio})}_{6} \quad 3.2$$

1. Los valores pico de parámetros del movimiento del terreno se aproximan mediante distribuciones lognormales. Obteniéndose la regresión sobre el logaritmo del parámetro de interés de movimiento del terreno (Y).
2. La magnitud sísmica está típicamente definida como el logaritmo de algún parámetro del movimiento pico. Consecuentemente, $\ln Y$ puede ser proporcional a la magnitud M.
3. La propagación de las ondas de esfuerzos viaja desde la fuente de un sismo, produciendo amplitudes en las ondas de cuerpo que decrecen de acuerdo a $1/R$ y amplitudes de onda de superficie que decrecen con $\sqrt{\frac{1}{R}}$.
4. El área donde ocurre la ruptura de la falla se incrementa de acuerdo con el incremento de la magnitud del sismo. La distancia efectiva, que recorren las ondas que provocan el movimiento fuerte sobre un sitio R incrementa de acuerdo con el incremento de la magnitud.
5. Parte de la energía acarreada por la onda de esfuerzos, es absorbida completamente en el viaje por los materiales del suelo. Este amortiguamiento del material, causa amplitudes del movimiento del terreno que disminuyen exponencialmente con R.
6. Los parámetros del movimiento del terreno pueden estar influenciados por las características de la fuente (dislocación repentina, normal o falla inversa) o características del sitio (estratigrafía del suelo)

Cuarta etapa: Distribución de probabilidad de movimiento: Una vez conocida la sismicidad de las fuentes y patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, incluyendo los efectos de la geología, se puede calcular el peligro sísmico considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio de interés. La probabilidad de que un parámetro del movimiento del suelo (Y) llegue a exceder un valor particular (x), se calcula para un sismo particular de magnitud (m) llegue a ocurrir en esa ubicación (r). Este proceso se repite para todas las magnitudes de sismos, y ubicaciones de fuentes posibles, sumando sus probabilidades particulares. Entonces, la expresión que representa la probabilidad de que un parámetro (Y) llegue a exceder un valor particular (x), está dada según la ecuación (Kramer, 1996)

$$P[Y > x] = \iint P[Y > x | m, r] f_M(m) f_{R|M}(r, m) dr dm \quad 3.3$$

donde:

$P[Y > x | m, r]$: Se obtiene de las leyes de predicción (leyes de atenuación).

$f_M(m)$: Función de densidad de probabilidad de magnitudes (parte de las relaciones de recurrencia definidas)

$f_{R|M}(r, m)$: Función de densidad de probabilidad para distancias de fuente a sitio (se obtiene a partir de la caracterización de fuentes)

Las fuentes sísmicas y las leyes de atenuación utilizadas en este trabajo puede consultarse en el trabajo desarrollado por Pérez Castro y otros (2019).

3.4 Curvas de peligro Sísmico en Suelo Firme

Las curvas de peligro sísmico se calcularon utilizando el software EZ-FRISK 7.65 (Risk Engineering, 2004), para algunos puntos de la ciudad, estas curvas proporcionan la contribución de todas y cada una de las fuentes que afectan al sitio de interés, considerando que las curvas son la probabilidad de exceder cierto valor en particular, de un parámetro del movimiento del suelo, se puede calcular para un sismo probable, a ocurrir en una posible ubicación de origen, y se afecta por la probabilidad de que ese sismo de magnitud específica ocurra en ese lugar en particular. Este proceso se repite para todas las magnitudes y ubicaciones posibles (Kramer, 1996).

Para la estimación de los espectros de peligro uniforme (EPU) en el sitio Tacubaya se incorporó al programa EZ-FRISK 7.65 (Risk Engineering, 2004) las funciones de atenuación o formas espectrales de la Figura 3.5 que se basan en los espectros medios de la Figura 3.2a, las cuales fueron propuestas por Gómez-Bernal et al. (2003) para suelo firme (Zona I). Como se sabe para los diferentes tipos de fuentes sísmicas se tienen diferentes profundidades del hipocentro, es decir para el tipo intraplaca profundidades intermedia de 35 a 80 km, interplaca con epicentros en la trinchera del Océano pacífico tienen profundidades entre 15 y 35 km y superficiales a menos de 10 km (Gómez-Bernal et al., 2003). Es importante incluir estas funciones debido a que incluyen el efecto de amplificación observado durante sismos en periodos de vibración largos (1-3 seg) en esta Zona I

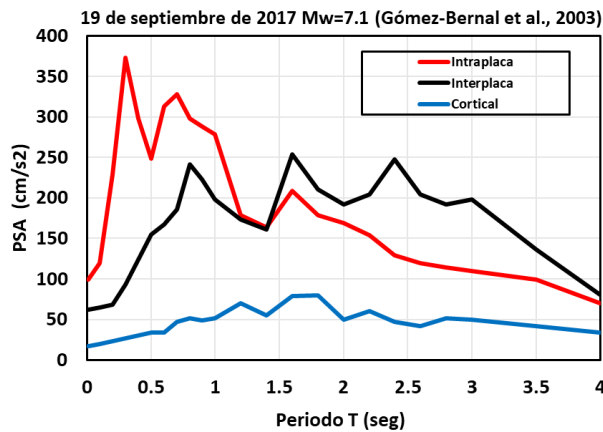


Figura 3.5. Formas espectrales a) Intraplaca b) Interplaca c) Corticales

Es importante conocer e identificar las fuentes sísmicas que aportan mayor peligro a los sitios estudiados, ya que serán estas las fuentes a las cuales se le deberá prestar mayor importancia para saber que tanto afectará un evento sísmico futuro, teniendo en cuenta que es un análisis probabilista.

En las Figura 3.6 y 3.7 se muestran las curvas de peligro en dos sitios de la Ciudad de México, Tacubaya y Tlalpan, para la aceleración máxima del suelo (PGA), se observa que para

todos los periodos de retorno estudiados que las fuentes sísmicas que mayor participan en el peligro sísmico total son IN1C, IN1B e IN2C las cuales corresponden a fuentes que producen sismos intraplaca o normales de más de 40 km de profundidad, pues tienen las mayores ordenadas; por su parte la fuente tipo interplaca con el mayor peligro corresponde a Guerrero Central.

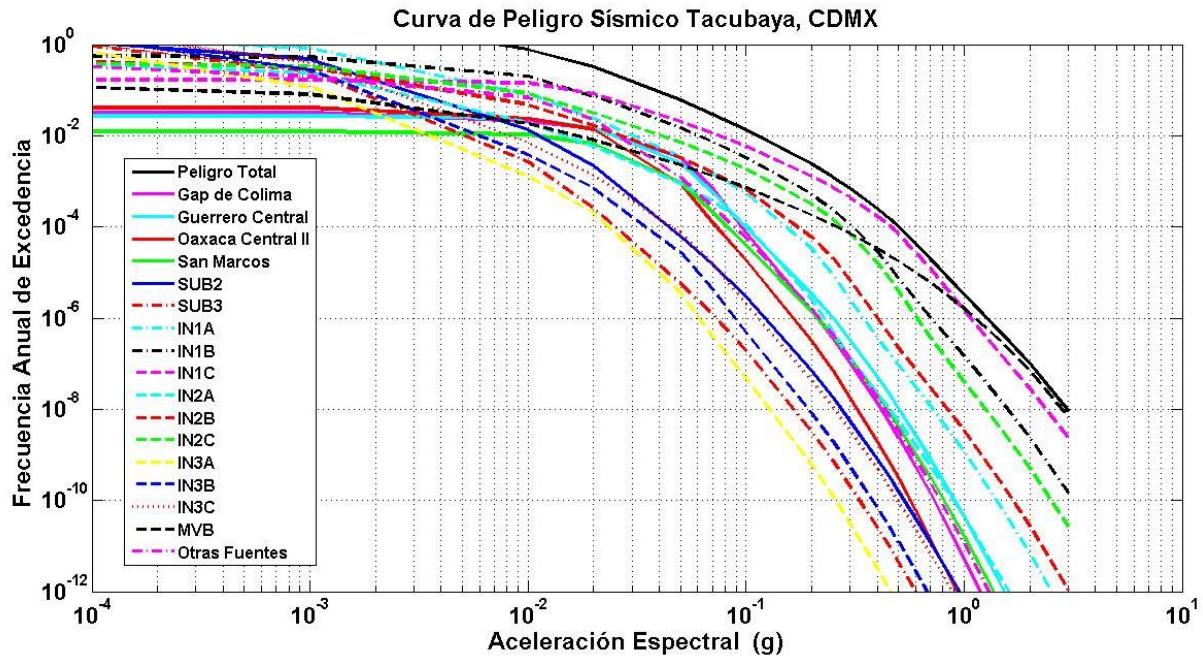


Figura 3.6. Curva de Peligro Sísmico para PGA en Tacubaya, Ciudad de México.

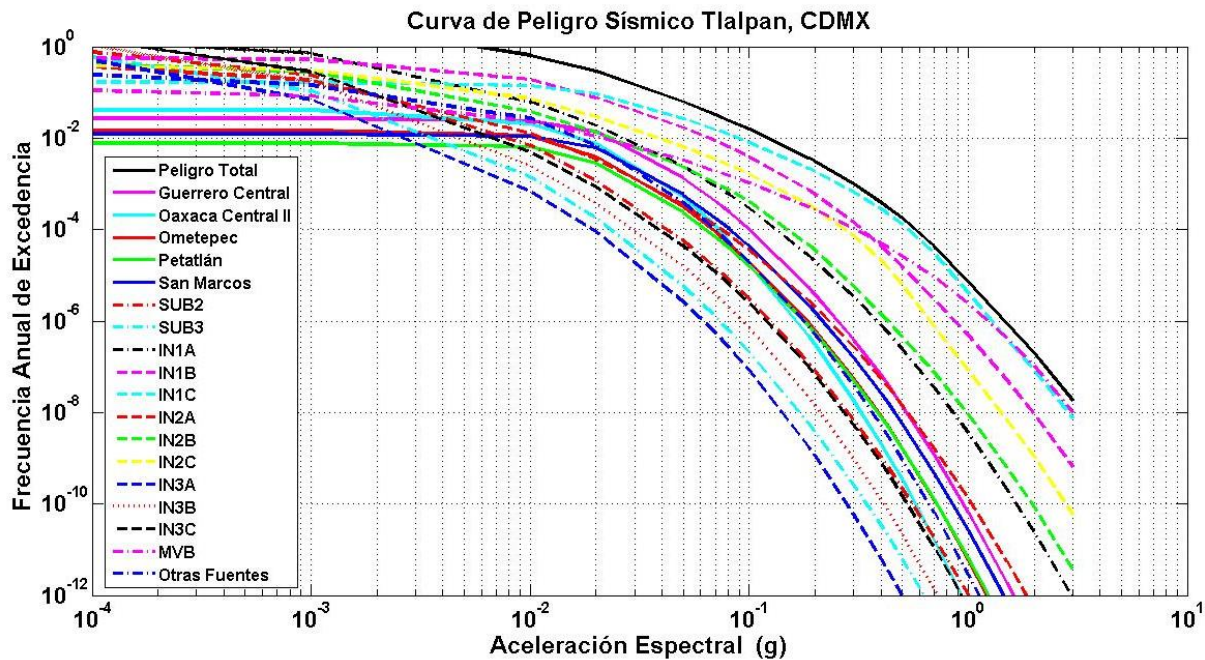


Figura 3.7. Curva de Peligro Sísmico para PGA en Tlalpan, Ciudad de México.

En la Figura 3.8 se muestran los espectros de peligro uniforme (EPU) de los sitios analizados en Ciudad de México y sitios cercanos del Estado de México para periodos de retorno de $T_r=2475$ años, $T_r=975$ años, $T_r=475$ años, $T_r=100$ años y $T_r=50$ años. Se observa que para los sitios Tacubaya y Cerro del Peñon donde se incluyeron las funciones de la Figura 3.5 se tienen ordenadas significativas de PSA en periodos altos de 1.0 a 3.0 seg, debido principalmente a la incorporación de la ley de atenuación de (Gómez-Bernal et al., 2003), la cual considera eventos interplaca, intraplaca y corticales para magnitudes $M>6$ y distancias hasta de 600 km.

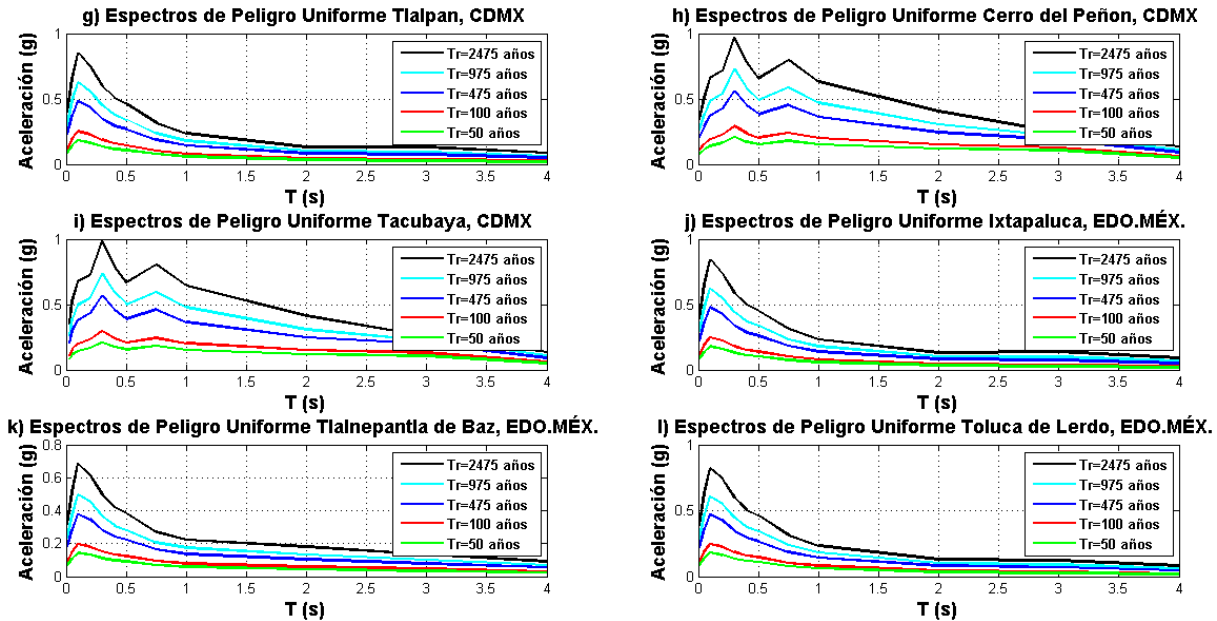


Figura 3.8 Espectros de Peligro Uniforme en sitios de Ciudad de México y Estado de México

3.5 Espectros de Diseño de las NTC para Diseño por Sismo, 2017

En la Ciudad de México las acciones sísmicas para diseño se determinan a partir de los espectros de diseño según las Normas Técnicas de Diseño por Sismo 2017 a través del SASID (Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño), por lo que para el diseño de una estructura es necesario definir los espectros de acuerdo al sitio de interés.

Se pueden comparar los espectros de peligro uniforme de los sitios estudiados con los indicados por el SASID, los EPU's de este trabajo corresponden a periodos de retorno de 2475, 975, 475, 100 y 50 años, mientras que en el SASID corresponden a un periodo de retorno de 250 años, es decir 125 años más que en las NTC (2004), sin embargo, aunque los periodos de retorno son diferentes, es posible establecer una comparación. Los sitios estudiados corresponden a tres diferentes Municipios anteriormente llamadas delegaciones, el primer sitio es Tlalpan (9.2791, -99.2114), Cerro del Peñón en la alcaldía Venustiano Carranza (19.4385, -99.0839) y Tacubaya en la alcaldía Miguel Hidalgo (19.4045, -99.1952). Para los tres casos únicamente se presentan los

periodos de retorno de 475 años, 100 años y 50 años, ya que son estos los periodos superior e inferior al usado por las NTC-2004 (SASID). Se presentan únicamente dos sitios, Tlalpan y Tacubaya, ya que el sitio del Cerro del Peñón tiene formas espectrales similares que el sitio de Tacubaya.

