



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

CAMPUS GUADALAJARA

“EFECTO DE LA DURACIÓN EN LA PROBABILIDAD DE COLAPSO CONSIDERANDO SIMULTÁNEAMENTE FORMA ESPECTRAL Y ESCALAMIENTO EN AMPLITUD”

DIEGO MONTEMAYOR URZÚA

DR. HÉCTOR GABRIEL DÁVALOS ALEJO

Director de tesis

Tesis presentada para optar por el grado de
Maestro en Estructuras
con Reconocimiento de Validez Oficial de Estudios
de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA,
según acuerdo número 20230414 con fecha 17-VII-23.

Zapopan, Jal., 11 de agosto del 2026

Resumen

En el diseño sismorresistente, la prevención del colapso estructural constituye uno de los objetivos fundamentales. El colapso es el estado de daño que se relaciona más directamente con la pérdida de vidas, las lesiones, las pérdidas económicas patrimoniales y otros impactos sociales ocasionados por eventos sísmicos severos. Debido a estas consecuencias y a la naturaleza aleatoria de la ocurrencia y de las características de los movimientos sísmicos, es indispensable cuantificar probabilísticamente el potencial de colapso del entorno construido. Conocer el riesgo de colapso de una estructura permite que los distintos participantes de un proyecto (entre ellos ingenieros, arquitectos, inversionistas, usuarios, autoridades y aseguradoras) tomen decisiones informadas respecto de su diseño y construcción, o, en el caso de edificaciones existentes, de su condición actual y de la necesidad de implementar medidas de reforzamiento.

En este contexto, es necesario desarrollar y evaluar parámetros que permitan caracterizar el potencial de daño de los movimientos de terreno y estimar, con la menor incertidumbre posible, la probabilidad de que estos provoquen el colapso de una estructura determinada. En el marco de la Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño (PBEE, por sus siglas en inglés), estos parámetros se denominan medidas de intensidad (IM, por sus siglas en inglés). Durante las últimas dos décadas, numerosos estudios han evaluado y comparado la eficiencia y la suficiencia de diferentes IM para estimar la respuesta y el colapso estructural. La eficiencia de una IM se relaciona con la variabilidad de la respuesta estructural condicionada a dicha medida; por lo tanto, cuanto menor sea esta variabilidad, mayor será su eficiencia. Por su parte, la suficiencia describe la independencia condicional entre la respuesta estructural y determinados parámetros causales del movimiento del terreno, tales como la magnitud del evento o la distancia del sitio a la falla, los cuales no son considerados explícitamente al elegir una IM. En consecuencia, el uso de una IM suficiente reduce la sensibilidad de las estimaciones de respuesta o de riesgo a las características particulares del conjunto de registros utilizado.

Cuantificar la probabilidad de colapso estructural requiere, entre otras cosas, someter un modelo analítico que sea capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento post-elástico, y, en particular, los diferentes modos de degradación de la estructura, a una serie de registros de aceleración que sean representativos del peligro sísmico del sitio. La intensidad de cada registro es caracterizada por la IM empleada. En la actualidad, la IM empleada con mayor frecuencia es la ordenada espectral de pseudoaceleración en el periodo fundamental de la estructura, $S_a(T_1)$. Sin embargo, se ha demostrado que registros de aceleración que producen la misma intensidad en términos de $S_a(T_1)$, producen a su vez respuestas inelásticas y potenciales de colapso bastante diferentes, dependiendo, entre varias cosas, de su forma espectral (es decir, dependiendo de la amplitud de las ordenadas espectrales en periodos distintos al periodo fundamental del sistema). Es por esta razón que estudios recientes, códigos de diseño y guías técnicas recomiendan que los registros empleados en análisis dinámicos no lineales sean seleccionados tomando en cuenta su forma espectral.

Adicionalmente, la cantidad de registros de aceleración que son capaces de inducir el colapso estructural en edificios diseñados de acuerdo a normativas vigentes es limitada. En

consecuencia, una práctica común es escalar la amplitud de los registros para alcanzar los niveles de intensidad deseados. Idealmente, para un determinado nivel de intensidad, la respuesta estructural no debería presentar tendencias sistemáticas con los factores de escala empleados. Dicho de otra forma, se esperaría que la respuesta estructural estimada utilizando registros escalados sea similar a la estimada utilizando registros sin escalar. Sin embargo, se ha observado que el uso de factores de escala altos tiende a introducir un sesgo en la estimación de la respuesta inelástica y de la probabilidad de colapso, particularmente cuando se emplea $S_a(T_1)$ como medida de intensidad. Se ha observado a su vez que considerar la forma espectral puede reducir este sesgo, mas no eliminarlo.

