



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**AMPLIFICACIÓN DE LAS ACCIONES  
INTERNAS EN ESTRUCTURAS  
RETICULARES DE CONCRETO  
REFORZADO DEBIDO A LA  
COMPONENTE VERTICAL DEL SISMO  
DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Gustavo Gabriel Andros Castro Gonzaga

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

*¡Sigue adelante!*  
*Como si tu vida fuera una carrera:*  
*detenerte es perder contra ti mismo,*  
*continuar es autosuperarte en cada paso dado*

***A mi madre y a mi padre:***

*Lucía Gonzaga García y Susano Castro Jiménez*

Siempre han estado presentes, y me han enseñado que motivos sobran para persistir y salir adelante; más que un logro mío, este es un logro de ustedes...  
¡Felicidades! ¡Han triunfado de nuevo!

***A mi hermana:***

*Grecia Poleth*

La persona por quien también reflexiono constantemente, y que alegra cada momento acompañándome desde el día en que nació

***A mi tío:***

*Juan González García*

Nunca te olvidaremos. Descansa en paz

## Agradecimientos

Al Dr. *Mauro Pompeyo Niño Lázaro*, por la atención durante el desarrollo de este trabajo, y el panorama científico brindado que ahora motiva parte de mis intereses intelectuales y profesionales.

Al M. I. *Octavio García Domínguez*, M. I. *Héctor Javier Guzmán Olguín*, M. I. *Juan Luis Umaña Romero*, y M. I. *Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose*, por la evaluación mediante el juicio ecuánime de cada uno de ellos como sinodales en la culminación de esta etapa.

A la *Facultad de Ingeniería*, pues en sus aulas adquirí la perspectiva madura de las necesidades constantes a las que se enfrenta el mundo.

A mis profesores, aquellos que ejercen su labor como verdaderos docentes promoviendo el aprendizaje, así como a quienes van más allá a través de sus valores y su inherente preocupación por brindar conocimiento, siendo ejemplo de ello los siguientes: *Fís. Pedro Ramírez Manny*, *Fís. Sergio Roberto Arzamendi Pérez*, *Quím. María del Rosario Cabeza Luna*, *Fís. Francisco Novelo Burbante*, M. I. *Nikté Norma Ocampo Guerrero*, *Ing. Jesús Gallegos Silva*, *Ing. Héctor Geovani Elizarrarás Esquivel*, M. I. *Ricardo Rubén Padilla Velázquez*, *Ing. Raúl Fernando Verduzco Murillo*.

A la *Comisión Nacional del Agua*, dependencia pública que me otorgó tiempo y espacio durante mi servicio social para desenvolverme en un ambiente diferente al académico.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*, por la grandiosa e invaluable experiencia universitaria que se mantendrá perpetua en mi memoria; dicha y orgullo ser parte de la máxima casa de estudios.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA) por el apoyo brindado a través del patrocinio del proyecto IN115418 “Propuesta de una metodología para la evaluación de la resiliencia estructural sísmica en infraestructura escolar pública”.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a través del patrocinio del proyecto A1-S-35223 “Definición de demandas sísmicas para el diseño de estructuras basado en riesgo y resiliencia”.

***¡Mi más sincero agradecimiento!***

## Resumen

México se caracteriza por ser un país con gran exposición a la actividad sísmica de origen tectónico, siendo los eventos de subducción los que definen primordialmente el alto peligro sísmico presente en gran parte de la república; sin embargo, en años recientes la manifestación relativamente constante de eventos intraplaca ha derivado en la ampliación del estudio de sus efectos en las estructuras. Al ser este tipo de sismos de gran potencial destructivo, una de las hipótesis planteadas para su estudio es que tal potencial es objeto de la presencia de la componente vertical, así como la interacción dinámica con su correspondiente componente horizontal; diversos análisis se han orientado hacia esta problemática, aunque los resultados no han sido del todo concisos y se han fundamentado en suposiciones poco coherentes entre sí, lo que conlleva a la divergencia en la interpretación de la componente sísmica vertical.

Por estas razones, se presenta el estudio de la respuesta estructural ante la acción simultánea de las componentes sísmicas horizontal y vertical, con estricto énfasis sobre las excitaciones sísmicas verticales, a través de la modelación del comportamiento dinámico en el rango elástico lineal de cinco marcos planos de concreto reforzado (uso y alturas convencionales) y con masa discretizada, donde tres de ellos son meramente casos hipotéticos de referencia, mientras que los dos restantes pertenecen a un grupo específico de estructuras con particularidades constructivas; todos ellos sometidos a las demandas accidentales presentadas durante el evento sísmico del 19 de septiembre de 2017, cuyas intensidades reflejaron valores sustanciales, que derivaron en grandes afectaciones sobre obras civiles en una región epicentral al centro de la República Mexicana.

Con base en los resultados, se estima que los efectos de las aceleraciones verticales son importantes, con incrementos variables de los mecanismos de trabajo en elementos estructurales, sobre todo a nivel de azotea por ofrecer menor limitación de la amplitud modal vertical, e incluso incrementos críticos para el resto de los niveles en casos específicos, siendo los mecanismos de carga axial y cortante los más relevantes. Como resultado de este estudio, se establecen parámetros, índices de referencia y correlaciones entre diferentes tipos de intensidades sísmicas, todo como propuesta para caracterizar la componente vertical y su relación con el comportamiento estructural, a fin de deducir de forma preliminar el escenario esperado más desfavorable presente en las estructuras ante este tipo de condiciones accidentales, en aras de concebir construcciones con mayor margen de seguridad para provecho de la sociedad, así como promover la investigación respecto a la componente sísmica en cuestión para reducir la incertidumbre en la resistencia requerida por las líneas de defensa estructural.

## Abstract

Mexico is characterized for being a country with important tectonic-seismic activity, where subduction events are the ones that essentially define the seismic hazard over a large part of country; however, in recent years the occurrence of intra-slab earthquake events have derived in further examination of its effects in structures. Given the large potential destructiveness of this kind of earthquakes, it is important to study its causes, therefore, one of the suggested hypotheses establishes that such potential comes from the vertical seismic acceleration, just as dynamic interaction with its horizontal counterpart; several research studies have been oriented to this issue, although the results are not totally clear and all of them are based on inconsistent assumptions, then they entail to nothing but divergence in the interpretation of the vertical seismic component.

According to this, a study on the structural response facing the jointly action of the horizontal and vertical seismic components is presented, with strict attention on the vertical seismic excitations, through the mathematical modelling of linear-elastic dynamic behavior from five reinforced concrete 2D-frames (conventional heights and use) with uniformly distributed mass, where three of them are merely hypothetical reference cases, whereas the two remaining frames belong to an specific group of structures with peculiar constructive features; all of them subjected to accidental actions due to the Mw7.1 September 19, 2017 seismic event, which intensities reached high values, causing wide damage in many civil structures over an epicentral radius at Mexico's center area.

Based on the findings, it is estimated that the effects of vertical accelerations are quite significant, with unsteady increases of internal stresses in frame elements, especially at top story level for lower limitation of its modal-vertical amplitude, and even critical values along the rest of the stories in specific cases, where the axial compression and shear mechanisms were the most relevant. As result of this study, a set of parameters, indexes and correlations were proposed, taking into account different type of seismic intensities, as a suggestion to be acquainted with the vertical seismic component and its relationship with the structural behavior, in order to figure out, in a preliminary manner, the worst expected scenario for any structure under the aforementioned accidental conditions, and to conceive better quake-resistant buildings for the overall society, as well as allow improvements in the reappraisal upon this current seismic component, achieving a reduction of the typical uncertainty regarding the required strength in the threshold of structural defense.

# Índice general

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
I.1. Objetivos .....	3
I.2. Justificación .....	3
I.3. Organización de la tesis .....	4
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
II.1. Peligro sísmico .....	5
II.2. Sismos intraplaca de falla normal .....	6
II.3. Efectos de distancia .....	7
II.4. Componente vertical sísmica .....	8
II.5. Sismos fuertes en México .....	10
II.6. Vibración vertical sísmica en edificios .....	12
II.7. Espectros nacionales e internacionales para el diseño sísmico de edificios ..	14
<b>III. METODOLOGÍA PROPUESTA</b> .....	<b>17</b>
<b>IV. CASOS DE ESTUDIO</b> .....	<b>20</b>
IV.1. Definición de las características estructurales .....	20
IV.2. Selección de los registros sísmicos .....	25
IV.3. Análisis modales espectrales .....	31
IV.4. Análisis estadístico de los elementos mecánicos .....	43
IV.5. Tendencia de la respuesta estructural .....	62
<b>V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>66</b>
V.1. Conclusiones .....	66
V.2. Recomendaciones .....	68
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>70</b>

## I. INTRODUCCIÓN

¿Tiene la componente sísmica vertical relevancia alguna sobre la respuesta dinámica de edificaciones? ¿Cuán prudente es incorporarla en el análisis estructural? ¿Es exagerado pensar que la interacción de las componentes sísmicas propicia condiciones aún más desfavorables? Interrogantes semejantes a estas se han hecho en las últimas décadas entre la comunidad ingenieril, a la luz de observaciones varias en el tiempo, y ante la gran manifestación de sismos alrededor del mundo. Las investigaciones elaboradas hasta la fecha están orientadas hacia enfoques diversos, algunas desarrolladas con mayor profundidad, sin que ello reduzca la incertidumbre relativa a la componente vertical, y cuyos resultados no reflejan mayor posibilidad de inferir los efectos de esta misma componente.

El caso ordinario de análisis sísmico reside en la acción dinámica proveniente de la componente horizontal, que por supuesto genera un estado crítico para las estructuras, debido a que sus propiedades mecánicas son considerablemente sensibles a los desplazamientos horizontales accidentales, siendo estos los que originan la respuesta máxima inercial de las edificaciones. No es el caso para la respuesta vertical, donde se estima que las propiedades mecánicas en esta dirección resultan “sobradas”, prescindiendo así de modelos saturados que consideren todos los grados de libertad, lo cual conlleva a las simplificaciones clásicas fundamentadas en osciladores de un grado de libertad; es decir, se ignora por completo la respuesta modal de las estructuras en dirección vertical, situación ampliamente aceptada hasta la actualidad, con excepción de casos muy particulares.

Si bien es claro que las aproximaciones ya establecidas para la evaluación sísmica de edificios han resultado suficientemente confiables, todavía existen discrepancias en cuanto a la resistencia requerida por los elementos estructurales; aunque aún no está adecuadamente sustentado, existen indicios de que la razón de tales discrepancias sean las aceleraciones verticales a las que se encuentran sometidas las estructuras, razonamiento que no necesariamente resulta disparatado, puesto que múltiples eventos sísmicos han generado intensidades sísmicas verticales sustanciales, incluso mayores que sus correspondientes intensidades horizontales, indistintamente de la distancia a la fuente sísmica o del tipo de mecanismo asociado al origen de la liberación de energía.

De igual modo, es totalmente válida la idea de que las estructuras, al disponer de rigidez axial global y masa sustentada propiamente por el sistema estructural, poseen intrínsecamente propiedades modales en dirección vertical, que se traduce en la capacidad para percibir excitaciones dinámicas en dicha dirección. No obstante, la problemática principal radica en la posibilidad de que se presente una determinada aceleración vertical, suficiente para inducir cierta demanda y recibir una respuesta apreciable; por esta



y otras razones la respuesta dinámica vertical suele despreciarse, al experimentar aceleraciones de poca o nula importancia para las construcciones, además de que realizar análisis más completos implica desarrollar modelos más detallados, que a su vez tienden a alejarse de un sentido práctico sin grandes beneficios.

Por igual, la gran variedad de estructuras civiles impone el reto de elegir los criterios adecuados de análisis para cada una de ellas, de forma que las estimaciones de diversos parámetros sean coherentes, tales como periodo de vibrar, ductilidad y amortiguamiento de carácter vertical; de no ser así, dichas estimaciones conllevarían a mayor ambigüedad e interpretación errónea de la acción sísmica vertical, aunado ello a la incertidumbre inherente de los criterios estándar sobre diseño y evaluación. Evidentemente no es del todo correcto pensar que la componente vertical impera por sobre la componente horizontal; sin embargo, resulta oportuno contemplar la participación de la respuesta vertical, y su respectiva aportación de carga sísmica, dentro del comportamiento global de las edificaciones, pues algunas observaciones posteriores a eventos de gran magnitud revelan afectaciones peculiares, mismas que están en posibilidad de ser explicadas con mayor precisión si se involucran cualidades dinámicas de índole vertical.

Desafortunadamente, los eventos sísmicos que realmente han sido representativos (en términos de su intensidad) no han brindado mucha certeza de los efectos de la componente vertical, en tanto que las construcciones tienden a manifestar daños de méritos estructurales triviales, que no permiten delimitar con claridad las características, semejanzas y diferencias particulares relativas a las acciones sísmicas verticales. En primera instancia se pensaría que es necesario generar información más profunda, ya sea teórica o experimental, pero incluso estudios más refinados requieren de conocimientos más sólidos por parte del ingeniero analista, quien podría inclinarse mayormente por la subjetividad, hasta el punto de prescindir de las demandas accidentales verticales, o asumiendo la concurrencia de las componentes sísmicas como parte del riesgo aceptable; la cuestión es reconocer qué tan válido es ignorar la respuesta sísmica vertical, o en qué grado se permite considerarla dentro del riesgo aceptable, antes de replantear el problema en su totalidad...



## ***I.1. Objetivos***

### ***General***

Determinar la influencia de la componente sísmica vertical en la respuesta dinámica de estructuras convencionales de concreto reforzado, dentro del rango elástico lineal, tomando como referencia las intensidades sísmicas generadas durante el evento acontecido el 19 de septiembre de 2017, y sus efectos observados en la región central de México sobre edificaciones de alturas comunes.

### ***Particulares***

- Obtener estimaciones iniciales de la capacidad que tiene la componente vertical para aportar carga sísmica, adicional a la generada por la componente horizontal, sobre estructuras ordinarias de uso habitacional
- Verificar la condición más desfavorable que se presenta en las estructuras, en términos de sus fuerzas internas, al considerar la participación modal vertical en el comportamiento global de las edificaciones
- Proponer parámetros e indicadores básicos que permitan pronosticar la resistencia requerida de los elementos estructurales, ante la acción simultánea de las componentes sísmicas horizontal y vertical
- Denotar el grado de exposición en el que se encuentran las edificaciones convencionales ante eventos sísmicos latentes del tipo intraplaca
- Generar información preliminar de referencia para valorar, como aproximación inicial, la respuesta sísmica vertical esperada

## ***I.2. Justificación***

Ante la evidente ambigüedad, interpretación diversa, e incluso polémica generada como consecuencia de la actividad sísmica atípica, esta tesis se encuentra motivada por los hechos acontecidos el 19 de septiembre de 2017, suceso que propició intensidades sísmicas importantes en direcciones horizontales y verticales, que plantean el supuesto de que la interacción dinámica de ambas componentes provoca serias afectaciones a los mecanismos de trabajo de las estructuras, tal como se infiere por los daños observados durante el evento citado sobre edificios de pequeña y mediana altura de uso convencional. Así mismo, es necesario hacer notar el riesgo latente que persiste en México ante la actividad intraplaca, la cual requiere ser tomada en cuenta complementariamente para



la adecuada valoración del peligro sísmico, y cuyos sismos característicos representan una amenaza por su gran capacidad para generar daños.

Por otra parte, la información de referencia sobre la componente vertical ya es notoria, aunque hasta cierto punto compleja, y resulta escasa si se compara con la amplia disponibilidad de referencias que se encuentran al alcance respecto al análisis sísmico tradicional. Por ello, este trabajo también pretende aportar mayor información de respaldo a través de un panorama más versátil, comprensible, práctico, con enfoque integral, y en aras de generar mayor conciencia sobre el comportamiento dinámico estructural vertical, así como dar pauta a reflexionar sobre la práctica desempeñada en la actualidad, no con el fin de juzgarla o menospreciarla, sino con el de obtener mayor provecho de las herramientas computacionales y de la información sísmica que suele pasarse por alto, para incrementar la seguridad estructural, y con ello la seguridad de los habitantes frente a fenómenos sísmicos.

### ***1.3. Organización de la tesis***

El presente trabajo consta de apartados principales, secundarios y complementarios, que abordan desde los aspectos básicos que fundamentan y respaldan el tema principal, hasta los resultados derivados de los cálculos desarrollados, analizando cada parte desde la perspectiva teórica y analítica, así como su correspondiente descripción e interpretación apoyada a través de figuras, tablas y gráficas contenidas a lo largo de la investigación.

Por tanto, esta tesis está dividida esencialmente de la siguiente manera: al inicio se encuentra el resumen, que desde luego expresa el contenido del escrito completo en su forma más elemental; seguido del capítulo primero, que incluye una pequeña introducción, en sentido sumamente general, sobre varias cuestiones contrastantes respecto a la manifestación de la componente sísmica vertical, además de los objetivos planteados y la justificación que motiva al estudio, mientras que el capítulo segundo proporciona los antecedentes y conceptos necesarios para comprender en su totalidad la temática aquí presentada, enfatizando en gran medida la situación actual en México.

El tercer capítulo sintetiza de forma muy breve la metodología que se propone, misma que rige a esta investigación; posteriormente se ubica el capítulo cuarto, que contiene el procedimiento desarrollado en forma detallada sobre los datos de entrada, modelación, análisis y resultados de los casos en estudio, orientados hacia la respuesta dinámica estructural ante la presencia de aceleraciones sísmicas verticales. Para finalizar, el capítulo quinto aporta las conclusiones y recomendaciones pertinentes, que se espera sean de utilidad para futura continuidad de la información referida; el documento cierra en toda su plenitud con el listado de referencias involucradas, cuya importancia se destaca por parte del autor.

## II. ANTECEDENTES

### II.1. Peligro sísmico

La evaluación previa al diseño de las estructuras involucra diversos ámbitos, ya que estas pueden encontrarse expuestas al peligro inminente por acciones accidentales debidas a viento, lluvia, actividad volcánica, huracanes e incluso tsunamis, entre otras; acciones que se caracterizan por la incertidumbre en su nivel de ocurrencia, ubicación, magnitud, duración, así como en su intrínseca intensidad. En consecuencia, resulta necesario determinar las repercusiones que puedan tener estos fenómenos naturales sobre las obras civiles, y el grado de exposición de la población potencialmente afectada, lo que conlleva a estudiar rigurosamente dichos fenómenos, y con ello estimar la probabilidad de la actividad que recae significativamente en una región en particular. En el caso específico de las acciones generadas por sismos de origen telúrico, se le conoce como *peligro sísmico* al grado de exposición que un sitio cualquiera tiene ante movimientos sísmicos, basándose en las intensidades máximas que en él pudieran presentarse (Bazán y Meli, 2001).

De acuerdo con McGuire (2008), los primeros trabajos relacionados al peligro sísmico partieron del estudio del movimiento del suelo y su frecuencia de ocurrencia (análisis probabilísticos), características que fueron aprovechadas para acercarse al diseño sísmico óptimo de las estructuras, contemplando la dependencia entre las aceleraciones inducidas por actividad sísmica y los mecanismos de falla resultantes; posteriormente todo ello permitió generar mapas de zonificación sísmica asociados a distintos periodos de retorno, que han sido parte de muchos esquemas relativos a la seguridad de los habitantes, no sólo en términos de construcción, sino también en términos de economía.

Existe gran debate respecto al tratamiento que se debe dar al peligro sísmico: mientras algunos autores se inclinan por la evaluación determinista, otros prefieren la evaluación probabilista. Lo anterior es de suma relevancia, puesto que un mismo evento sísmico puede analizarse con ambas perspectivas y llegar a conclusiones igualmente válidas, pero totalmente diferentes; Bommer (2002) incluso describe a dichas perspectivas como cuestión de dicotomía, y resalta la gran oposición que se ha presentado entre ellas a lo largo del tiempo, debido esencialmente a los méritos que presenta una metodología frente a la otra. Por tanto, el hecho de optar por uno u otro procedimiento para establecer las bases de diseño estructural no tiene punto de partida.

Diversos autores han intentado desarrollar estrategias para la selección de escenarios sísmicos, las cuales tienen cierto grado de aceptación entre los precursores del tema. McGuire (2008) destaca las ventajas de evaluar la respuesta sísmica del sitio en estudio a través de análisis probabilísticos, derivando esto (a conveniencia) en curvas de peligro sísmico y espectros de peligro uniforme, además de describir cómo estos análisis han sido base fundamental para mejoras en la ingeniería sísmica y estructural. De igual



forma, Estevea (1968) recomienda tomar en cuenta, durante la toma de decisiones, las pérdidas esperadas por daños estructurales inducidos por sismos (análisis de costos y beneficios futuros en términos monetarios), con el fin de no tratar de manera aislada la incertidumbre aleatoria inherente de los diferentes escenarios sísmicos.

La tendencia para la evaluación del peligro sísmico no es clara, a causa también del gran trasfondo matemático para caracterizar la incertidumbre, la cual siempre está presente, ya sea por falta de conocimiento (incertidumbre epistémica) o por la aleatoriedad de los eventos (incertidumbre aleatoria), lo que conlleva a una mayor contraposición entre los enfoques del peligro sísmico, así como un mayor conflicto sobre cómo incorporar la incertidumbre y/o reducirla al mínimo. Tales cuestiones son abordadas por Abrahamson y Bommer (2005), donde describen la incertidumbre desde el enfoque probabilístico, cuantificada por medio de la desviación estándar resultante en curvas de peligro sísmico, que en esencia proviene parcialmente de meras interpretaciones previas, al contraponer niveles subjetivos de confianza en el desarrollo del árbol de decisiones, con relación a criterios para evaluar las intensidades de diseño más desfavorables.

## ***II.2. Sismos intraplaca de falla normal***

Se les conoce como sismos intraplaca a aquellos que se producen dentro de la placa tectónica por factores dinámicos y cambios en los niveles de esfuerzo, que eventualmente desembocan en la liberación de energía acumulada, debido a fracturas por exceso de deformaciones que pueden llevar al mecanismo de falla normal. Este tipo de sismos resultan ser poco comunes (por lo menos en la república mexicana). Existen casos históricos particulares caracterizados por la actividad intraplaca bajo la república mexicana: un sismo en 1858 de  $M \sim 7.7$ , provocando daños en el estado de Michoacán y la Ciudad de México, cuya evidencia sugiere un evento del tipo asociado a falla normal (Singh *et al.*, 1996); otro sismo en 1931 de magnitud  $M 7.8$ , que causó mayores daños en el estado de Oaxaca (Singh *et al.*, 1985); y otro más en Tehuacán en el año 1999 de magnitud  $M 7.0$ , que afectó principalmente a estructuras coloniales en la ciudad de Puebla (Singh *et al.*, 1999), sólo por mencionar algunos.

Al igual que cualquier evento sísmico de gran magnitud, los sismos intraplaca de falla normal tienen alto potencial destructivo, aunque menor probabilidad de ocurrencia (comparados contra los sismos de subducción), además de que su distribución espacial y temporal resulta ser más compleja (García, 2006). A pesar de ello, el progreso sobre la investigación y conocimiento de este tipo de sismos ha incrementado en los últimos años, gracias al crecimiento de la red sismológica, paralelamente con el incremento de la actividad intraplaca. Los resultados de algunas investigaciones señalan que, para una magnitud dada, los sismos intraplaca se perciben con intensidad mayor que los sismos interplaca (Pérez-Campos *et al.*, 2010), más aún cuando el sitio es altamente susceptible a grandes deformaciones, como terrenos de suelo blando (Singh *et al.*, 2014).



De igual modo, los sismos de falla normal se caracterizan por el contenido de frecuencias altas y de corta duración, esto debido al tipo de mecanismo de falla, caída de esfuerzos y magnitud asociada al evento sísmico (Jaimes y Reinoso, 2006). Otro aspecto curioso es el reportado por Chávez y Castro (1988), donde hallaron, de un conjunto de sismos en México, mayor atenuación de la intensidad sísmica interplaca para distancias epicentrales menores a 200 km, mientras que para distancias mayores los sismos intraplaca describen mayor atenuación; un estudio similar y congruente con este último es el desarrollado por García *et al.* (2005). Otra investigación análoga que también converge con las anteriores es desarrollada por Furumura y Singh (2002), donde concluyen semejanzas en sus resultados a través de la comparación entre datos observados y simulados, considerando ambos tipos de fuente sísmica.

Entre los acontecimientos más recientes de este tipo está el presentado el 16 de junio de 2013, cuyo movimiento fue de magnitud M5.8 (SSN, 2013), con epicentro catalogado dentro de los más cercanos a la Ciudad de México, localizado aproximadamente a 130 km al sur de Ciudad Universitaria, el cual provocó una aceleración máxima del terreno de 19.5 gal en dicho sitio; el acontecimiento fue experimentado por los habitantes de la capital de México como de intensidad severa, aunque irónicamente no se presentaron daños, denotando las grandes diferencias en la percepción general entre eventos de subducción y de falla normal (Singh *et al.*, 2014). Sin embargo, dos eventos más que pasaron a formar parte determinante en la historia de la actividad sísmica intraplaca de México ocurrieron en 2017, específicamente el 7 y 19 de septiembre, catastróficos e independientes entre sí, los cuales se tratarán a detalle más adelante.

### ***II.3. Efectos de distancia***

Ante la alta variabilidad sobre las propiedades físicas de los acontecimientos sísmicos, la influencia de dichos eventos también resulta ser sumamente diferente para un sitio cualquiera. Esto se ha confirmado a través de la experiencia e información recabada, lo cual ha sido pauta para generar modelos analíticos, que permitan aproximar los parámetros básicos esperados o probables, con el objeto de predecir la repercusión general para diferentes distancias a la fuente sísmica; en la literatura pueden encontrarse diversas propuestas de este tipo bajo los términos *ecuaciones de predicción* o *leyes de atenuación*, cuyas variables independientes principales suelen ser la magnitud de momento sísmica y la distancia mínima al área de ruptura, resultando ello en valores máximos de la respuesta sísmica.

García (2006) menciona aspectos que en general dificultan los análisis de sitio, como las características regionales y locales, o las tasas de atenuación de las ondas que se presentan sobre el medio terrestre; también destaca la dificultad sobre la elección de la distancia apropiada para caracterizar los movimientos fuertes, siendo las distancias epicentral e hipocentral (de fuente puntual) poco adecuadas, y con alta incertidumbre para ciertas condiciones. A partir de esta última problemática se han generado propuestas



de uso más amplio, siendo un ejemplo la desarrollada por Joyner y Boore (1981), referida como la distancia a la proyección en superficie del plano de falla; Pacor *et al.* (2018) hacen uso de esta y otras propuestas en el desarrollo de su estudio sobre los efectos por sismos fuertes de fuente cercana.

Así mismo, a través de las leyes de atenuación (también conocidas como *Ground Motion Prediction Equations*, o por su forma abreviada *GMPE's*) se representa de manera genérica una valoración del peligro sísmico, pasando por alto información específica del lugar, tales como las particularidades no lineales en la respuesta del sitio (Bazzurro y Cornell, 2004). Estas mismas ecuaciones suelen sustentarse principalmente en la distancia respecto a algún punto de liberación de energía sísmica, y consideran de manera somera las condiciones de sitio: Sadigh *et al.* (1997) hace uso de la profundidad al estrato de roca, mientras que Boore *et al.* (1997) considera el promedio de la velocidad de onda de cortante dentro de los primeros 30 m de suelo.

Por otra parte, cuando el sismo es de magnitud suficientemente elevada, la amplitud del movimiento no aumenta significativamente con la proximidad a la zona asociada a la ruptura, haciéndose casi independiente de esta (García, 2006). Algunos modelos de atenuación donde se observa dicha peculiaridad son los elaborados por Boore *et al.* (1997), Campbell (1997) y Sadigh *et al.* (1997); en ellos, para distancias grandes la atenuación de aceleraciones tiene comportamiento lineal o casi lineal, pero para distancias menores a 30 km (aproximadamente) las aceleraciones máximas no varían sustancialmente, obteniendo curvas de atenuación semejantes entre sí para diferentes magnitudes. Desgraciadamente la información recopilada aún es insuficiente, por lo que no se tiene absoluta evidencia de que los modelos propuestos tengan buena certidumbre, lo cual conlleva a su constante reevaluación conforme al aumento de la actividad sísmica en general.

Es de particular interés el hecho de que los sismos son sumamente latentes y aleatorios, por lo que muchos estudios se realizan esencialmente identificando las fuentes sísmicas, para determinar sus efectos para varias regiones ante condiciones tanto regionales como locales, tal como sucede al día de hoy respecto a la zona de subducción en la costa del Pacífico en México, donde radica la alta probabilidad de que ocurra un sismo de gran magnitud que resultaría en múltiples daños y pérdidas, aún mayores que en septiembre de 1985, situación que implica la necesidad de actualizar las GMPE's preestablecidas para las diferentes regiones del país.

## ***II.4. Componente vertical sísmica***

Durante un sismo ocurren en el suelo movimientos en todas las direcciones y con intensidades aleatorias, debido a la propagación de ondas (específicamente ondas de cuerpo y ondas de superficie) a través del inmensamente heterogéneo medio terrestre; estas generan desplazamientos horizontales, verticales e incluso angulares, aunque estos úl-



timos no son registrados por los acelerógrafos (García, 1998). Para el diseño sismorresistente suele considerarse únicamente la acción de la componente horizontal, pero diversos investigadores han advertido desde hace algunas décadas el impacto de la componente vertical sobre las estructuras, siendo Newmark (1973) uno de los pioneros en este tema, y autor del cociente promedio de intensidades máximas vertical a horizontal igual a dos tercios ( $V/H = 2/3$ ).

Si bien esta componente no es desconocida, no ha sido estudiada en su totalidad ni con tanta rigurosidad como la componente horizontal. La mayoría de los estudios se han enfocado en los efectos de sitio (principalmente con cercanía a la fuente sísmica), y son pocos los que han hecho un esfuerzo por incluir la acción sísmica vertical en los análisis de la respuesta estructural: Kim *et al.* (2011) atienden este último asunto en puentes de concreto; Guo *et al.* (2018) dan enfoque a chimeneas industriales de concreto; de manera excepcional, Martínez *et al.* (2012) tratan la sensibilidad de mampostería histórica, mientras que Tian *et al.* (2010) dirigen su estudio hacia torres de transmisión eléctrica. Esto es sólo por mencionar algunos trabajos que han proporcionado información en el ámbito de la componente vertical.