En la Figura 3.9 (a) se muestran 14 espectros de respuesta de las componentes horizontales en siete sitios de la zona I de la Ciudad de México junto con el respectivo espectro del percentil 84.1 de los 14 espectros, el cual se puede comparar con los EPU's en Tacubaya para los periodos de retorno de 50 y 100 años y con el EPU del SASID de las NTC, puede notarse claramente el espectro de las NTC está por debajo del EPU de 100 años y tiene una buena correlación con el EPU de 50 años, por lo que puede concluirse que para la zona I el nivel de los espectros de diseño estaría subestimado.

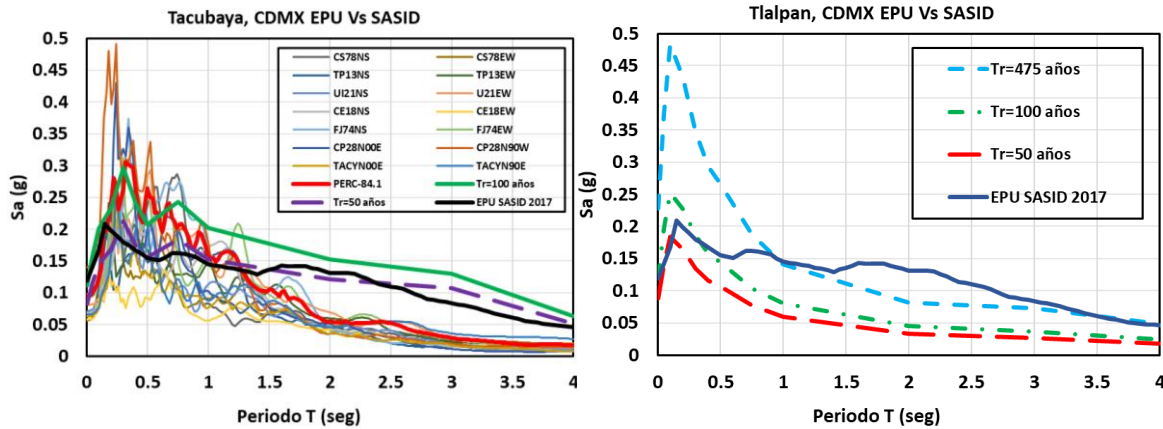


Figura 3.9. Comparación de EPU y SASID a) Tlalpan b) Tacubaya

En la tabla 3.2 y Figura 3.10 se presentan propuestas de los espectros de diseño para Ciudad de México, considerando una meseta más prolongada debido principalmente a la forma de los espectros de peligro uniforme que incluyen en gran medida las aceleraciones espectrales generadas por eventos del tipo intraplaca, como resultado de incorporar la ley de atenuación de la Figura 3.5. Para el Estado de México el sitio de Ixtapaluca presento las mayores aceleraciones espectrales de los sitios analizados en ese estado.

Tabla 3.1 Parámetros Espectro de Diseño Transparente Ixtapaluca, EDO. MÉX. y Tacubaya, CMDX

Tr (años)	Ixtapaluca, EDO.MÉX.				Tacubaya, CDMX			
	a ₀ (g)	c (g)	T _a (s)	T _b (s)	a ₀ (g)	c (g)	T _a (s)	T _b (s)
2475	0.3947	0.8427	0.1	0.5	0.3497	0.9891	0.1	0.8
975	0.2931	0.6225	0.1	0.5	0.2658	0.7365	0.1	0.8
475	0.2252	0.4791	0.1	0.5	0.208431	0.568527	0.1	0.8
100	0.1178	0.2478	0.1	0.5	0.1116	0.2969	0.1	0.8
50	0.08586	0.1795	0.1	0.5	0.08261	0.2132	0.1	0.8

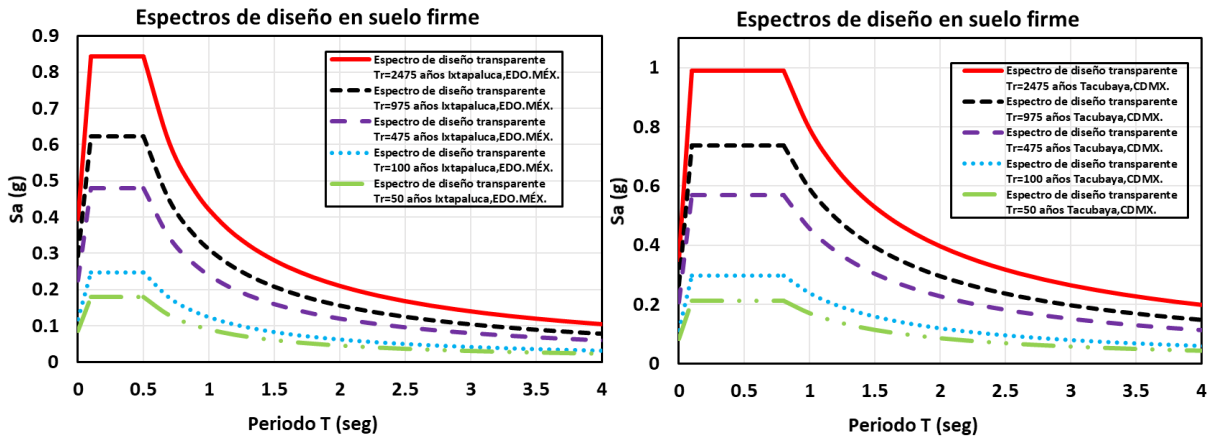


Figura 3.10. Espectro de Diseño Transparente Ixtapaluca, EDO. MÉX. y Tacubaya, CDMX

3.6 Espectros de Peligro en terreno blando

Los espectros de respuesta de peligro en terreno blando se pueden ejemplificar con los espectros de la estación CO56 en Colonia Roma, en la Figura 3.11 se presentan, dos espectros de peligro calculados para el 5% de la amortiguación crítica, utilizando el percentil 84,1% de los espectros normalizados de los siete eventos de la Figura 3.3, y afectados por la PGA estimada, obtenida con la relación de atenuación (Gómez-Bernal, et al, 2003); un espectro con una PGA de 0,1 g como el evento del 19 de septiembre de 2017, y el segundo espectro con una PGA de 0,23 g, el máximo esperado. En la misma Figura 3.11 se incluyen el espectro registrado en la estación CO56 durante el 19 de septiembre de 2017, y el espectro de peligro uniforme en este sitio de acuerdo con el Código de Construcción Mexicano 2017 (Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México, SASID). Podemos notar una buena correlación entre el terremoto del 19 de septiembre de 2017 y los espectros estimados.

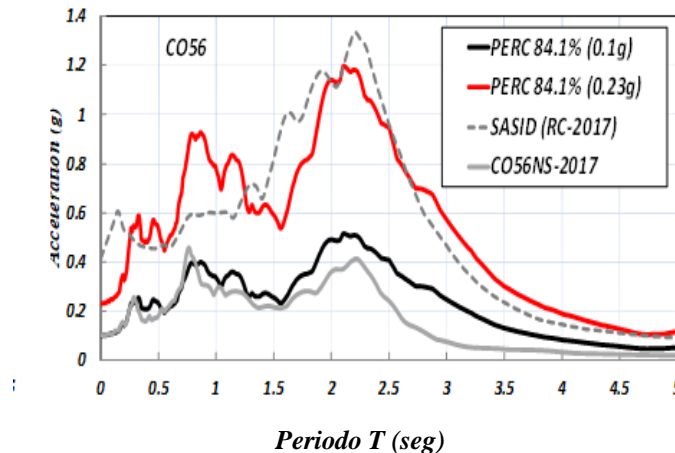


Figura 3.11 Espectros de Peligro en estación CO56, comparación de espectros con las NTC sismo (SASID).

CAPITULO 4

VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS EN CIUDAD DE MÉXICO

4.1 Metodología utilizada

Este Proyecto pretende aplicar una metodología para elaborar curvas de fragilidad de edificios residenciales en Ciudad de México, y poder determinar la probabilidad de excedencia de los diferentes estados de daño; además de estimar el porcentaje de daño global que experimentan los edificios ante diferentes niveles de peligro sísmico. Se realizaron análisis estáticos no lineales de edificios construidos antes de 1985 para obtener curvas de capacidad media; y así con las curvas de fragilidad estimar el daño ante varios escenarios. Además, se determinaron curvas de fragilidad para modelos estructurales de edificios construidos después del año de 1985.

La evaluación de vulnerabilidad sísmica desarrollada en el presente trabajo se centra principalmente en la metodología HAZUS (FEMA, 2003) y RISK-UE (Milutinovic et al., 2003), misma que ha sido adaptada para el caso de las edificaciones dañadas en la Ciudad de México durante el sismo del 19S-2017.

Esta metodología se describe de manera global en la Figura 4.1, donde inicialmente se realiza la identificación y selección de sistemas estructurales a estudiar típicos de una zona. En este caso se seleccionaron 5 edificios correspondientes a una tipología que es muy común de la Ciudad de México, y que no solo ha resultado vulnerable ante el sismo del 19S-2017, sino que también lo ha sido durante otros eventos sísmicos. Una vez identificadas las estructuras a estudiar se definen los principales parámetros a considerar. Esta variación tiene como función principal obtener una desviación estándar de las posibles capacidades de cada uno de los modelos analizados y considerarlas dentro de su evaluación de vulnerabilidad. La definición de los umbrales de daño se realizó según la Tabla 4.1.



Figura 4.1. Metodología desarrollada para calcular funciones de vulnerabilidad

4.2 Edificios estudiados

Con la finalidad de estudiar los edificios existentes construidos antes de 1985 en la Ciudad de México, se seleccionaron cinco edificios de mediana altura que resultaron dañados por el sismo de 2017. Estos edificios se construyeron a base de columnas de concreto reforzado y losa plana reticular (SE2), cuatro localizados en la alcaldía Benito Juárez y uno más en la alcaldía Cuauhtémoc. Todos los edificios son de uso habitacional y se clasifican dentro del grupo B según el RCDF. En la Tabla 4.1 se resumen las características principales de los cinco edificios, incluyendo la clasificación de la escala EME-98, y según la Plataforma de la CDMX.

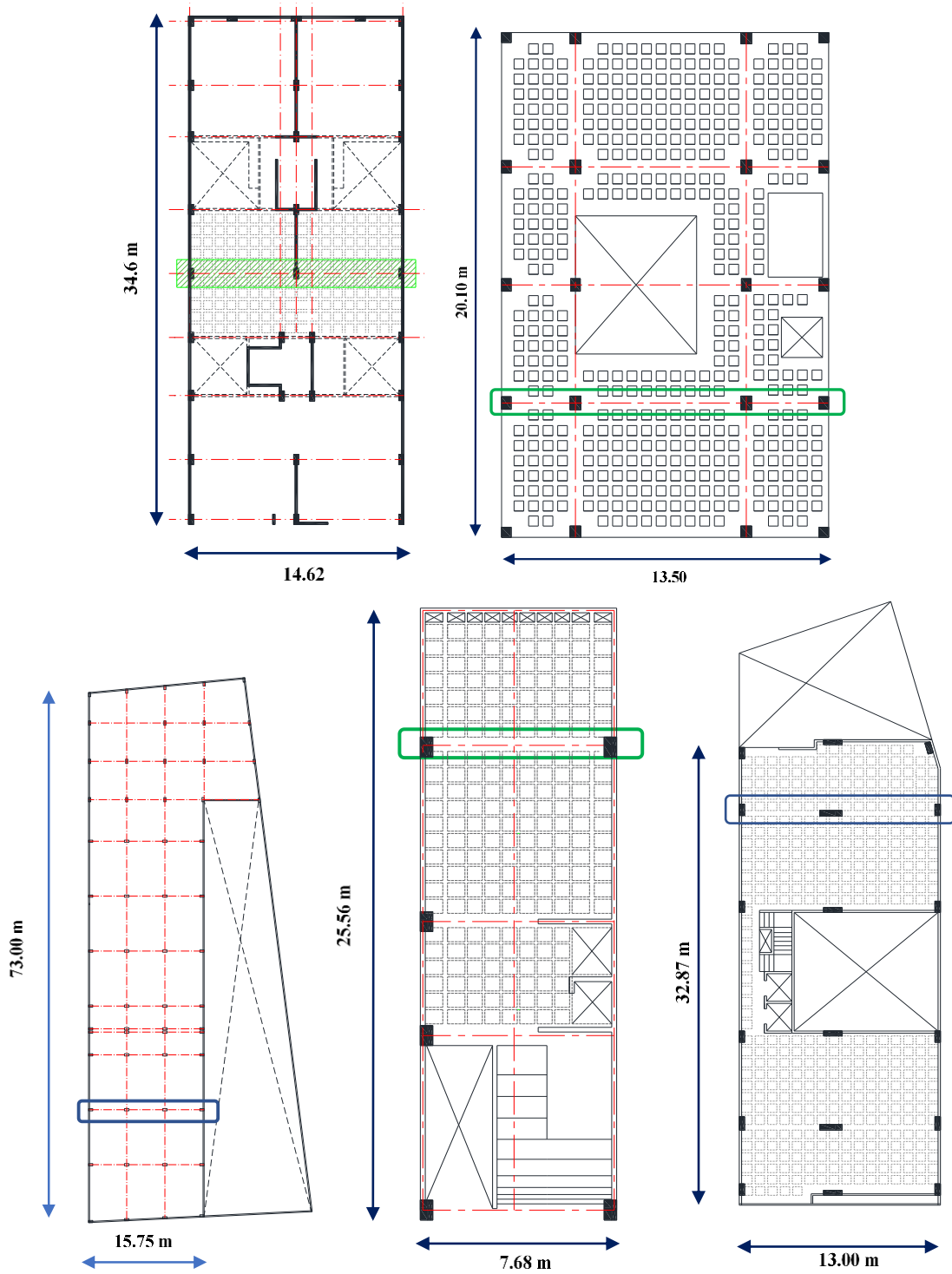


Figura 4.2. Plantas estructurales de los edificios estudiados. Arriba: SE2-5N y SE2-7N, Abajo: SE2-8N, SE2-10N y SE2-12N respectivamente.

Estas edificaciones tienen plantas rectangulares alargadas según se muestra en la Figura 4.2, como puede observarse, a excepción del edificio SE2-7N, los edificios exceden o son iguales al valor de 2.5, que es un valor límite sugerido en todas las recomendaciones de estructuración, porque cuando se excede se ha observado que la respuesta estructural puede ser amplificada y los efectos de torsión también pueden incrementarse, además todas estas estructuras no tienen trabes y las losas tienen peraltes relativamente bajos, lo que genera marcos flexibles alejados de ser sistemas de cortante. Otro factor que incrementa la vulnerabilidad de estos edificios es la orientación desfavorable de las columnas con su eje menor en el lado corto.

Tabla 3.1. Características generales de los edificios estudiados.