La escasa información que se ha generado hasta el momento ha sido tal, que las conclusiones no son concretas ni apuntan a una tendencia clara, pues hay desde autores que no consideran alarmante la componente vertical (como los precursores Jennings y Husid, 1968), hasta quienes han hecho propuestas para generar espectros de diseño por demanda sísmica vertical (véase Bozorgnia y Campbell, 2004; Gülerce y Abrahamson, 2011), así como autores que argumentan un término medio, en el que es necesario realizar análisis para ciertas condiciones y/o particularidades; este último caso es común debido a las semejanzas entre daños singulares observados en las estructuras (*e.g.* Carydis *et al.*, 2012), o por algunas recomendaciones de diseño dadas para estructuras especiales (puentes, chimeneas, mástiles, etc.) cercanas a la fuente sísmica probable (*e.g.* Plevris *et al.*, 2017).

Con el objetivo de estimar la magnitud de la componente vertical, es común encontrar en investigaciones contemporáneas cocientes de la intensidad sísmica vertical con la correspondiente horizontal, siendo esta metodología casi un estándar al momento de cuantificar analíticamente la respuesta sísmica vertical, y siempre que las características del evento lo ameritan. Aunque hay diferentes interpretaciones respecto a los resultados, existe cierto consenso de que tales cocientes son dependientes del periodo, así como de la distancia epicentral; trabajos como los de Ambraseys y Douglas (2003), y de Perea y Esteva (2005) son ejemplo de ello. Con frecuencia los análisis de este tipo se presentan en forma gráfica (con dispersión o curvas), de donde es fácil identificar la presencia de cocientes mayores o cercanos a uno, aunque también sobresale la tan controvertida variabilidad de los datos; cuando estas gráficas se encuentran desarrolladas en función del periodo, los cocientes tienden a ser mayores en el intervalo de periodos cortos, mientras que cuando se han desarrollado en función de la distancia epicentral,



los cocientes tienden a ser mayores para distancias cortas, y en el resto del dominio (periodos o distancias mayores) la atenuación de los valores es drástica.

De igual manera, es posible que los modelos de atenuación vertical no se encuentren disponibles o actualizados en varias regiones a nivel mundial, ya sea por la limitada atención puesta hacia esta componente, por sismos característicos que no representan amenaza alguna en cuanto a intensidades sísmicas verticales, o por la escasa actividad sísmica extraordinaria, que conlleva a catálogos insuficientes para evaluaciones adecuadas con el muestreo recabado. Stewart *et al.* (2016) han hecho un esfuerzo por predecir los parámetros principales que definen a la componente vertical, a través de GMPE's desarrolladas para posible aplicación universal, con base en sismos de poca profundidad y de magnitudes comprendidas entre M3.0 y M7.9; también es necesario destacar que, a diferencia de muchos otros trabajos, estos autores prescinden de la componente horizontal como variable de referencia para generar estas ecuaciones, argumentando que la relación  $V/H$  difícilmente cubre todas las condicionantes de cálculo de la atenuación, y provoca que se pierda coherencia con las características de origen del movimiento vertical.

En el caso de México, Ruiz-García (2018) examina la respuesta vertical experimentada en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, y concluye que la obtención del espectro vertical a partir de la reducción del horizontal a  $2/3$  de sus valores es suficiente, al menos para cubrir las demandas sísmicas generadas por este evento; para ello, el autor contempla en su investigación una muestra reducida de las relaciones  $V/H$  espectrales para suelo blando de la capital, las cuales llegaron a superar la unidad y mostraron dependencia del periodo, por lo que infiere que la componente vertical pudo haber contribuido en el comportamiento de las estructuras dañadas y colapsadas. Posteriormente, Jaimes y Ruiz-García (2019) proponen un espectro de relaciones  $V/H$  basado igualmente en el suelo blando de la Ciudad de México, para sismos intraplaca de profundidad intermedia, tomando como referencia seis eventos comprendidos entre 1964 y 2017; dicho trabajo destaca por rechazar el valor de  $2/3$  para la obtención del espectro de diseño vertical, y por tomar en cuenta el periodo de vibración en dirección vertical.

## ***II.5. Sismos fuertes en México***

México, al igual que muchos otros países, se caracteriza por el alto riesgo sísmico que presenta debido a su ubicación dentro de la Placa de Norteamérica, la interacción que tiene esta con la placa de Cocos, la placa de Rivera y la Placa del Pacífico, además de la colindancia con Estados Unidos y su correspondiente falla de San Andrés, haciendo del país un lugar altamente vulnerable a la actividad sísmica; prueba de ello son los diversos sismos suscitados en su historia, que a su vez han provocado daños y pérdidas a diferentes escalas. Si bien existe el antecedente histórico amplio sobre sismicidad en



México, es hasta la segunda mitad del siglo XX que se empieza a tomar verdadera conciencia sobre la importancia de recabar información sísmica a nivel nacional, y así disponer de ella para la mejor comprensión del fenómeno y de eventos posteriores.

La información previa al siglo XIX está basada primordialmente en testimonios, e incluso así para la primera mitad del siglo XX, periodo dentro del cual el 7 de junio de 1911 ocurre un sismo durante la entrada de Francisco I. Madero a la capital (Tovar de Teresa y Mas, 2017). Otro de los casos más extraordinarios sucedió en el mes de junio de 1932: una serie de sismos se presentó entre las costas de Jalisco y Colima los días 3, 18 y 22, con magnitudes M8.2, M7.8 y M6.9 respectivamente; de acuerdo con múltiples reportes y testimonios, estos tres eventos generaron grandes daños en diferentes estados de la república mexicana, además de un devastador tsunami a causa del tercer sismo (SSN, 2016). Así mismo, entre los terremotos mejor identificados por la población capitalina está el acontecido el 28 de julio de 1957 con magnitud M7.5 (SSN, 2014), considerado dentro de los más devastadores para el país, y conocido popularmente como “el sismo del Ángel” por haber ocasionado la caída del Ángel de la Independencia.

Aunque la actividad sísmica de México es provocada principalmente por dinámica tectónica, existen casos recopilados de movimientos causados por actividad en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM); ejemplo de ello es el sismo del 19 de noviembre de 1912 con magnitud M6.9 cerca del municipio de Acambay (Estado de México), que provocó daños en la región aledaña (Urbina y Camacho, 1913); también otro sismo el 4 de enero de 1920 con magnitud M6.4 en la zona oriente de dicho Cinturón, generando pérdidas importantes (Suárez, 1992). Algunos autores han hecho hincapié en la necesidad de ponderar el peligro sísmico, adicionalmente, en función de esta cadena volcánica activa: Bayona *et al.* (2017) hacen mención de ello, con sus estimaciones del peligro sísmico mediante datos históricos e instrumentados, indicando la importancia que tiene generar una muestra tal que permita actualizar los modelos probabilísticos, asociados a tasas de sismicidad presente en la región del CVTM por movimientos de naturaleza cortical, los cuales representan riesgo latente por periodo de inactividad y cercanía con zonas de alta densidad poblacional de México.

Por otra parte, la zona de subducción ha sido estudiada con bastante anterioridad debido a los numerosos sismos (principalmente fuertes), originados a lo largo de la costa del Pacífico en México. Esta zona es donde tuvo lugar el sismo del 19 de septiembre de 1985 con magnitud M8.0, que se extendió desde el estado de Michoacán y generó daños en la Ciudad de México y otras regiones centrales del país, además de numerosos decesos estimados en 20 000 personas (Anderson *et al.*, 1986), aunque fuentes extraoficiales hacen estimaciones diferentes, por lo que hasta la fecha no se tiene certeza de números fiables. Desde entonces, el progreso conjunto en el conocimiento científico sobre sismología, y su aprovechamiento en ingeniería sísmica y estructural ha ido en aumento, en beneficio tanto para el país como para el mundo.



Retomando el tema de sismos intraplaca, es de gran interés el hecho de que estos eventos se han presentado con cierta frecuencia en años recientes, cada uno de ellos con magnitud considerable, lo que ha ocasionado alarma entre la comunidad científica, y ha dado lugar a reevaluar el peligro sísmico contemplando también eventos de falla normal; la justificación principal de esto proviene de dos eventos muy particulares acontecidos en el año 2017: uno de ellos es del 7 de septiembre con magnitud M8.2 (SSN, 2017a) al sur del istmo de Tehuantepec, específicamente con epicentro en el golfo de Tehuantepec y muy cercano al estado de Chiapas, afectando mayormente a este mismo y al estado de Oaxaca. Dicho movimiento telúrico fue percibido incluso en parte de la región central mexicana y Guatemala, por lo que está catalogado dentro de los más fuertes en México.

Posteriormente otro terremoto devastador ocurrió el 19 de septiembre de 2017, extraordinario por haberse presentado el mismo día que el sismo de 1985, aunque sus características individuales no tienen relación alguna entre sí; el epicentro tuvo lugar en el estado de Puebla, con magnitud M7.1 asociada al mecanismo de falla normal en la placa subducida de Cocos (SSN, 2017b), generando daños principalmente en el estado mencionado y Morelos, así como en la capital del país. La cercanía del epicentro a las zonas con alta densidad de población, la dinámica de la ruptura y los efectos característicos de sitio, fueron los factores fundamentales que determinaron la magnitud de las aceleraciones en diversos sitios afectados. Particularmente, los daños en la Ciudad de México se vieron reflejados en edificios de pequeña a mediana altura, edificios de piso suave, así como edificios construidos antes de 1985 (Galvis *et al.*, 2017).

## ***II.6. Vibración vertical sísmica en edificios***

Uno de los aspectos más importantes en dinámica estructural es la vibración forzada, aquella que se induce a las estructuras debido a los movimientos bruscos del terreno. Aunque es común que las acciones sísmicas que obran sobre las construcciones civiles se establezcan en función de sus propiedades mecánicas laterales, los estudios y observaciones recientes sugieren que la componente vertical sísmica podría tener influencia significativa en la respuesta estructural de edificios, ya que las aceleraciones verticales presentes en diversos sismos fuertes han sido de escalas apreciables, lo que ha llevado a muchos investigadores a preguntarse si es prudente considerar la inducción de fuerzas accidentales adicionales en dicha dirección, sobre todo para el diseño de edificios o evaluación de construcciones existentes de este tipo (y no sólo estructuras especiales), dada la importancia de pronosticar con seguridad la ductilidad y los eventuales mecanismos de falla en edificaciones (Elfeki y Youssef, 2007).

Se han hecho intentos por establecer metodologías para estimar adecuadamente la vibración vertical de estructuras: Young y Budynas (2002) presentan expresiones para determinar el periodo de vibrar en vigas, mediante propiedades básicas como masa distribuida, para diferentes condiciones de apoyo; Perea y Esteva (2005) han extrapolado tales aspectos para marcos planos simples, a través de la relación de rigideces a flexión



entre vigas y columnas. De esta forma, la aproximación por medio de análisis lineales podría complementarse con información modal de la dirección vertical. Sin embargo, queda claro que, para ver reflejadas alteraciones en el comportamiento sísmico de las estructuras por aceleraciones verticales, es necesario hacer uso de análisis no lineales, y reservar los análisis lineales para estimación inicial en el rango elástico hipotético.

Diversas investigaciones hechas sobre estructuras de concreto reforzado concluyen que la componente vertical tiene gran relevancia: recientemente Kim *et al.* (2018) desarrollaron análisis no lineales sobre marcos con diferentes dimensiones de alturas y crujeas, para sismos fuertes de fuente cercana y relación  $V/H$  (en términos de PGA) mayor a 0.6; con ello determinaron que la capacidad de columnas ante carga axial y cortante resulta afectada por la componente vertical, mientras que a nivel global esta misma componente puede incrementar la distorsión de entrepiso. Perea (2002) estudia el comportamiento estructural considerando, entre muchos otros aspectos, la asignación de acero de refuerzo únicamente por efecto de la componente horizontal, y el desempeño de dicha cuantía sobre la resistencia, al someter estructuras (vigas y marcos planos) a fuerzas adicionales por la componente vertical, mediante análisis dinámicos no lineales con registros sísmicos específicos, y con discretización de la masa sobre las vigas; sus resultados apuntan a que hay influencia importante de la acción sísmica vertical, que se refleja en la amplificación de demandas axiales y rotaciones plásticas sobre columnas, así como en demandas mayores por flexión sobre vigas, induciendo también articulaciones plásticas en sus respectivos extremos y centros.

Por otra parte, la vibración vertical también se ha estudiado para estructuras de acero: Vilerá *et al.* (2008) analizaron marcos de acero tridimensionales de diferentes alturas y simétricos, en términos no lineales simplificados, con criterios de diseño sobre normas venezolanas, dimensionando los elementos estructurales sin considerar la componente vertical, y cumpliendo la condición de columna fuerte-viga débil; aunque no son explícitos en cuanto a la metodología para reflejar la vibración vertical de los modelos, se reportan incrementos de carga axial en columnas internas y reducción del espectro de capacidad, contrastando con el hecho de que la componente vertical no influye significativamente en los desplazamientos. Otro aspecto que se destaca de dichos análisis es el incremento en la cantidad de ciclos de carga en columnas, que conlleva a la suposición de posibles fallas por fatiga de las mismas.

Cabrera (2013) se enfoca en la respuesta de edificaciones de mampostería estructural con diferentes alturas, adoptando requerimientos dentro de la normatividad colombiana, para uso de vivienda y con estructuración simétrica, e involucrando en los análisis el parámetro  $V/H$  de eventos sísmicos de la región; aunque tampoco se especifica el método usado para tomar en cuenta la vibración vertical de la estructura, sus resultados exhiben (en general) incrementos notables en la carga axial, mientras que los incrementos son despreciables para las sollicitaciones por flexión y cortante, así como para los desplazamientos horizontales y las correspondientes distorsiones de entrepiso,



situación que el autor atribuye a la aportación de rigidez elevada por los muros estructurales, con lo cual reitera la necesidad de generar un espectro de diseño vertical, y al mismo tiempo profundizar en propiedades de ductilidad y amortiguamiento en sentido vertical, rechazando así el valor  $V/H = 2/3$  por estar recomendado incoherentemente.

También es importante mencionar que ciertos mecanismos más complejos ya conocidos en ingeniería estructural han sido valorados: Mortezaei (2014) ha evaluado (analítica y experimentalmente) los efectos en columnas por sismos de fuente cercana, concretamente su posible inducción de deformaciones plásticas por efectos combinados de las componentes horizontal y vertical, además de la reducción en la capacidad a cortante, propiciada por fuerzas de tensión presentes en intervalos del movimiento vertical; con ello concluye que la longitud de las articulaciones plásticas es mayor debido a la acción conjunta de dichas componentes, y proporciona expresiones para estimar dicha longitud. Así mismo, Bovo y Savoia (2019) analizan el comportamiento de elementos prefabricados ante fluctuaciones por la demanda sísmica vertical, tanto en columnas como en la zona de conexión viga-columna, en términos no lineales sobre modelos representativos de elementos finitos; con base en sus resultados, generan y calibran expresiones (considerando el periodo de vibrar vertical) para eventos de fuente cercana y lejana, como alternativa para caracterizar las acciones verticales, y contemplar las fluctuaciones en el diseño de estructuras prefabricadas.

## ***II.7. Espectros nacionales e internacionales para el diseño sísmico de edificios***

Las consideraciones generales para definir las demandas sísmicas de diseño se limitan a la acción sísmica horizontal, siendo esto tanto a nivel nacional como internacional; esto es, los espectros de diseño se encuentran referidos a registros de movimientos del terreno en dirección horizontal, y en función del peligro sísmico dominante de la región. Sin embargo, la inminente influencia de la componente vertical en la respuesta sísmica ha llegado a ser tal, que la normativa de construcción alrededor del mundo ha adaptado sus lineamientos de diseño, de tal forma que algunos reglamentos consideran prudente desarrollar análisis complementarios, por fuerzas accidentales que pudieran presentarse en dirección vertical: en México, CFE (2015) señala la posibilidad de incorporar los efectos sísmicos de la componente vertical, sobre elementos estructurales sensiblemente susceptibles a las aceleraciones verticales, como elementos en voladizo y vigas de gran claro, aplicando fuerzas verticales adicionales que desarrollen una condición crítica para su estabilidad.

Otros reglamentos mexicanos que sugieren la incorporación de la componente vertical son el Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero (GGRO, 1994), así como el Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla (GPUE, 1999). En contraste, hasta la fecha no se ha señalado consideración alguna respecto a la componente vertical, en la normatividad vigente proporcionada por el Gobier-



no de la Ciudad de México (GCDMX, 2017). Por lo anterior, se pone en evidencia la ausencia del espectro de diseño asociado a la acción vertical, y la evaluación simplificada de esta componente en casos sumamente especiales.

Por otra parte, Perea y Esteva (2005) realizaron el análisis de algunos registros sísmicos en México, enfocados sobre las características de la componente vertical, donde generan los cocientes de aceleraciones espectrales vertical a horizontal, con el fin de mostrar: 1) la alta variación de estos valores para diferentes características de eventos y sitios, y demostrar que concebir al espectro de diseño de aceleración vertical, como reducción del horizontal mediante la propuesta de Newmark (1973), no es coherente ni válido para cubrir la dispersión de dichos cocientes en forma generalizada; y 2) una propuesta de envolvente simple, a partir del promedio de los cocientes espectrales generados por la muestra específica usada en su trabajo, siendo esta envolvente suficientemente aceptable para canalizar los valores de la curva promedio, principalmente para periodos cortos.

En cuanto al ámbito de la reglamentación mundial, el Eurocódigo 8 (CEN, 2003) establece dentro de sus lineamientos las bases para considerar la acción sísmica vertical, a partir de la clasificación del suelo, mediante parámetros que permitan describir las condiciones locales del sitio de desplante de una estructura cualquiera. Por otra parte, dicho código indica que la acción de ambas componentes debe desarrollarse en coherencia con el peligro sísmico de la región en estudio, e incluso contempla la posibilidad de evaluar las acciones mediante dos o más espectros si la estructura lo requiere; concretamente, se considera la posibilidad de incluir en el análisis el espectro de respuesta elástico vertical, haciendo distinción entre espectros tipo 1 y tipo 2. También la ACS (2003) proporciona expresiones detalladas para definir el espectro vertical de diseño, así como un factor de comportamiento vertical  $q$  constante igual a 1.5 para cualquier material y sistema estructural, análogamente a las consideraciones dentro del Eurocódigo 8.

Otros países consideran pertinente desarrollar espectros referidos a la componente vertical, aunque en algunos casos de forma simplificada y con aplicación restringida: España presenta en su NCSE-02 (CPNS, 2009) al espectro de respuesta elástica vertical como reducción del horizontal correspondiente, pero limitando su aplicación a elementos estructuralmente sensibles, con posibilidad de prescindir de tal espectro en análisis generales de edificios; mientras que Grecia, a través de su código EAK2000 (OERPP, 2000), establece a este espectro de la misma forma que España (factor de reducción igual a 0.7), e incluye un factor de comportamiento vertical  $q_v$ , con la limitante de aplicar las fuerzas verticales resultantes en forma estática sobre elementos estructurales específicos. Por su parte, la ASCE (2014) proporciona información para optar entre espectros verticales específicos de sitio, o como producto de la reducción del espectro horizontal, para evaluar ciertos miembros estructurales. En Venezuela, la Norma 1756 de la COVENIN (2001) también toma el coeficiente de 0.7 para generar el espectro de diseño vertical a partir del horizontal.



Casos particulares están presentes en el marco internacional, que no detallan procedimiento alguno para generar el espectro de diseño vertical, sino la inclusión analítica de la componente vertical mediante acciones equivalentes, y sólo ante condiciones estructurales especiales, tal como en Estados Unidos y su FEMA-368 (FEMA, 2000), en el cual se hace distinción entre fuerzas accidentales estáticas y dinámicas, con el fin de aplicar adicionalmente acciones verticales en función de la carga muerta o de la aceleración horizontal, respectivamente, en especial sobre elementos en voladizo o presforzados. De igual forma, la ASCE (2010) considera la carga de la componente vertical mediante amplificación de la carga gravitacional. El ICC (2018) describe con mayor detalle la carga sísmica vertical dentro de las combinaciones de carga, que al mismo tiempo están referenciadas a los requerimientos estándar de la ASCE. Colombia, por medio de la NSR-10 (ACIS, 2010), considera también fuerzas accidentales estáticas y dinámicas en dirección vertical, con énfasis en acciones estáticas verticales adicionales sobre elementos estructurales especiales, para zonas de amenaza sísmica importante. En contraparte, Chile no presenta información referente a la componente vertical (INN, 2009), al igual que la normativa de construcción en Irán (BHRC, 2005).

### **III. METODOLOGÍA PROPUESTA**

Cuando se trata de evaluar la respuesta sísmica de estructuras la información de referencia se encuentra disponible y como respaldo inmediato, lo cual es básicamente lo que se pretende con la metodología aquí presentada, siendo esto un apoyo para caracterizar de forma simple la respuesta dinámica de edificaciones reflejada ante la acción sísmica adicional de la componente vertical, para así comprender mejor su contribución en las demandas de diseño a través de parámetros básicos, tomando como base los principios preestablecidos esenciales de la dinámica estructural; lo anterior radica en la limitada investigación desarrollada hasta el momento, especialmente en México, que se deriva en la necesidad de profundizar en el tema de la componente vertical, de manera que se cubran con mayor precisión las estimaciones clásicas en ingeniería sísmica e ingeniería estructural.

Dado que es posible abordar el tema de la componente sísmica vertical desde distintos puntos, esta metodología se enfoca en el análisis de estructuras convencionales de concreto reforzado, mediante el comportamiento dinámico de marcos planos simples y simétricos con alturas comunes (periodos de vibración vertical y horizontal bajos), asumiendo comportamiento ideal elástico lineal, y determinando la respuesta estructural por medio del método de análisis modal – espectral; con ello también se evalúa, de manera implícita y somera, el grado de exposición sísmica por eventos intraplaca en función de la componente en cuestión. Estos párrafos se tratan a continuación con mayor detalle:

#### **1. Definición de las características estructurales**

Las estructuras se conciben como marcos planos rígidos, con propiedades mecánicas asociadas a concreto reforzado, en coherencia con la correspondiente normatividad de diseño y construcción, priorizando la resistencia suministrada por vigas y columnas, ya que se tiene por objeto la evaluación del sistema estructural en términos de demandas internas presentadas en los elementos mencionados.

#### **2. Definición de la amenaza sísmica**

Se seleccionan registros sísmicos representativos del sitio de interés, y que se ajusten a la necesidad de evaluar los efectos de la componente vertical por su amenaza potencial, descrita a través de criterios adecuados (PGA, intensidades espectrales, razones de intensidad, distancia a la fuente sísmica, condiciones locales, contenido de frecuencias, índices y/o parámetros estructurales, etc.), o los que se consideren pertinentes para justificar y reafirmar la selección muestral.



### **3. Modelación matemática**

Se obtienen las propiedades modales de los marcos, a partir de modelos que reflejen apropiadamente la vibración estructural en direcciones horizontal y vertical, considerando rigidez elástica lineal para los componentes estructurales. En consecuencia, los grados de libertad deben ser suficientes para apreciar los desplazamientos, especialmente para la dirección vertical, de tal forma que los elementos estructurales participen en su totalidad sobre las formas modales.

### **4. Análisis de la respuesta estructural**

Con base en la previa información sísmica y modal, las estructuras se someten a las acciones dinámicas relativas a los espectros de respuesta. Para la obtención de dichos espectros, parámetros particulares como amortiguamiento y ductilidad pueden ser tomados en cuenta, no siendo indispensable la precisión en su valoración para la dirección vertical, a menos que se disponga de mayor información de referencia. La respuesta sísmica de los marcos debe ser producto de a) demandas laterales (componente horizontal), y b) demandas conjuntas (componentes vertical y horizontal).

### **5. Análisis estadístico de la respuesta estructural**

Una vez obtenida la respuesta sísmica, se recaban los resultados obtenidos por las acciones dinámicas tanto laterales como conjuntas; esto conlleva a clasificar convenientemente los datos para desarrollar información estadística, así como los parámetros necesarios, adecuados y comparativos, que proporcionen información evidente de la variabilidad en la respuesta de los marcos, ocasionada por la incorporación de la componente vertical.

### **6. Interpretación de resultados**

Se describe analíticamente la influencia que tiene la componente sísmica vertical, con el fin de determinar el escenario estructural más desfavorable; esto es, la condición accidental que se presenta en los elementos estructurales, principalmente en términos de fuerzas internas, ante la aportación de carga sísmica adicional en dirección vertical, para así valorar su relevancia general frente a la componente horizontal, apoyándose en parámetros y/o índices estructurales de referencia.

A continuación, en la figura III.1 se esquematiza el diagrama de flujo que expresa de forma sintética el procedimiento descrito.

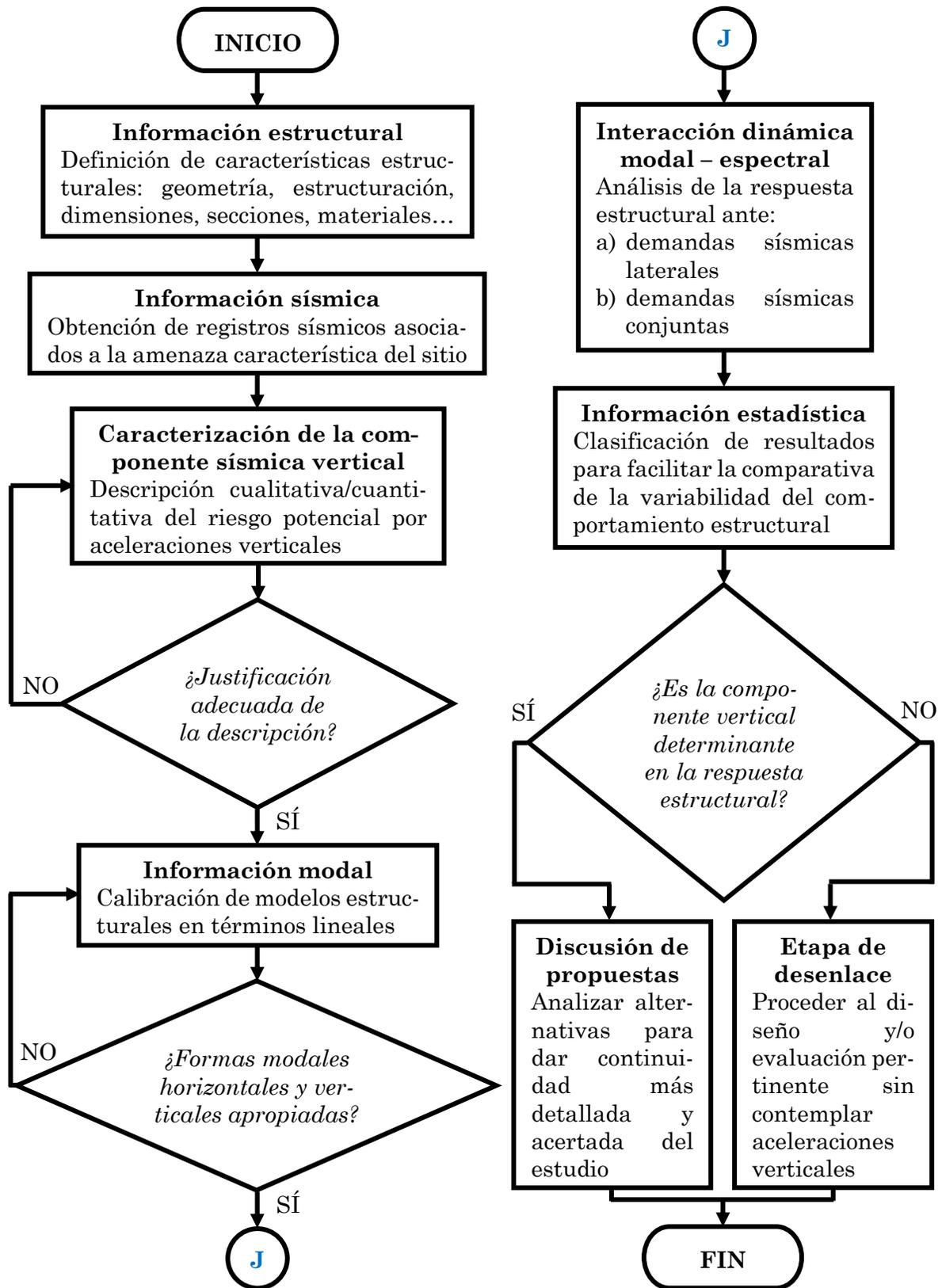


Figura III.1. Diagrama de flujo para definir la influencia de la componente vertical

## IV. CASOS DE ESTUDIO

### IV.1. Definición de las características estructurales

Para los análisis que se presentan a continuación, se partirá de las propiedades generales para definir las estructuras hipotéticas, asumiendo que los parámetros básicos son los usuales para diseño de estructuras de concreto, de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal en su versión 2004, RCDF-2004 (GDF, 2004a); en la tabla IV.1.1 se muestran los valores usados correspondientes a las propiedades mecánicas del concreto.

**Tabla IV.1.1.** Propiedades básicas para concreto reforzado

PROPIEDAD	NOTACIÓN	VALOR
Resistencia a compresión	$f'_c$	250 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	$E_c$	221 360 kg/cm <sup>2</sup>
Peso volumétrico	$P_v$	2 400 kg/m <sup>3</sup>

Así mismo, conforme al RCDF-2004, en sus Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, NTC-CADEE (GDF, 2004b), se estipulan diferentes cargas vivas unitarias para aplicar sobre sistemas de piso, que para este trabajo son las presentadas en la tabla IV.1.2 para desarrollos de vivienda; dichas cargas actuarán sobre losa maciza con área tributaria rectangular, de 1.25 m de ancho por 5 m de largo y 20 cm de espesor. Además, se considera la carga adicional total de 40 kg/m<sup>2</sup> por peso muerto de losas de concreto (establecido por igual en las NTC-CADEE), así como una carga supuesta de 20 kg/m<sup>2</sup> por instalaciones.

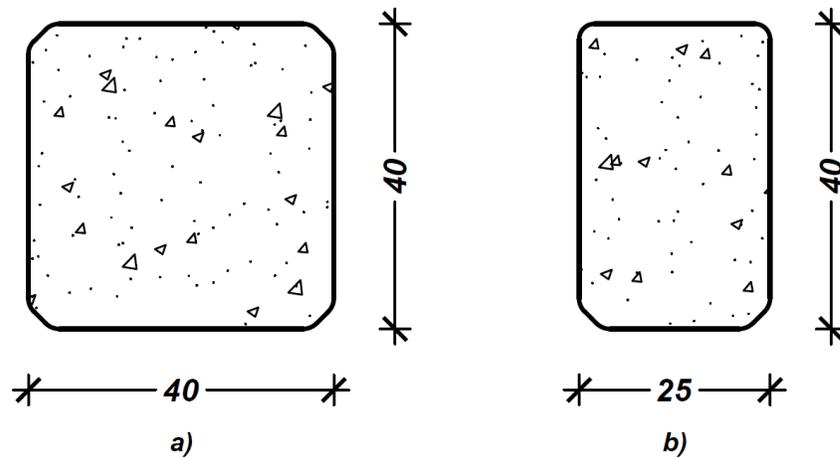
**Tabla IV.1.2.** Cargas vivas unitarias consideradas

DESTINO DE PISO	W <sub>a</sub> , kg/m <sup>2</sup>	W <sub>m</sub> , kg/m <sup>2</sup>
Habitación	90	170
Azotea (pendiente < 5%)	70	100

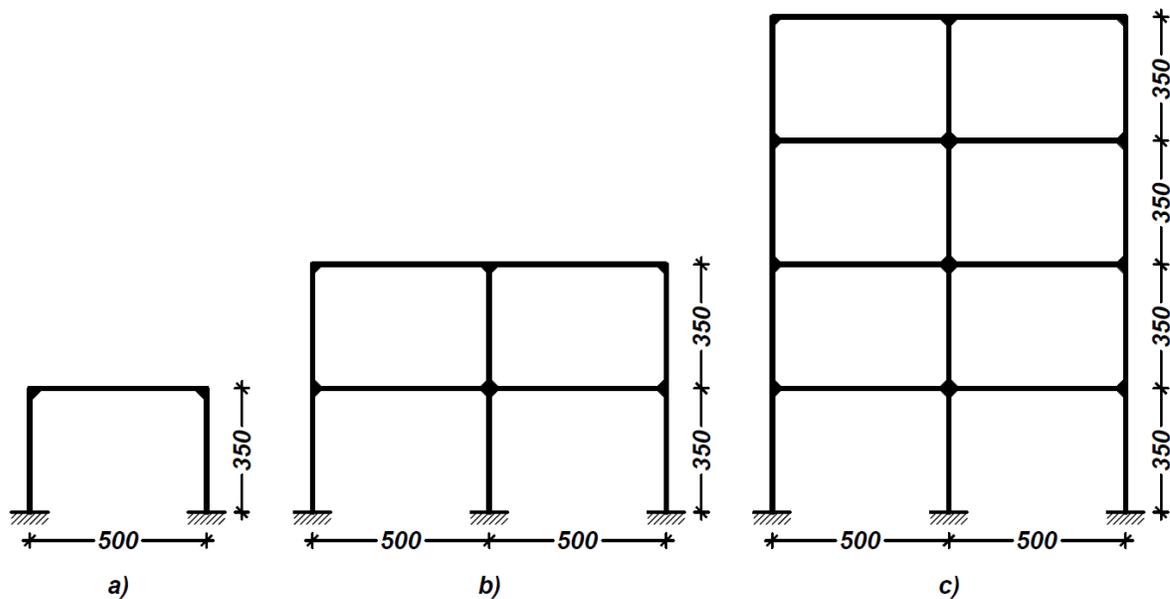
Con la información anterior se proponen marcos planos rígidos de concreto reforzado, de estructuración sencilla y simétrica, cuyas secciones para vigas y columnas se muestran en la figura IV.1.1. Estas serán usadas para determinar la respuesta estructural de tres marcos hipotéticos, siendo ellos de un nivel con una crujía (1N-1C), dos niveles con dos crujías (2N-2C), y cuatro niveles con dos crujías (4N-2C); en la figura IV.1.2 se ilustran



tales estructuras. Es necesario aclarar que el marco 1N-1C es el modelo “base” sobre el cual se generaron los dos marcos restantes, razón por la cual se conservan las dimensiones de alturas y crujeías de entrepiso en cada uno de ellos.



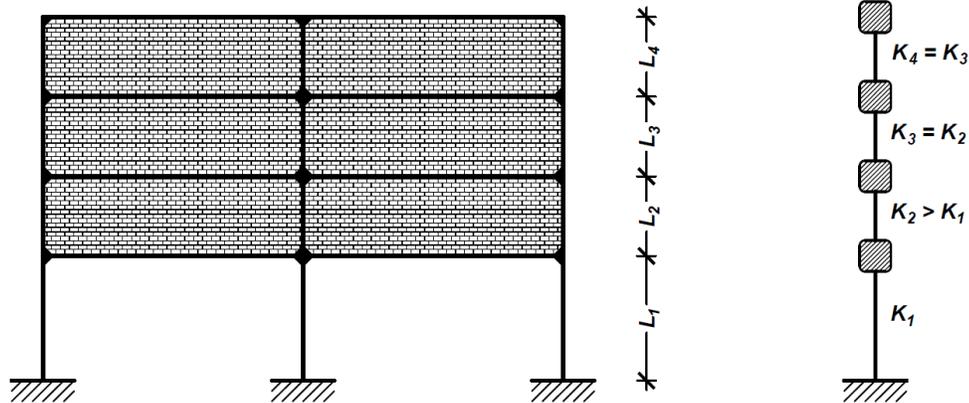
**Figura IV.1.1.** Secciones para a) columnas y b) vigas en estructuras hipotéticas. Acotaciones en centímetros



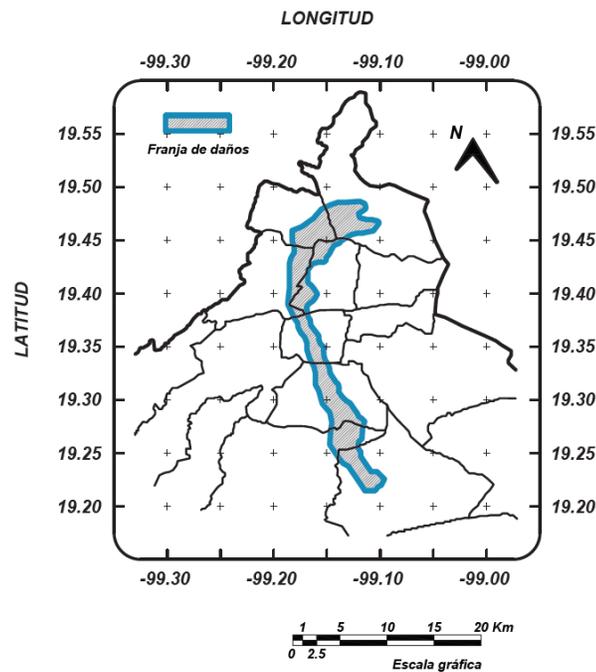
**Figura IV.1.2.** Marcos planos hipotéticos planteados: a) 1N-1C, b) 2N-2C, c) 4N-2C. Acotaciones en centímetros

Por otra parte, para extender el estudio de los efectos de la componente vertical, también se analizan dos marcos planos adicionales a los propuestos; estos corresponden a mode-

los de estructuras que resultaron dañadas por el sismo objeto de esta tesis. Lo anterior es debido a que informes oficiales reportaron, respecto a la capital del país, edificios de pequeña a mediana altura muy afectados, de estructuración dual con marcos de concreto reforzado y muros de mampostería, caracterizados por irregularidad de piso débil (figura IV.1.3), ubicados a lo largo de una franja sobre zona de transición y lacustre, anteriormente conocidas como zonas II y III respectivamente en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, NTC-DS (GDF, 2004c) (figura IV.1.4).



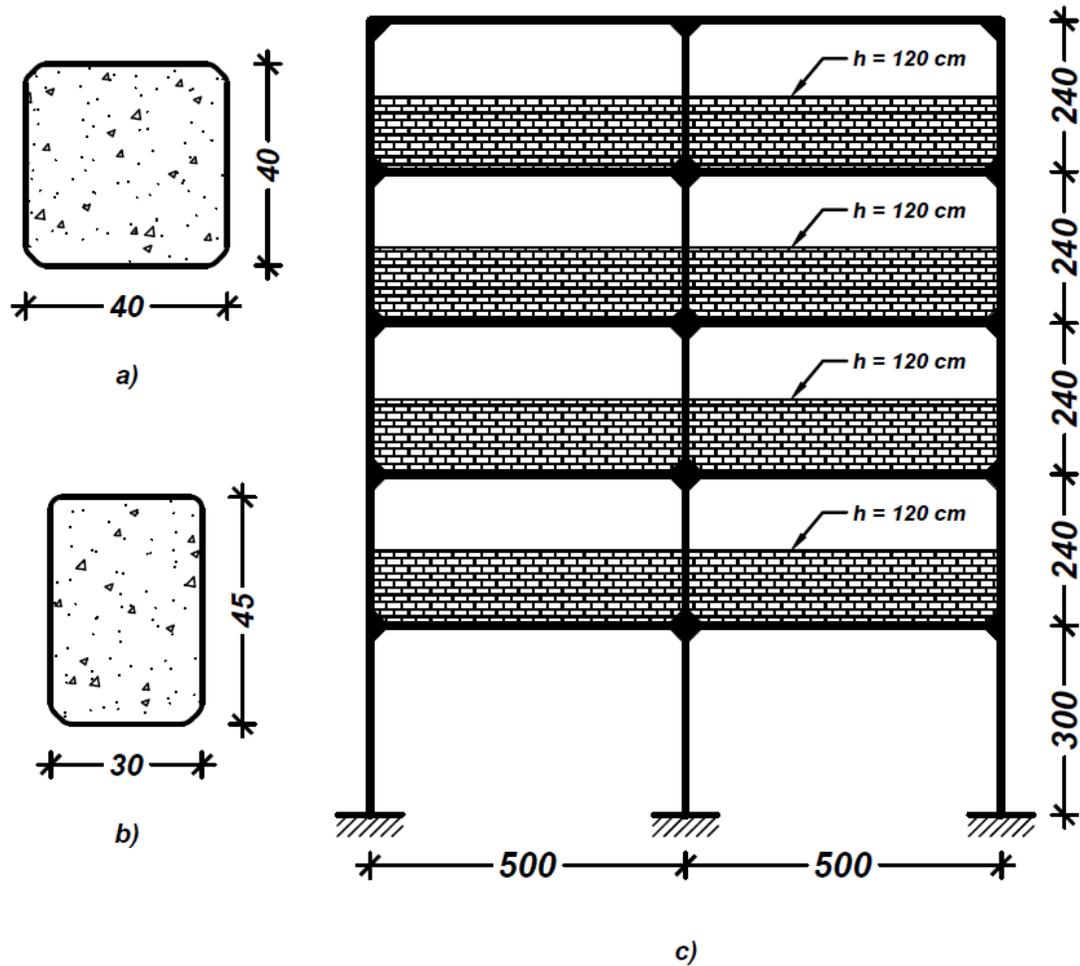
**Figura IV.1.3.** Ejemplo simplificado de patología estructural tipo piso débil: contribución de rigidez por muros (izquierda), y oscilador de referencia (derecha)



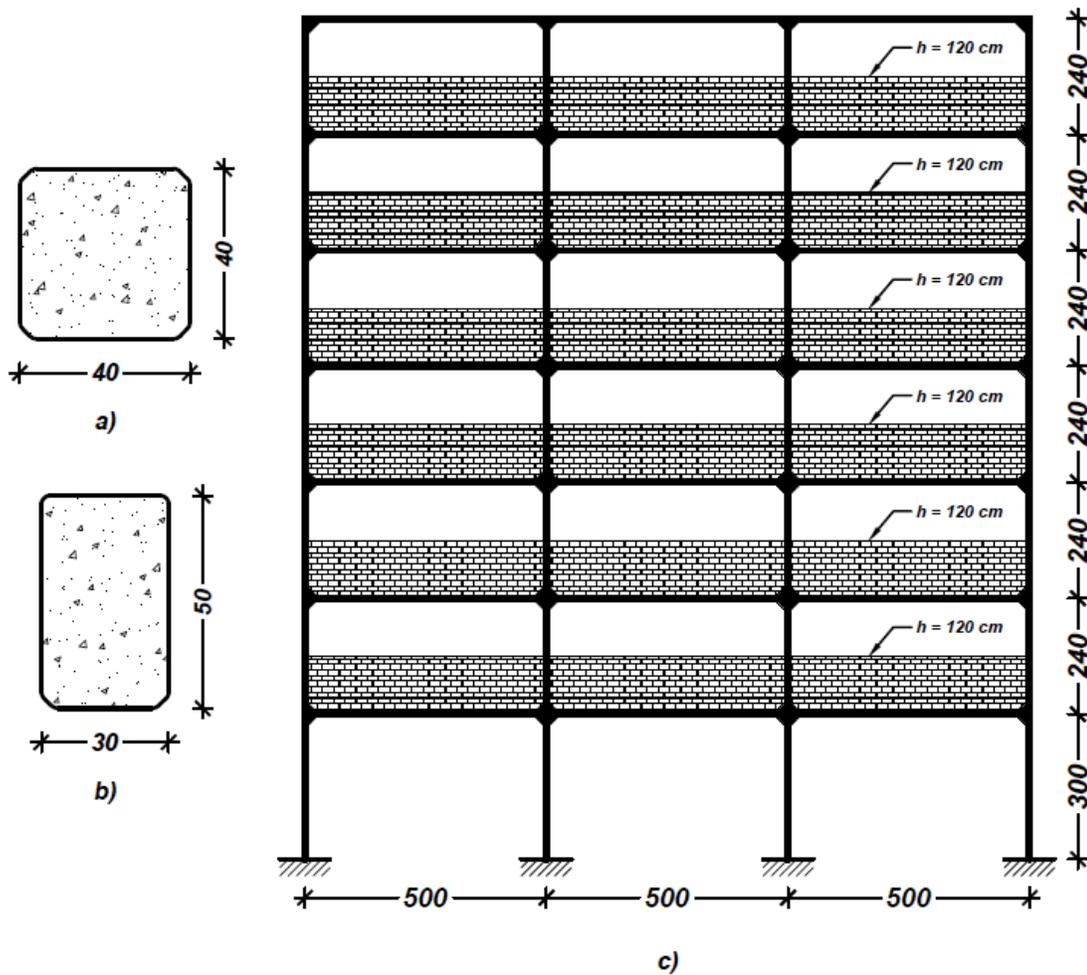
**Figura IV.1.4.** Franja aproximada descriptiva del conjunto de estructuras dañadas, debido al sismo del 19 de septiembre de 2017, en zonas II y III



En la figura IV.1.5 y IV.1.6 se muestran las características estructurales de los marcos adicionales mencionados anteriormente, siendo estos de 5 niveles con 2 crujeas (5N-2C) y 7 niveles con 3 crujeas (7N-3C) respectivamente; cabe destacar que en ambas estructuras se considera la carga adicional por muros desligados de mampostería, con altura de 1.2 m para los entrepisos de 2.4 m de altura. En la tabla IV.1.3 se muestran las propiedades estructurales de dichos muros, en caso de requerirse para otros casos de análisis posteriores.



**Figura IV.1.5.** Modelo de la estructura 5N-2C: a) sección en columnas, b) sección en vigas, c) dimensiones globales. Acotaciones en centímetros



**Figura IV.1.6.** Modelo de la estructura 7N-3C: a) sección en columnas, b) sección en vigas, c) dimensiones globales. Acotaciones en centímetros

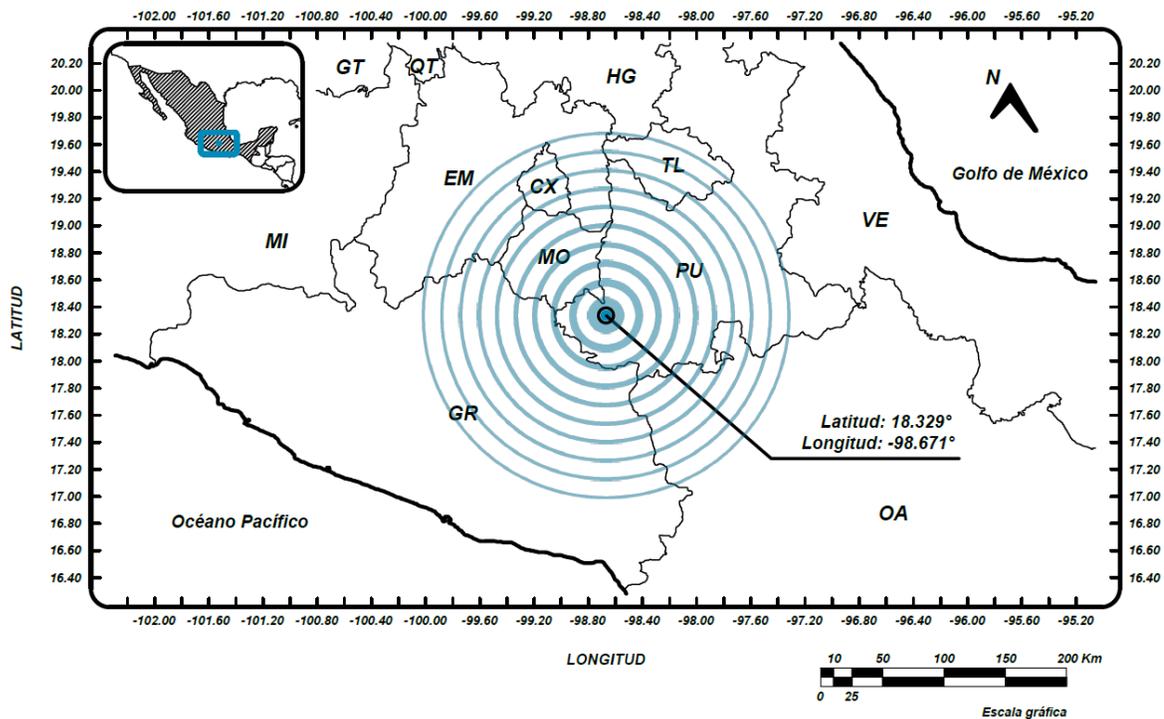
**Tabla IV.1.3.** Propiedades básicas para mampostería de muros

PROPIEDAD	NOTACIÓN	VALOR
Resistencia a compresión	$f_m$	15 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	$E_m$	9 000 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de cortante	$G_m$	3 600 kg/cm <sup>2</sup>
Peso volumétrico	$P_V$	1 600 kg/m <sup>3</sup>

En cuanto a las cargas vivas unitarias de estos últimos marcos, el destino de piso también corresponde a uso habitacional, losas con espesor de 10 cm y área tributaria rectangular de 5 m por 2.5 m; las propiedades estructurales restantes son las mismas que las aplicadas a las estructuras hipotéticas.

## IV.2. Selección de los registros sísmicos

La definición de la amenaza sísmica se deriva del evento ocurrido el 19 de septiembre de 2017, el cual indujo aceleraciones importantes en estructuras ubicadas en diferentes puntos de la región central del país; básicamente los daños más severos se reflejaron en un radio de aproximadamente 150 km, respecto al epicentro en el estado de Puebla (véase figura IV.2.1), en coherencia con el mapa de intensidades generado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM, 2017a), sobre las aceleraciones máximas del terreno estimadas para la región epicentral y vecindad próxima a esta.

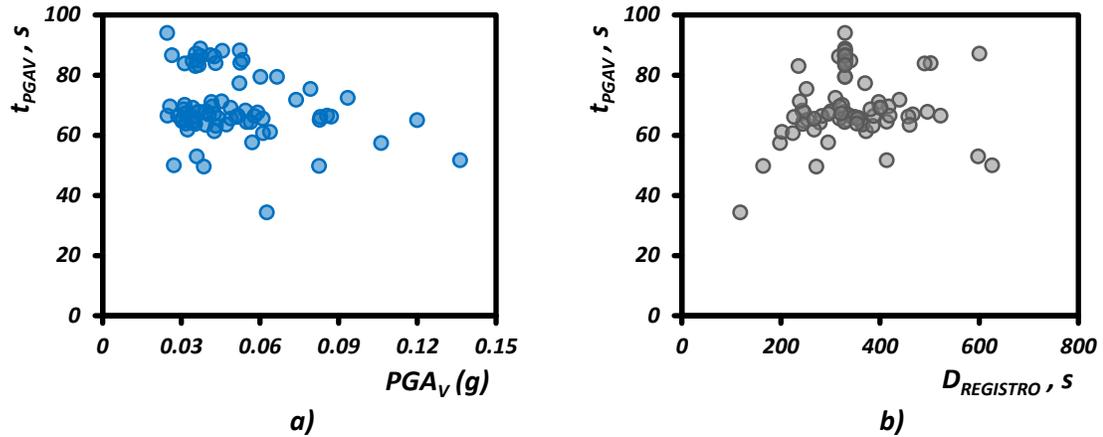


**Figura IV.2.1.** Radio aproximado de mayor afectación respecto al epicentro debido al sismo del 19 de septiembre de 2017

De los registros que se obtuvieron para dicho evento, sólo se seleccionaron 76 de los 97 disponibles, todos ellos proporcionados por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES, 2017), y por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM, 2017b); estas 76 estaciones se encuentran dentro del radio de afectación. Siendo así, se realizaron análisis preliminares sobre el comportamiento de cada sitio, tomando como referencia las aceleraciones máximas del suelo, lo cual se presenta en la figura IV.2.2, donde se observa de a) que la gran mayoría de aceleraciones “pico” verticales ( $PGA_v$ ) tienden a mantenerse en un intervalo definido de tiempo; por otra parte, de b) se observa que los tiempos asociados a los  $PGA_v$  son considerablemente menores, en comparación

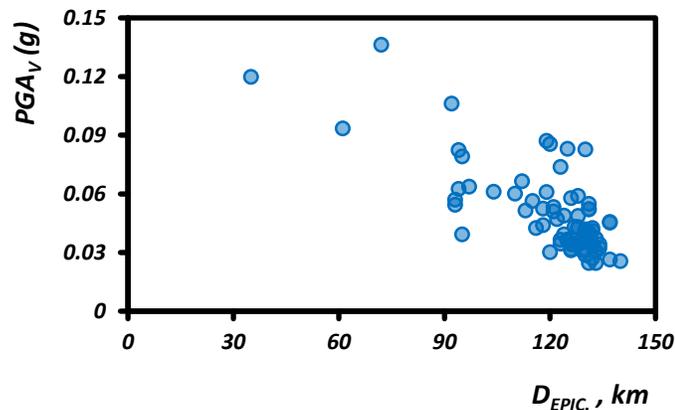


con la duración total del registro. Debido a que estas gráficas fueron elaboradas en función del registro completo de aceleraciones de cada estación, es necesario reevaluar la información para los registros en su parte intensa del movimiento fuerte del terreno, usando como referencia ilustrativa las gráficas descritas previamente.



**Figura IV.2.2.** Analítica temporal de las aceleraciones máximas verticales del suelo: a) tiempo de manifestación y b) desarrollo durante el evento

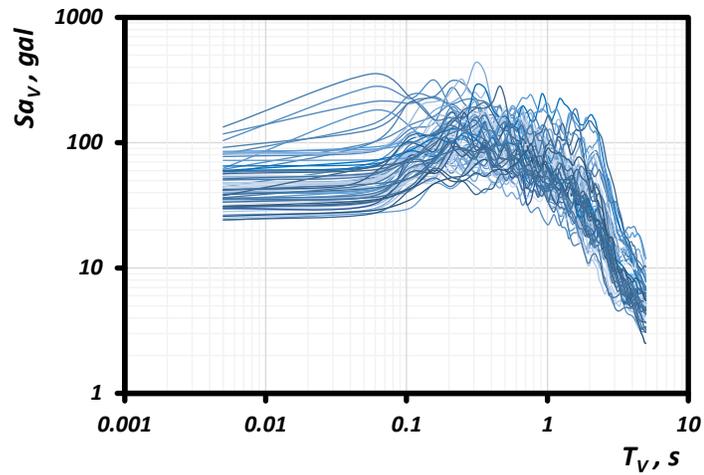
De igual forma, es posible considerar la intensidad de  $PGA_V$  como dependiente de la distancia epicentral; esto se ilustra en la figura IV.2.3, donde se observa que a medida que se redujo la distancia al epicentro, los  $PGA_V$  aumentaron. Sin embargo, es evidente que, por falta de información, se dificulta inferir con buena certidumbre un comportamiento general, lo cual da pauta a la revisión de modelos de atenuación establecidos para la zona central mexicana, y con ello verificar su situación actual respecto a la componente vertical.



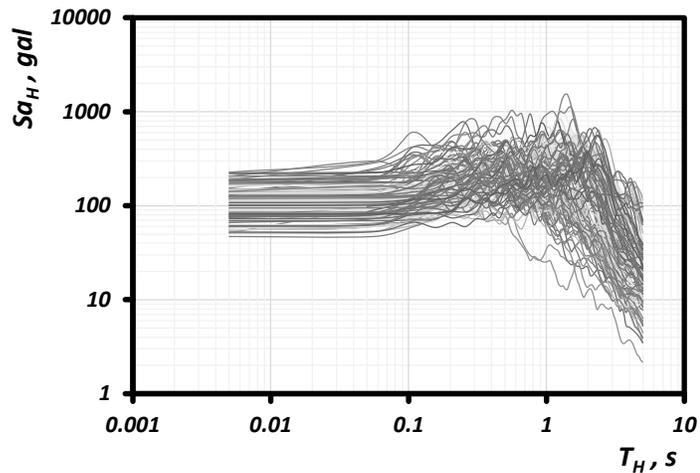
**Figura IV.2.3.** Aceleraciones máximas verticales del suelo en función de la distancia epicentral



En la figura IV.2.4 se muestran los espectros de respuesta generados de manera aislada para cada componente sísmica, donde se observa en a) que las aceleraciones espectrales máximas verticales estuvieron comprendidas en un intervalo poco definido, pero marcando preferencia por los periodos cortos; mientras que en b) las aceleraciones espectrales máximas horizontales denotaron un “barrido”, que se extiende desde periodos cortos hasta periodos largos.



a) Componente vertical

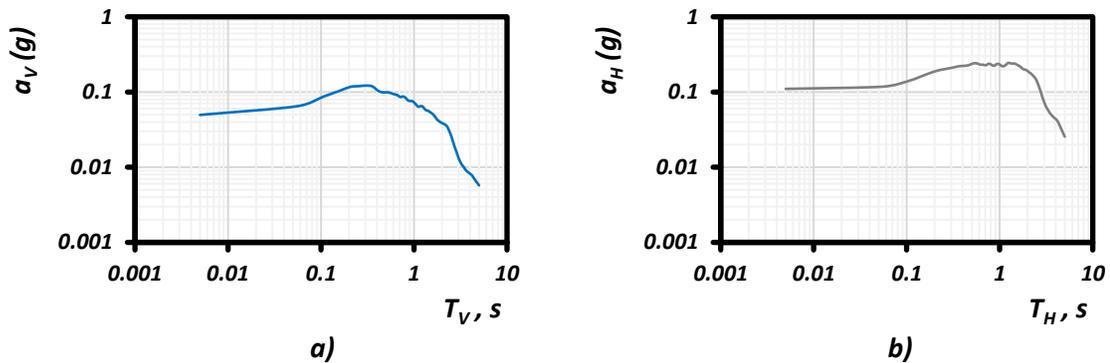


b) Componente horizontal

**Figura IV.2.4.** Espectros de respuesta elástica de pseudoaceleración.  $\zeta = 5\%$  respecto al crítico para ambas componentes

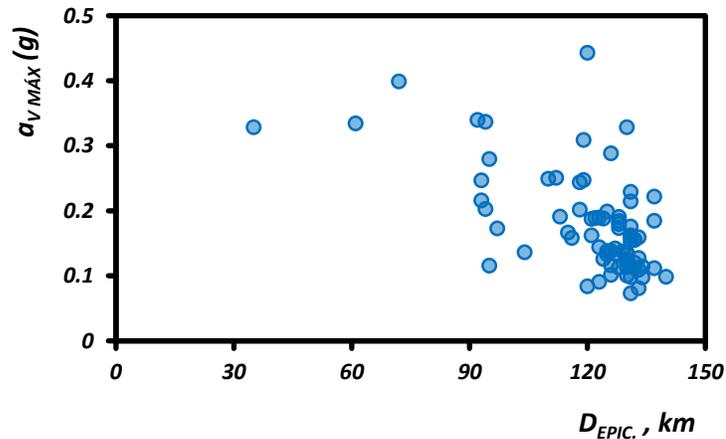


Para visualizar mejor esta situación, en la figura IV.2.5 se presenta la curva promedio correspondiente a cada componente, donde en a) la curva de la componente vertical asciende paulatinamente hasta llegar a un máximo, para después descender progresivamente; mientras que en b) la curva de la componente horizontal mantiene una meseta y después descende drásticamente.



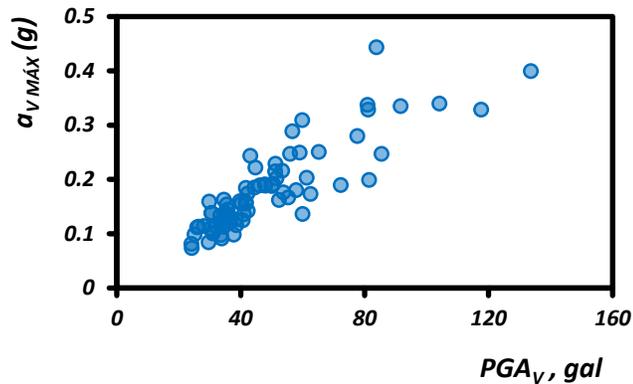
**Figura IV.2.5.** Promedio de espectros de respuesta elástica: a) componente vertical y b) componente horizontal

La información previa sirve de apoyo para representar la variación de las aceleraciones espectrales verticales máximas respecto a la distancia epicentral, relación que se visualiza en la figura IV.2.6, donde la dispersión es producto de la ordenada espectral máxima en cada espectro de respuesta vertical; de esta misma figura también es notable la variabilidad de datos para distancias epicentrales mayores a 120 km. Sin embargo, más adelante se verá que tal variabilidad no necesariamente representa una amenaza sobre las estructuras, a excepción de casos muy particulares.