Clave	año	Niv	Altura (m)	crujías	L corto	L crujia	Zona	H losa	cols	Rel B/A	Grado daño
SE2-5N	1977	5	13.80	2	14.62	7.31	IIIa	35	70x35	2.4	GD2 (R alto)
SE2-7N	1982	7	18.90	3	13.50	3.40	IIIa	35	55x45	1.5	GD3 (R alto)
SE2-8N	1983	8	22.25	3	15.75	5.25	IIIa	25	65x35	5.4	GD3 (R alto)
SE2-10N	1978	10	26.0	1	7.68	7.68	IIIb	35	50x80	3.3	GD3 (R alto)
SE2-12N	1980	12	32.4	2	13.00	6.33	IIIa	35	145x40	2.5	GD2

4.3 Análisis estáticos no-lineales y curvas de capacidad

Para cada uno de los edificios estudiados se realizaron análisis estáticos no lineales (Pushover) utilizando el programa SAP, para definir así las curvas de capacidad de cada modelo. La configuración estructural y las cargas consideradas de los edificios se definen en la referencia 1 (De Anda, 2020). Las distintas curvas de capacidad de los modelos analizados se presentan en la Figura 4.3. De acuerdo a los resultados es posible notar que el modelo de la estructura SE2-10N, es el que aporta la menor capacidad resistente, ya que su capacidad última se presenta cuando ocurre un cortante basal de $V_u=25.56$ Ton, con un desplazamiento de azotea de 27.2 cm, mientras que la estructura más resistente corresponde al modelo SE2-7N, donde su cortante basal es de $V_u=60.31$ Ton, con un desplazamiento de azotea de 31.02 cm.

Para obtener la ductilidad, μ , del sistema es necesario representar la curva de capacidad en su forma bilineal, la cual se obtiene definiendo el punto de fluencia y el punto de capacidad último de la estructura. El procedimiento utilizado en este trabajo corresponde al propuesto por FEMA 356 (2000), el cual está basado en igualar la energía disipada por la estructura definida por el área bajo la curva real con la energía disipada de la curva idealizada.

La ductilidad μ es la relación del desplazamiento último, D_u , entre el desplazamiento de fluencia D_y . En la Tabla 4.2 se presentan algunos de los puntos más importantes que definen las curvas de capacidad obtenidas en su forma bilineal.

Tabla 4.2 Puntos característicos de las curvas de la Figura 4.3

Edificio	Periodo T [s]	Dy [cm]	Vy [Tonf]	Du [cm]	Vu [Tonf]	$\mu=Du/Dy$
SE2-5N	0.684	6.820	35.570	24.239	39.189	3.554
SE2-7N	0.747	6.350	48.496	31.018	60.307	4.885
SE2-8N	1.365	16.250	39.182	61.561	53.111	3.788
SE2-10N	1.522	9.650	19.180	27.200	25.555	2.819
SE2-12N	1.518	12.500	38.120	40.898	43.765	3.272

4.4 Espectros de capacidad

Con la finalidad de poder comparar la demanda sísmica con la capacidad de la estructura, es necesario transformar la curva *pushover* a una curva que relacione el desplazamiento espectral Sd con la aceleración espectral Sa . A esta transformación se le conoce como espectro de capacidad y se desarrolla aplicando las características dinámicas del modo fundamental. El espectro de capacidad se determina haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$Sd_j = \frac{Dt_j}{\gamma_M \varphi_{t1}} \quad (4.1)$$

$$Sa_j = \frac{V_j}{M_T \alpha} \quad (4.2)$$

donde:

D_{ij} = Desplazamiento de cada punto de la curva de capacidad [cm]

V_j = Cortante de cada punto de la curva de capacidad [Ton]

γ_M = Factor de participación en el primer modo

α = Coeficiente de masa efectiva en el cortante basal del primer modo

φ_{t1} = Amplitud tope de la estructura asociada al primer modo

M_T = Masa total de la estructura

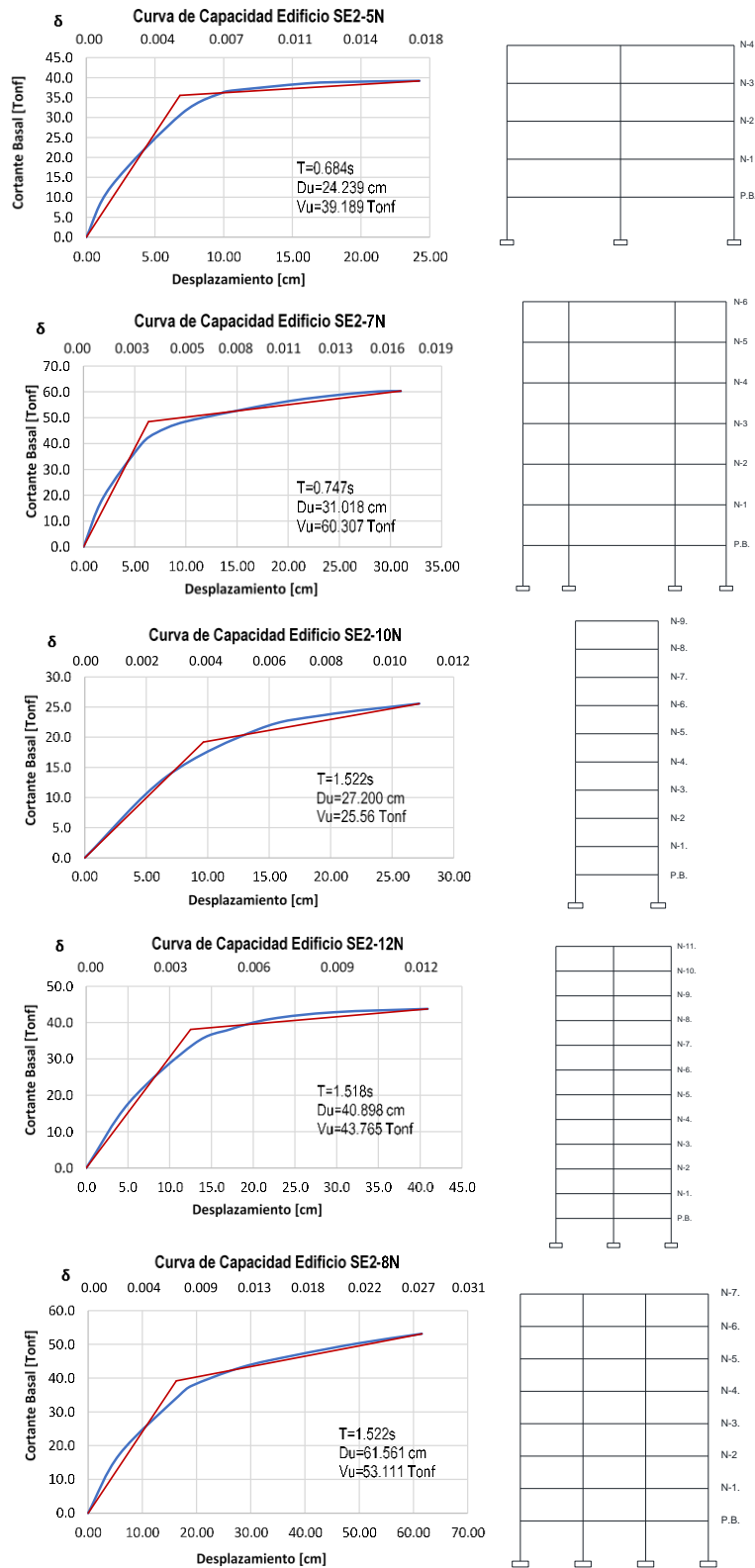


Figura 4.3. Curvas de capacidad de los edificios estudiados

Para obtener los resultados de las ecuaciones 1 y 2 es necesario incluir otras expresiones que se encuentran implícitas dentro de las ecuaciones antes mencionadas, las cuales se definen de la siguiente manera:

$$m_1 = \varphi^T M \varphi \quad (3.3)$$

$$\gamma_1 = \frac{\varphi^T M J}{m_1} \quad (4.4)$$

$$\alpha_1 = \frac{(\varphi^T M J)^2}{M_T m_1} \quad (4.5)$$

donde:

φ = Vector de formas modales normalizado a la unidad

M = Matriz de masas

J = Vector que describe las cargas generalizadas

Los espectros de capacidad se encuentran definidos por dos puntos principales: el punto de capacidad de última (UC) y el punto de capacidad de fluencia (YC), los cuales se expresan de la siguiente manera:

$$YC \left[A_y = S_{ay} = \frac{C_s SR}{\alpha_1}; D_y = S_{dy} \right] \quad (4.6)$$

$$UC \left[A_u = S_{au} = \lambda A_y; D_u = S_{du} \right] \quad (4.7)$$

Donde C_s representa un coeficiente resistente de diseño. Este valor es calculado mediante la ecuación 6, con la finalidad de obtener una sobrerresistencia aproximada de los edificios analizados. En la Figura 4.3 se muestran los espectros de capacidad, así como su representación bilineal y el C_s .

En la Figura 4.4 se comparan los coeficientes sísmicos resistentes, C_s , de los 5 edificios, con los espectros de diseño R1976, usando una sobrerresistencia (SR) de 1.5 (Figura 4.b). Suponiendo reducciones para Q entre 2 y 4, se puede concluir que para este tipo de edificios construidos antes de 1985 con este sistema estructural, la sobrerresistencia se encuentra entre 1.45 y 1.58 para los edificios estudiados.

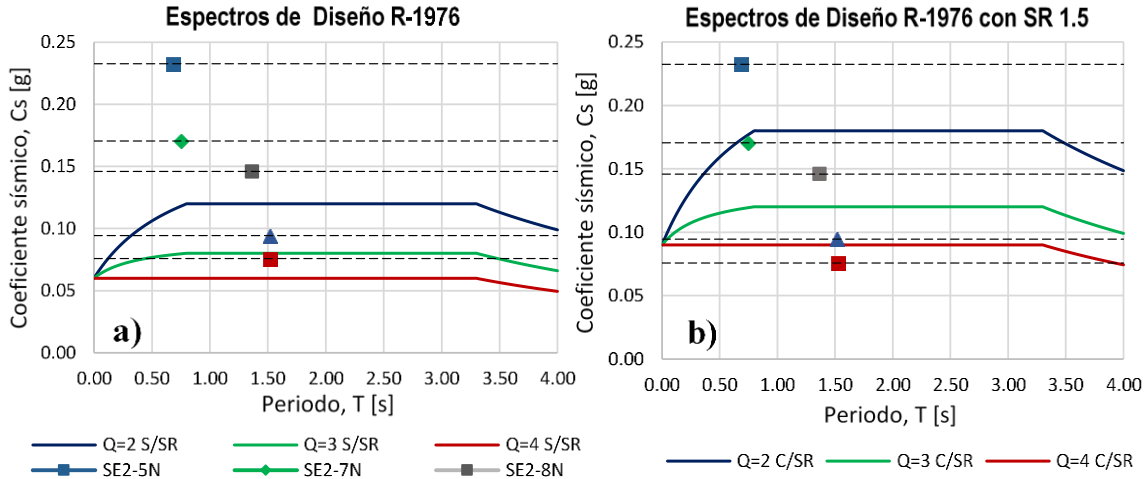


Figura 4.4. a) Espectros de Diseño (ED) R-1976. b) afectados por una Sobrerresistencia (SBR) de 1.5 y coeficientes resistentes “Cs” para los edificios estudiados

4.5 Definición de umbrales de daño

Como parte de la metodología utilizada en este trabajo, se optó por dividir los edificios analizados en dos grupos, en primer lugar, porque dadas las características y propiedades de cada uno de estos, la dispersión de las curvas de capacidad es mayor entre los edificios de 5-7 niveles y 8-12 niveles (Figura 4.5). En segundo lugar, se desea reducir la incertidumbre que existe por esta diferencia, ya que solo se cuenta con 5 edificios analizados. Es por ello que se han calculado dos curvas de capacidad media, una para edificios que presentan periodos pequeños y otra para edificios con periodos mayores a un segundo (Figura 4.6). Esta división por periodos también es útil y resulta de gran interés, ya que permite clasificar el tipo de edificios que resultaron más vulnerables ante el sismo del 19 de septiembre de 2017. A partir de estas curvas de capacidad en su forma bilineal se definieron los umbrales de daño para cada tipología.

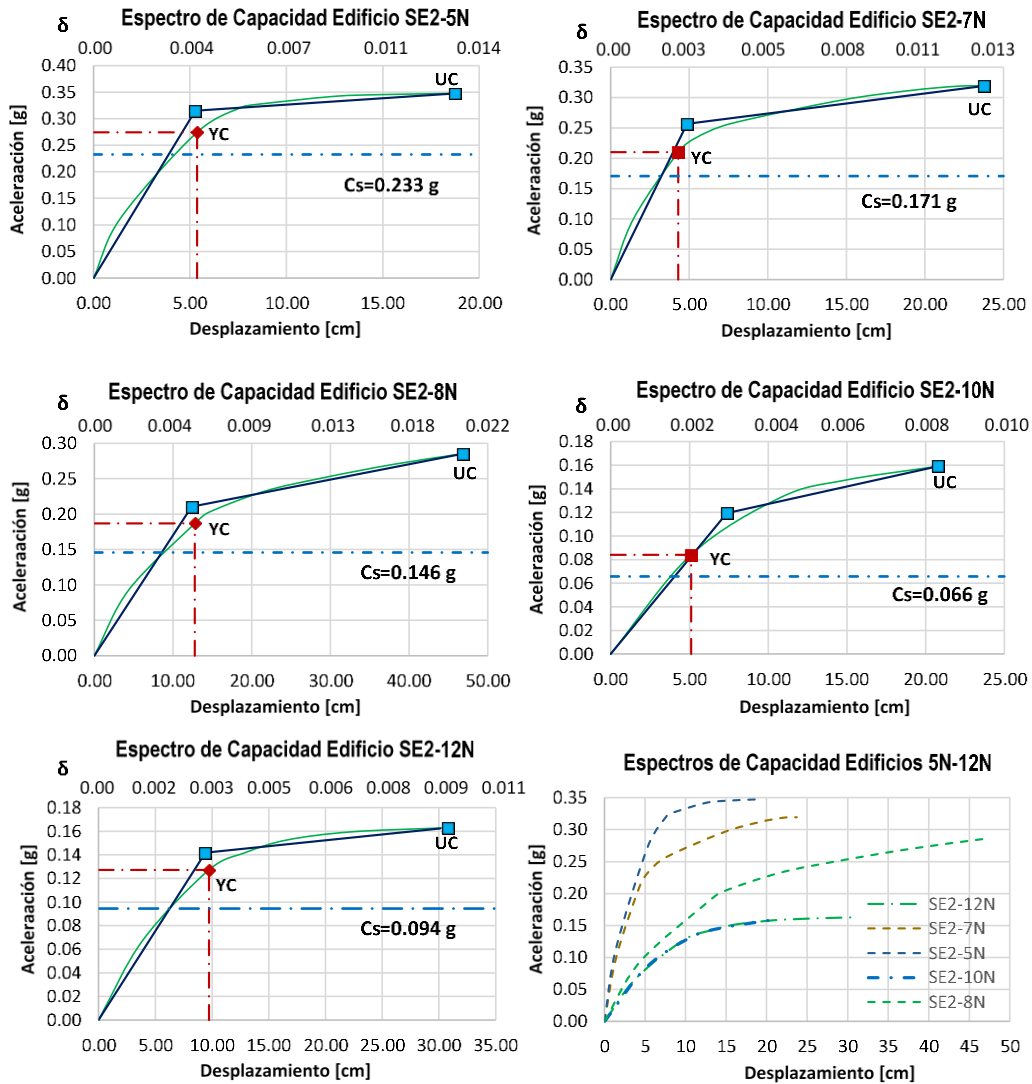


Figura 4.5. Espectros de capacidad de edificios estudiados de 5 a 12 niveles

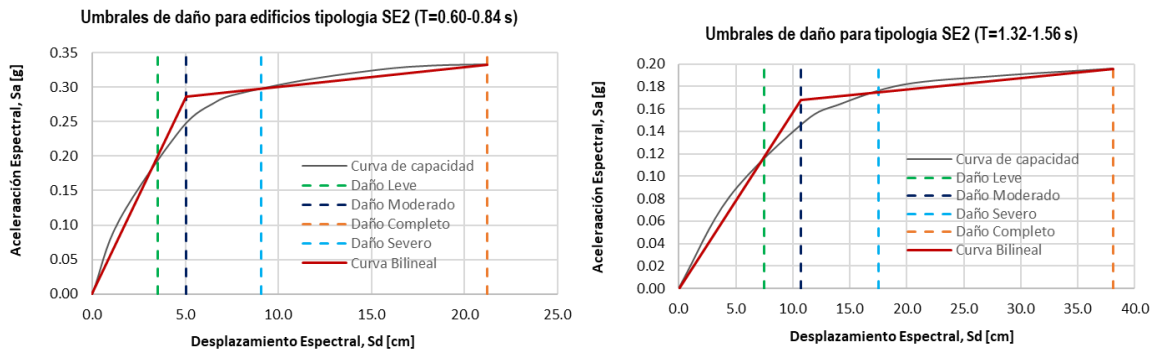


Figura 4.6. Espectros de Capacidad y umbrales de daño para dos grupos de edificios.