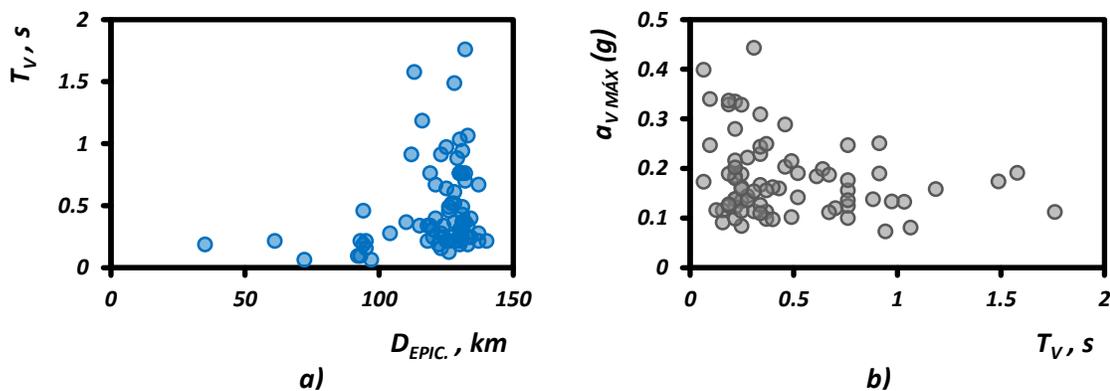
**Figura IV.2.6.** Conjunto de aceleraciones espectrales verticales máximas en cada estación de registro sísmico

También existe cierta dependencia de las aceleraciones espectrales con las aceleraciones presentes en el terreno: la figura IV.2.7 muestra la correlación existente entre aceleraciones espectrales máximas verticales, y aceleraciones verticales máximas del terreno; la gráfica no denota uniformidad por las condiciones locales de cada sitio, entre otras cuestiones, pero la dispersión posee relativa proporcionalidad en sus incrementos.



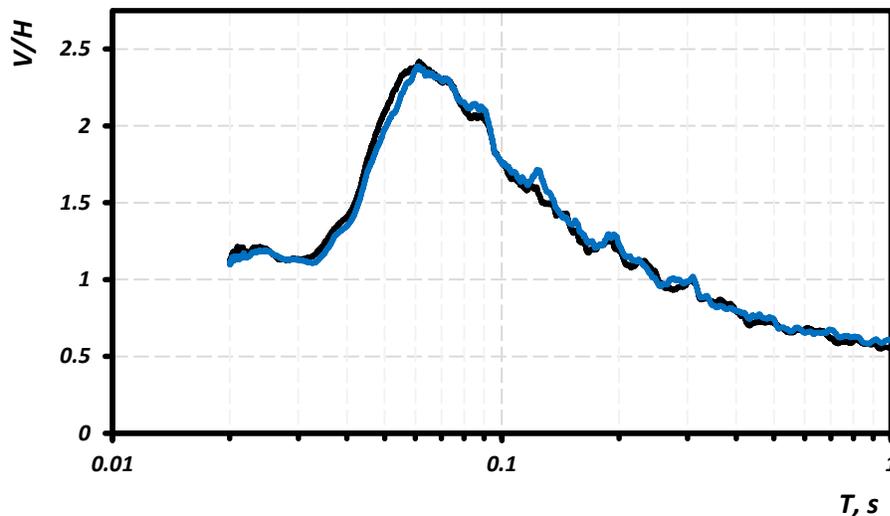
**Figura IV.2.7.** Correlación entre aceleraciones espectrales verticales máximas y aceleraciones verticales máximas del terreno

Por otra parte, a través de la información mostrada en la figura IV.2.8, se hace una estimación de las estructuras que estuvieron más expuestas a los efectos de la componente vertical: en a) se observa la gran variedad de estructuras que se vieron sujetas a las aceleraciones espectrales verticales máximas, incluso estando alejadas de la fuente sísmica; en contraste, en b) se observa que dichas aceleraciones verticales afectaron primordialmente a estructuras de periodo vertical corto. Cabe reiterar que estas gráficas están desarrolladas con base en las ordenadas espectrales máximas, de cada espectro generado a partir de los 76 registros seleccionados.



**Figura IV.2.8.** Osciladores con respuesta máxima: a) respuesta respecto al epicentro, b) aceleración vertical máxima inducida

Además, es posible establecer la relación de intensidades sísmicas vertical a horizontal,  $V/H$ , en función del periodo de vibrar, tal como lo han desarrollado algunos autores (e.g. Perea y Esteva, 2005; Ruiz-García, 2018; Jaimes y Ruiz-García, 2019), a partir de los análisis de espectros de amplitudes de Fourier, para determinar la relación de las ordenadas espectrales verticales con sus correspondientes ordenadas espectrales horizontales, mediante funciones de transferencia y considerando ambas direcciones horizontales (NS y EW). Este procedimiento fue desarrollado con ayuda del programa de cómputo DEGTRA (Ordaz *et al.*, 2011), usando como datos de entrada los acelerogramas relativos a los 76 registros seleccionados; con ello se obtuvieron las curvas que se muestran en la figura IV.2.9, resultado del promedio de todas las funciones de transferencia calculadas.



**Figura IV.2.9.** Promedio de funciones de transferencia de los espectros de amplitudes de Fourier. NS en color azul, EW en color negro

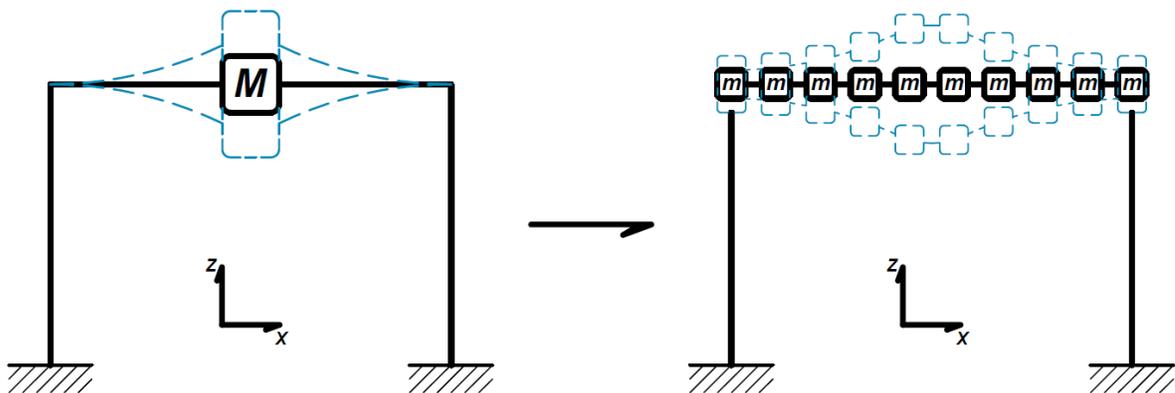
De esta última curva se concluye que las relaciones  $V/H$  mayores recaen principalmente sobre periodos de vibrar muy cortos, congruente con parte de la información desarrollada hasta este punto. Sin embargo, es necesario aclarar lo siguiente: si se define a cada cociente en función de un mismo periodo de vibrar, implícitamente se asume que se está tratando con una estructura cuya rigidez axial es igual a su rigidez lateral, situación que pierde sentido práctico, ya que hasta ahora no existe estructura tal que presente esa característica; además, aún persiste la problemática de la estimación idónea del periodo de vibrar vertical, pero diversas propuestas convergen en que estos son sumamente pequeños, por lo que hablar de periodos verticales mayores a un segundo tal vez sería exagerado, o se estaría concibiendo a las estructuras con muy baja rigidez axial (muy flexibles en dirección vertical), que se traduciría en materiales de resistencia inferior a la del concreto, o de funcionalidad estructural casi nula, en el caso más extremo.

### IV.3. Análisis modales espectrales

Para este trabajo los análisis se realizaron en el rango elástico lineal de las estructuras, con el fin de evaluar (como estimación inicial) su comportamiento estructural ante condiciones normales de servicio. La teoría empleada es la usual relativa a la dinámica estructural para diseño sísmico, mediante análisis modales espectrales, con ayuda del programa de cómputo SAP2000 (CSI, 2013), considerando la variante adicional de la vibración vertical de la masa discretizada, tal como se aprecia en la figura IV.3.1 para el marco hipotético base de un nivel y una crujía, donde su masa total de entrepiso se distribuye a lo largo de la viga sobre un total de 10 nodos, lo cual se resume mediante la siguiente ecuación:

$$M_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} = m_{i1} + m_{i2} + \dots + m_{in} \quad (1)$$

De esta expresión,  $M$  representa la masa total de entrepiso,  $i$  es el entrepiso correspondiente analizado,  $j$  se refiere a la porción o fracción de masa  $m$ , mientras que  $n$  es el número total de porciones, previamente definido para asignar en cada nivel de la estructura. Hay que tomar en cuenta que el número adecuado de porciones de masa, su distribución y magnitud, son aspectos fuertemente condicionados al criterio personal, más aún si por distintas razones se requiere concentrar proporciones diferentes en ciertos intervalos de los elementos estructurales, y sólo para entrepisos específicos. Para los modelos aquí presentados, y con el objeto de no complicar innecesariamente los análisis en general, se considerarán fracciones de masa con distribución uniforme y de proporciones iguales, aspectos que se describirán a detalle más adelante.



**Figura IV.3.1.** Representación idealizada de la vibración modal fundamental en dirección vertical del marco 1N-1C con masa discretizada



Por consiguiente, el grado de libertad en el eje 'z' es incluido para contemplar las excitaciones dinámicas debidas al movimiento vertical del suelo, de manera que se posibilite la evaluación de la respuesta estructural por acciones horizontales, y también por acción conjunta de las componentes horizontal y vertical; se describe esta parte en la figura IV.3.2, donde se muestra la estructura simplificada por su masa y su rigidez lateral y rigidez axial, que reflejaría respuesta dinámica horizontal y vertical, respectivamente.

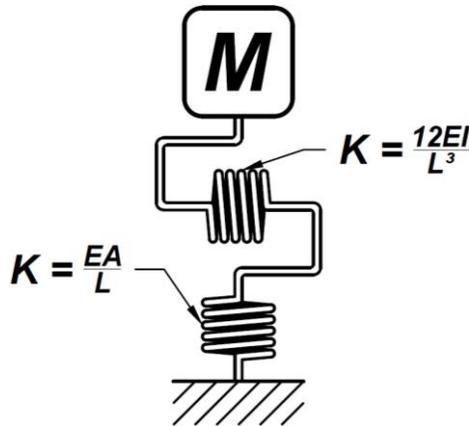
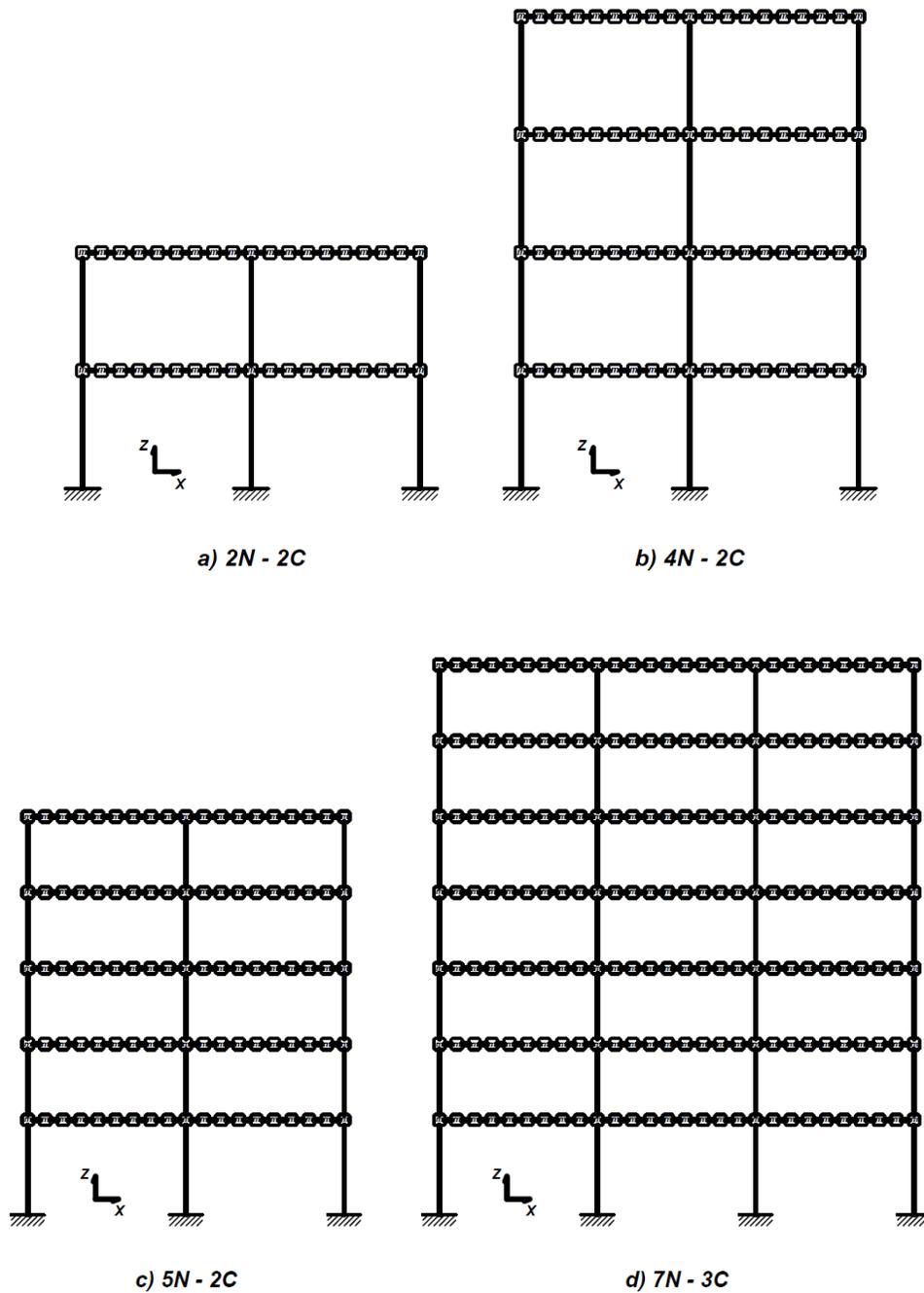


Figura IV.3.2. Oscilador idealizado con dos grados de libertad

En la figura IV.3.3 se tienen los marcos planos descritos anteriormente, tanto los hipotéticos como los relativos a estructuras existentes, con sus respectivas masas discretizadas a lo largo de las vigas, haciendo énfasis en que la cantidad de nodos para concentrar las masas es asumida debido a la longitud de las vigas: una cantidad menor tiende a describir el comportamiento de osciladores de un grado de libertad, sin mostrar diferencias apreciables respecto a los modelos finales propuestos; mientras que una cantidad mayor de nodos sería poco práctico, y describiría un comportamiento exageradamente flexible para las vigas.



**Figura IV.3.3.** Marcos en estudio con masas discretizadas. 19 nodos por nivel en modelos a), b) y c); 28 nodos por nivel en modelo d)

Debido a lo anterior, se recalca la importancia de tener cierto criterio para determinar la mejor discretización de las masas de entrepiso, y así obtener resultados coherentes y en un sentido práctico. Se muestran las masas totales de entrepiso en la tabla IV.3.1, así como las masas asignadas por nodo, siendo estas el resultado de dividir la masa total de entrepiso entre el número de nodos por nivel.



**Tabla IV.3.1.** Masas actuantes en direcciones horizontal y vertical

MARCO MODELO	MASA DE ENTREPISO kg s <sup>2</sup> / m	NODOS POR NIVEL	MASA POR NODO kg s <sup>2</sup> / m
1N-1C	Nivel 1 796.9	10	79.7
2N-2C	Nivel 1 1457.2	19	76.7
	Nivel 2 1457.2		76.7
4N-2C	Nivel 1 1457.2	19	76.7
	Nivel 2 1457.2		76.7
	Nivel 3 1457.2		76.7
	Nivel 4 1457.2		76.7
5N-2C	Nivel 1 2600.1	19	136.8
	Nivel 2 2564.7		135.0
	Nivel 3 2564.7		135.0
	Nivel 4 2564.7		135.0
	Nivel 5 2189.7		115.2
7N-3C	Nivel 1 3542.8	28	126.5
	Nivel 2 3496.0		124.8
	Nivel 3 3496.0		124.8
	Nivel 4 3496.0		124.8
	Nivel 5 3496.0		124.8
	Nivel 6 3496.0		124.8
	Nivel 7 3307.2		118.1

Para definir la carga lineal que actuará sobre las vigas, se considera la acción de las cargas gravitacionales sobre las áreas tributarias correspondientes, tal como se describió inicialmente en la definición de las características estructurales, sin contribución de rigidez por la losa, al estar simplemente apoyada. Hay que recordar que en los modelos de 5 y 7 niveles (modelos de estructuras reales dañadas durante el sismo en cuestión), hay mayor aportación en el peso que recae sobre las vigas, debido a los muros desligados de mampostería de media altura, lo que implica que la masa repartida en los nodos sea relativamente elevada.

En primera instancia, es fundamental la revisión de los periodos de vibrar en dirección horizontal de las estructuras en estudio, pues son los que definen si los modelos están correctamente calibrados, para responder adecuadamente a las demandas sísmicas, definidas a través de los espectros de respuesta correspondientes; en la tabla IV.3.2 se desglosan los periodos fundamentales horizontales obtenidos para cada estructura, acorde con las propiedades definidas anteriormente para los elementos estructurales.



**Tabla IV.3.2.** Periodos de vibrar fundamentales en dirección horizontal

MARCO MODELO	$T_H$ , s	$\omega$ , rad/s
1N-1C	0.150	41.83
2N-2C	0.315	19.92
4N-2C	0.644	9.76
5N-2C	0.621	10.11
7N-3C	0.782	8.04

Una vez obtenidos los modelos estructurales calibrados, se determina la respuesta modal en dirección vertical. En la tabla IV.3.3 se muestran los valores obtenidos para los periodos de vibrar fundamentales verticales, siendo estos los que poseen el porcentaje más alto de masa participativa en la respuesta modal, particular en cada estructura modelada; de esta información hay que señalar que en la estructura 2N-2C el porcentaje de masa participativa es bajo, mientras que su modo de vibrar vertical secundario por igual presenta un porcentaje de masa participativa del 37%, por lo que en este marco en particular existen dos modos de vibrar que dominan primordialmente su respuesta modal. También se observa, de los resultados anteriores, que el periodo de vibrar vertical se incrementa a medida que el número de niveles aumenta; esto supone una condición de flexibilidad para la cual la rigidez axial de la estructura disminuye si su altura aumenta, situación que no necesariamente es riesgosa, ya que el parámetro que prioritariamente define la demanda sísmica es la masa.

**Tabla IV.3.3.** Respuestas modales fundamentales en dirección vertical

MARCO MODELO	$T_v$ , s	$\omega$ , rad/s	% MASA EFECTIVA
1N-1C	0.067	94.05	68.9%
2N-2C	0.056	113.09	37.5%
4N-2C	0.066	94.91	68.4%
5N-2C	0.076	82.69	81.0%
7N-3C	0.089	70.35	80.0%

Además, para las estructuras de 5 y 7 niveles (5N-2C y 7N-3C, respectivamente), gran parte de la respuesta recae sobre su modo fundamental, mientras que para las estructuras hipotéticas la respuesta se reparte entre modos fundamentales y modos secundarios; lo anterior se confirma a través de la tabla IV.3.4, donde por igual se muestran los porcentajes de masa participativa para el resto de los modos de vibrar verticales en cada estructura, siendo estos modos los que representan la participación de mayor relevancia, y cuya suma porcentual acumulada resulta mayor al 90% para cada marco.



Al ser los periodos verticales fundamentales de valores bajos, es de esperarse que el resto de los periodos verticales participativos sean sumamente menores, sin importar la altura de la estructura.

**Tabla IV.3.4.** Propiedades modales participativas en dirección vertical

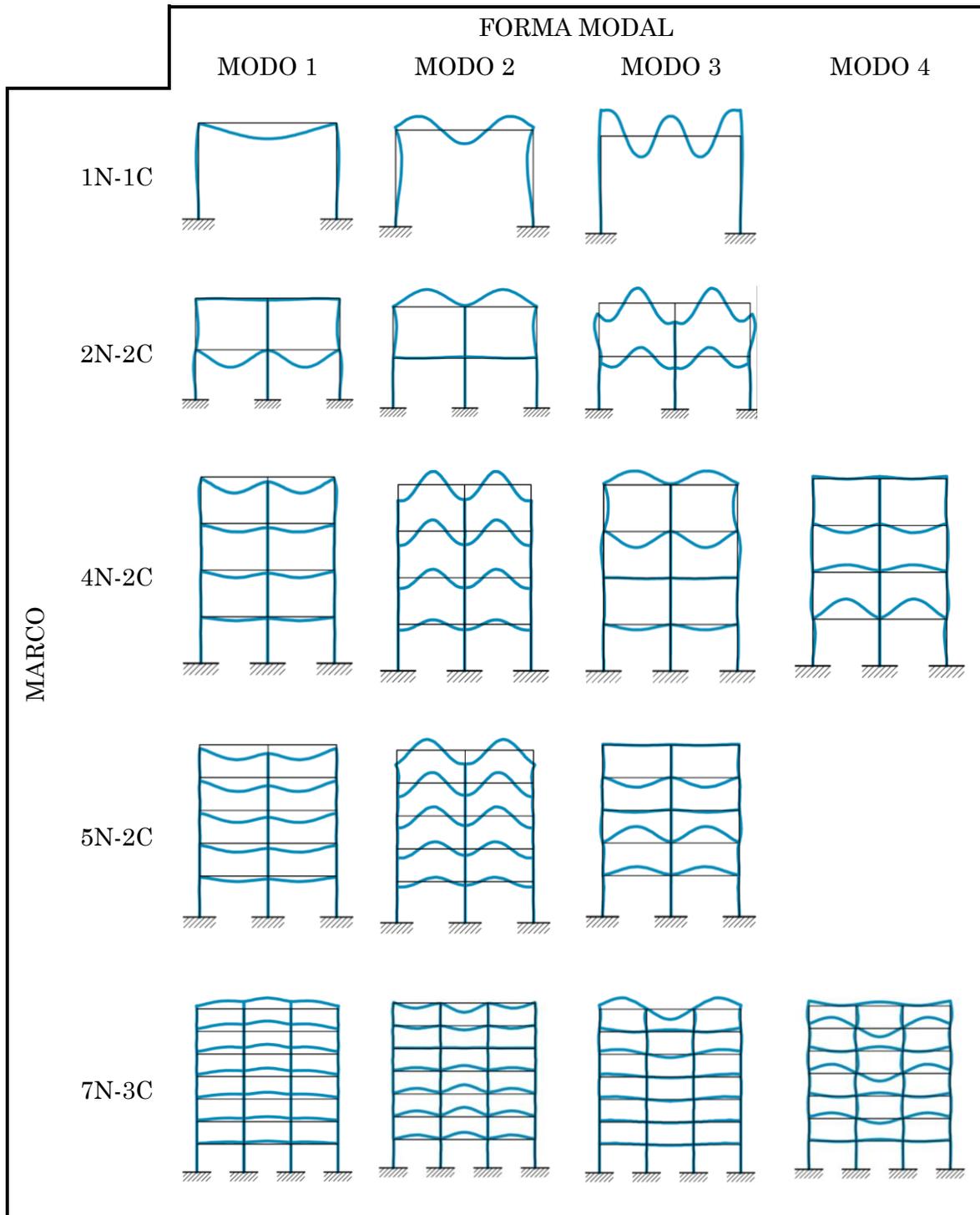
MARCO MODELO		$T_v$ , s	$\omega$ , rad/s	% MASA EFECTIVA
1N-1C	Modo 2 <sub>(v)</sub>	0.013	494.82	14.6%
	Modo 3 <sub>(v)</sub>	0.006	1002.60	11.9%
2N-2C	Modo 2 <sub>(v)</sub>	0.060	104.63	37.0%
	Modo 3 <sub>(v)</sub>	0.015	425.86	18.6%
4N-2C	Modo 2 <sub>(v)</sub>	0.020	310.97	12.9%
	Modo 3 <sub>(v)</sub>	0.058	109.04	7.4%
	Modo 4 <sub>(v)</sub>	0.055	114.87	7.0%
5N-2C	Modo 2 <sub>(v)</sub>	0.024	263.90	7.6%
	Modo 3 <sub>(v)</sub>	0.057	109.41	3.9%
7N-3C	Modo 2 <sub>(v)</sub>	0.051	124.25	6.7%
	Modo 3 <sub>(v)</sub>	0.069	91.24	2.2%
	Modo 4 <sub>(v)</sub>	0.064	98.14	1.7%

De la tabla anterior también hay que destacar que la participación de cada modo de vibrar llega a ser importante, incluso para modos superiores (modos de menor periodo) en las estructuras hipotéticas, situación que resultaría contraproducente bajo ciertas circunstancias, puesto que las aceleraciones espectrales tienden a ser mayores en el umbral de periodos cortos.

En la tabla IV.3.5 se ilustran las formas modales obtenidas en dirección vertical para cada estructura, de acuerdo con los modos fundamentales y secundarios participativos en la respuesta modal, descritos numéricamente en párrafos anteriores; de los esquemas se distingue que las amplitudes máximas de las vibraciones tienden a presentarse en la zona central de cada marco modelado, así como en la zona central de las vigas, tanto para las estructuras 5N-2C y 7N-3C como para los marcos hipotéticos, por lo que se deduce que la respuesta estructural final recaerá principalmente sobre dichas zonas, sin menospreciar la respuesta de los elementos presentes en las zonas laterales.



**Tabla IV.3.5.** Formas modales en dirección vertical para marcos en estudio



A continuación, las estructuras se someten a demandas sísmicas a través de los espectros de respuesta, teniendo en cuenta que es necesario generarlos a partir de las 3 direcciones del registro. Si bien en esta tesis se estudian marcos planos, los análisis se realizan considerando la acción aislada en cada dirección de la componente horizontal (NS y EW), y posteriormente la acción simultánea de aceleraciones en dirección vertical junto con la dirección norte-sur (V-NS), así como con la dirección este-oeste (V-EW), con el fin de determinar la acción conjunta más desfavorable en términos de fuerzas internas, para así cuantificar las amplificaciones máximas que se presentan en los elementos estructurales, comparadas respecto a la acción individual de la componente horizontal.

En la figura IV.3.4 se presenta el esquema de acelerogramas y los respectivos espectros de respuesta, generados para las 3 direcciones registradas en la estación con clave CH84, “Culhuacán”, siendo dicha estación la que reflejó el valor más alto de aceleración espectral en dirección vertical, en comparación con el resto de registros seleccionados.

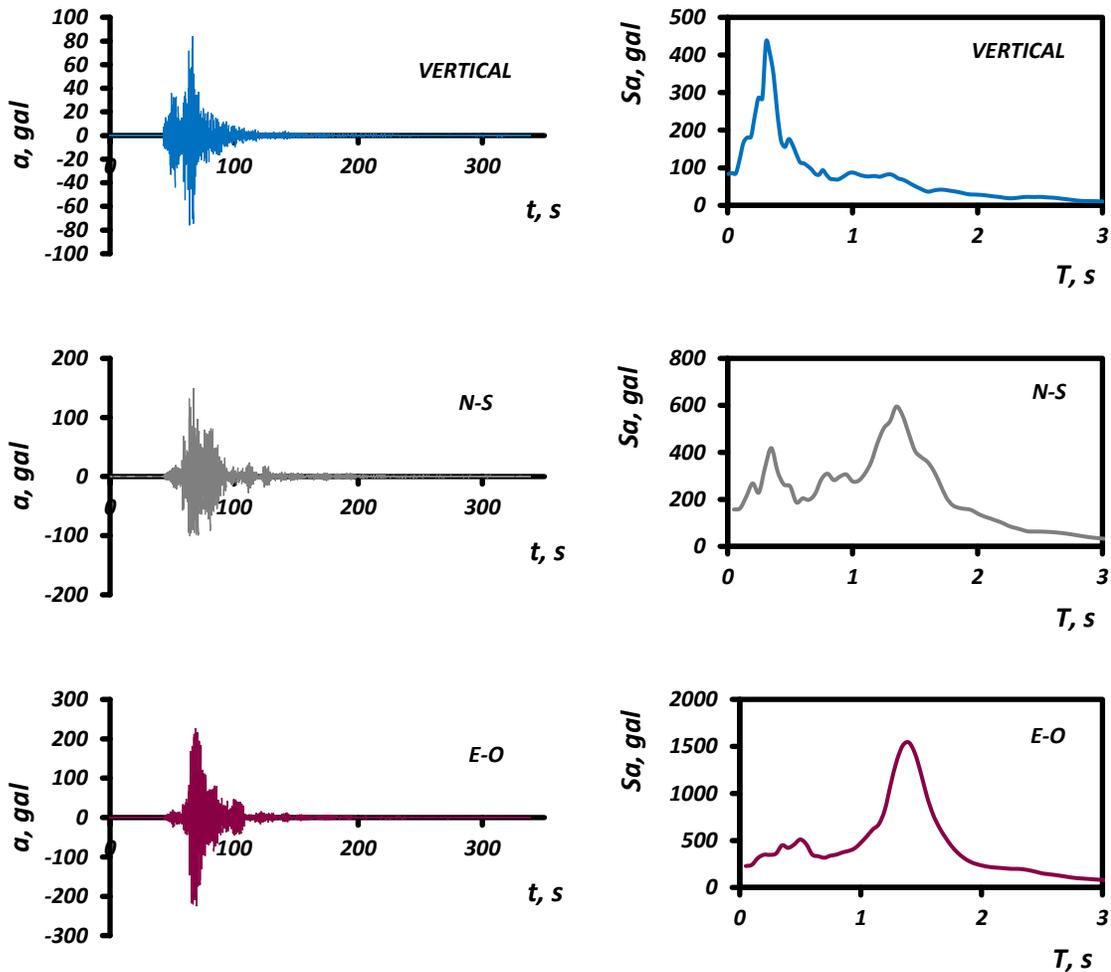
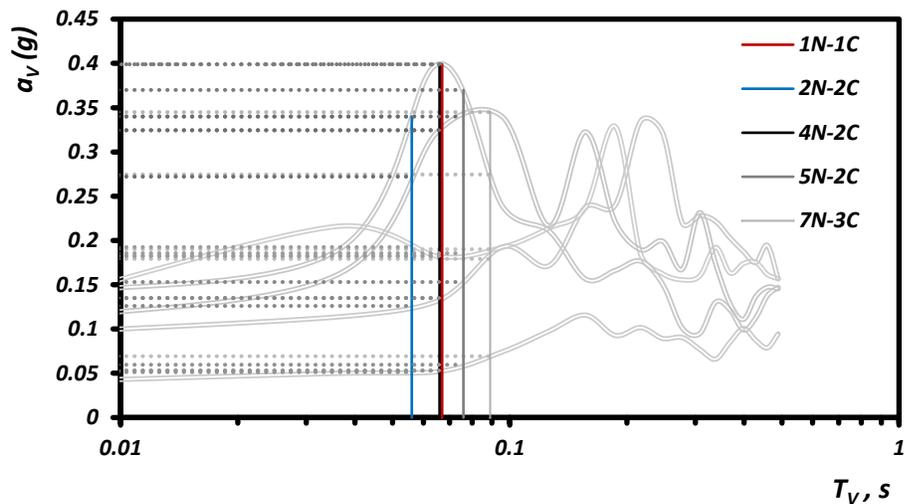


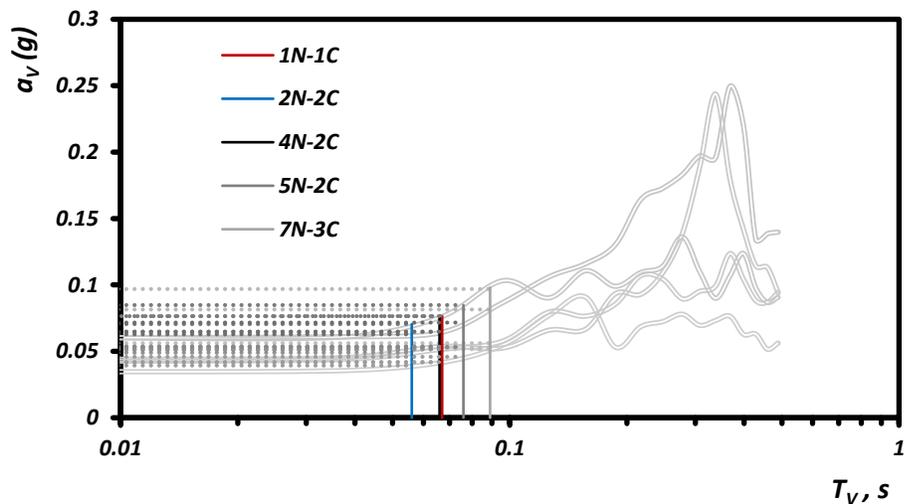
Figura IV.3.4. Señales de aceleración registradas por la estación CH84, y sus correspondientes espectros de respuesta



A modo de ejemplo, la figura IV.3.5 muestra las gráficas *periodo vertical-aceleración espectral vertical* asociadas a 10 estaciones, cinco de ellas para distancias epicentrales menores a 100 km contenidas en a), y las cinco restantes para distancias mayores contenidas en b), identificando los periodos fundamentales verticales de los cinco marcos analizados, con sus respectivas aceleraciones espectrales inducidas; se observa nuevamente que, para ciertos puntos, los valores de aceleración espectral vertical son sustanciales en el umbral de periodos cortos. Refiérase también a la tabla IV.3.6 para información adicional, relativa a las 10 estaciones mencionadas anteriormente.



a) Radio epicentral menor a 100 km



b) Radio epicentral mayor a 100 km

Figura IV.3.5. Demanda de aceleraciones espectrales verticales



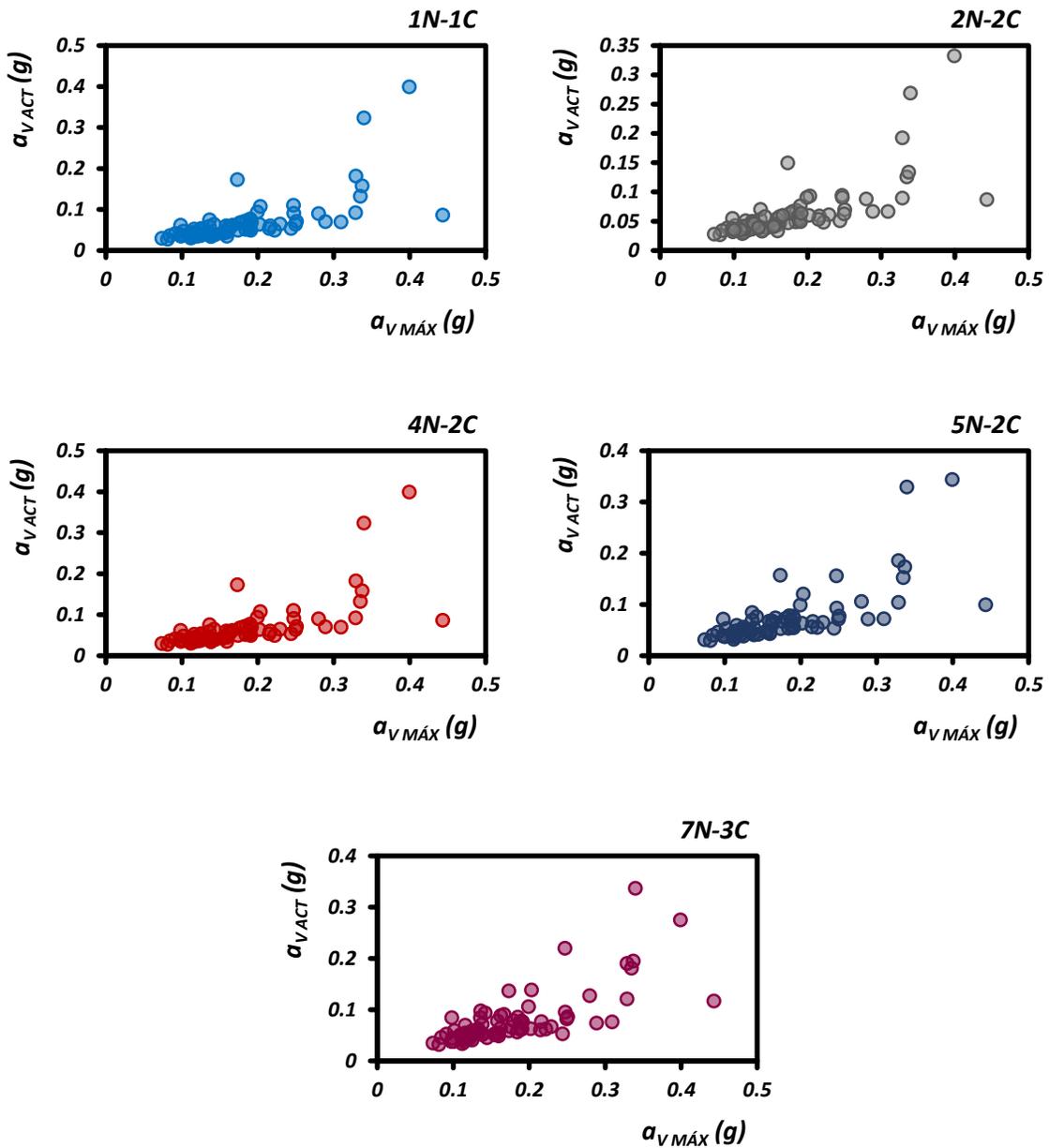
**Tabla IV.3.6.** Conjunto parcial de estaciones consultadas para el evento sísmico

CLAVE	NOMBRE	D <sub>EPIC</sub> , km
<i>RABO</i>	Raboso	35
<i>HMTT</i>	Huamuxtitlán	61
<i>YAIG</i>	Yautepec	72
<i>SXPU</i>	<i>SISMEX</i> Puebla	92
<i>CHFL</i>	Chila de las Flores	95
<i>PA34</i>	Escuela Primaria “Álvaro Obregón”	104
<i>TH35</i>	Tláhuac	110
<i>GC38</i>	Jardín de Niños “Luz García Campillo”	118
<i>CUP5</i>	Instituto de Ingeniería, Patio 5	123
<i>SCT2</i>	<i>SCT B-2</i>	128

Así mismo, de la última figura es evidente que las estructuras ubicadas a distancias epicentrales menores a 100 km, fueron propensas a percibir los valores máximos de aceleración espectral; si bien, para distancias epicentrales mayores a 100 km, hay valores máximos significativos de aceleración, estos no tuvieron influencia sobre las estructuras modeladas en esta tesis, sino después del umbral de periodos cortos, por lo que las estructuras comunes no se encontraron en gran riesgo ante la componente vertical. Esto debería confirmarse a través de investigaciones posteriores, para estructuras de mayor altura y/o diferente configuración estructural.

En consecuencia, hay que tener muy presente que las aceleraciones espectrales verticales máximas, aunque tienden a manifestarse en el umbral de periodos cortos, no recaen directamente sobre estructuras ordinarias (como las aquí modeladas), pues estas tienen periodos de vibrar verticales menores a los asociados a ordenadas espectrales máximas; es en casos muy excepcionales donde el periodo fundamental vertical de la estructura se aproxima, de manera sustancial, al periodo vertical con ordenada espectral máxima.

Con base en la idea del párrafo anterior se elaboraron las gráficas de la figura IV.3.6, que revelan la aceleración espectral vertical máxima *versus* aceleración espectral vertical actuante o inducida, esta última haciendo referencia a la aceleración espectral que, teóricamente, se desarrolló en los marcos respecto a su periodo fundamental vertical. Se clasifican dichas gráficas individualmente para cada estructura, de donde se destaca que las dispersiones para los marcos 1N-1C y 4N-2C son similares, ya que sus periodos fundamentales verticales son prácticamente idénticos; para los marcos 2N-2C, 5N-2C y 7N-3C se distingue un ligero incremento de la dispersión, siendo la estructura de 7 niveles la que refleja dispersión máxima sobre su gráfica, en comparación con los otros marcos.

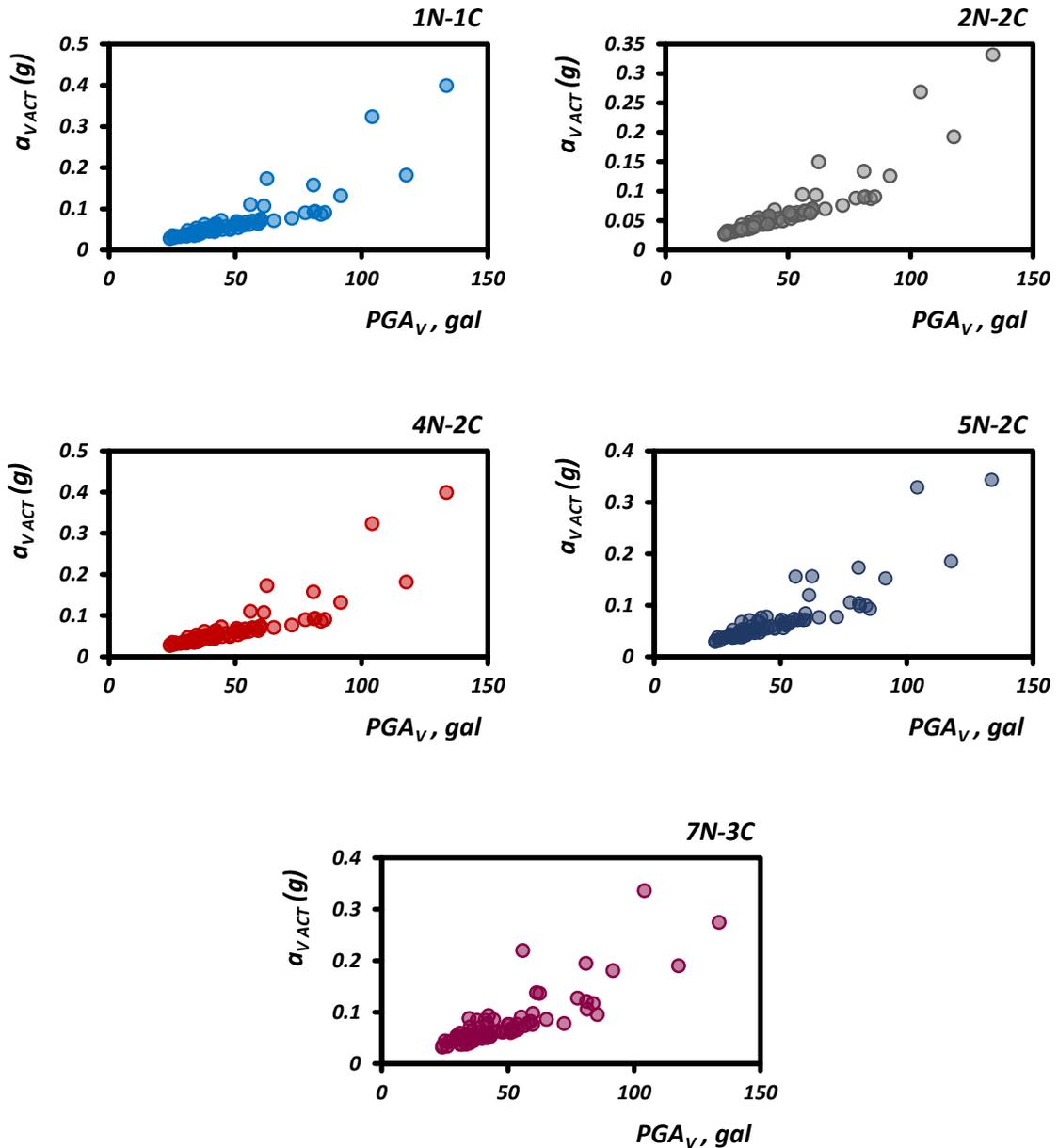


**Figura IV.3.6.** Desarrollo de aceleraciones espectrales verticales actuantes respecto a las ordenadas espectrales verticales máximas

Estas gráficas posibilitan la deducción aproximada de la ordenada espectral vertical actuante, conocida la aceleración espectral vertical máxima, para tener una primera estimación de la aceleración de diseño, así como valorar si esta aceleración implica incrementos importantes de fuerzas internas en la estructura de interés, tal como se verá en los subcapítulos posteriores. En dado caso que no se cuente con información tan detallada sobre los registros, es posible emplear la información asociada a la PGA, parámetro que comúnmente se encuentra disponible con mayor facilidad; se aprovechó



dicho parámetro de la selección de registros para generar la figura IV.3.7, con la misma esencia y finalidad que las relativas a la figura IV.3.6; obsérvese que la dispersión de los datos persiste de manera relativamente análoga entre las figuras mencionadas, pero también se presenta con mayor uniformidad en el caso de esta última figura, lo que sugiere una mejor correlación entre ambos parámetros, haciendo énfasis en que su aplicabilidad tendrá mayor coherencia en estructuras tratadas en el rango elástico lineal.



**Figura IV.3.7.** Desarrollo de aceleraciones espectrales verticales actuantes respecto a las aceleraciones verticales máximas del terreno



#### IV.4. Análisis estadístico de los elementos mecánicos

Se procede a determinar la demanda estructural sísmica, estableciendo que las fuerzas internas de referencia serán las ocasionadas por acciones sísmicas horizontales, y comparando estos resultados con las demandas internas producidas por la acción simultánea de las componentes horizontal y vertical. Basándose en la metodología común adoptada por otros investigadores (e.g. Perea y Esteva, 2005; Ruiz-García, 2018; Jaimes y Ruiz-García, 2019), se genera un conjunto de cocientes para cada estructura modelada; esto es, cada marco tiene una relación de intensidad sísmica  $V/H$  asociada a cada registro de aceleración. En la figura IV.4.1 se observan tales conjuntos, donde cada marco presentó un rango de cocientes considerablemente amplio, que desciende a medida que el periodo fundamental horizontal aumenta, siendo la estructura de un nivel (1N-1C) la que representa el mayor riesgo de amplificación de demanda sísmica, a causa de sus bajos periodos de vibrar vertical y horizontal.

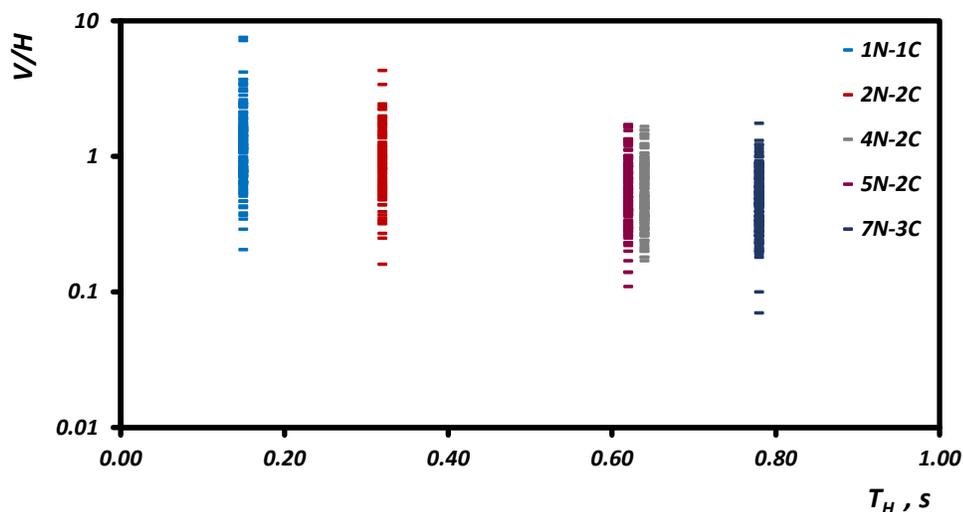
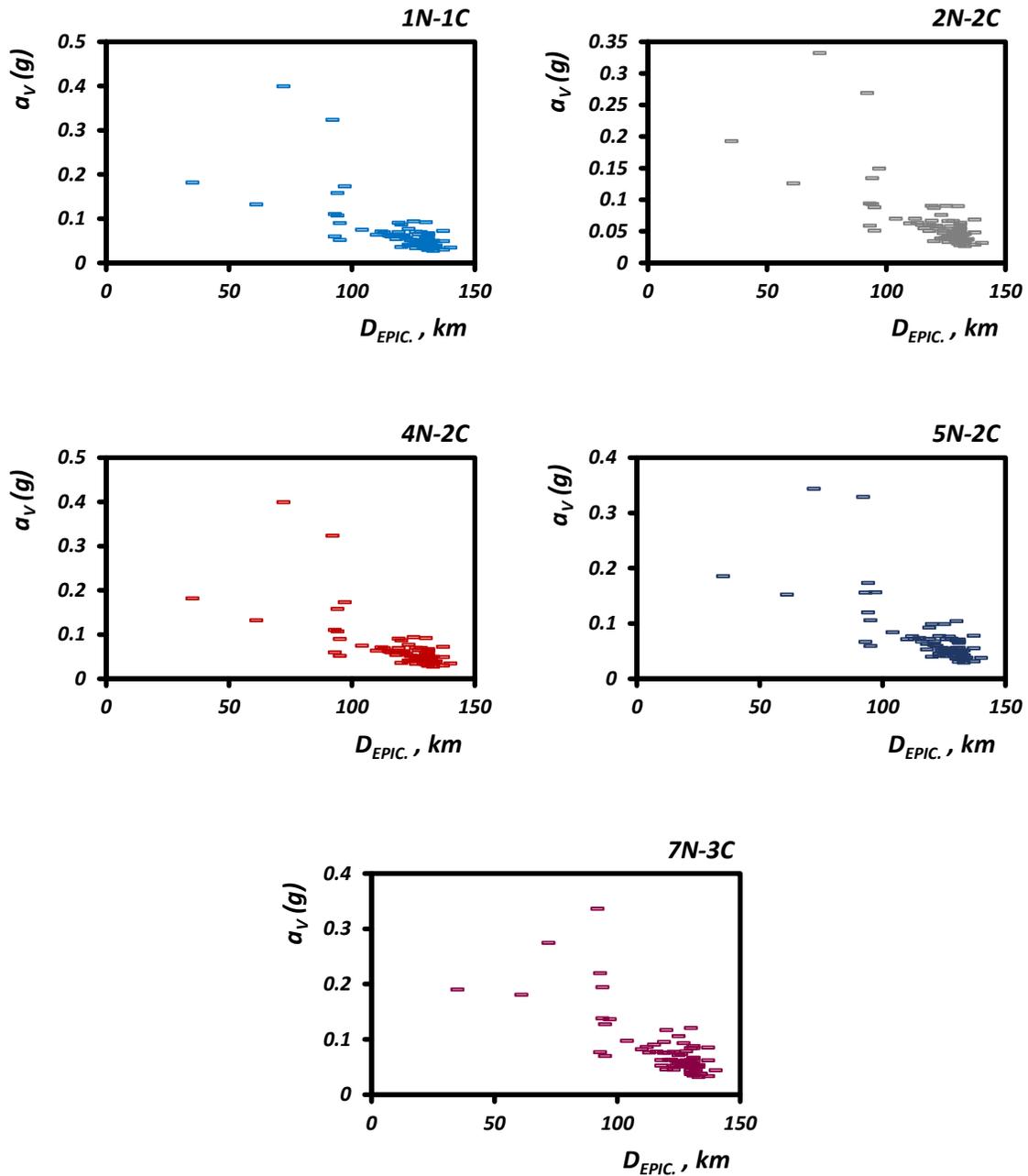


Figura IV.4.1. Razones de amplitudes de Fourier para marcos modelados

Nuevamente hay que hacer énfasis en que, estas razones o cocientes de amplitudes no necesariamente determinan el grado de exposición que tienen las estructuras, ante los efectos de la componente vertical sísmica, tal como se verá más adelante. Con base en la información desarrollada hasta ahora, es posible conocer las aceleraciones espectrales verticales actuantes en cada estructura respecto a la distancia epicentral, y tomando como referencia su periodo fundamental vertical; a través de la figura IV.4.2 se muestra lo anterior, con similitudes en cuanto a la dispersión de pseudoaceleraciones, denotando la presencia de aceleraciones verticales inferiores a  $0.1g$  para distancias epicentrales mayores a 100 km.



**Figura IV.4.2.** Aceleraciones espectrales verticales actuantes en las estructuras respecto a su distancia epicentral

En consecuencia, se obtiene lo que se ha denominado *porcentaje de amplificación*, que se refiere al incremento de las demandas accidentales por manifestación de la componente vertical sísmica. En el desarrollo de las siguientes gráficas se han contemplado únicamente las amplificaciones máximas, las cuales se presentaron en el último nivel para todas las estructuras en estudio; es decir, las columnas y vigas presentes en el nivel superior de los marcos, fueron los elementos estructurales más afectados en cuanto a



demandas internas amplificadas. Así mismo, los elementos estructurales más sensibles ante amplificaciones internas fueron aquellos que se encontraban en la zona central de cada marco para algunos casos, y en la zona lateral para otros; esto se estará detallando más adelante.

En la figura IV.4.3 se muestra la variación de la magnitud de carga a compresión, siendo en las fuerzas internas axiales donde prevalecen (en general) los porcentajes máximos de amplificación, en columnas correspondientes a la zona central de las estructuras. Por otra parte, las columnas exteriores presentaron amplificaciones importantes en cuanto a cortante y flexión, tal como se muestra en la figura IV.4.4.

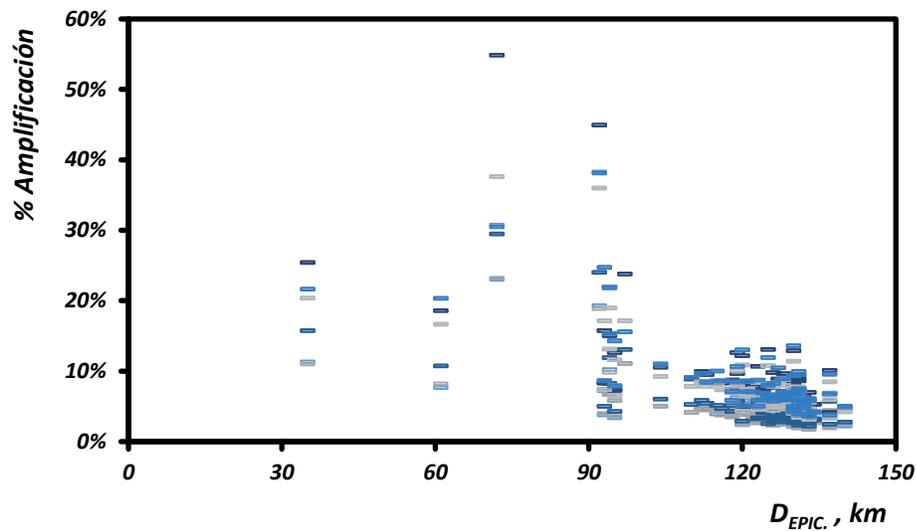


Figura IV.4.3. Variación en la amplificación de la carga axial

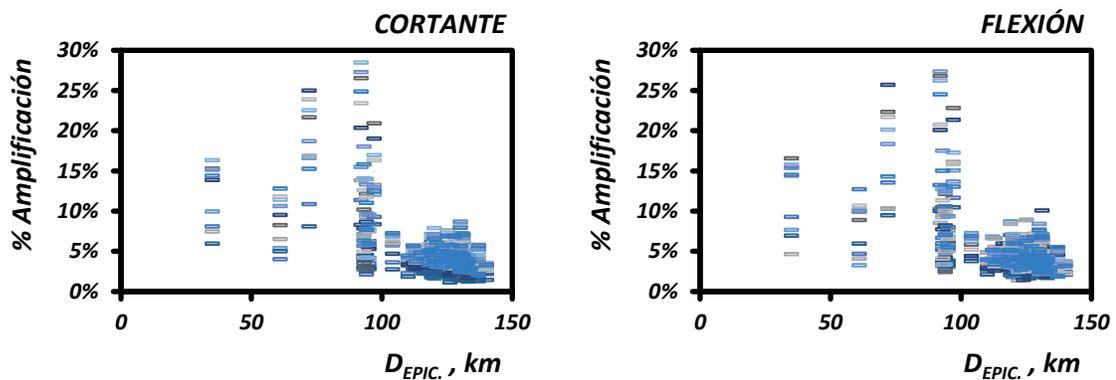
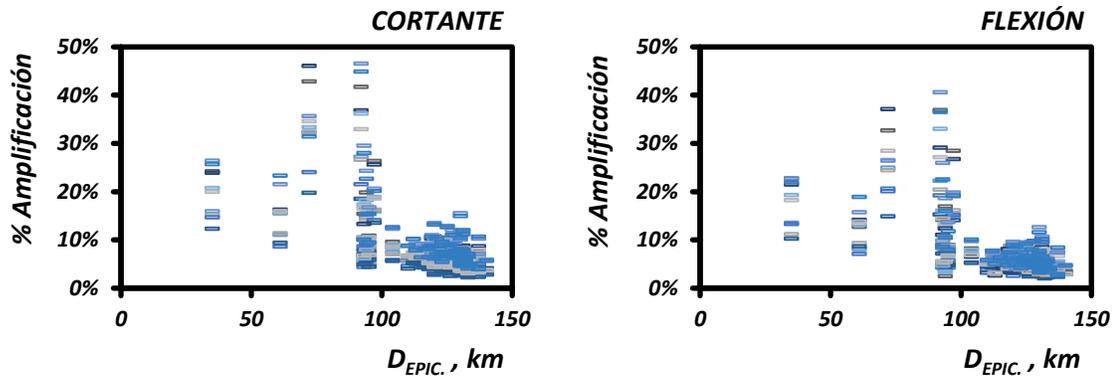


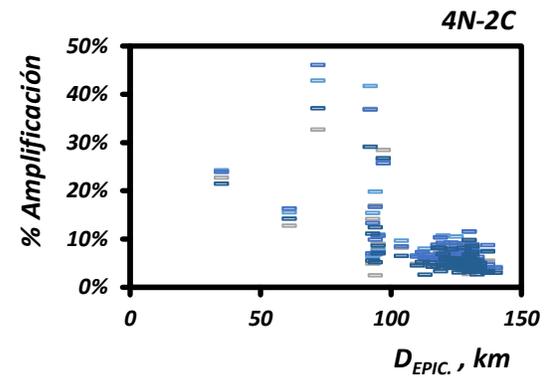
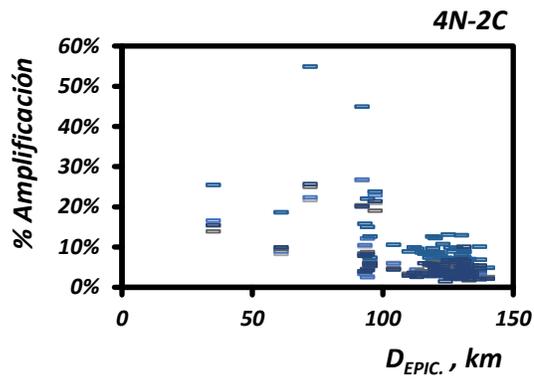
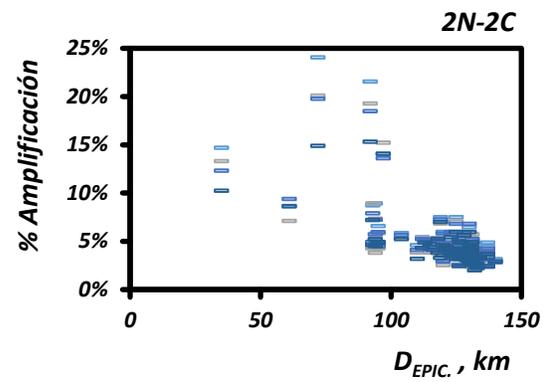
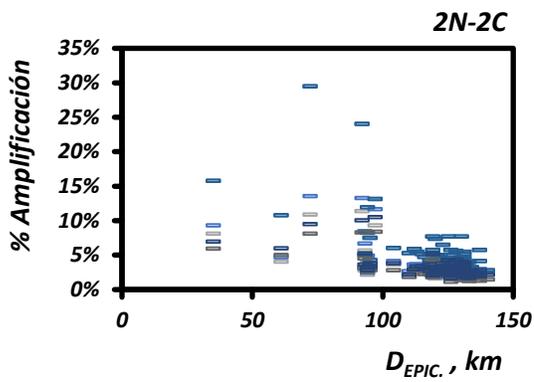
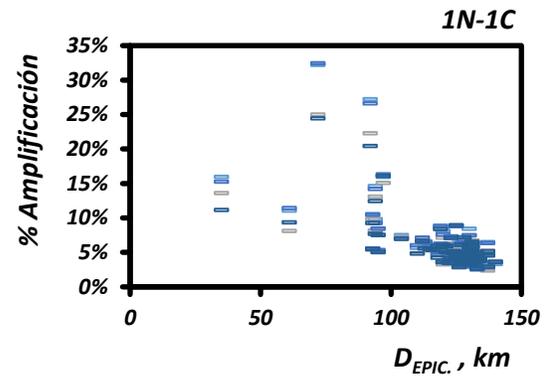
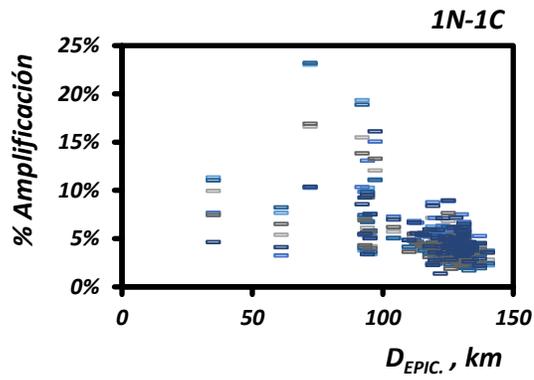
Figura IV.4.4. Variación en la amplificación de cortante y flexión en columnas

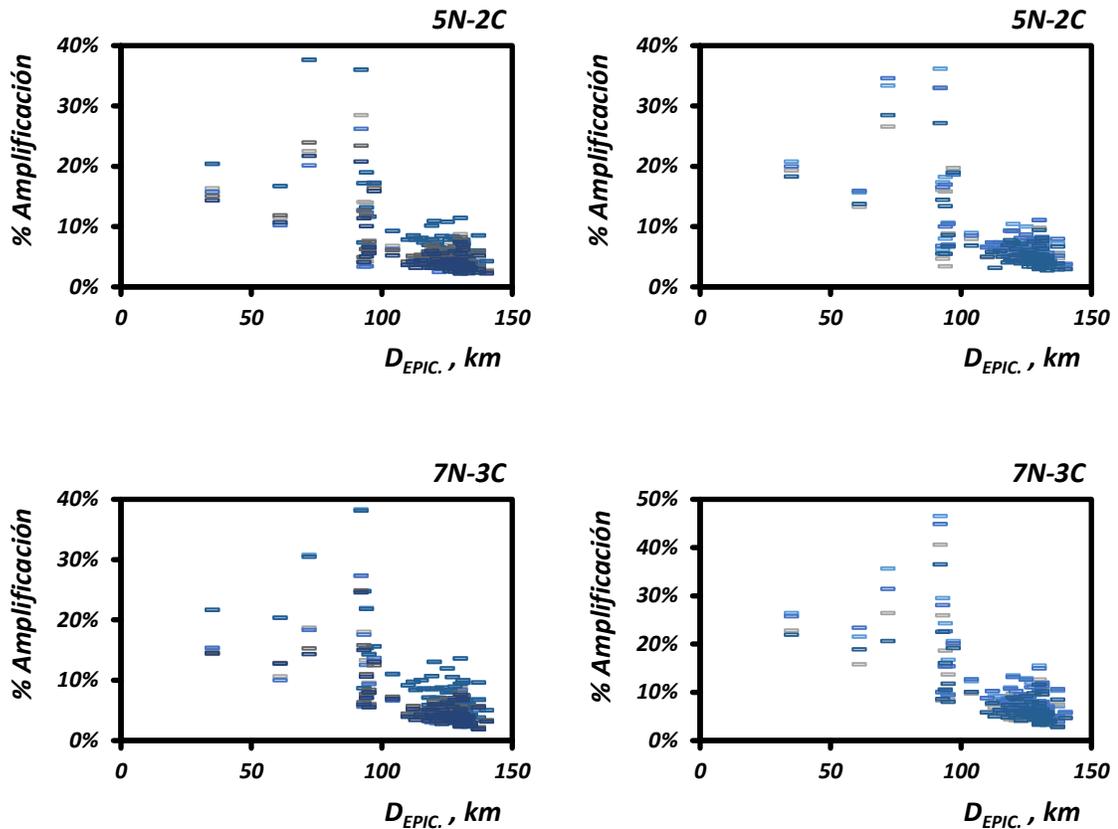
Una situación similar se presenta para las vigas, donde su amplificación fue importante en términos de cortante; sin embargo, la demanda por flexión también fue destacable para varios casos. En la figura IV.4.5 se esquematiza lo anterior, evidenciando nuevamente que la zona central de las estructuras fue sensible a mayores amplificaciones de fuerzas internas; además, esto implicaría mayor preponderancia a fallas frágiles en vigas, y a eventuales desarrollos anticipados de la ductilidad media.