Los estados de daños utilizados en este trabajo forman parte de la propuesta hecha por Lagomarsino y Penna (2003), en el Proyecto RISK-UE. En esta propuesta se suponen cuatro estados de daño, los cuales se determinan a partir de los parámetros de desplazamiento de fluencia (D_y) y desplazamiento último (D_u) definidos en la forma bilineal de la curva de capacidad y espectro de capacidad. Estos umbrales están definidos en la Tabla 4.3 para los edificios de 5-7 niveles y 8-12 niveles. A partir de estos umbrales de daño, es posible calcular los valores de S_d para posteriormente construir las curvas de fragilidad.

Tabla 4.3. Umbrales de daño para los dos grupos de tipologías

Estado de Daño	Umbral de Daño	S_d (cm) T=0.60-0.84s	S_d (cm) T=1.32-1.56s
Daño Leve	$S_d1=0.7D_y$	3.53	7.49
Daño Moderado	$S_d2=D_y$	5.04	10.70
Daño Severo	$S_d3=D_y+0.25(D_u-D_y)$	9.09	17.55
Daño Completo	$S_d4=D_u$	21.23	38.09

Aunque ya se han descrito de una manera más completa estos umbrales de daño por De Anda (2020), a continuación, se definen sus puntos límites de manera breve. El primer umbral de daño corresponde al daño leve, el cual se encuentra definido antes de alcanzar el punto de fluencia. El daño moderado se define como el punto de capacidad de fluencia, mientras que el daño severo se encuentra posterior al punto de fluencia, pero no mucho más allá de este. Finalmente, el daño completo, es un daño muy fuerte, donde la estructura es inhabitable, este se encuentra definido en el punto de la capacidad última.

4.6 Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

Las curvas de fragilidad son una representación gráfica de la función de distribución acumulada de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica dada. En la metodología HAZUS (FEMA, 1999) se definen las curvas de fragilidad mediante una distribución de probabilidad de tipo lognormal definida por la siguiente ecuación:

$$P[ED \geq ED_i] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ED}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d_{ED}}} \right) \right] \quad (4.8)$$

Donde $\bar{S}_{d_{ED}}$ es el desplazamiento espectral medio para el cual la probabilidad de excedencia es del 50%. β_{ED} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral, Φ es la función de distribución normal estándar acumulada y S_d es el desplazamiento espectral.

En esta metodología cada curva de fragilidad está definida por el valor del desplazamiento espectral medio correspondiente al umbral de cada estado de daño definido en por las Tablas 4 y 5. La desviación estándar se calculó mediante dos métodos y se ajustó a la media de ambos. El primer método obtiene la desviación estándar usando las distintas curvas de capacidad reales, mientras que el segundo ajusta las curvas de fragilidad con una distribución discreta de probabilidad (Tabla 4.5).

Tabla 4.4. Distribución de probabilidades de excedencia del 50% en cada estado de daño

Condición	$P_{\beta}(1)=0.50$	$P_{\beta}(2)=0.50$	$P_{\beta}(3)=0.50$	$P_{\beta}(4)=0.50$
$P_{\beta}(1)=0.50$	0.500	0.119	0.012	0.000
$P_{\beta}(2)=0.50$	0.896	0.500	0.135	0.008
$P_{\beta}(3)=0.50$	0.992	0.866	0.500	0.104
$P_{\beta}(4)=0.50$	1.000	0.988	0.881	0.500

La Tabla 4.4 está basada en la metodología propuesta por la RISK-UE, y se calculó usando una función de distribución de probabilidad beta (FDP), la cual se determinó usando cinco estados de daño (incluyendo el no daño). Posteriormente se determinó la desviación estándar β_{ED} a partir de un ajuste por mínimos cuadrados de la distribución lognormal de la ecuación 8 que define las curvas de fragilidad de los puntos dados en la Tabla 4.4. Los parámetros obtenidos que definen las curvas de fragilidad se encuentran en la Tabla 4.5, donde se incluyen los umbrales de daño con sus desviaciones típicas para cada uno de los dos grupos definidos anteriormente.

Tabla 4.5. Principales parámetros para la construcción de curvas de fragilidad.

Grupo SE2	Daño Leve (DL)		Daño Moderado (DM)		Daño Severo (DS)		Daño Completo (DC)	
	Sd1	β_1	Sd2	β_2	Sd3	β_3	Sd4	β_4
5N-7N	3.528	0.310	5.040	0.470	9.088	0.60	21.2318	0.68
8N-12N	7.490	0.310	10.700	0.390	17.547	0.45	38.0891	0.63

Para determinar la probabilidad de daño de un determinado tipo de estructura, en muchas ocasiones se calcula el punto de desempeño de la estructura mediante un espectro de diseño y su curva de capacidad. Este punto de desempeño es trasladado a la curva de fragilidad, para finalmente obtener su probabilidad de daño. Para esta metodología se propone utilizar los espectros de respuesta de desplazamientos generados a través de registros sísmicos del sismo del 19S-2017, con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios ante este evento sísmico. Por otra parte, en la Tabla 4.5 se propuso una relación entre los umbrales de daños definidos en HAZUS y RISK-UE con la clasificación EME-98 adaptada a este trabajo para poder comparar de una mejor forma el grado de daño observado con el grado de daño obtenido de manera analítica.

Tabla 4.6. Relación de umbrales de daño con clasificación EME-98.

Clasificación RISK-UE		Clasificación EME-98	
SD	Sin Daño	GD1	Grado de Daño 1
DL	Daño Leve	GD2	Grado de Daño 2
DM	Daño Moderado	GD3	Grado de Daño 3
DS	Daño Severo	GD4	Grado de Daño 4
DC	Daño Completo	GD5	Grado de Daño 5

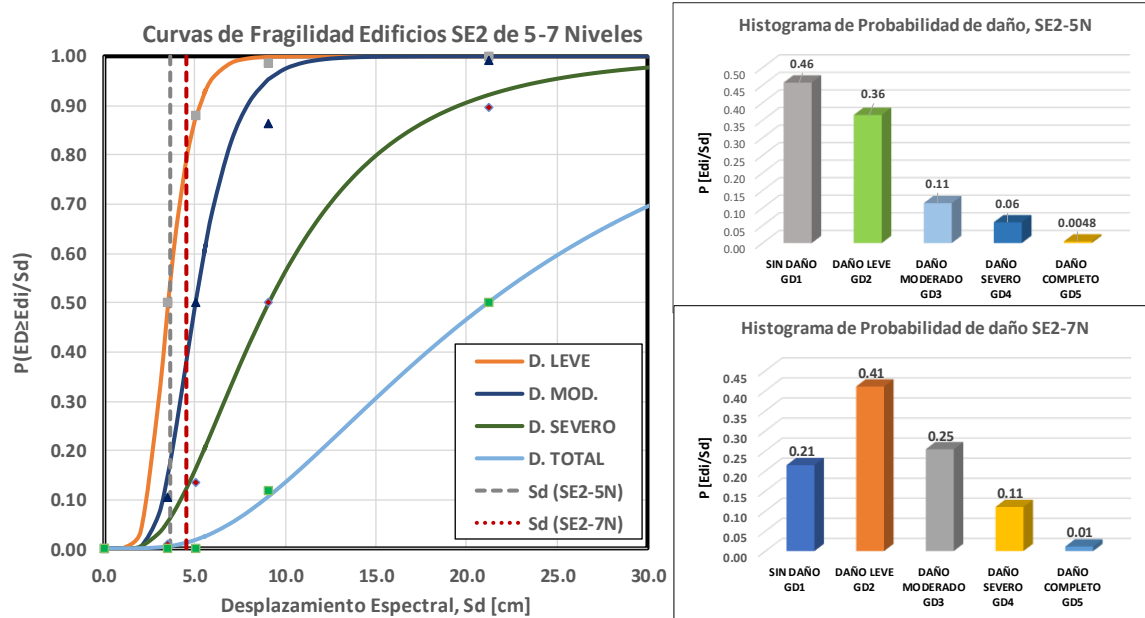


Figura 4.7. Izquierda: curvas de fragilidad, y desplazamientos S_d para cada edificio según su periodo, en las estaciones SI53 y AO24. Derecha: Histograma de Probabilidad de Daño para cada edificio.

Las curvas de fragilidad, calculadas según el criterio descrito antes, para el primer grupo de edificios entre 5 y 7 niveles (con periodos entre 0.60 a 0.86 s) se presenta en la parte izquierda de la Figura 4.7. Además, se incluyen los desplazamientos S_d (en líneas discontinuas) para cada uno de los dos edificios según su periodo de vibración correspondientes al espectro de desplazamientos del sismo del 19 de septiembre de 2017 en las estaciones SI53 y AO24, en el lado derecho de la Figura 4.7 se muestran los histogramas asociados a este sismo. En las Tablas 7 y 8 se indican los factores de daño medio, FDC para cada caso.

Tabla 4.7. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-5N.

ED (Risk-UE)	ED (EME-98)	Probabilidad	FDC (%)	Prob x FDC	% Daño EME-98
SIN DAÑO	GD1	45.7%	5%	2.3%	0-10%
LEVE	GD2	36.5%	20%	5.9%	10-30%
MODERADO	GD3	11.4%	45%	8.2%	30-60%
SEVERO	GD4	5.9%	75%	4.4%	60-90%
COMPLETO	GD5	0.5%	100%	0.5%	90-100%
				20%	GD2

Tabla 4.8. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-7N

ED (Risk-UE)	ED (EME-98)	Probabilidad	FDC (%)	Prob x FDC	% Daño EME-98
SIN DAÑO	GD1	21.4%	5%	1.1%	0-10%
LEVE	GD2	41.0%	20%	8.2%	10-30%
MODERADO	GD3	25.4%	45%	11.4%	30-60%
SEVERO	GD4	11.0%	75%	8.3%	60-90%
COMPLETO	GD5	1.1%	100%	1.1%	90-100%
				30%	GD2

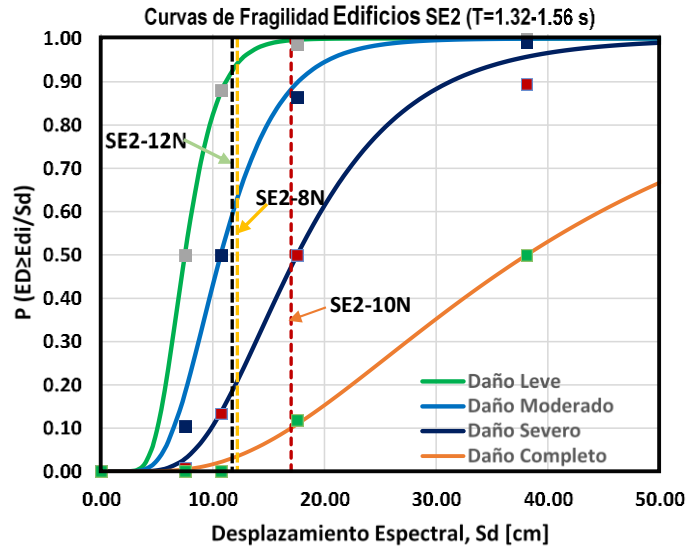


Figura 4.8. Curvas de fragilidad, se indican con línea discontinua los desplazamientos S_d para cada edificio según su periodo, calculados en las estaciones SI53 y AO24 respectivamente.

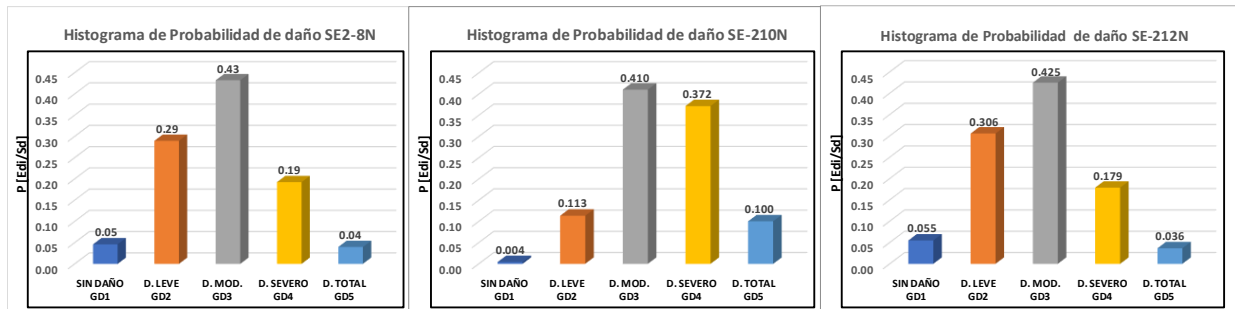


Figura 4.9. Histograma de Probabilidad de Daño para edificios SE2-8N, SE2-10N y SE2-12N.

Las curvas de fragilidad para el segundo grupo de edificios entre 8 y 12 niveles (con periodos entre 1.32 y 1.52s) se presenta en la Figura 4.8, y se incluyen los desplazamientos S_d (en líneas discontinuas) para cada uno de los tres edificios según su periodo de vibración, y correspondientes al espectro de desplazamientos del sismo del 19 de septiembre de 2017 en las

estaciones SI53 y AO24. En la Figura 4.9 se muestran los histogramas asociados a cada caso para este sismo. En las Tablas 9 a 11 se indican los factores de daño medio, FDC para cada caso.

Tabla 4.9. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-8N

ED (Risk-UE)	ED (EME-98)	Probabilidad	FDC (%)	Prob x FDC	% Daño EME-98
SIN DAÑO	GD1	4.6%	5%	0.2%	0-10%
LEVE	GD2	29.0%	20%	5.8%	10-30%
MODERADO	GD3	43.2%	45%	19.4%	30-60%
SEVERO	GD4	19.2%	75%	14.4%	60-90%
COMPLETO	GD5	4.0%	100%	4.0%	90-100%
				44%	GD3

Tabla 4.10. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-10N.

ED (Risk-UE)	ED (EME-98)	Probabilidad	FDC (%)	Prob x FDC	% Daño EME-98
SIN DAÑO	GD1	0.4%	5%	0.0%	0-10%
LEVE	GD2	11.3%	20%	2.3%	10-30%
MODERADO	GD3	41.0%	45%	18.5%	30-60%
SEVERO	GD4	37.2%	75%	27.9%	60-90%
COMPLETO	GD5	10.0%	100%	10.0%	90-100%
				59%	GD3

Tabla 4.11. Factor de Daño Medio (FDM) para edificio SE2-10N

ED (Risk-UE)	ED (EME-98)	Probabilidad	FDC (%)	Prob x FDC	% Daño EME-98
SIN DAÑO	GD1	5.5%	5%	0.3%	0-10%
LEVE	GD2	30.6%	20%	6.1%	10-30%
MODERADO	GD3	42.5%	45%	19.1%	30-60%
SEVERO	GD4	17.9%	75%	13.4%	60-90%
COMPLETO	GD5	3.6%	100%	3.6%	90-100%
				43%	GD3

Finalmente, con los resultados obtenidos se puede apreciar que, para los casos estudiados, la estructura SE2-10N resultó ser la más vulnerable con un 59% de daño global, siendo clasificada con un grado de daño moderado (GD3), sin embargo, esta edificación se encuentra casi al límite de incursionar dentro de una clasificación de daño severo (GD4). En la gráfica de la Figura 4.10 se puede observar que los edificios estudiados con periodos superiores a un segundo resultaron con mayor probabilidad de obtener un daño completo (GD5), mientras que el edificio SE2-5N resultó con mayor probabilidad de tener un GD1-GD2. Esto no quiere decir que éstas tipologías sigan una tendencia con respecto a su vulnerabilidad, sino que también dependerá de la zona en donde se ubique la estructura y sus propiedades dinámicas.

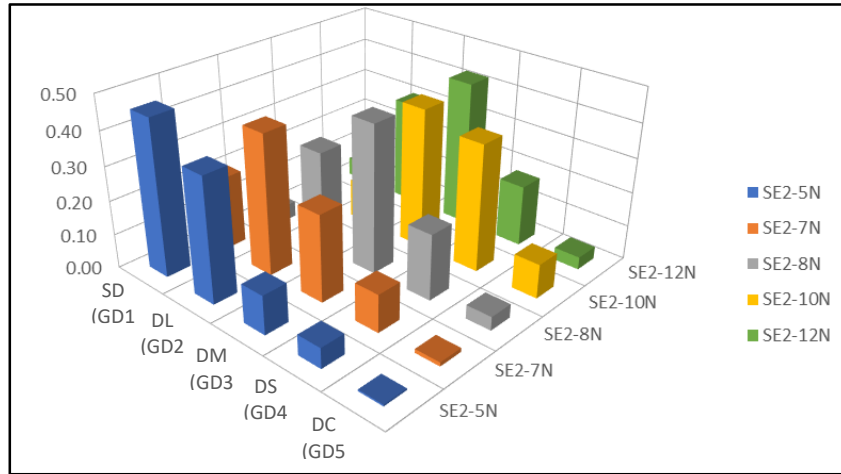


Figura 4.10. Histograma global de probabilidades de daños estudiados

Es interesante mencionar que las curvas de fragilidad obtenidas pueden ser usadas de manera general para edificios estructurados a base de columnas de concreto reforzado y losa plana, con periodos de 0.60-0.84 segundos y de 1.32-1.56 segundos tomando en cuenta otros escenarios. En la Figura 4.11 se muestran las curvas de fragilidad para los dos grupos creados anteriormente, en las que se puede observar que los edificios con periodos de 0.60-0.84 s resultaron ser más vulnerables que los de 1.32-1.56 s. Por ejemplo, si existiera una estructura con un periodo de 0.84 s, con un evento sísmico que le haya ocasionado un desplazamiento máximo de 5 cm, la probabilidad de exceder un daño moderado es del 50%, mientras que para un edificio con un periodo de 1.32 s sería aproximadamente de 4%.

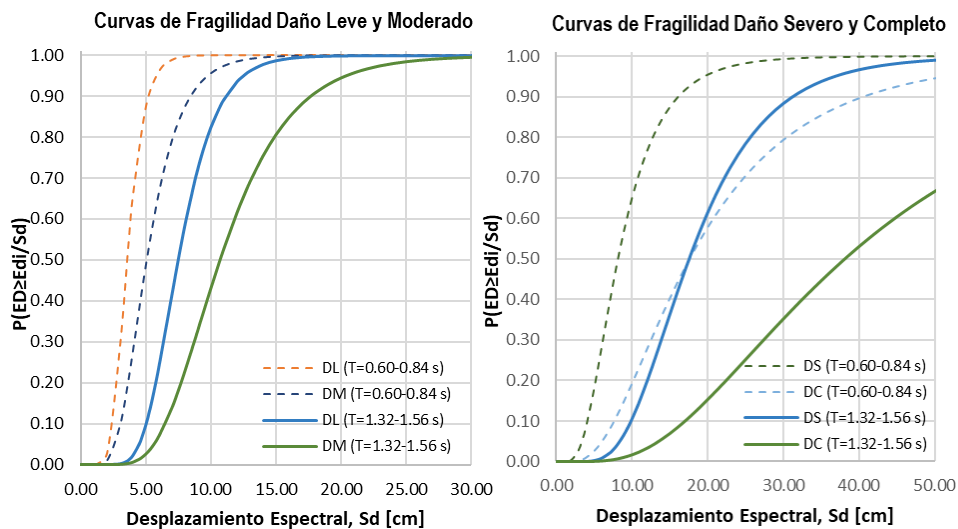


Figura 4.11. Curvas de fragilidad para edificios con periodos entre 0.60-0.84 s y 1.32-1.56 s.

Tabla 4.12. Resultados obtenidos para la tipología SE2 de 5-12 niveles

Edificio	Clasificación RISK-UE	Clasificación ISC	Clasificación EME-98	% Daño Observado	% Daño Método Analítico
SE2-5N	Daño Leve	Riesgo Alto	GD2	25%	20%
SE2-7N	Daño Leve-Moderado	Riesgo Alto	GD2-GD3	35%	30%
SE2-8N	Daño Moderado	Riesgo Alto	GD3	50%	44%
SE2-10N	Daño Moderado	Riesgo Alto	GD3	45%	59%
SE2-12N	Daño Moderado	Riesgo Alto	GD3	50%	43%

4.7 Recomendaciones para reducir la vulnerabilidad de las tipologías estudiadas

Las irregularidades estructurales en los edificios son uno de los factores más comunes que influyen en los daños durante terremotos, en el caso del sismo del 19 de septiembre de 2017, se observó que la irregularidad debido a plantas alargadas, con relación de aspecto en planta mayor a 3, fue bastante común en edificios que resultaron dañados (Gómez Bernal et al, 2018 y 2019), y además en muchos casos la orientación de las columnas era desfavorable, de tal manera que la rigidez lateral en el lado corto es proporcionada solo por los momentos de inercia menores, esto es particularmente crítico cuando el edificio solo cuenta con una o dos crujeas en la dirección corta, como es el caso de los edificios SE2-10N y SE2-5N.

Con la finalidad de analizar el efecto que tiene la orientación de las columnas en la capacidad resistente de este tipo de edificios se modificó la orientación de las columnas incluyendo dos casos más para el edificio SE2-10N, y tres más para el modelo SE2-5N como muestra las Figuras 12 y 13 respectivamente. Se calcularon las curvas de capacidad de cada caso y las curvas de capacidad media y la desviación estándar, lo cual permite construir curvas de fragilidad para una tipología representativa. Las distintas curvas de capacidad se muestran también en las Figuras 12 y 13. Los resultados obtenidos, demuestran que la orientación de las columnas, influye de manera significativa en la capacidad resistente de los edificios.

En el grupo de modelos SE2-10N (Figura 4.12), el edificio original con la orientación de la columna con su eje débil es el menos resistente, y soporta una aceleración espectral aproximada de 0.16 g, mientras que el modelo con columnas giradas 90° (SE2-10N-M1) alcanzó una capacidad resistente de 0.23 g, lo que representa un incremento del 40%. Por otra parte, al ser más rígida la estructura SE2-10N-M1, disminuye el periodo fundamental de 1.52s a 1.35s.

En el grupo de modelos SE2-5N (Figura 4.13), el edificio original representa la estructura con la menor capacidad resistente (39.19 Ton) con las columnas orientadas con su eje débil, y el edificio con mayor resistencia es aquel que tiene las columnas orientadas 90° respecto al original, con un cortante último de 56.71 Ton, lo que representa un incremento de un 45% en la capacidad resistente. En términos de aceleraciones, el edificio original resiste 0.35 g con un desplazamiento último de 18.73 cm, mientras que los otros tres modelos resisten aceleraciones mayores a 0.40 g.

Este análisis muestra que cuando existan plantas alargadas con pocas columnas en la dirección corta, se debe buscar siempre orientar a las columnas de tal manera que proporcionen la mayor rigidez posible.

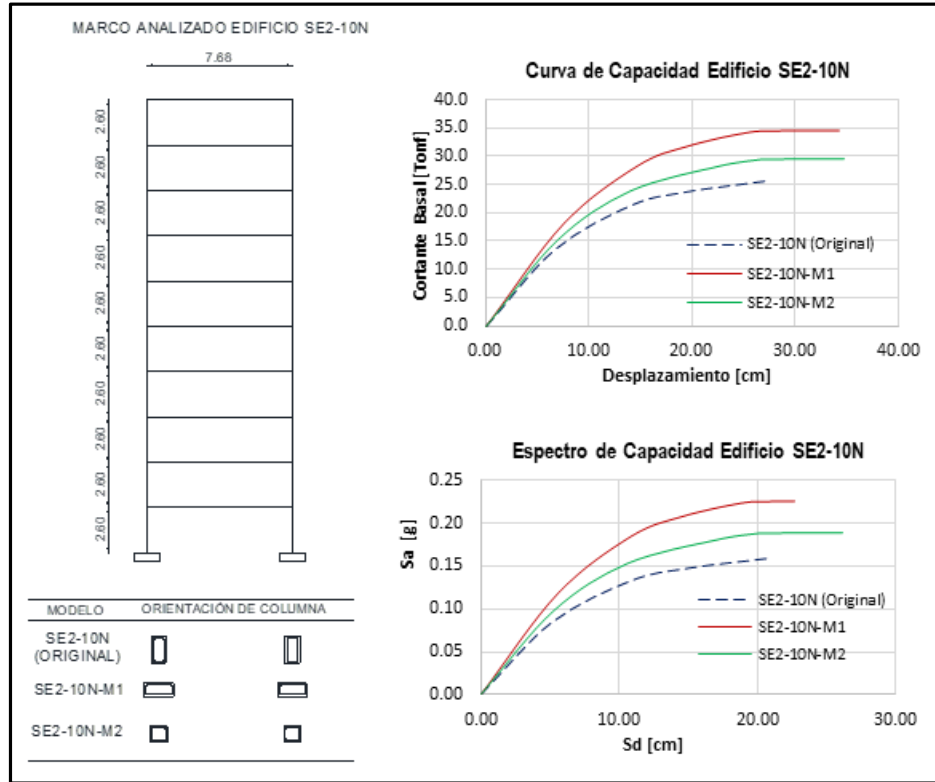


Figura 4.12. Curvas de capacidad del grupo de modelos SE-10N.

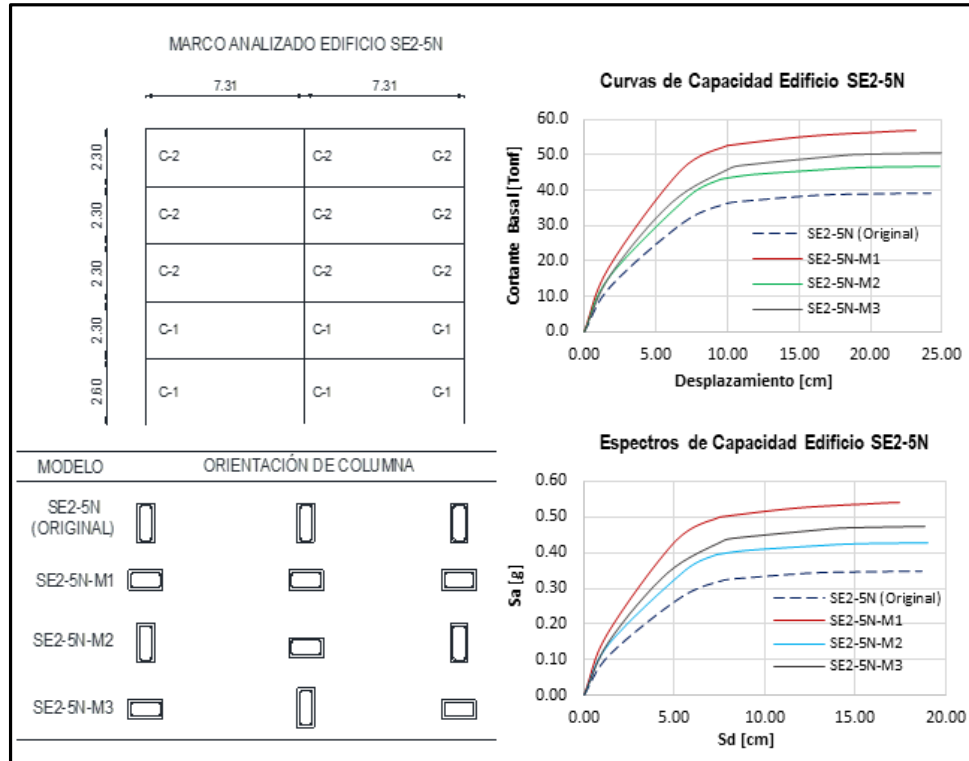


Figura 4.13. Curvas de capacidad del grupo de modelos SE-5N.

4.8 Curvas de fragilidad para edificios construidos después de 1985

Con la finalidad de incluir a los edificios construidos con reglamentos de construcciones recientes, se incluyeron modelos teóricos de edificios a partir de los espectros de diseño de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo del año 2004 (GDF, 2004). En la Figura 4.14 se muestran los espectros de capacidad determinados para tres factores de reducción por ductilidad, Q, de 2, 3 y 4, y considerando estructuras construidas en la zona IIIb, y un factor de sobrerresistencia de 1.5. Estos espectros son la base para determinar las curvas de fragilidad de la Figura 4.15, siguiendo el mismo procedimiento usado antes, pero con los parámetros de la Tabla 4.13. Las curvas de fragilidad se calcularon para seis modelos estructurales con periodos entre 1.0 s y 2.0 s, con intervalos de 0.2s.

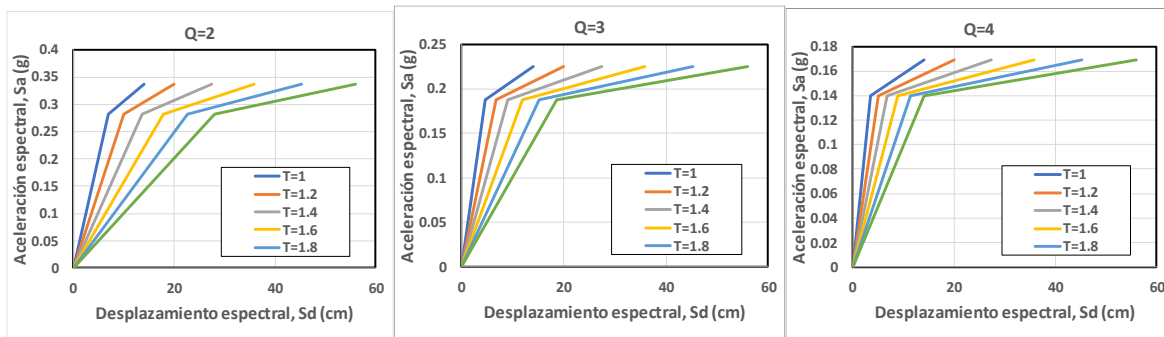


Figura 4.14. Espectros de Capacidad determinados a partir de los espectros de diseño de las NTC2004 para la zona IIIb y usando un factor de sobrerresistencia de 1.5.