**Figura IV.4.5.** Variación en la amplificación de cortante y flexión en vigas

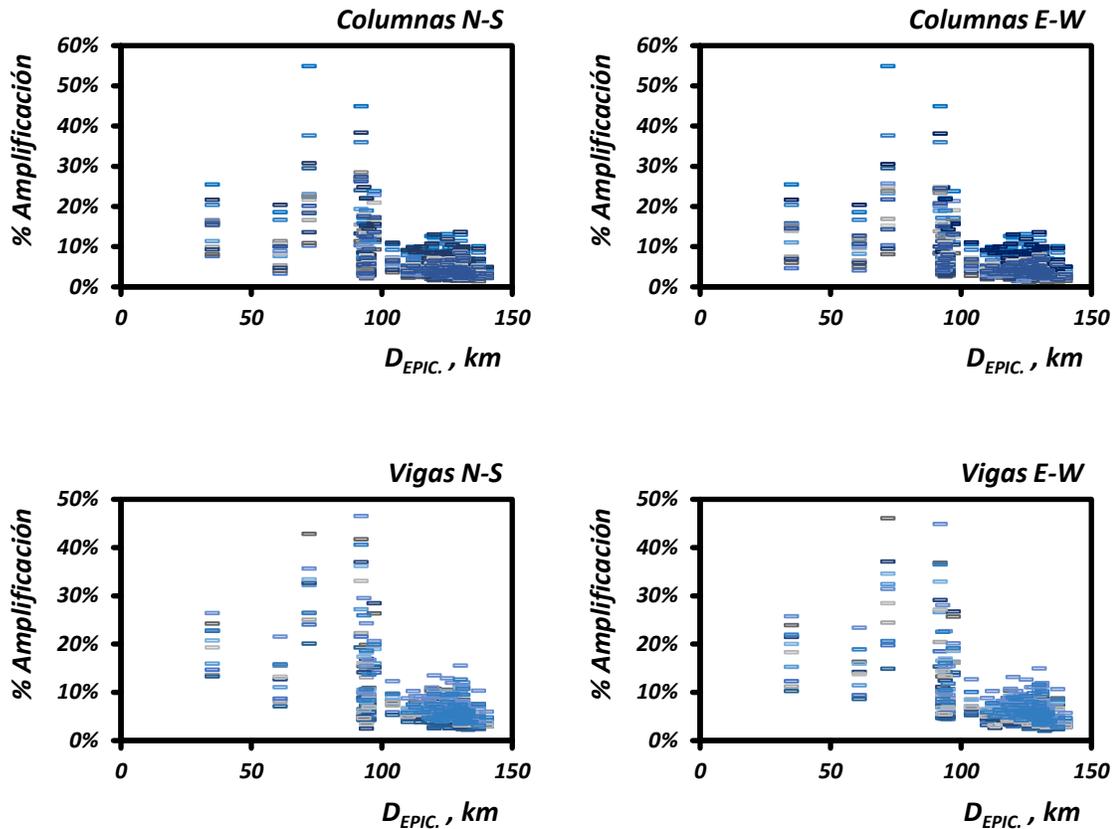
Siguiendo el mismo patrón de amplificación, la figura IV.4.6 muestra las amplificaciones clasificadas por marco modelado, y separando el comportamiento presentado en columnas y en vigas, donde las columnas de la estructura 1N-1C presentaron gran variación en sus fuerzas internas, aunque sus vigas alcanzaron valores mayores en su amplificación; no es el caso para el marco 2N-2C, donde hay cierta equivalencia en la afectación de los elementos estructurales, mientras que el mayor grado de afectación se presenta en el marco 4N-2C, cuyas amplificaciones en columnas y vigas alcanzaron los valores más sustanciales, en tanto que las estructuras 5N-2C y 7N-3C reflejaron similitudes entre ellas, siendo aún más propensas que las estructuras de uno y dos niveles, y con vigas más desfavorecidas en la estructura de 7 niveles.





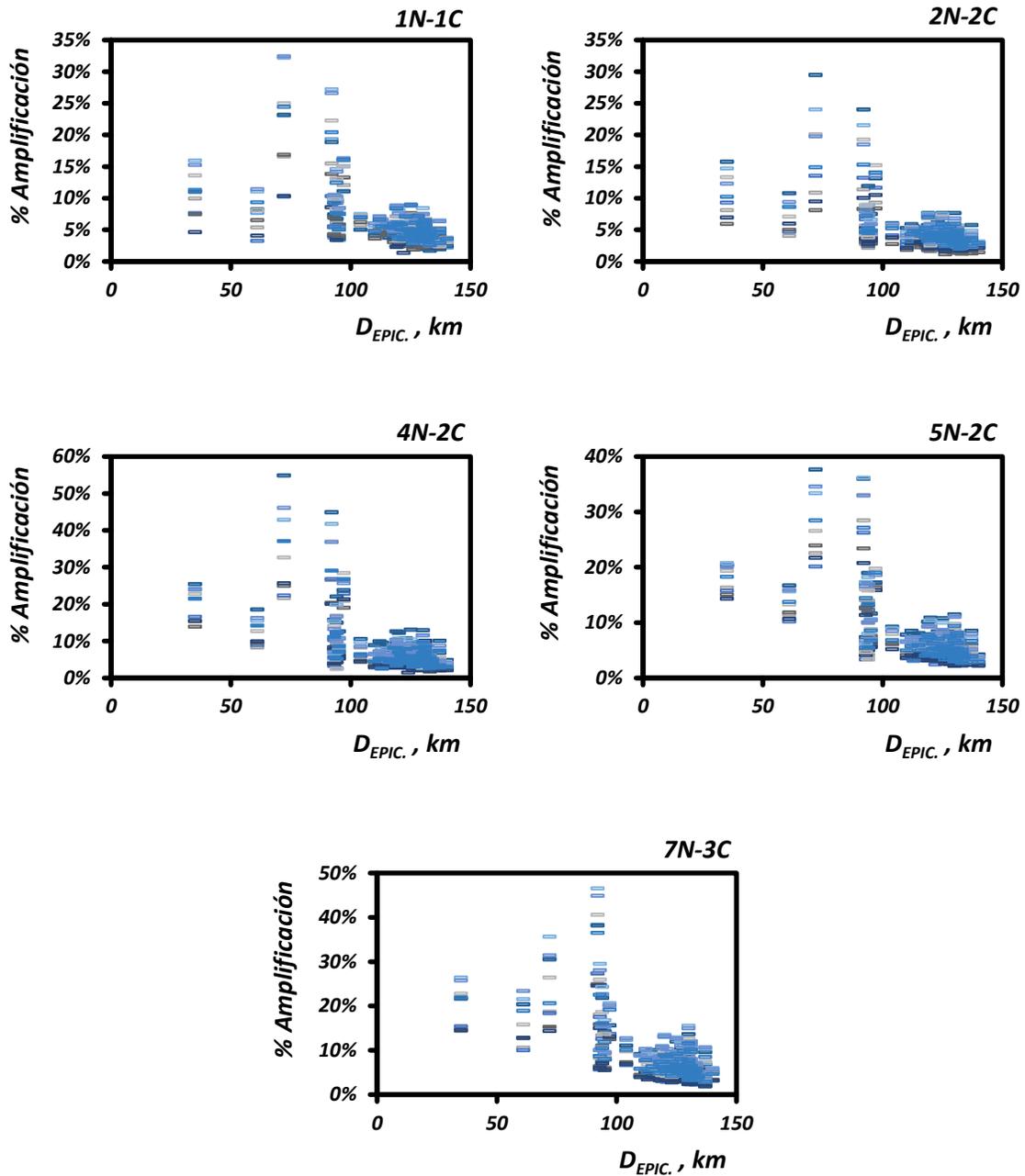
**Figura IV.4.6.** Variación de la amplificación en columnas (izquierda) y en vigas (derecha) para cada marco modelo

En cuanto a los efectos direccionales, las columnas y vigas reflejaron un comportamiento similar en su dispersión, sin diferencias apreciables, tal como se ve en la figura IV.4.7, lo cual sería indicio de que las demandas de aceleración vertical son independientes de la acción sísmica horizontal, que a su vez implica la posibilidad de que los análisis por medio de funciones de transferencia (razones de intensidad sísmica V/H) sean erróneos, ya que la amplificación es bastante similar en ambas direcciones.



**Figura IV.4.7.** Variación de la amplificación por dirección de la acción sísmica horizontal

De igual forma, la figura IV.4.8 muestra la respuesta general de amplificación para cada marco, nuevamente en función de la distancia epicentral; se observa que la variación de los porcentajes de amplificación fue mayor para distancias cortas, mientras que, para distancias epicentrales mayores a 100 km, la dispersión de los valores se mantuvo por debajo del 15%, lo cual no necesariamente es indicio de riesgo menor para las estructuras ante los efectos asociados a la componente vertical. De esta misma figura también se deduce que el marco 4N-2C resultó más afectado, al haber presentado tendencia hacia amplificaciones mayores, seguido por el marco 7N-3C y 5N-2C; no hay que menospreciar las amplificaciones que se presentaron en los marcos 1N-1C y 2N-2C.



**Figura IV.4.8.** Respuesta general de cada marco en términos de amplificación de sus acciones internas

Visto de forma más sintetizada y específica, se contemplan intervalos de amplificaciones respecto a cada tipo de fuerzas internas que se presentaron en cada marco. A través de la figura IV.4.9 se representa lo anterior, para lo cual de a) es evidente que la carga axial afectó prioritariamente al marco 4N-2C, con amplificaciones que se extienden hasta el 55%, y con una situación por igual crítica para los marcos 7N-3C y 5N-2C, seguido de los marcos 2N-2C y 1N-1C; una situación diferente se esquematiza en b) respec-



to al cortante en columnas, que afectó de manera relativamente equitativa a los marcos de 4, 5 y 7 niveles, al presentar similitudes en sus valores de amplificación, y siendo la estructura 2N-2C la menos afectada por dicho mecanismo, mientras que para c) el momento flexionante en columnas provocó amplificaciones similares a las producidas por cortante.

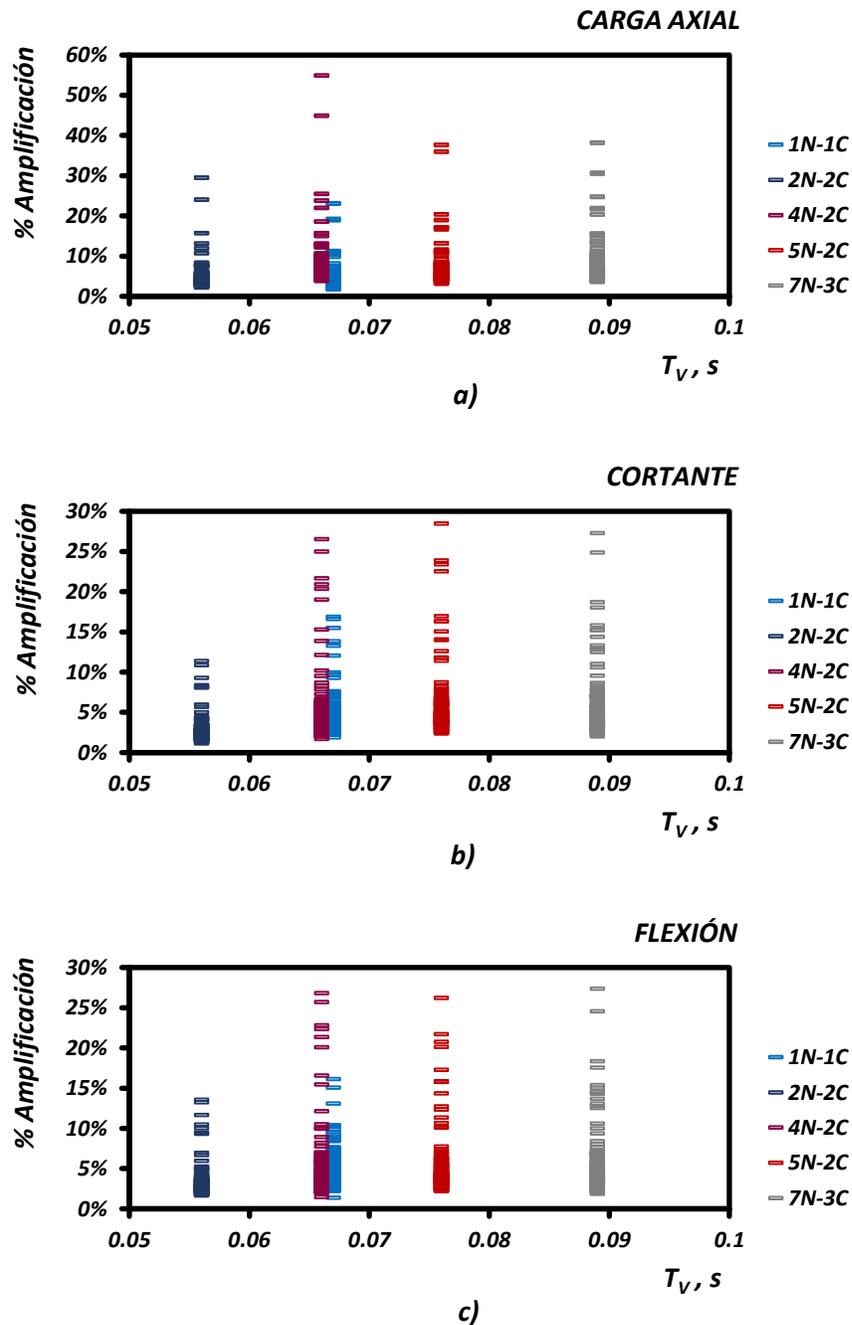
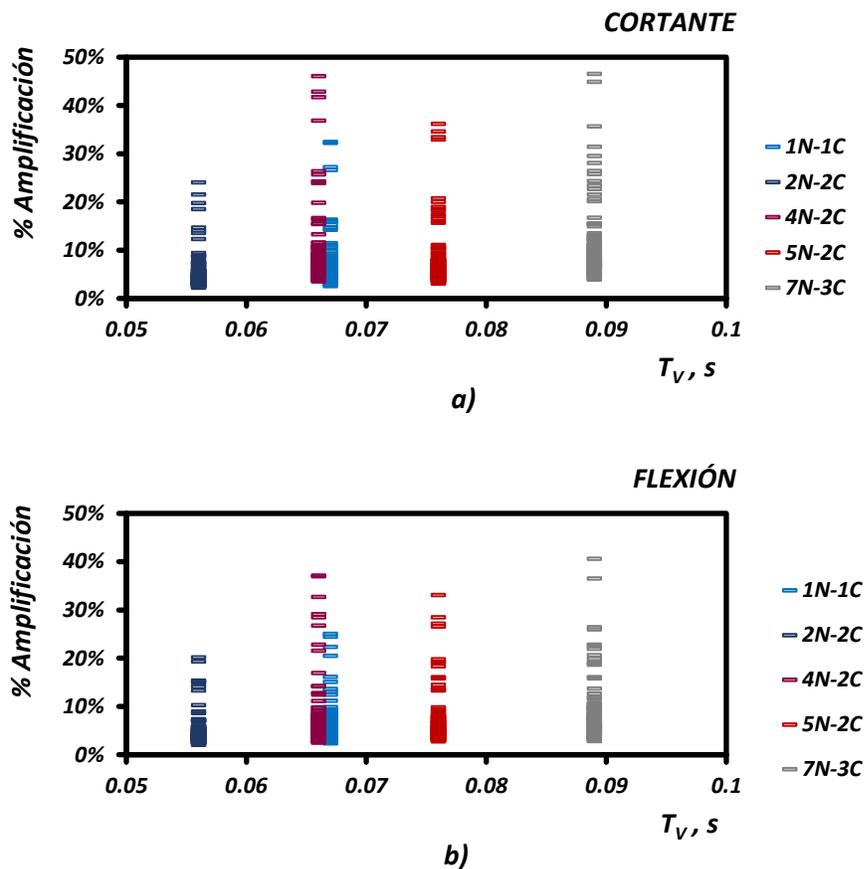


Figura IV.4.9. Rangos de amplificaciones de los elementos mecánicos en columnas

De manera análoga, en la figura IV.4.10 se visualizan los intervalos de amplificación para vigas, en donde se percibe lo siguiente: para a) los marcos 7N-3C y 4N-2C fueron los más afectados por cortante en sus vigas, seguidos por las estructuras 5N-2C y 1N-1C, siendo el marco 2N-2C el menos afectado, aunque con amplificaciones cercanas al 25%; en el caso del momento flexionante, de b) los intervalos son similares a los presentados por cortante, pero con valores máximos ligeramente reducidos, siendo nuevamente la estructura 7N-3C la más afectada en sus vigas, y la estructura 2N-2C la menos afectada. Con esto nuevamente se reitera la predisposición de las vigas a fallas frágiles, y/o a rebases de la ductilidad media.



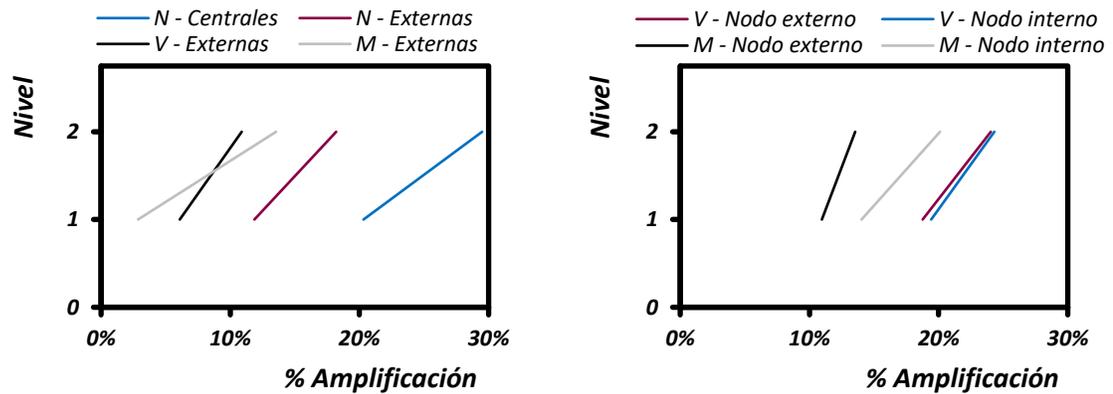
**Figura IV.4.10.** Rangos de amplificaciones de los elementos mecánicos en vigas

A nivel global, se observa la amplificación de fuerzas internas en todos los niveles de las estructuras. A continuación, se muestran las gráficas que representan la amplificación acontecida en cada nivel, y haciendo distinción entre elementos estructurales en la zona central y la zona lateral de los marcos modelados. Aunque este comportamiento fue sustancialmente observable sólo para ciertos registros de aceleración, es importante notar que la amplificación máxima se presentó para el último nivel en todas las estructuras,

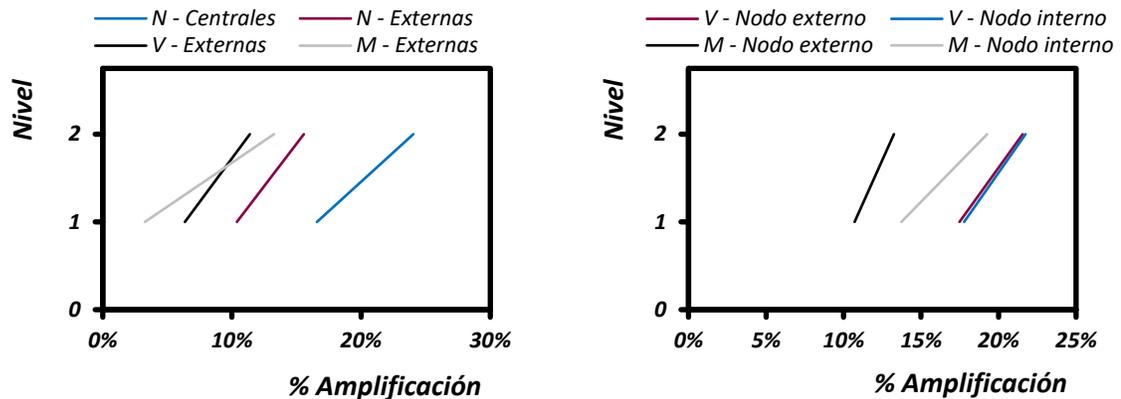


y fue decreciente hacia niveles inferiores, sin que ello implicara que su amplificación fuera despreciable; en algunos casos los elementos estructurales ubicados en la zona central fueron más afectados, mientras que para otros los más afectados estuvieron en la zona lateral o externa, lo cual se detallará a continuación.

Para el caso de la estructura 2N-2C, de la figura IV.4.11, las amplificaciones mayores de carga axial se presentaron para columnas centrales, seguido por las columnas externas, mientras que en términos de cortante y flexión las columnas centrales no presentaron amplificaciones, y sólo se vieron reflejadas amplificaciones en columnas externas; en el caso de las vigas, el cortante tuvo la mayor relevancia en sus nodos externo e interno (amplificación similar sobre nodos extremos de cada viga), y el momento flexionante fue mayormente amplificado sobre nodos internos (nodos al centro de la estructura). Se presentan las situaciones descritas para dos estaciones de registro.



a) Para el registro de la estación YAIG

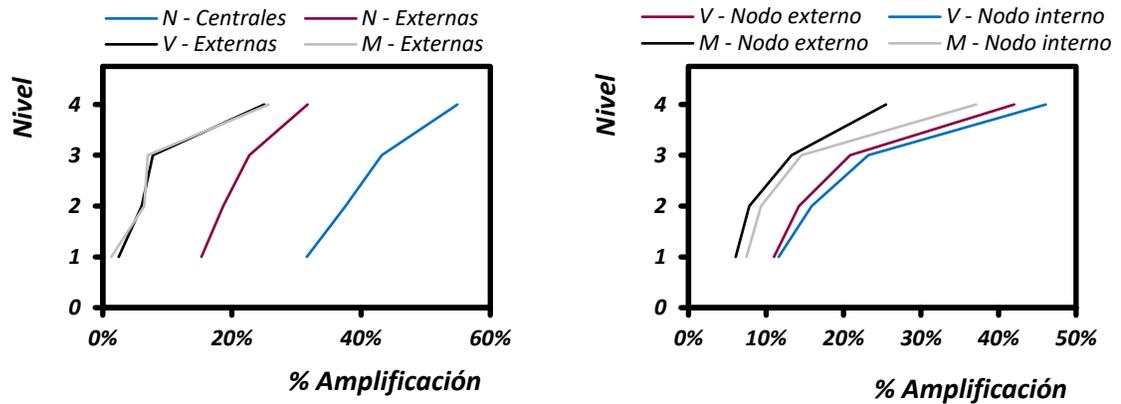


b) Para el registro de la estación SXPU

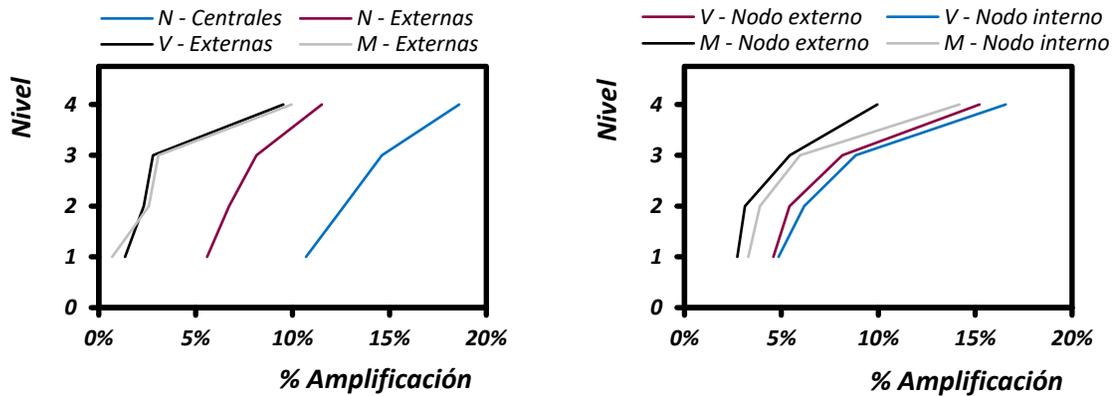
Figura IV.4.11. Amplificación valorada por nivel del marco 2N-2C, en columnas (izquierda) y en vigas (derecha)



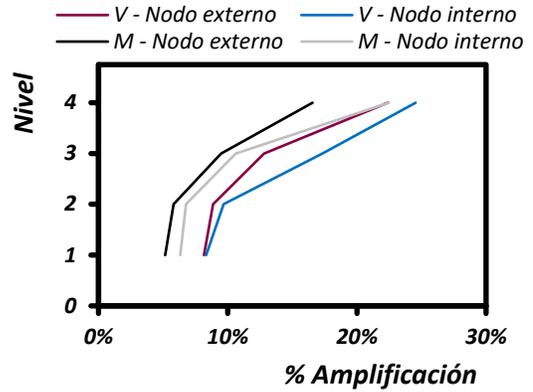
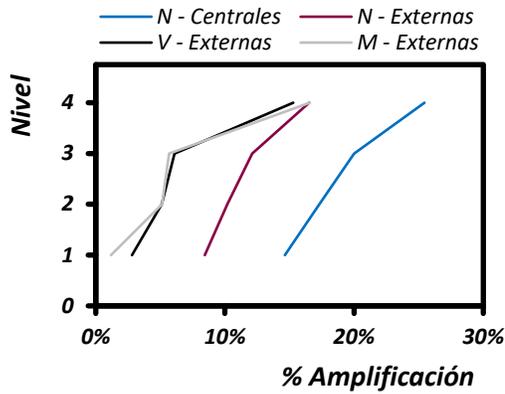
Para el caso de la estructura 4N-2C, en la figura IV.4.12 se observan ciertas semejanzas en las amplificaciones presentadas por nivel, teniendo nuevamente en columnas centrales los mayores valores de carga axial amplificada, y con amplificación de demandas por cortante y flexión sólo en columnas externas (sin cambios en columnas centrales); en el caso de las vigas, los porcentajes se atenuaron drásticamente hacia niveles inferiores, tanto para cortante como para momento flexionante, teniendo las más altas demandas de dichos elementos mecánicos en nodos internos (zona central de la estructura). Se presentan las situaciones descritas en este párrafo para seis casos relevantes de estaciones de registro.