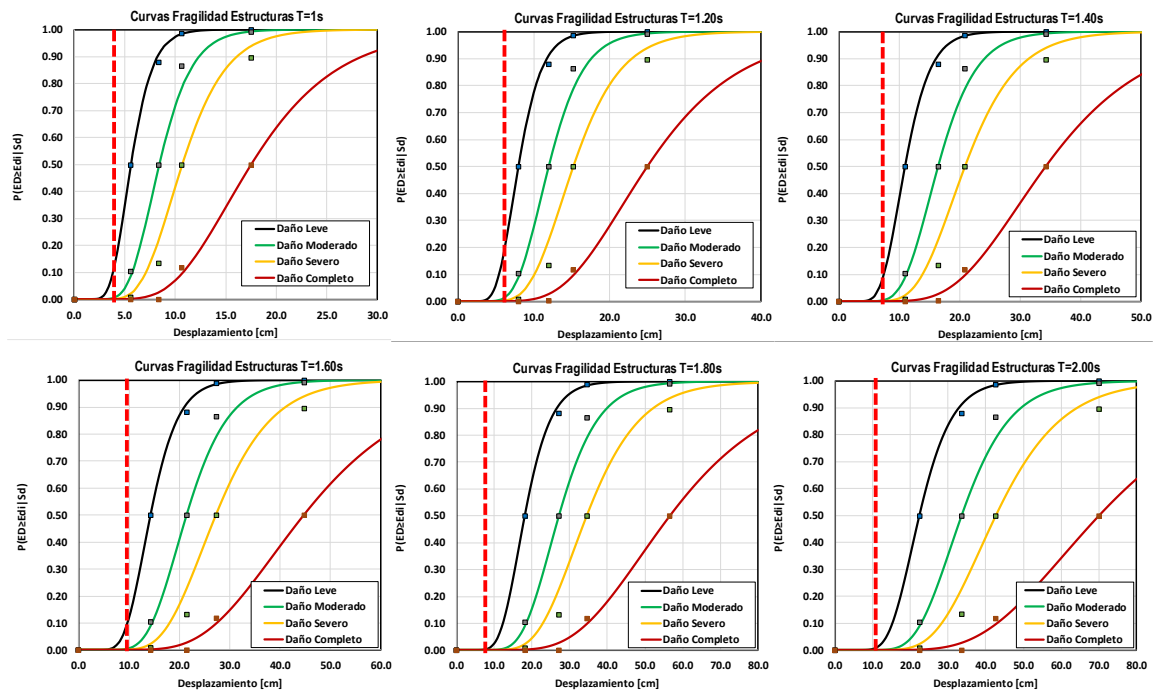


Figura 4.15. Curvas de fragilidad para edificios con un factor Q=2 y periodos T de 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 y 2.0 s.

Tabla 4.13. Parámetros de las curvas de fragilidad de los modelos de la Figura 4.15.

Estado de daño	Umbral de Daño	Sd (cm) para cada tipología de edificios					
		T ₁ =1.0 s	T ₂ =1.2 s	T ₃ =1.4 s	T ₄ =1.6 s	T ₅ =1.8 s	T ₆ =2.0 s
<i>Daño Leve</i>	Sd ₁ =0.8 Dy	5.60	8.00	10.96	14.32	18.12	22.40
<i>Daño Moderado</i>	Sd ₂ =1.2Dy	8.40	12.00	16.44	21.48	27.18	33.60
<i>Daño Severo</i>	Sd ₃ =Dy+0.25(Du-Dy)	10.68	15.25	20.89	27.30	34.54	42.70
<i>Daño Completo</i>	Sd ₄ =1.25Q(Dy)	17.50	25.00	34.25	44.75	56.63	70.00

En la Figura 4.16 se muestran los espectros de respuesta de desplazamiento para el 5% del amortiguamiento crítico en once estaciones de la zona IIIb de Ciudad de México del sismo del 19 de septiembre de 2017, se calcularon para modelos elásticos y para modelos con ductilidad igual a dos (Q=2). Se indican además en la misma Figura 4.16, los espectros de respuesta medios o promedios, y el espectro correspondiente al percentil 84%, para todos los casos. Es importante señalar que es poca la dispersión entre los espectros de las diferentes estaciones para los espectros de desplazamiento, comparado con los espectros de respuesta de aceleración.

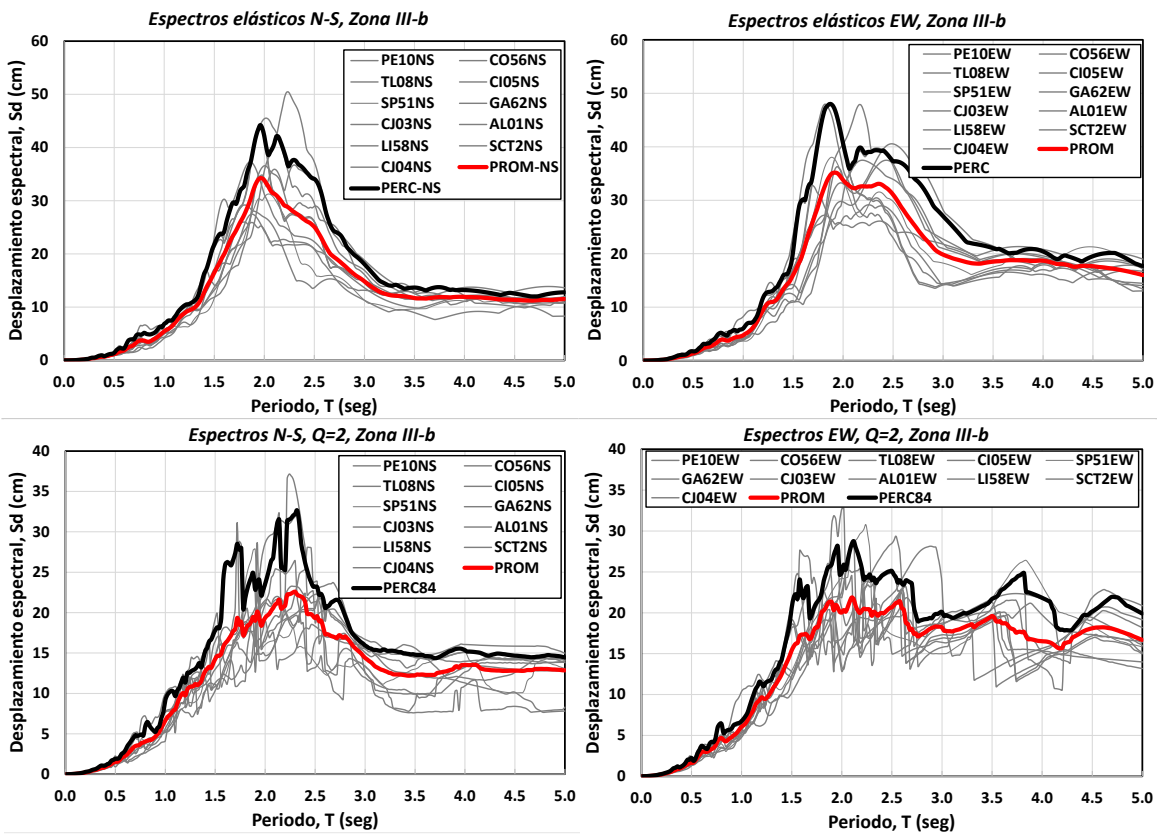


Figura 4.16. Espectros de respuesta de desplazamientos, Sd, elásticos (Q=1) y de ductilidad (Q=2) en 11 estaciones de la Zona IIIb del sismo 19/09/2017. Se incluye el promedio y el percentil 84%.

Con la finalidad de calibrar las curvas de fragilidad de la Figura 4.15, se incluye en cada uno de los seis recuadros los desplazamientos, S_d , asociados a cada periodo. Se puede ver que en general, existe muy buena correlación con el comportamiento de los edificios de este grupo (construidos después de 1985), observado durante el sismo del 19 de septiembre de 2017.

4.9 Conclusiones

Con el objetivo de estimar la vulnerabilidad o fragilidad de edificios residenciales de la Ciudad de México, se estudiaron en detalle cinco edificios estructurados con columnas de concreto reforzado y losa plana aligerada (SE2), construidos antes de 1985, los cuales resultaron dañados por el sismo del 19 de septiembre de 1985. Se realizaron análisis estáticos no lineales (Pushover) de cada uno de los cinco edificios para obtener una curva de capacidad media. El objetivo de este estudio fue desarrollar una metodología que permitiera obtener el porcentaje de probabilidad de daño que presentaron estos edificios ante el sismo del 19S-2017. Es por ello que se usaron los espectros de respuesta correspondientes al sismo antes mencionado para calcular la probabilidad de daño en conjunto con las curvas de fragilidad, sin embargo, también es posible obtenerla usando un punto de desempeño, donde la demanda sísmica está relacionada con un espectro de diseño.

Con las curvas de capacidad de cada uno de los edificios se estiman sus ductilidades y sobrerresistencias de diseño esperadas. Se encontró que la sobrerresistencia promedio usada para este tipo de estructuras (edificios construidos antes de 1985) es de aproximadamente 1.50. Los edificios fueron divididos en dos grupos, dado que las diferencias de sus curvas de capacidad se encontraban ligeramente distanciadas. Esto se debe principalmente a que los edificios con periodos cortos presentan más sobrerresistencia estructural que las estructuras con periodos altos en la mayoría de los casos.

Los resultados reflejaron que la estructura estudiada más vulnerable ante el sismo del 19S-2017 fue el edificio de 10 niveles (SE2-10N), el cual presenta una planta alargada con una relación de $B/A=3.33$, además de contar solo con una crujía. A esta estructura se le asignó un porcentaje de daño observado (evaluación preliminar) del 45%, mientras que el método analítico realizado en esta sección arroja un porcentaje de daño global del 59%, en ambos casos con daño moderado y un grado de daño de 3.

Por otro lado, la estructura menos vulnerable resultó ser el edificio de 5 niveles (SE2-5N), ya que en la evaluación preliminar se le asignó un porcentaje de daño del 25%, mientras que en el método analítico basado en las curvas de capacidad y de fragilidad, resultó con un daño global del 20%, en ambos casos con daño leve y un grado de daño 2.

La zona donde se ubican las edificaciones es otro factor que está relacionado con la vulnerabilidad de las distintas tipologías estructurales, ya que existen zonas que representan más riesgo que otras. De aquí surge la importancia de las curvas de fragilidad, que, si bien en este estudio se desarrolló solo para algunos casos, estas pueden ser usadas de manera general para determinar la vulnerabilidad sísmica de edificios en determinadas zonas, y con escenarios propuestos, siempre y cuando se encuentren dentro de los periodos definidos en este trabajo (0.60-0.84s y 1.32-1.56s).

Con la finalidad de investigar la forma de reducir la vulnerabilidad de este tipo de tipologías se estudiaron modelos basados en los edificios SE2-10N (más vulnerable) y el SE2-5N (menos vulnerable), para lo cual se varió la orientación de las columnas. Se pudo observar que la orientación de las columnas influye de manera significativa en la resistencia de las estructuras, por lo que se debe evitar estructurar edificaciones con columnas orientadas en su eje débil, incluso una buena orientación de las columnas ayuda a controlar el periodo estructural. La vulnerabilidad de ambas estructuras se hubiera reducido tomando en cuenta la configuración estructural de estas.

Con la finalidad de incluir a los edificios construidos con Reglamentos de Construcciones posteriores a 1985, se incluyeron modelos teóricos de edificios a partir de los espectros de diseño de las NTC para diseño por sismo 2004. Se calcularon espectros de capacidad para modelos estructuras en la zona IIIb, y un factor de sobrerresistencia de 1.5 y $Q=2$. Cuando se probaron con los desplazamientos espectrales del sismo de 2017, se puede ver que en general, existe muy buena correlación con el comportamiento de los edificios de este grupo.

En conclusión, la metodología utilizada en este trabajo muestra que se obtienen resultados bastante razonables, a pesar de que solo se han utilizado pocos datos, sin embargo, los edificios usados en este trabajo son representativos, pues resultaron dañados por el sismo de 2017.

A pesar de la utilidad de estos modelos, es necesario reconocer sus limitaciones y rango de aplicabilidad. Estas funciones de fragilidad capturan las características específicas solo de algunas de las tipologías del parque de edificios de la Ciudad de México, por lo que se requiere extender el estudio a otras tipologías de edificios. Además, deben incluirse más escenarios de Peligro Sísmico.

APENDICE A
CLASIFICACIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

Material	Clasificación	Clave	Sistema Estructural Principal	Sistema de piso
CONCRETO REFORZADO	Marcos	SE1L1	Marcos DE C.R.	Losa maciza
		SE1L2	Marcos DE C.R.	Losa plana
		SE1L4	Marcos DE C.R.	Losa con vigueta y bovedilla
	Columnas	SE2L2	Columnas de C.R.	Losa plana
	Sistema estructural mixto	SE12L25	Marcos de C.R	Losa maciza
			Columnas de C.R.	Losa plana
SE17L1		Marcos de C.R Muros de concreto	Losa maciza	
SE17L2	Marcos de C.R Muros de concreto	Losa plana		
MAMPOSTERÍA	Confinada	SE3L1	Muros de mampostería confinada	Losa maciza
		SE3L4	Muros de mampostería confinada	Losa con vigueta y bovedilla
		SE3L10	Muros de mampostería confinada	Otro
	Parcialmente confinada	SE6L1	Muros de mampostería parcialmente confinada	Losa maciza
		SE6L8	Muros de mampostería parcialmente confinada	Bóveda catalana
		SE6L18	Muros de mampostería parcialmente confinada	Bóveda catalana y losa maciza
	No confinada	SE4L4	Muros de mampostería no confinada	Losa con vigueta y bovedilla
		SE4L5	Muros de mampostería no confinada	Losa maciza sin vigas
		SE4L8	Muros de mampostería no confinada	Bóveda catalana

Material	Clasificación	Clave	Sistema Estructural Principal	Sistema de piso
ACERO	Acero	SE9L1	Marcos de acero	Losa maciza
		SE9L7	Marcos de acero	Losacero
		SE9L10	Marcos de acero	otro
	Mixto: Acero y concreto	SE10L17	Marcos de acero Marcos de C.R.	Losacero Losa maciza
MIXTO: CONCRETO Y MAMPOSTERÍA	Columnas y mampostería	SE5L12	Columnas de C.R. Muros de mampostería confinada	Losa plana Losa maciza
		SE5L15	Columnas de C.R. Muros de mampostería confinada	Losa plana Losa maciza sin vigas
		SE8L5	Columnas de C.R. Muros de mampostería parcialmente confinada	Losa maciza sin vigas
		SE8L21	Columnas de C.R. Muros de mampostería parcialmente confinada	Losa plana Losa maciza
		SE23RL5	Columnas de C.R. Muros de mampostería con refuerzo interior	Losa plana
	Marcos y mampostería	SE16L1	Marcos de C.R. Muros de mampostería parcialmente confinada	Losa maciza
		SE14L10	Marcos de C.R. Muros de mampostería no confinada	Otras
		SE13L1	Marcos de C.R. Muros de mampostería confinada	Losa maciza
		SE13L10	Marcos de C.R. Muros de mampostería confinada	Otros