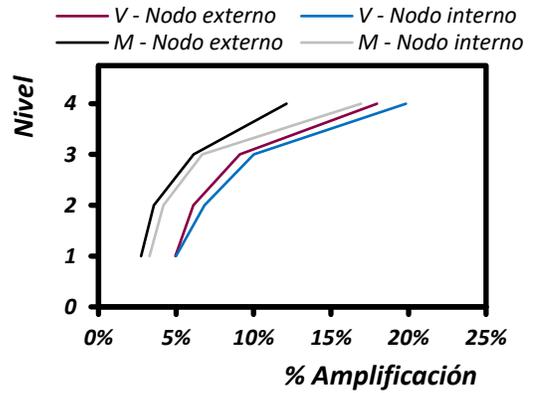
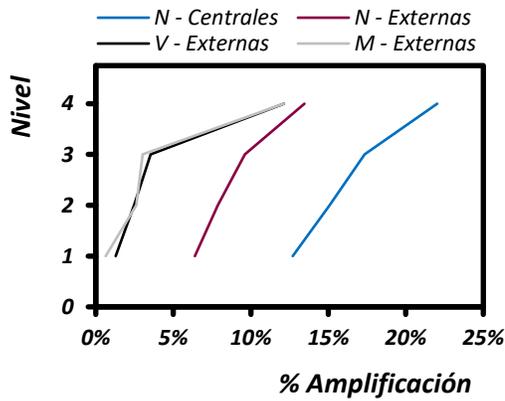
a) Para el registro de la estación YAIG



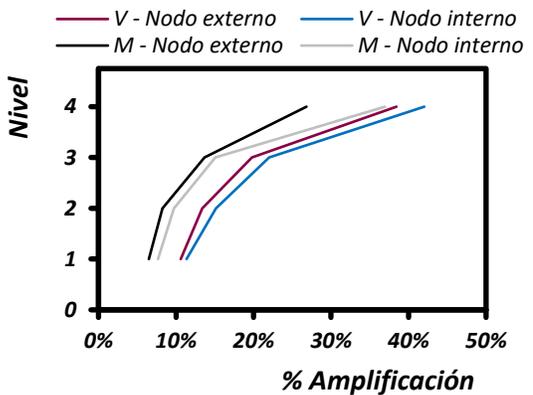
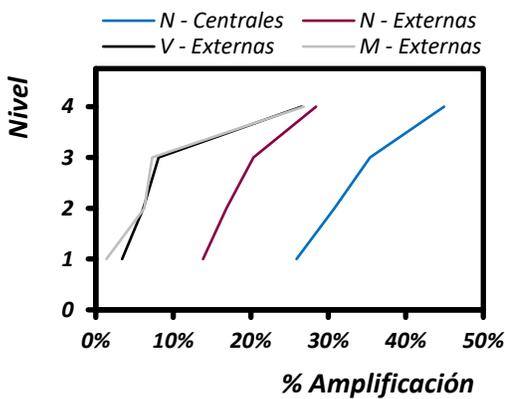
b) Para el registro de la estación HMTT



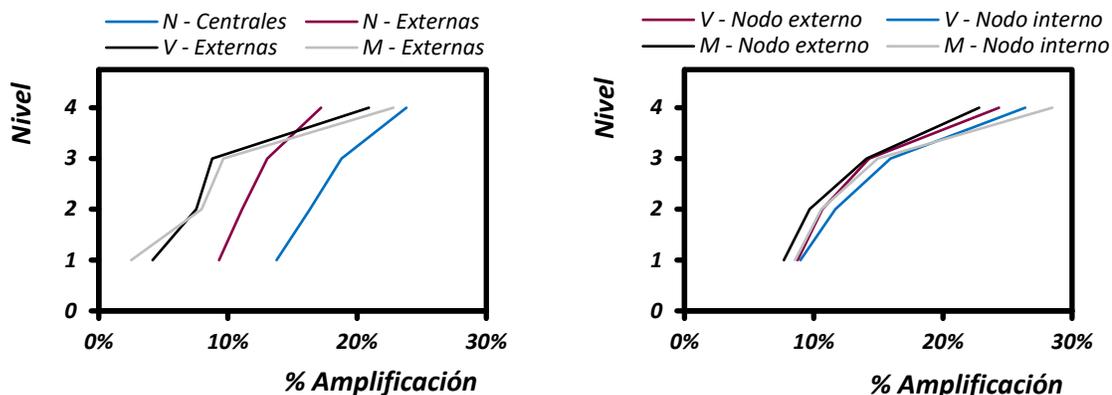
c) Para el registro de la estación RABO



d) Para el registro de la estación RFPP



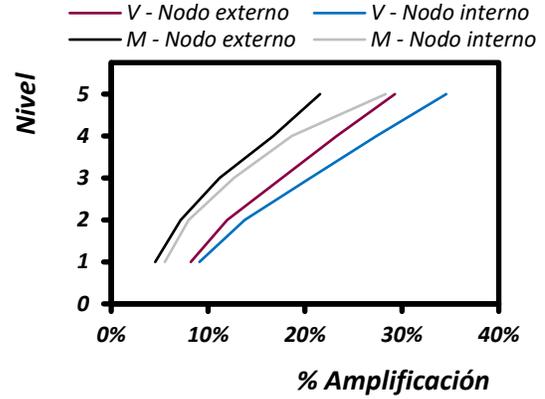
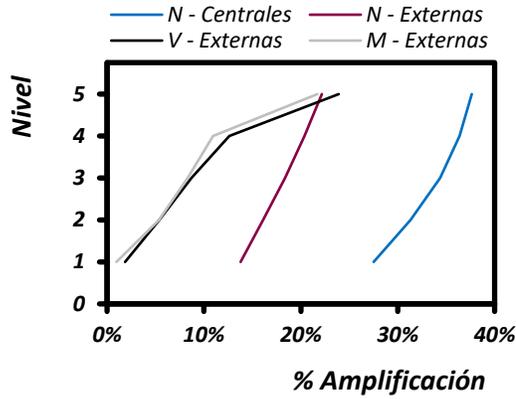
e) Para el registro de la estación SXPU



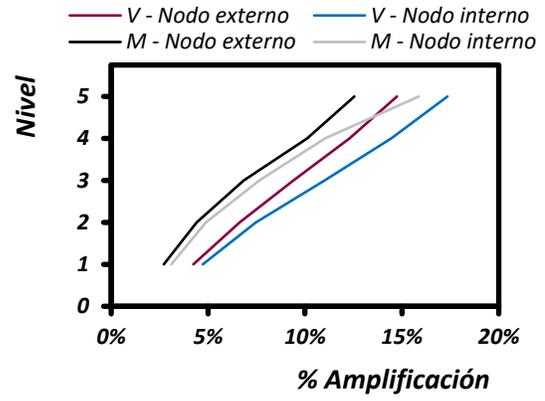
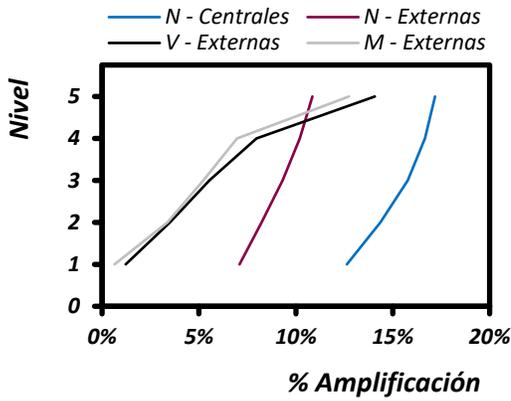
f) Para el registro de la estación TNLP

**Figura IV.4.12.** Amplificación valorada por nivel del marco 4N-2C, en columnas (izquierda) y en vigas (derecha)

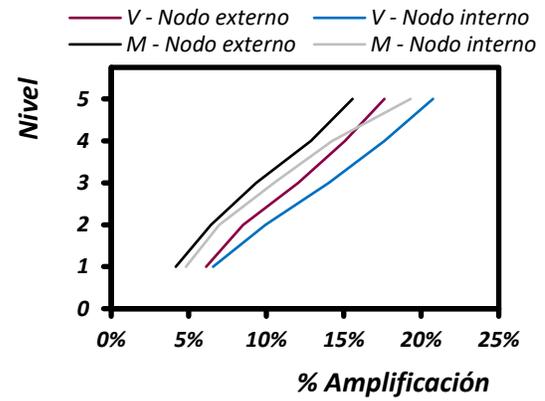
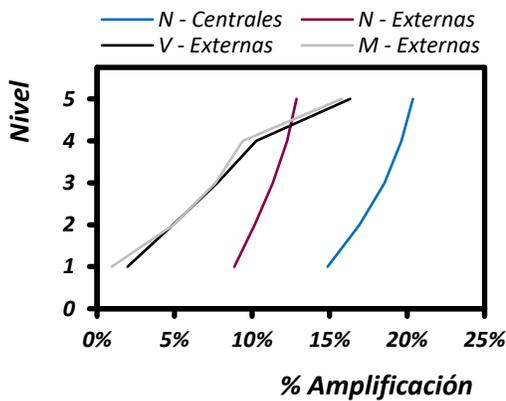
Respecto al marco 5N-2C, en la figura IV.4.13 también se observan semejanzas en los porcentajes de amplificación, con curvas similares a las presentadas para la estructura 4N-2C; es decir, nuevamente las columnas centrales presentaron mayores amplificaciones (comparadas con las columnas externas) en términos de carga axial, mientras que el cortante y la flexión tuvieron amplificaciones considerablemente despreciables para columnas externas del primer nivel, sin amplificaciones en columnas centrales de todos los niveles. En el caso de las vigas, persiste la relativa uniformidad con dependencia casi lineal en ambos mecanismos, afectando más a nodos internos que a externos. Se presentan por igual seis casos relevantes de estaciones de registro sísmico.



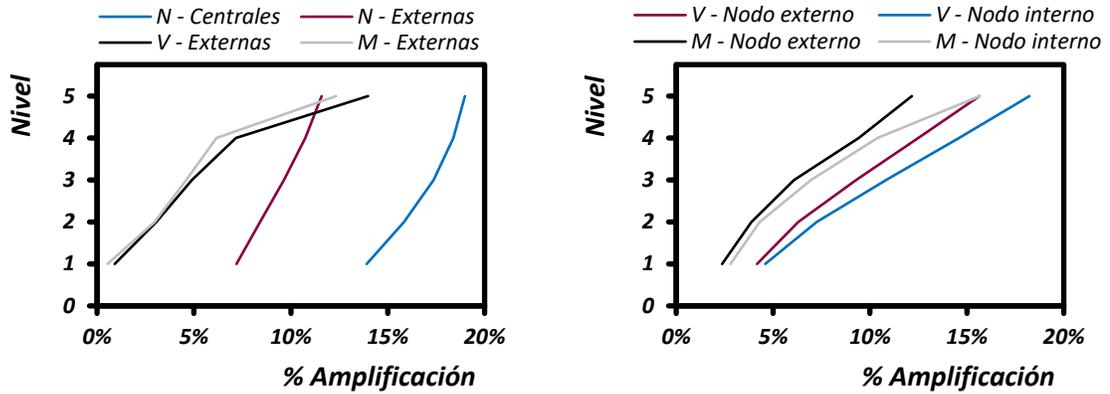
a) Para el registro de la estación YAIG



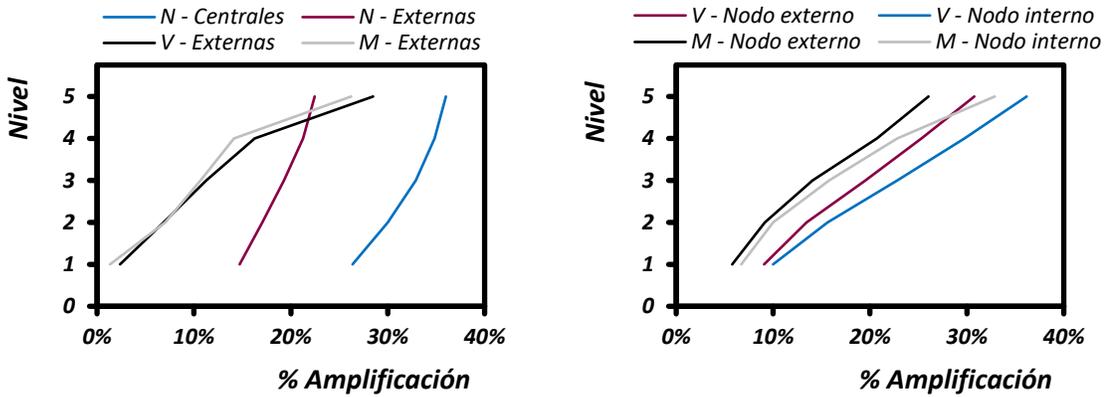
b) Para el registro de la estación PBP2



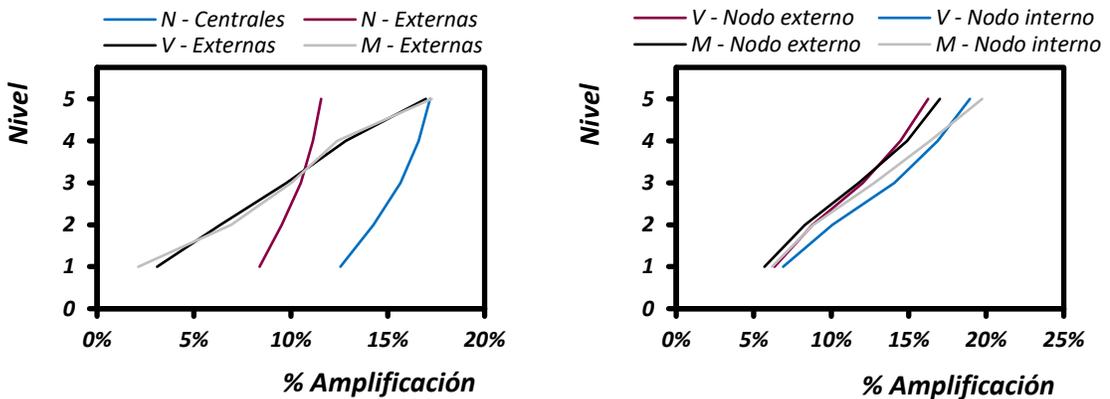
c) Para el registro de la estación RABO



d) Para el registro de la estación RFPP



e) Para el registro de la estación SXP



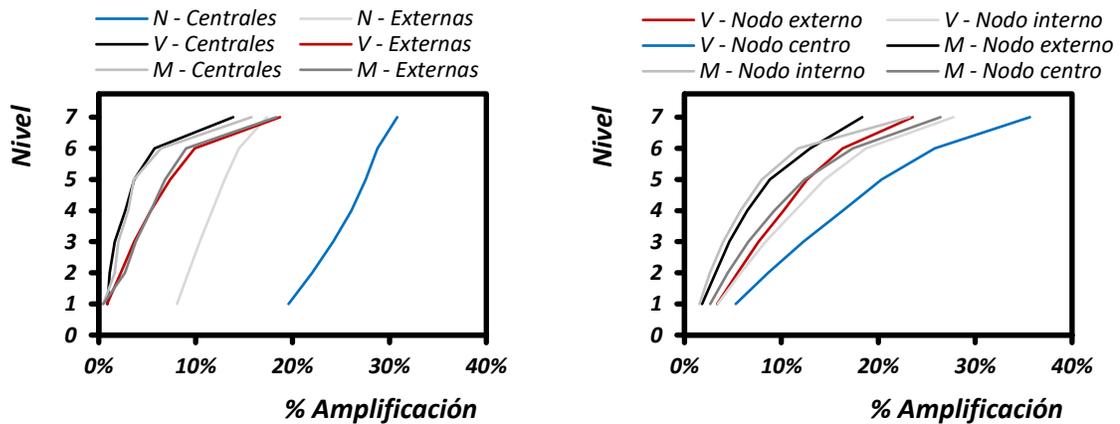
f) Para el registro de la estación TNLP

Figura IV.4.13. Amplificación valorada por nivel del marco 5N-2C, en columnas (izquierda) y en vigas (derecha)

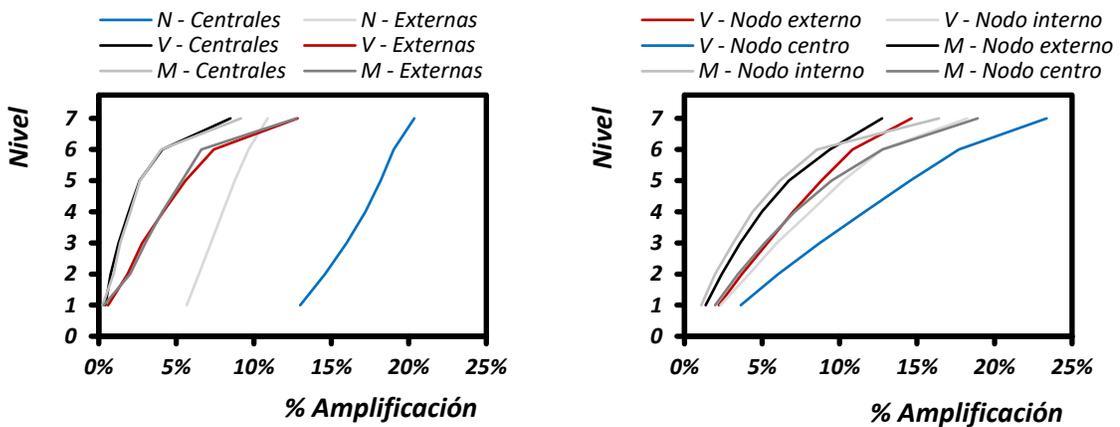


Por otra parte, en la figura IV.4.14 se muestran las curvas correspondientes a la estructura 7N-3C, donde se reafirma la idea de que las columnas centrales fueron los elementos estructurales más afectados, al presentar las mayores amplificaciones de su carga axial; en contraste, las columnas externas experimentaron mayores amplificaciones en términos de cortante y flexión, pero con porcentajes mayormente apreciables a nivel de azotea, siendo las columnas centrales los elementos menos afectados por estos mismos mecanismos. En cuanto a las vigas, se observa ligera atenuación de las amplificaciones hacia los niveles inferiores, con valores mayores predominantes sobre nodos en la zona central, siendo el cortante el mecanismo más desfavorable.

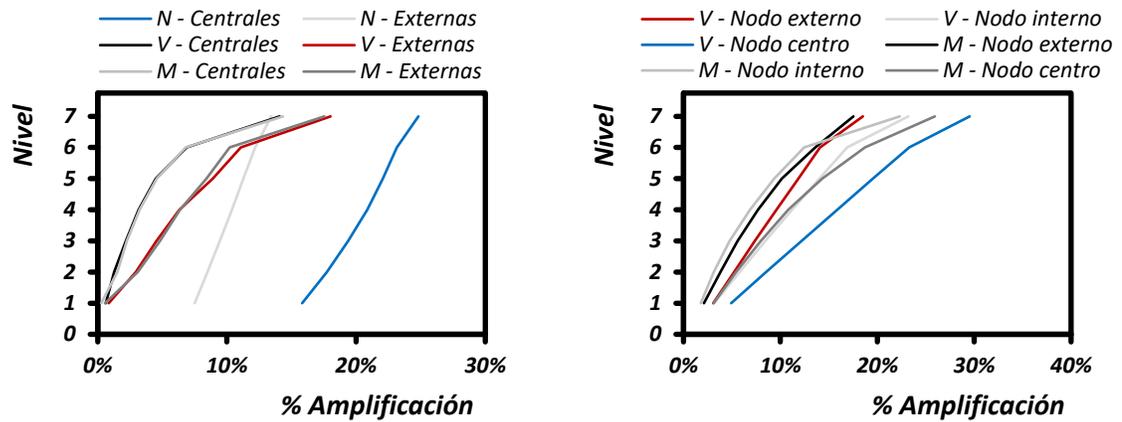
De esta misma figura, entiéndase como “nodo interno” a los nodos extremos de la viga central, y como “nodo externo” y “nodo centro” a los nodos extremos de la viga lateral o externa. Se presentan los aspectos descritos anteriormente para seis casos relevantes de estaciones de registro sísmico.



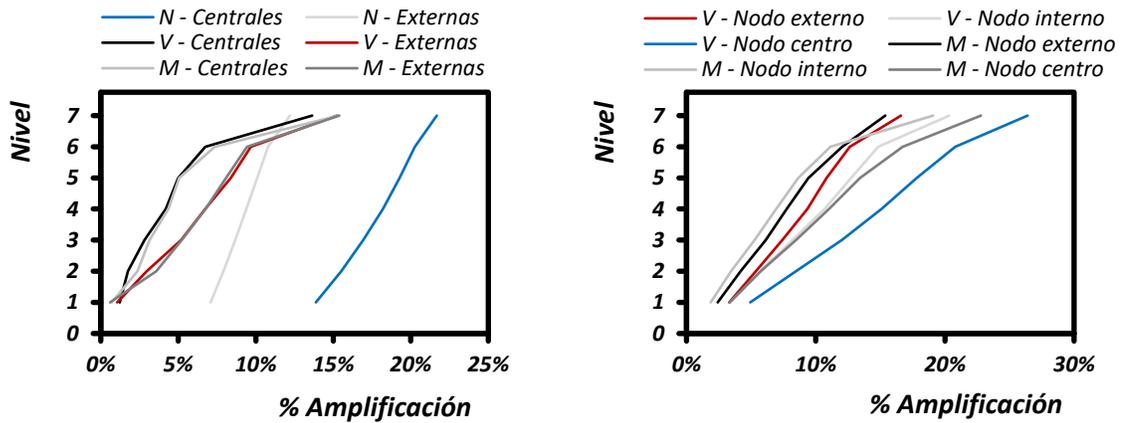
a) Para el registro de la estación YAIG



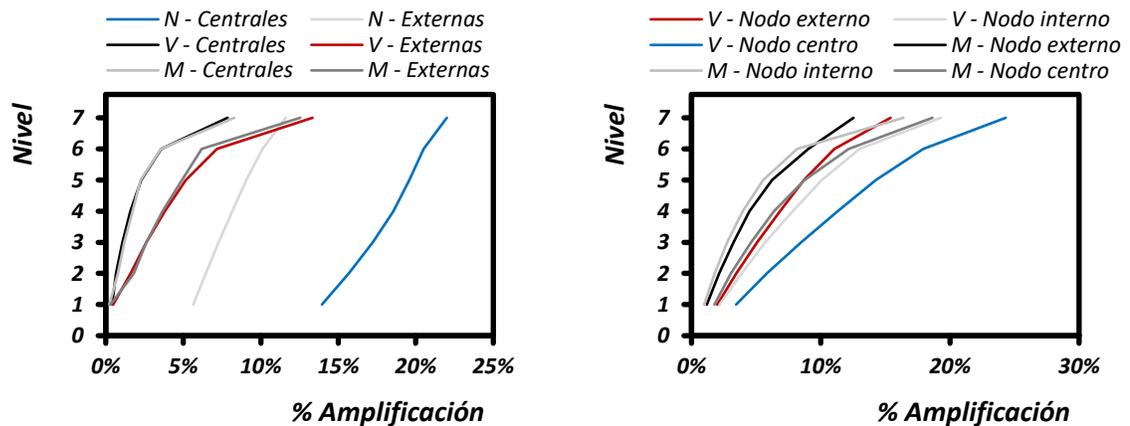
b) Para el registro de la estación HMTT



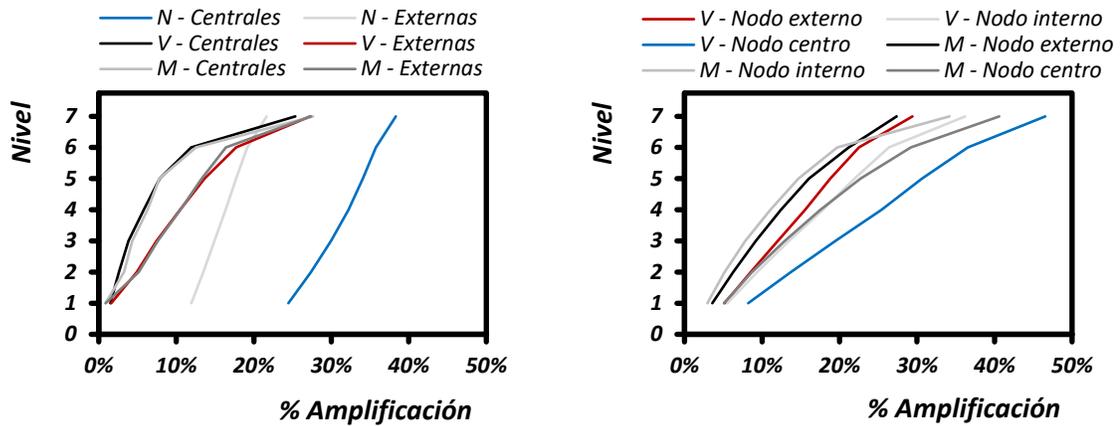
c) Para el registro de la estación PBP2



d) Para el registro de la estación RABO



e) Para el registro de la estación RFPP



f) Para el registro de la estación SXPU

Figura IV.4.14. Amplificación valorada por nivel del marco 7N-3C, en columnas (izquierda) y en vigas (derecha)

Aunque fueron pocos los registros que permitieron observar el comportamiento de las amplificaciones que ocurrieron en niveles inferiores, estas curvas permiten dar una idea simplificada de lo que ocurriría en general, para una amplificación máxima esperada en azotea, y determinar su atenuación aproximada conforme al número de niveles en la estructura, con el fin de obtener las amplificaciones más desfavorables predominantes en el diseño global ante demandas sísmicas.

Lo anterior también denota la estabilidad que poseen los niveles inferiores ante excitaciones dinámicas verticales, gracias al soporte superior del resto de la estructura, que restringe en mayor medida la libertad con la que vibran estos mismos niveles, provocando menor aportación de carga sísmica en dirección vertical; a diferencia del nivel de azotea, que no tiene soporte estructural superior que restrinja sus vibraciones verticales, por lo que hay mayores amplificaciones.



### IV.5. Tendencia de la respuesta estructural

Con el conjunto previamente determinado para ampliificaciones, se define otro conjunto de datos para determinar la *ampliificación esperada* o *ampliificación media*, a partir de la aceleración espectral vertical actuante, dependiente del periodo vertical fundamental. Siendo así, resulta necesario clasificar de acuerdo con el mecanismo y tipo de elemento estructural. En la figura IV.5.1 se establecen las ampliificaciones de carga axial en las columnas de cada marco analizado previamente, donde es posible asumir la dependencia como lineal para todas las estructuras, aunque esta tendencia difiere en su pendiente para cada estructura; por decir, en la estructura 1N-1C se tiene la pendiente menor, contrastando con la pendiente mayor presente en el marco 4N-2C, a pesar de que ambas fueron sometidas al mismo grupo de aceleraciones, y sus periodos verticales fundamentales son prácticamente idénticos, pero por otro lado la ampliificación de la carga axial en columnas de las estructuras 5N-2C y 7N-3C tuvo la misma tendencia, aunque dichas estructuras difieren en sus periodos verticales fundamentales.

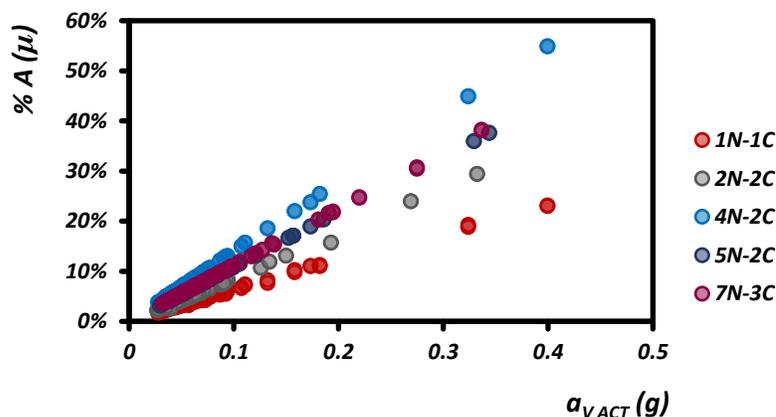


Figura IV.5.1. Amplificaciones esperadas en columnas a compresión

Para el cortante en columnas se tiene la figura IV.5.2, que presenta gran bifurcación de las ampliificaciones esperadas, por lo que tampoco es posible inferir una prospección única para todos los marcos, pues cada uno de ellos refleja tendencias diferentes entre sí. Sin embargo, es aplicable el mismo principio propuesto previamente para determinar las ampliificaciones esperadas, dada una aceleración vertical actuante; también cabe mencionar que se esperaría menor acción del cortante para columnas en estructuras del tipo dos niveles con dos crujías, tal como se ve en esta misma gráfica.

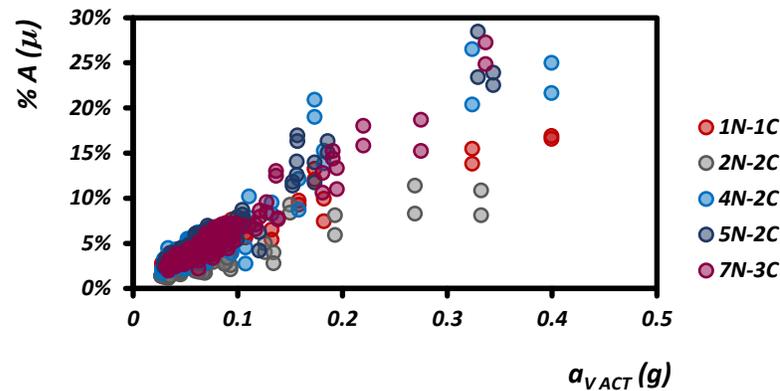


Figura IV.5.2. Amplificaciones esperadas en columnas a cortante

En cuanto al momento flexionante en columnas se tiene la figura IV.5.3, donde la bifurcación de las amplificaciones esperadas es aún mayor, incluso en el intervalo de aceleraciones verticales actuantes por debajo de 0.1g, sin que ello represente un problema mayor, pues aún es posible inferir la amplificación esperada a partir de una aceleración actuante determinada, para cada estructura en particular; un detalle adicional que debe destacarse es que, al igual que en el cortante, los valores máximos no cambian sustancialmente para aceleraciones verticales mayores a 0.2g, lo que indica que ciertas estructuras “entran” en un umbral de saturación de amplificaciones, donde el incremento de aceleraciones espectrales verticales actuantes no necesariamente representa un incremento de las amplificaciones. Siendo esta idea una primera suposición, deberá confirmarse a través de investigaciones posteriores con modelos más detallados.