APENDICE B

DETALLES ESTRUCTURALES DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS

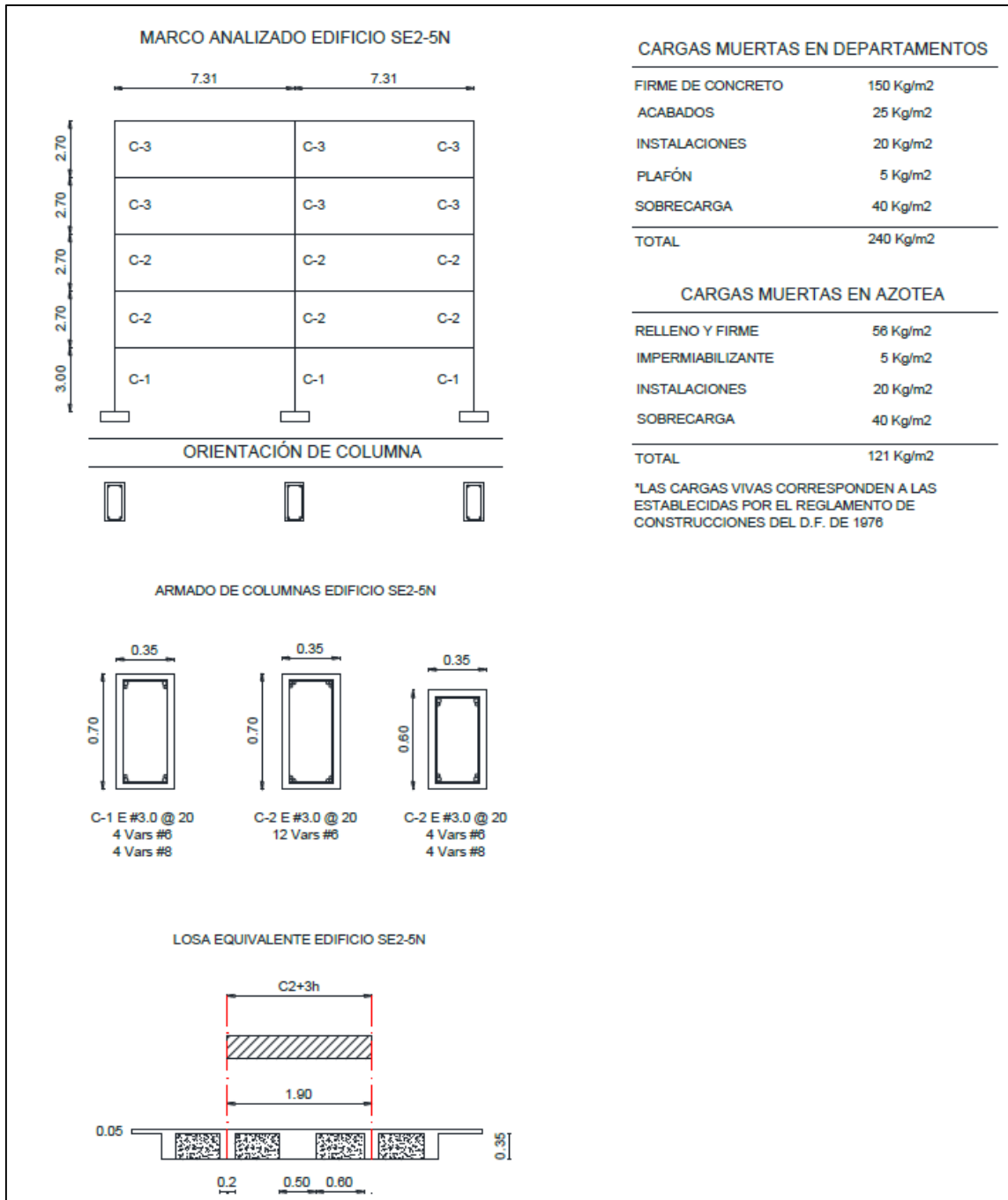


Figura B1. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-5N usadas en el análisis no-lineal.

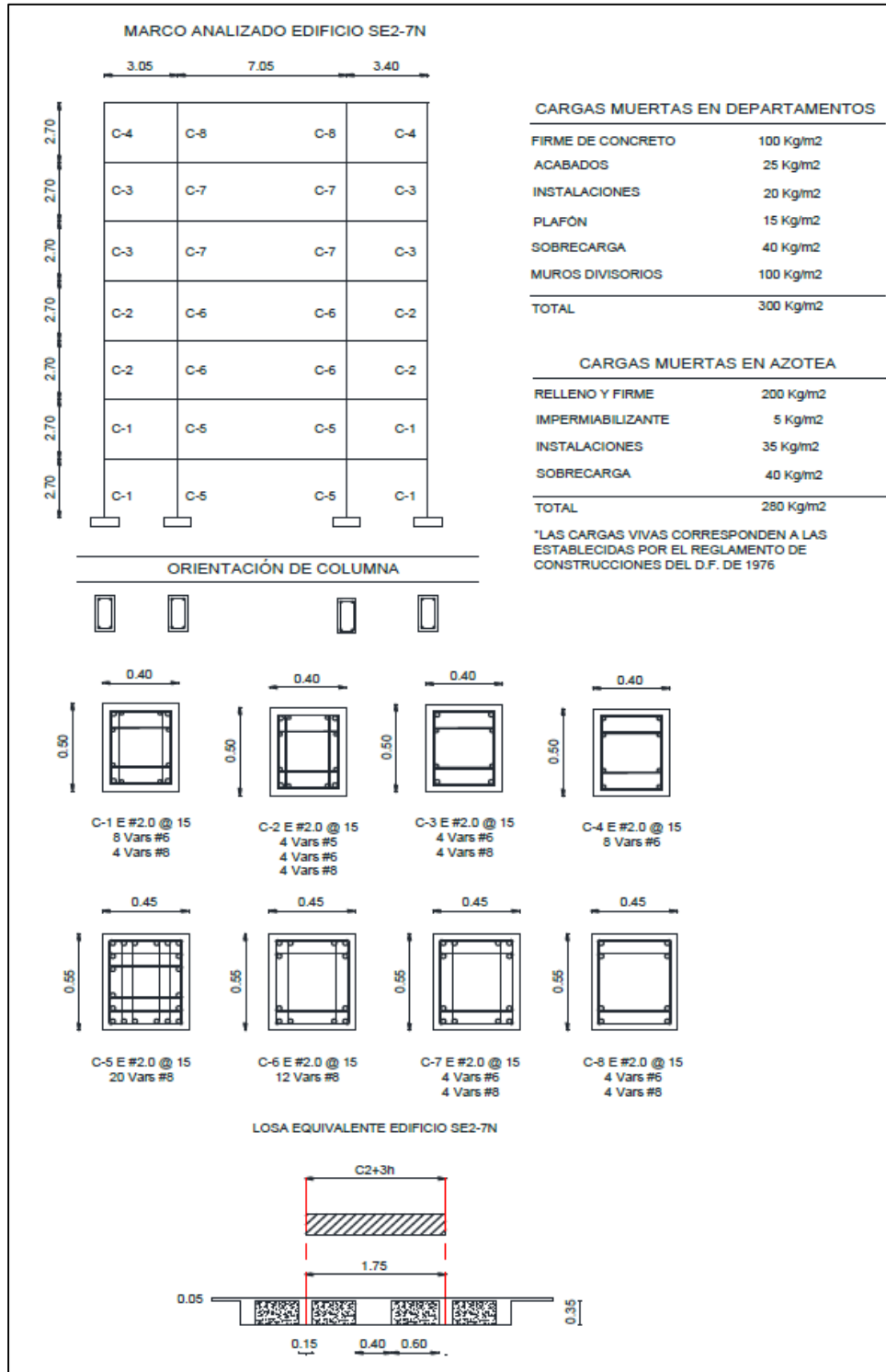


Figura B2. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-7N usadas en el análisis no-lineal.

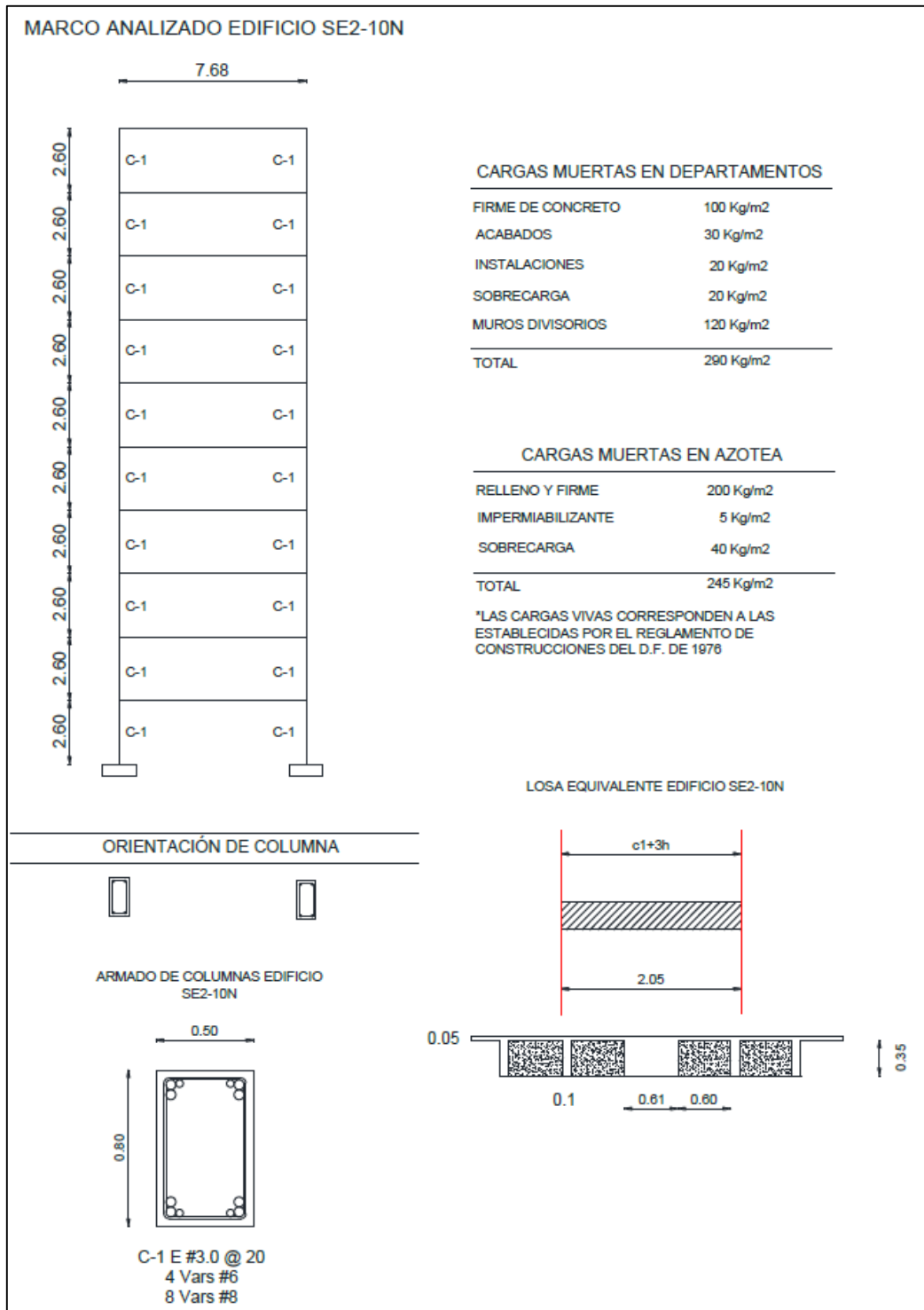


Figura B3. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-10N usadas en el análisis no-lineal.

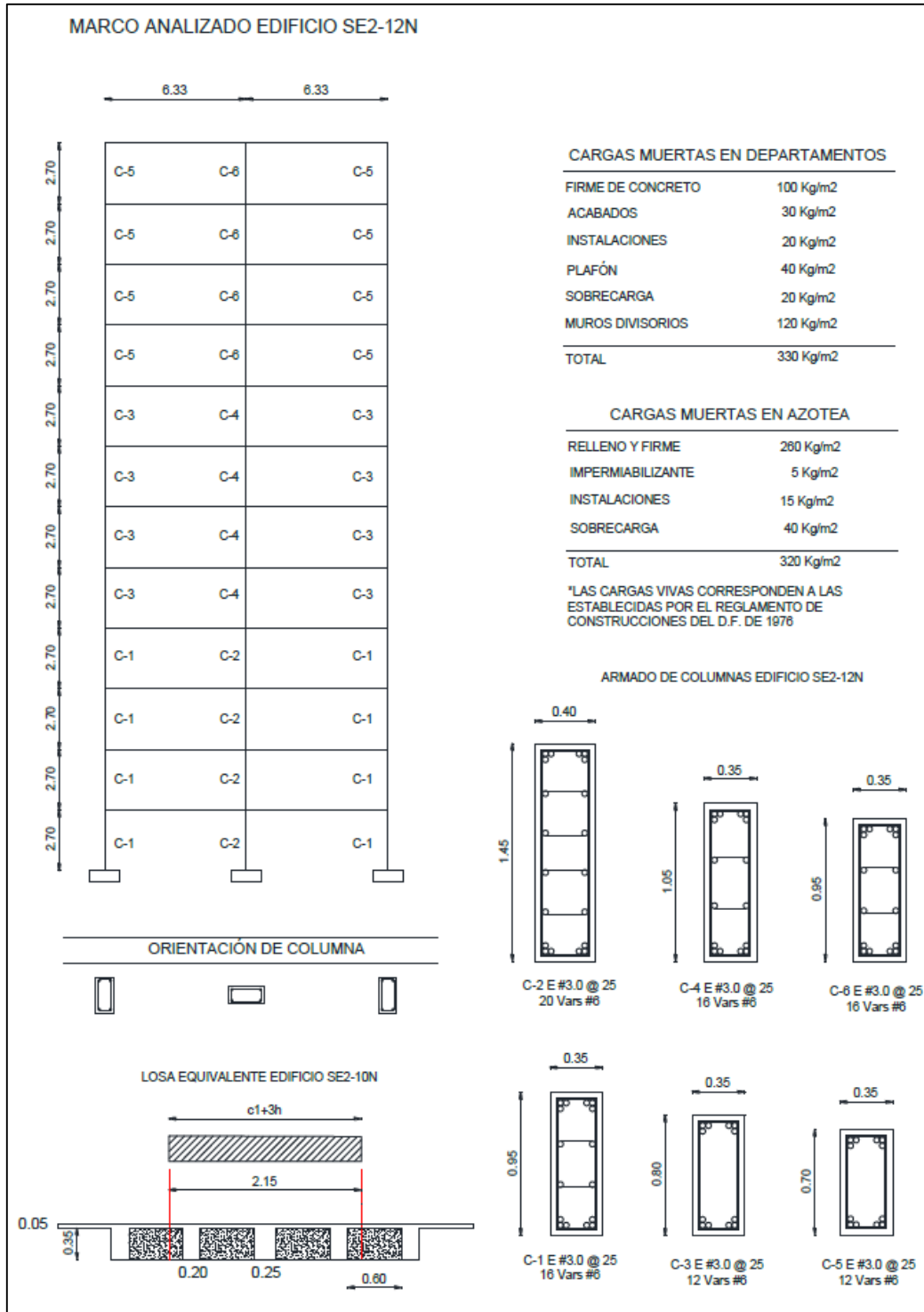


Figura B4. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-12N usadas en el análisis no-lineal.