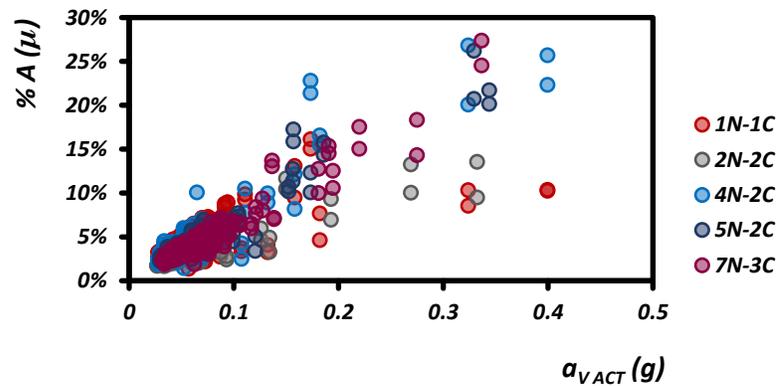


Figura IV.5.3. Amplificaciones esperadas en columnas a flexión

En la figura IV.5.4 se presentan las amplificaciones esperadas para vigas a cortante, cuya tendencia de datos mantiene cierto grado de uniformidad, asemejándose a un comportamiento lineal; también se deduce que el cortante es el mecanismo que representa la condición más crítica, con amplificaciones esperadas importantes, siendo las más desfavorables para estructuras de pequeña a mediana altura (marcos de 4, 5 y 7 niveles).

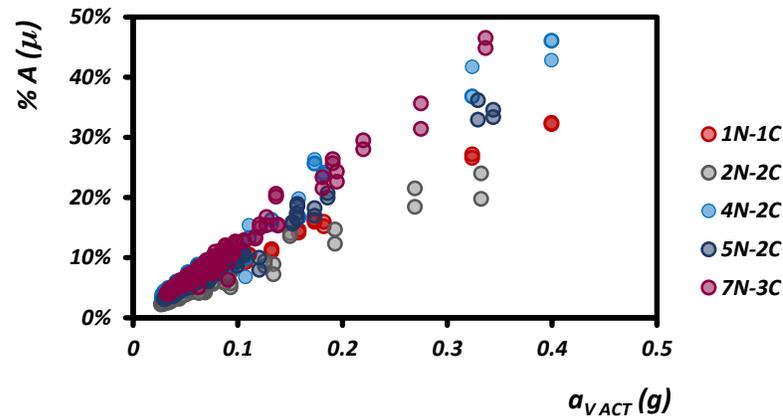


Figura IV.5.4. Amplificaciones esperadas en vigas a cortante

Por otra parte, en la figura IV.5.5 se presentan las amplificaciones esperadas por flexión en vigas, donde la dispersión nuevamente refleja saturación en el umbral de aceleraciones grandes, especialmente en los marcos de 2 y 4 niveles. Ya que las amplificaciones esperadas llegan a ser de gran magnitud, es de esperarse que el detallado de acero no sea suficiente para lograr el desarrollo adecuado para fallas dúctiles. No olvidar que el cortante es crítico para el diseño de las vigas.

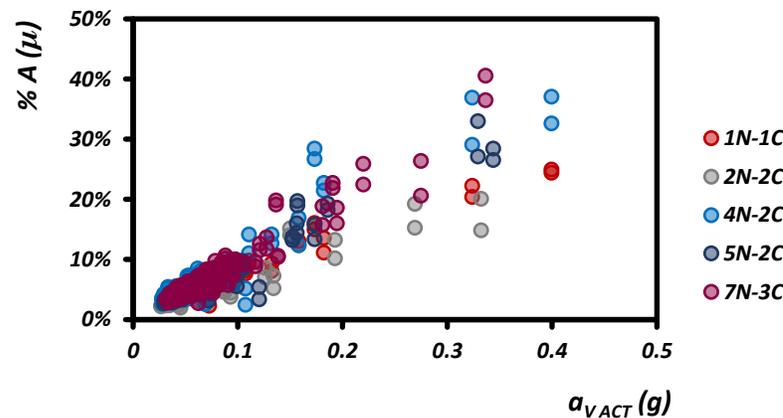
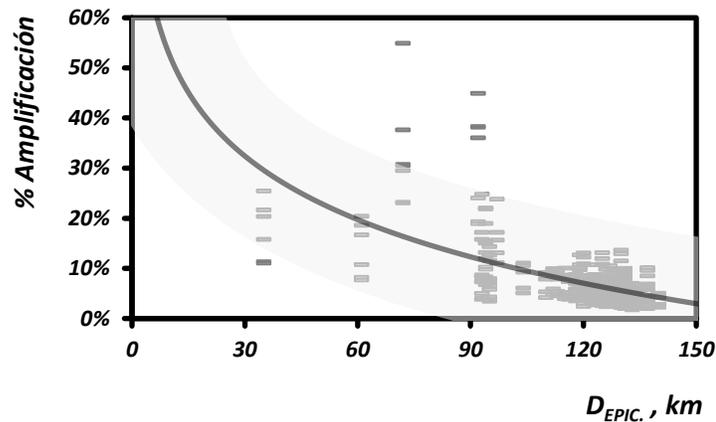


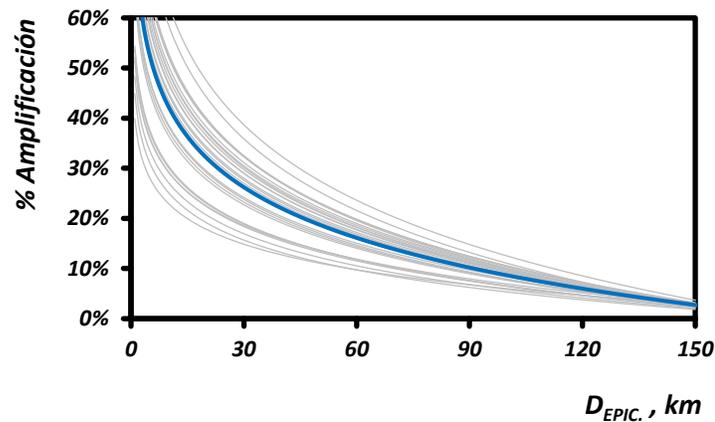
Figura IV.5.5. Amplificaciones esperadas en vigas a flexión

Volviendo a las amplificaciones máximas, al obtener todos los datos relativos a las fuerzas internas ante condiciones de amplificación, se determina la tendencia sobre el conjunto de todos los puntos graficados anteriormente. De ello se infiere una tendencia definida mediante aproximación con una regresión de carácter no lineal, asumiendo que la amplificación de las acciones internas aumenta a medida que la distancia se reduce; mediante la figura IV.5.6 se esquematiza esta regresión planteada, para las amplificaciones máximas de carga axial en función de la distancia epicentral.



**Figura IV.5.6.** Tendencia de las amplificaciones máximas en carga axial

Este tipo de regresión fue aplicada para cada conjunto de datos presentados en el subcapítulo IV.4, con el fin de reunir un conjunto de curvas de tendencia para definir la curva promedio, tal como se muestra en la figura IV.5.7, donde las amplificaciones se hacen casi nulas para distancias epicentrales superiores a los 120 km.



**Figura IV.5.7.** Curva de tendencia promedio de las amplificaciones máximas (azul), con las curvas de referencia (gris)

Por otro lado, para sismos de fuente cercana se esperaría que las amplificaciones sean superiores a las estimadas en esta tesis, aunque dicha situación estaría catalogada dentro de una probabilidad de ocurrencia muy baja. Sin embargo, es necesario aclarar que la regresión no resulta adecuada con los datos obtenidos para cubrir todas las amplificaciones máximas posibles, destacando que hay regiones de las cuales no se tiene información para asumir con certeza la valoración de las aceleraciones espectrales, tanto para la componente vertical como para la horizontal.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta tesis se trataron modelos de distintos marcos planos de concreto reforzado, en virtud de su respuesta dinámica vertical, idealizada por medio de la discretización de su masa, ante condiciones accidentales por eventos singulares como el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017 en México, que exhibió intensidades sísmicas importantes en direcciones horizontales y verticales, planteando la hipótesis de que la componente sísmica vertical toma relevancia en el comportamiento estructural, y altera negativamente los mecanismos de trabajo en los elementos estructurales de las edificaciones. Bajo esta premisa, los resultados anteriormente desglosados se extienden como sigue:

### V.1. Conclusiones

Al haber involucrado en la modelación el comportamiento modal vertical de los cinco marcos analizados, así como las aceleraciones verticales del terreno, las estructuras reflejaron respuestas sísmicas desfavorables, valoradas principalmente por medio de porcentajes de amplificación de las fuerzas internas, de tal forma que cuando los marcos se sometieron a la acción simultánea de las demandas sísmicas horizontales y verticales, los elementos mecánicos de vigas y columnas se incrementaron sustancialmente con respecto a la acción aislada de la componente horizontal, siendo en el último nivel (nivel de azotea) de todos los marcos donde las amplificaciones fueron máximas, en contraste con los porcentajes que fueron mínimos (mas no despreciables) en el primer nivel.

Específicamente, las columnas centrales o internas presentaron mayor amplificación en su carga a compresión, mientras que las columnas laterales o externas presentaron mayores amplificaciones en términos de cortante y flexión. Lo anterior resulta razonable, puesto que en las columnas centrales recae mayor carga tributaria; es entonces que la vibración vertical de la estructura provoca mayor susceptibilidad de dichos elementos ante carga axial. En cambio, el hecho de que las columnas externas hayan presentado mayor amplificación de cortante y flexión se debe a que, al estar soportadas lateralmente por sólo uno de sus lados, tuvieron menor capacidad para resistir desplazamientos angulares; por ende, aquellas columnas coincidentes con el eje de simetría de los marcos no presentaron amplificaciones en cortante y flexión, siendo estos los marcos de 2, 4 y 5 niveles, ya que existe soporte lateral suministrado por elementos en ambos lados de la columna, que implica que los giros solicitados en el nodo se contrarresten y favorezcan el equilibrio de columnas de este tipo.

En cuanto a las vigas, aquellas ubicadas en la proximidad de la zona central reflejaron mayores amplificaciones en mecanismos de cortante y flexión, que se explica de manera similar a lo previamente descrito para las columnas, pues la vibración modal vertical es mutua entre vigas y columnas; es decir, debido a que las columnas centrales son soporte



de dos vigas laterales, la vibración vertical de dichas vigas se transmite a través de sus masas hacia elementos en la zona central, por lo que hay mayor sensibilidad a las aceleraciones verticales en tanto mayor sea el acercamiento al eje de simetría.

Bajo estas mismas circunstancias, se observó una atenuación de las amplificaciones hacia niveles inferiores, aunque la variación no fue lineal, pero mantuvo cierta uniformidad, de modo que las amplificaciones en azotea fueron los porcentajes más representativos, que se redujeron en cada nivel intermedio hasta llegar al primer nivel, donde las amplificaciones fueron menores. Esto hace notar que los niveles inferiores son más estables ante los efectos de la componente vertical, al estar “confinados” por el soporte proporcionado por niveles superiores, que no permiten que los primeros niveles vibren verticalmente con tanta libertad, siendo el primer nivel el que se favorece de toda la restricción; a diferencia del nivel de azotea, que no cuenta con soporte estructural superior alguno que limite las amplitudes de las vibraciones verticales, por lo que su mayor respuesta estructural es consecuencia de su mayor vibración modal.

Otro aspecto destacable de los resultados es que el mecanismo de cortante fue importante, tanto en vigas como en columnas, situación que es totalmente desfavorable para la integridad de la estructura, ya que el cortante está asociado a fallas de tipo frágil; lo mismo ocurrió con la carga a compresión, que fue otro elemento mecánico representativo, lo que conlleva a pensar en fallas por aplastamiento de las mismas. Por otra parte, el momento flexionante afectó en mayor medida a las vigas, que claramente es debido a que la acción dinámica de la componente vertical es perpendicular al eje longitudinal de las vigas. Esto sugiere en conjunto que, si los elementos estructurales están reforzados para afrontar acciones laterales, el acero sería insuficiente para condiciones como las ocurridas en el sismo de interés, provocando en las edificaciones daños diversos al sobrepasarse su capacidad de diseño.

Con respecto al periodo fundamental vertical, los marcos tuvieron periodos de vibrar verticales muy bajos (menores a 0.1 s), lo que derivó en mayor predisposición de este tipo de estructuras a interactuar con aceleraciones espectrales verticales más altas, por encontrarse en el umbral de periodos cortos, con valores mayores para distancias epicentrales menores a 100 km. Si bien hubo aceleraciones espectrales considerables para distancias mayores, estas sólo ocurrieron para periodos de vibrar superiores a los periodos fundamentales verticales de los marcos modelados, por lo que las amplificaciones fueron menores al 15% a estas distancias; con ello no se descarta la posibilidad de que tales aceleraciones afecten a otras estructuras. Del mismo modo, fue posible corroborar la amenaza de la componente vertical gracias a la relación  $V/H$  en función del periodo de vibrar, usando a este parámetro sólo como mera referencia, y no como justificación absoluta, para inferir qué estructuras se encontraban fuertemente amenazadas; aunque todas presentaron amplificaciones sustanciales, los marcos 4N-2C, 5N-2C y 7N-3C revelaron en general los porcentajes más altos.



Por último, el panorama general aquí presentado indica que las disposiciones en las normativas oficiales son insuficientes respecto a la componente vertical, en cuanto a tipos y dimensiones de los elementos estructurales, pues los marcos descritos para esta investigación no presentan particularidades como vigas de gran longitud, no son irregulares ni se encuentran en condiciones críticas por la cantidad de carga que sustentan; además, la ausencia del espectro de diseño por demandas verticales es señal de que las respectivas aceleraciones espectrales han sido ignoradas casi por completo, a pesar de su capacidad para propiciar mecanismos desfavorables para la estabilidad estructural. Es por ello que se propusieron parámetros, índices y correlaciones varias para caracterizar cualitativa y cuantitativamente la respuesta del terreno y la respuesta estructural, tales como el tiempo de manifestación de los PGAv, la amplificación media o esperada, y la aceleración vertical actuante o inducida, de manera que sirvan como apoyo para justificar la relevancia de las aceleraciones verticales sísmicas sobre el comportamiento estructural, e incorporarlas en el análisis pertinente.

## ***V.2. Recomendaciones***

Es imprescindible hacer énfasis en que todos los resultados sustentados en esta tesis están basados esencialmente en marcos modelados con masa discretizada, por lo que no se descarta la posibilidad de que la propuesta deba mejorarse bajo otros criterios, de modo que los periodos de vibrar verticales sean representativos para las estructuras analizadas, y reflejen adecuadamente sus características modales, siendo esto fundamental para evaluar la respuesta estructural completa; incluso sería deseable que se lleve a cabo la calibración de modelos con apoyo de mediciones de vibración ambiental. Así mismo, resulta necesario evaluar el comportamiento de estructuras que tengan alguna irregularidad en planta o elevación, con distinto destino de piso, e incluso incorporar a la investigación otro tipo de construcciones y normatividades anteriores, pues las condiciones de carga resultarían diferentes a las de marcos simples y simétricos, con otro grado de sensibilidad ante los efectos de la componente vertical.

Por otra parte, si los resultados aquí presentados son suficientemente certeros, es preciso que las estructuras se diseñen para no incurrir en eventuales fallas de tipo frágil, que obliga a que el detallado del acero de refuerzo sea óptimo para sobrellevar las amplificaciones de fuerzas internas que se presenten, sin descuidar la filosofía de diseño viga débil – columna fuerte. He aquí también la importancia de realizar análisis del tipo no lineal, para reconocer con precisión cómo ocurre la interacción dinámica de las componentes sísmicas en el tiempo; dichos análisis también facilitan la respuesta de estructuras con cierto estado de salud estructural, por lo que extender el estudio de la componente vertical en términos no lineales resultaría favorecedor, al considerar el deterioro y/o daño acumulado presente en las estructuras.



De igual modo, debe evaluarse con sensatez la necesidad de un espectro de diseño para demandas verticales, no apresurarse a generar la envolvente como tal, sin antes percatarse de las aceleraciones espectrales verticales que verdaderamente representan una amenaza sobre las estructuras. Además, se considera bastante pertinente evitar seguir la tendencia popular de caracterizar a la componente vertical mediante el parámetro  $V/H$ , ya que este realmente no ha llevado a la convergencia de los intentos por darle un significado; al contrario, plantea sin fundamento la dependencia entre la componente horizontal y vertical, llevando de manera implícita a la suposición de que forzosamente se presentará una intensidad vertical siempre que haya una intensidad horizontal, ambas asociadas a un mismo periodo de vibrar, cuando muchos eventos sísmicos han demostrado que esto no es así. Por consiguiente, se sugiere usar dicho parámetro con cautela, y no emplearlo para generar el espectro de diseño vertical como simple modificación del espectro de diseño horizontal, sin siquiera contemplar factores característicos asociados a cada mecanismo telúrico.

Finalmente, es necesario habilitar información más profunda sobre diversos aspectos afines, tales como propiedades mecánicas particulares (*e.g.* amortiguamiento, ductilidad) de carácter vertical; calibrar el modelo de amplificación con la distancia presentado en este trabajo mediante correlaciones para fuentes finitas y propiedades estructurales inelásticas, de modo que haya compatibilidad con los modelos de atenuación existentes (verificando su actualización); reevaluar la situación actual del peligro sísmico, y tener en cuenta para ello todos los escenarios sísmicos posibles que residen en la actividad interplaca, intraplaca y en la zona del CVTM; así como dar seguimiento a la influencia de la componente vertical sobre factores singulares como deflexión en vigas, desplazamientos laterales, distorsiones, cortante basal, efectos de segundo orden, respuesta del sistema de piso y de elementos secundarios o de fachada.

## **REFERENCIAS**

- Abrahamson, N. y J. Bommer (2005). Probability and uncertainty in seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra*, vol. 21, no. 2, pp. 603-607
- ACIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Bogotá, Colombia
- ACS, Association of Caribbean States (2003). Código Modelo de Construcción para Sismos. Puerto España, Trinidad y Tobago
- Ambraseys, N. y J. Douglas (2003). Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 1-18
- Anderson, J., P. Bodin, J. Brune, J. Prince, S. Singh, R. Quaas, y M. Onate (1986). Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake, *Science*, vol. 233, no. 4768, pp. 1043-1049
- ASCE, American Society of Civil Engineers (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10. Reston, VA
- ASCE, American Society of Civil Engineers (2014). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-13. Reston, VA
- Bayona, J., G. Suárez, y M. Ordaz (2017). A probabilistic seismic hazard assessment of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico based on historical and instrumentally recorded seismicity, *Geofísica Internacional*, vol. 56., no. 1, pp. 87-101
- Bazán, E. y R. Meli (2001). *Diseño sísmico de edificios*, Ed. Limusa, Distrito Federal, México
- Bazzurro, P. y C. Cornell (2004). Nonlinear soil-site effects in probabilistic seismic-hazard analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 94, no. 6, pp. 2110-2123
- BHRC, Building and Housing Research Center (2005). Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800 (tercera edición). Teherán, Irán
- Bommer, J. (2002). Deterministic vs. probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy, *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 43-73



- Boore, D., W. Joyner, y T. Fumal (1997). Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: a summary of recent work, *Seismological Research Letters*, vol. 68, no. 1, pp. 128-153
- Bovo, M. y M. Savoia (2019). Evaluation of force fluctuations induced by vertical seismic component on reinforced concrete precast structures, *Engineering Structures*, vol. 178, pp. 70-87
- Bozorgnia, Y. y K. Campbell (2004). The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra, *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 175-207
- Cabrera, O. (2013). Incidencia de la componente vertical sísmica en el comportamiento estructural de una edificación en mampostería estructural, *Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle*, Santiago de Cali, Colombia
- Campbell, K. (1997). Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra, *Seismological Research Letters*, vol. 68, no. 1, pp. 154-179
- Carydis, P., C. Castiglioni, E. Lekkas, I. Kostaki, N. Lebesis, y A. Drei (2012). The Emilia Romagna, May 2012 earthquake sequence. The influence of the vertical earthquake component and related geoscientific and engineering aspects, *Ingegneria Sismica*, vol. 29, no. 2-3, pp. 31-58
- CEN, Comité Européen de Normalisation (2003). Design of structures for earthquake resistance – part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Bruselas, Bélgica
- CFE, Comisión Federal de Electricidad (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles – Capítulo C.1.3: Diseño por Sismo. México
- Chávez, M. y R. Castro (1988). Attenuation of modified Mercalli intensity with distance in Mexico, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 78, no. 6, pp. 1875-1884
- CIRES, Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. (2017). Registros digitales – Reporte instrumental (2017-09-19), *Boletín de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México*. México
- COVENIN, Comisión Venezolana de Normas Industriales (2001). Norma 1756-2001: Edificaciones Sismorresistentes. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela



- CPNS, Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes (2009). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación, NCSE-02. Madrid, España
- CSI, Computers and Structures, Inc. (2013). SAP2000 integrated software for structural analysis and design. Berkeley, CA
- Elfeki, M. y M. Youssef (2007). Effect of the vertical earthquake component on the seismic response of reinforced concrete moment frames. *Memorias del Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ontario, Canadá
- Esteva, L. (1968). Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico, *Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM*, México
- FEMA, Federal Emergency Management Agency (2000). NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures – part 1: Provisions, FEMA-368. Building Seismic Safety Council, Washington, D. C.
- Furumura, T. y S. Singh (2002). Regional wave propagation from Mexican subduction zone earthquakes: the attenuation functions for interplate and inslab events, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 92, no. 6, pp. 2110-2125
- Galvis, F., E. Miranda, P. Heresi, H. Dávalos, y J. Silos (2017). Preliminary statistics of collapsed buildings in Mexico City in the september 19, 2017 Puebla-Morelos earthquake. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Reporte preliminar, Universidad de Stanford, Stanford, CA
- García, D. (2006). Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central, *Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid*, Madrid, España
- García, D., S. Singh, M. Herráiz, M. Ordaz, y J. Pacheco (2005). Inslab earthquakes of Central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 95, no. 6, pp. 2272-2282
- García, L. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- GCDMX, Gobierno de la Ciudad de México (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, México
- GDF, Gobierno del Distrito Federal (2004a). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Distrito Federal, México



- GDF, Gobierno del Distrito Federal (2004b). Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Distrito Federal, México
- GDF, Gobierno del Distrito Federal (2004c). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Distrito Federal, México
- GGRO, Gobierno del Estado de Guerrero (1994). Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero. *Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guerrero*, Chilpancingo, México
- GPUE, Gobierno del Estado de Puebla (1999). Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla. *Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Puebla*, Puebla, México
- Gülerce, Z. y N. Abrahamson (2011). Site-specific design spectra for vertical ground motion, *Earthquake Spectra*, vol. 27, no. 4, pp. 1023-1047
- Guo, X., W. Chen, y J. Yu (2018). Combined effect of vertical and horizontal ground motions on failure probability of RC chimneys, *Advances in Civil Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Londres
- ICC, International Code Council, Inc. (2018). International Building Code. Country Club Hills, IL
- II-UNAM, Instituto de Ingeniería (2017a). *Mapa de intensidades 2017-09-19*, Catálogo de mapas de intensidades. UNAM, México
- II-UNAM, Instituto de Ingeniería (2017b). Registros digitales – Reporte instrumental (2017-09-19), Base de datos de registros acelerográficos, Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería, UNAM, México
- INN, Instituto Nacional de Normalización (2009). Diseño sísmico de edificios, Norma Chilena Oficial NCh-433.Of1996 (segunda edición). Santiago de Chile, Chile
- Jaimes, M. y E. Reinoso (2006). Comparación del comportamiento de edificios en el Valle de México ante sismos de subducción y de falla normal, *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, no. 75, pp. 1-22
- Jaimes, M. y J. Ruiz-García (2019). New vertical-to-horizontal ratio spectrum due to intraslab earthquakes for soft-soil sites of Mexico City, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 126, pp. 1-6



- Jennings, P. y R. Husid (1968). Collapse of yielding structures during earthquakes, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, vol. 94, no. EM5, pp. 1045-1065
- Joyner, W. y D. Boore (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 71, no. 6, pp. 2011-2038
- Kim, S., C. Holub, y A. Elnashai (2011). Analytical assessment of the effect of vertical earthquake motion on RC bridge piers, *Journal of Structural Engineering*, vol. 137, no. 2, pp. 252-260
- Kim, S., S. Kim, y C. Chang (2018). Analytical assessment of the effect of vertical ground motion on RC frames designed for gravity loads with various geometric configurations, *Advances in Civil Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Londres
- Martínez, G., R. Rojas, y R. Gaytan (2012). Efecto de la componente sísmica vertical sobre las naves de la Catedral de Morelia. Memorias del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, México. SMIE
- McGuire, R. (2008). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 37, no. 3, pp. 329-338
- Mortezaei, A. (2014). Plastic hinge length of RC columns under the combined effect of near-fault vertical and horizontal ground motions, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 58, no. 3, pp. 243-253
- Newmark, N. (1973). A study of vertical and horizontal earthquake spectra, *Reporte WASH-1255*. U. S. Atomic Energy Commission, Directorate of Licensing. Washington, D. C.
- OERPP, Organization for Earthquake Resistant Planning and Protection (2000). Greek Code for Seismic Resistant Structures – EAK2000. Grecia
- Ordaz, M., C. Montoya, S. Singh, J. Arboleda, F. Castellanos, M. Gallego, J. Pacheco, M. Santoyo, A. Zapata, F. Lázares, D. Arroyo, y A. Callerio (2011). DEGTRA. Instituto de Ingeniería, UNAM, México
- Pacor, F., C. Felicetta, G. Lanzano, S. Sgobba, R. Puglia, M. D'Amico, E. Russo, G. Baltzopoulos, e I. Iervolino (2018). NESS1: a worldwide collection of strong-motion data to investigate near-source effects, *Seismological Research Letters*, vol. 89, no. 6, pp. 2299-2313



- Perea, T. (2002). Introducción al estudio de la componente vertical de movimientos sísmicos y su influencia en el comportamiento estructural, *Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería, UNAM, México*
- Perea, T. y L. Esteva (2005). Componente vertical de registros sísmicos en México y su efecto en la respuesta sísmica no lineal de edificios, *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, no. 72, pp. 45-79
- Pérez-Campos, X., S. Singh, A. Iglesias, L. Alcántara, M. Ordaz, y D. Legrand (2010). Intraslab Mexican earthquakes of 27 april 2009 (Mw5.8) and 22 may 2009 (Mw5.6): a source and ground motion study, *Geofísica Internacional*, vol. 49, no. 3, pp. 153-163
- Plevris, V., Kremmyda, G., y Fahjan, Y. (2017). Performance-based seismic design of concrete structures and infrastructures, *Advances in Civil and Industrial Engineering (ACIE) Book Series*, IGI Global. Hershey, PA
- Ruiz-García, J. (2018). Examination of the vertical earthquake ground motion component during the september 19, 2017 (M<sub>w</sub> = 7.1) earthquake in Mexico City, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 110, pp. 13-17
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, y R. Youngs (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data, *Seismological Research Letters*, vol. 68, no. 1, pp. 180-189
- Singh, S., G. Suárez, y T. Domínguez (1985). The Oaxaca, Mexico, earthquake of 1931: lithospheric normal faulting in the subducted Cocos plate, *Nature*, vol. 317, no. 6032, pp. 56-58
- Singh, S., M. Ordaz, J. Pacheco, R. Quass, L. Alcántara, S. Alcocer, C. Gutiérrez, R. Meli, y E. Ovando (1999). A preliminary report on the Tehuacán, México earthquake of june 15, 1999 (M<sub>w</sub>=7.0), *Seismological Research Letters*, vol. 70, no. 5, pp. 489-504
- Singh, S., M. Ordaz, y L. Pérez-Rocha (1996). The great Mexican earthquake of 19 june 1858: expected ground motions and damage in Mexico City from a similar future event, *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 86, no. 6, pp. 1655-1666
- Singh, S., X. Pérez-Campos, V. Espíndola, V. Cruz-Atienza, y A. Iglesias (2014). Intraslab earthquake of 16 june 2013 (M<sub>w</sub> 5.9), one of the closest such events to Mexico City, *Seismological Research Letters*, vol. 85, no. 2, pp. 268-277
- SSN, Servicio Sismológico Nacional (2013). Reporte de sismo: sismo del día 16 de junio de 2013, Guerrero. Reportes Especiales, UNAM, México



- SSN, Servicio Sismológico Nacional (2014). Reporte de sismo: sismo del día 18 de abril de 2014, Guerrero. Reportes Especiales, UNAM, México
- SSN, Servicio Sismológico Nacional (2016). Sismos históricos: sismos de 1932. Reportes Especiales, UNAM, México
- SSN, Servicio Sismológico Nacional (2017a). Reporte especial: sismo de Tehuantepec (2017-09-07 23:49 M<sub>w</sub> 8.2). Reportes Especiales, UNAM, México
- SSN, Servicio Sismológico Nacional (2017b). Reporte especial: sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos. Reportes Especiales, UNAM, México
- Stewart, J., D. Boore, E. Seyhan, y G. Atkinson (2016). NGA-West2 equations for predicting vertical-component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra*, vol. 32, no. 2, pp. 1005-1031
- Suárez, G. (1992). El sismo de Jalapa del 3 de enero de 1920, *Rev. Mex. Ing. Sísm.*, vol. 42, pp. 3-15
- Tian, L., H. Li, y G. Liu (2010). Seismic response of power transmission tower-line system subjected to spatially varying ground motions, *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Londres
- Tovar de Teresa, I. y M. Mas (2017). Recuerdos del Zócalo (VI): la apoteósica entrada del revolucionario Francisco I. Madero a Ciudad de México, 7 de junio de 1911, *Relatos e Historias en México*, no. 110
- Urbina, F. y H. Camacho (1913). La zona megaséismica Acambay-Tixmadejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912, Instituto Geológico de México, Boletín 32
- Vilera, L., P. Rivero, y W. Lobo (2008). Efectos sísmicos de la componente vertical en edificios aporricados de acero, *Ciencia e Ingeniería*, vol. 29, no. 1, pp. 79-88
- Young, W. y R. Budynas (2002). *Roark's formulas for stress and strain*, Ed. McGraw-Hill, E. U. A.