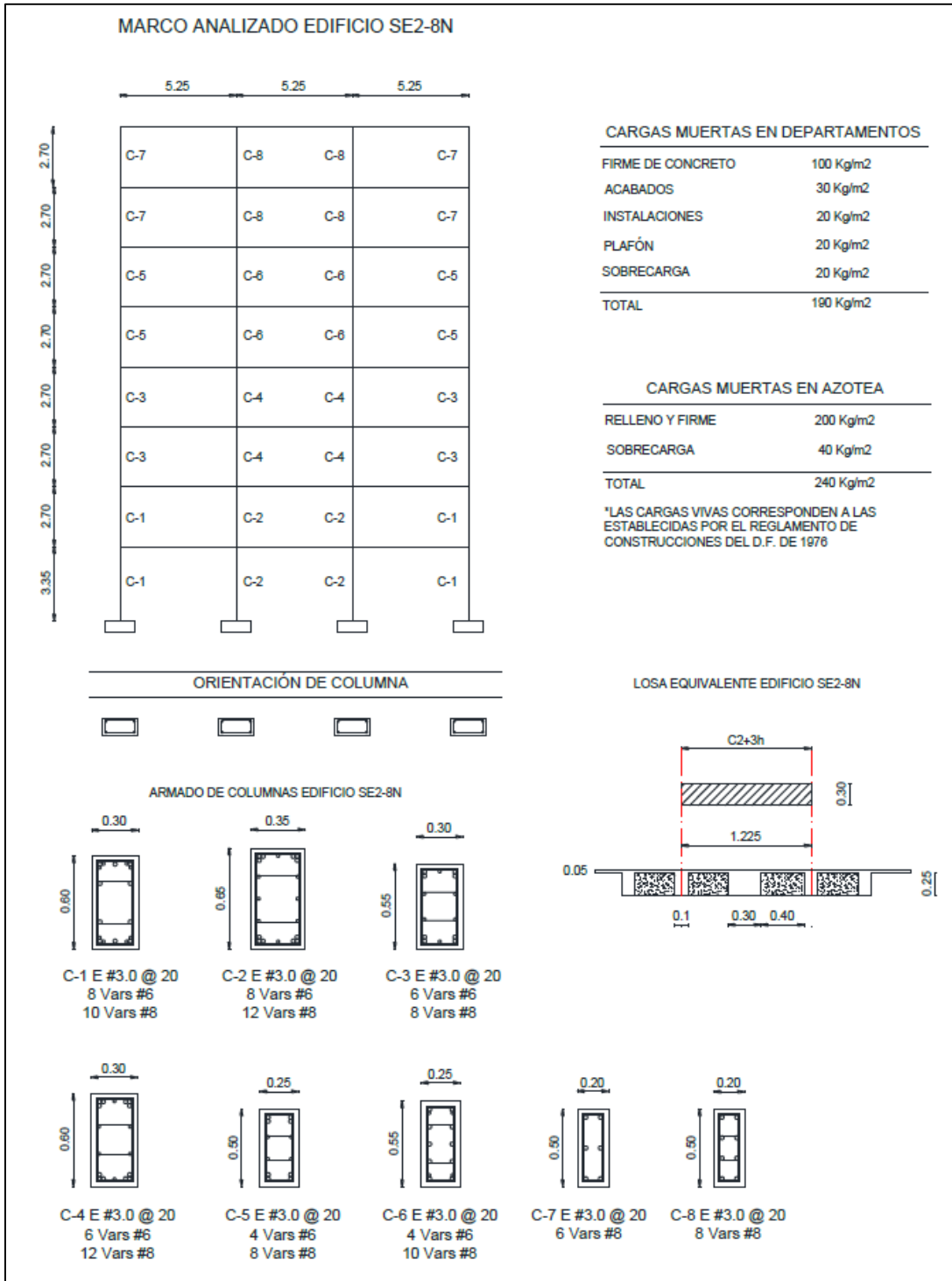


Figura B5. Detalles estructurales y cargas del edificio SE2-8N usadas en el análisis no-lineal.

APÉNDICE C

UNA EXPRESIÓN PARA ESTIMAR EL PERIODO FUNDAMENTAL DE TIPOLOGÍAS SE2

Las irregularidades en la configuración estructural fueron una de las principales causas del daño del 19 de septiembre de 2017. Por ejemplo, el problema típico de la configuración en esquina quedó de manifiesto nuevamente como en terremotos pasados, es decir, como consecuencia de que las dos fachadas perpendiculares se rellenan con muros de mampostería, mientras que las fachadas de la calle quedan sin rellenas. El porcentaje de daños en edificios de esquina de acuerdo al grado de daño se indica en la Figura C1, y como se puede notar para edificios con grado 3 excede al 36%, y fue de 33% para edificios con daño GD 3, 4 y 5.

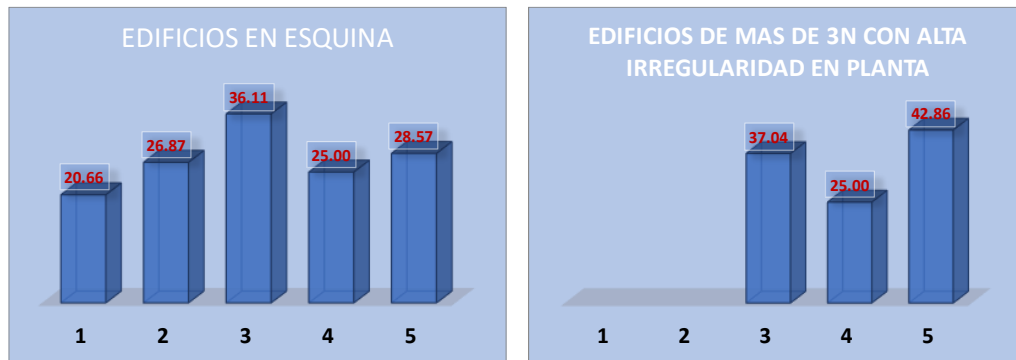


Figura C1. Porcentaje de los Edificios en esquina con algún tipo de daño. Derecha, edificios con Grado de daño 3, 4 y 5 y con irregularidad en planta, dañados por el sismo del 19/09/2017.

Algunos de los edificios en esquina con algún tipo de daño se analizaron para estudiar sus propiedades dinámicas y estimar sus excentricidades. Todos los edificios tienen losa plana aligerada. En la Figura C2 se muestran las plantas tipo de siete de estos edificios de esquina, y en la Tabla C1 (primeros 8 edificios en esquina) se resumen sus datos generales que incluyen las excentricidades torsionales en cada dirección, y el grado de daño asignado debido al sismo. Como puede notarse, se estiman excentricidades altas, que en cinco de los siete edificios exceden el 20 % al menos en una dirección, lo que representa una alta irregularidad.

El otro grupo de edificios vulnerables con irregularidades que genera daños considerables durante terremotos es el de plantas alargadas, L, como los casos 9 al 15 de la Tabla C1, (ver detalles en la Figura 3.2 y Apéndice B), en algunos casos se alcanzan relaciones de aspecto (lado largo/lado corto) en planta cercanas a 4. En la Tabla C1 también se reporta el periodo fundamental.

En la literatura se han propuesto algunas expresiones simples para determinar el periodo fundamental de vibrar de los edificios. Una fórmula muy usada para estimar el periodo en edificios estructurados a base de marcos rígidos es multiplicar por un factor de 0.1 el número de niveles, N, (es decir, dividir entre 10 el valor de N). Con los datos de los quince edificios de la Tabla C1,

es posible definir una expresión para estimar el periodo fundamental de los edificios con losa plana reticular y columnas de concreto reforzado (sin traveses), definidos en este reporte como SE2, en la última columna de la tabla se han calculado el cociente T_1/N para cada edificio, además del promedio que resultó de $X=0.15$ con una desviación estándar de $\sigma = 0.024$, por lo tanto, se puede definir la fórmula como:

$$T = 0.15 (N) \tag{C.1}$$

Para estimar el periodo fundamental, T, de edificios con losa plana reticular y columnas de CR.

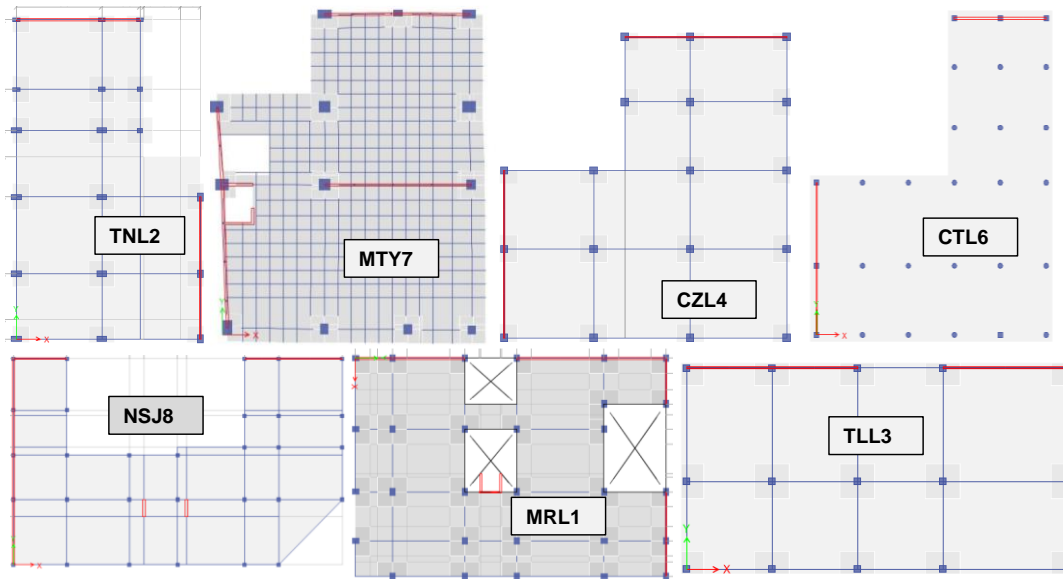


Figura C2. Siete de los varios edificios en esquina y con sistema de piso a base de losa plana aligerada que resultaron dañados por el sismo 19/09/2017.

Tabla C1. Características de edificios SE2, ocho en esquina (E) y siete con planta alargada (L)

	Edificio	Niv	tipo	Planta(m)	H losa	L Crujía	T ₁	T ₂	T ₃	e _x (%)	e _y (%)	GD	T ₁ /N
1	TNL2	8	E	14x24.5	40	2.9-6.5	1.1	0.97	0.69	8.4-9.4	6.8-10.4	3	0.1375
2	TLL3	8	E	21.9x11.5	35	4.9-7.2	1.17	1.12	0.81	0.7-2.3	17.2-23.8	3	0.1463
3	CTL6	6	E	18.3x22.5	20	3.6-6.0	1.22	0.94	0.59	18.3-26.2	17.3-22.4	3	0.2033
4	MTY5	8	E	16.5x12.7	45	4-7.4	1.33	1.01	0.72	16.4-21.9	16.2-17.8	3	0.1663
5	MRL1	9	E	14.7x21	40	4.8-5.9	1.46	1.13	0.73	12.2-23.1	11.5-19.4	3	0.1622
6	NSJ9	11	E	29.1x18.2	35	3.1-5.5	1.62	1.4	0.89	10.2-22.0	9.0-16.5	2	0.1473
7	CZL54	10	E	20.5x22	35	4.5-7.0	1.42	1.21	0.85	6.1-12.5	7.6-15.0	3	0.1420
8	VRS7	9	E	16.0x10.0	35	2.8-6.5	1.06	0.78	0.64	S.I.	S.I.	3	0.1173
9	CH444	11	L	31.4x18.2	35	3.6-7.7	1.69	0.67	0.53	S.I.	S.I.	3	0.1534
10	SNL93	9	L	39.0x10.3	30	4.6-8.9	1.65	0.43	0.41	S.I.	S.I.	3	0.1833
11	SE25N	5	L	34.6x14.6	35	7.31	0.68	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	2	0.1368
12	SE27N	7	L	20.1x13.5	35	3.40	0.75	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	3	0.1068
13	SE28N	8	L	73.0x15.8	25	5.25	1.37	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	3	0.1706
14	SE210N	10	L	25.6x7.7	35	7.68	1.52	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	3	0.1522
15	SE212N	12	L	32.9x13.0	35	6.33	1.52	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	2	0.1265
												PROMEDIO	0.1501

E- Edificio en Esquina, L- Edificio con Planta alargada, S.I.- sin información.GD-grado de daño

REFERENCIAS

- De Anda Gil J (2020). “Vulnerabilidad sísmica de edificios construidos antes de 1985 en Ciudad de México a raíz del sismo del 19 de septiembre de 2017” Tesis de Maestría. División CBI. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Departamento del Distrito Federal, DDF (1987) “Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo. Gaceta Oficial del DDF.
- Federal Emergency Management Agency. (2005). "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures". FEMA 440, United States.
- Federal Emergency Management Agency FEMA. (1999). HAZUS, Earthquake Loss Estimation Methodology. Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., United States.
- Federal Emergency Management Agency FEMA. (2003). "Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model". Federal Emergency Management Agency FEMA and National Institute of Building Sciences NIBS. Washington, D.C.
- Gobierno de la Ciudad de México (2004) “Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo” Gaceta Oficial. Gobierno del Distrito Federal, GDF (2004). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”. URL: <http://www.smie.org.mx/informacion-tecnica/estados/reglamentos-construccion-ciudad-de-mexico.php>.
- Gómez-Bernal, A., Juárez-García, H. y Arellano E., (2003). Estimación de parámetros de riesgo sísmico en Guerrero en función de las diferentes zonas sismogénicas. Memorias XIV CNIS. León, Guanajuato.
- Gómez Bernal A., Arellano E., Huarte C., Juárez H., Cruz E., Rangel (2005) “Riesgo Sísmico y Escenarios de Daño en la Colonia Roma” Proc XV Congreso Nacional de Ing. Sísmica, México D F.
- Gómez Bernal, A., Juárez García, H., De Anda Gil, J., Tovar Hidalgo, A., Arellano Méndez, E., Sordo Zabay, E. Roeslin, S., Elwood, K. (2018). "Evaluación del comportamiento de los edificios dañados durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México". XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural., Campeche, México.
- Gómez Bernal, A., Arellano, E., González, O. y Juárez, H. (2019). "Características, causas, y consecuencias de los daños debidos al sismo del 19 de septiembre de 2017 (M=7.1) en México". XII Congreso Chileno de Sismología e ingeniería Sísmica, ACHISINA, Chile.
- Hassan, A. F., and Sozen, M. A. (1997), "Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes," ACI Structural Journal, 94(1): 31-39.
- Kramer, S. L., (1996). Geotechnical earthquake engineering. Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c1996, vol. 1.
- Lang, K., and Bachmann, H. (2004), "On the Seismic Vulnerability of Existing Buildings: A Case Study of the City of Basel," Earthquake Spectra, 20(1): 43-66.
- Lautour, O.R., Omenzetter, P. (2009). “Prediction of seismic-induced structural damage using artificial neural networks”. Engineering Structures. v31, n. 2, pp 600-606. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.11.010.
- McGuire, R. K., (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Milutinovic, Z. V., y Trendafiloski, G. S. (2003). "Vulnerability of current buildings. Risk-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns". Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. pp. 109.
- Pérez Castro Abraham J. J., Gómez Bernal Alonso, Juárez García Hugón (2019) “Análisis probabilista del peligro sísmico en la zona central de la Republica Mexicana” Memorias XXII Congreso SMIS, Monterrey México.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Cap XXXI. Diseño por sismo (1966) Diario Oficial, 9 febrero.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Título IV, Requisitos de Seguridad y Servicio para las Estructuras (1976). Diario Oficial, 14 de diciembre.
- Risk-Engineering, (2014). Ez-Frisk v.7.65, Manual de usuario. Risk Engineering, Inc., Golden, Colorado, USA.
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial, SEDATU. www.gob.mx/sedatu
- Villar-Vega M., Silva V., Crowley H., Yepes C., Tarque N., Acevedo A. B., Hube M., Gustavo C. D., Santa María H. (2017) “Development of a Fragility Model for the Residential Building Stock in South America” Earthquake Spectra, Volume 33, No. 2, pp 581–604, May.
- Yakut, A., Ozcebe, G., and Yucemen, M. S. (2006), "Seismic Vulnerability Assessment Using Regional Empirical Data," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35(10): 1187-1202.
- Yüçemen, M. S., Özcebe, G., and Pay, A. C. (2004), "Prediction of Potential Damage Due to Severe Earthquakes," Structural Safety, 26(3): 349-366.