Más recientemente, diversos estudios han propuesto que la duración del movimiento fuerte del terreno tiene un efecto importante en la probabilidad de colapso, y que, adicional a la forma espectral, los registros empleados en análisis dinámicos deberán seleccionarse considerando su duración. Estas conclusiones contradicen a estudios anteriores que concluyeron que la duración del movimiento del terreno no tenía un efecto significativo en la respuesta inelástica máxima o incluso en la probabilidad de colapso. Esta discrepancia en la literatura resalta la necesidad de estudios adicionales para definir si la duración tiene un efecto significativo en la probabilidad de colapso, para cuantificar la magnitud de estos efectos, sus dependencias en otros parámetros del movimiento y, finalmente, definir si la duración del movimiento del terreno es una característica que deba considerarse de manera explícita en la estimación del riesgo de colapso.

Aunque algunos de los trabajos recientes que han evaluado el efecto de la duración en la probabilidad de colapso consideraron a su vez los efectos de la forma espectral, no se ha estudiado de manera conjunta la influencia de la duración, la forma espectral y el posible sesgo asociado con el uso de factores de escala. El presente estudio evalúa la influencia de la duración de registros de aceleración en su capacidad para acelerar o retrasar el colapso estructural, considerando simultáneamente los efectos de la forma espectral y el escalamiento en amplitud. La principal aportación consiste en separar el efecto de la duración del movimiento fuerte de los efectos asociados con la forma espectral y el factor de escala en sistemas de un grado de libertad (SDOF, por sus siglas en inglés) con comportamiento histerético degradante. Los resultados muestran que, cuando se utiliza como medida de intensidad la pseudoaceleración espectral correspondiente al periodo fundamental del sistema, $S_a(T_1)$, el empleo de factores de escala elevados puede producir una subestimación de la influencia de la duración sobre la probabilidad de colapso en sistemas de periodo corto. En contraste, en sistemas de periodo intermedio y largo no se observa una tendencia sistemática en los efectos de la duración con los factores de escala empleados; sin embargo, los resultados muestran que el aparente efecto de la duración varía según el factor de escala empleado y el sistema estructural considerado, lo cual indica que el efecto aparente de la duración puede estar sesgado por el uso de factores de escala.

Agradecimientos y Dedicatoria

Para comenzar, quiero agradecer a Dios, por darme la vida y por ofrecerme incontables oportunidades para dedicarme a una profesión que me apasiona. Haber encontrado en la ingeniería estructural una vocación y tener la oportunidad de contribuir a la sociedad a través de mi trabajo son regalos por los que estaré siempre agradecido.

Quiero expresar un agradecimiento muy especial al Profesor Héctor Dávalos, quien me impulsó a realizar mis estudios de maestría y cuya confianza y apoyo hicieron posible que me incorporara al programa. Como mi director de tesis, compartió generosamente su conocimiento y experiencia y contribuyó de manera decisiva a mi formación académica y profesional. El trabajo que desarrollé bajo su dirección fue determinante en mi decisión de continuar una trayectoria académica y realizar estudios de doctorado. Su apoyo y orientación continúan siendo importantes para mi formación y desarrollo académico.

Asimismo, agradezco al Profesor Eduardo Miranda, quien se desempeñó como asesor externo durante el desarrollo de esta tesis y compartió generosamente su conocimiento y experiencia a lo largo de la investigación. Me siento muy afortunado de haber tenido su orientación durante este trabajo y de continuar mi formación académica bajo su tutoría durante el doctorado.

Agradezco también al Mtro. José Ramón Silos, quien ha acompañado y apoyado mi desarrollo profesional y académico durante más de ocho años. La oportunidad de complementar mis estudios de posgrado con el trabajo que realicé junto a él ha sido fundamental para mi formación y desarrollo técnico.

Mi especial agradecimiento también al Profesor Luis Ángel Amezcua, uno de mis principales maestros en el campo de la ingeniería estructural a lo largo de mis estudios de licenciatura y maestría. Agradezco también su apoyo a esta investigación al compartir los registros de aceleración que hicieron posible una parte importante de este trabajo.

A mis padres, Gilberto y Rosa María, y a mis hermanos, Gilberto y Alejandro, por su apoyo incondicional, su motivación y por impulsarme siempre a perseguir mis metas. Su constante respaldo a cada una de mis decisiones ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

A la Universidad Panamericana, donde comenzó mi interés por la ingeniería estructural y donde tuve la oportunidad de aprender de excelentes profesores y compañeros. Durante mis estudios de licenciatura y maestría formé amistades que contribuyeron de manera importante a mi desarrollo académico y profesional. Agradezco especialmente la motivación y el apoyo de mis compañeros de licenciatura Humberto, Ricardo, Mauricio y Daniel; de mis compañeros de maestría Magali, Ricardo, Juan de Dios, Jorge, Pablo, Jesús Carlos y José Carlos; y de los profesores Francisco de la Mora y Juan Antonio Balderrama, quienes compartieron conmigo sus conocimientos y su pasión por la ingeniería.

Finalmente, a mi esposa Ana Claudia, quien con su cariño incondicional ha hecho suyos mis sueños y me ha acompañado, apoyado e impulsado a perseguirlos durante todos estos años. Nada de esto sería posible sin ella a mi lado. Esta tesis está dedicada a ella.

Índice de Contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 - Motivación y antecedentes.....	1
1.2 - Objetivos y alcances	3
Capítulo 2: Revisión de Literatura	5
2.1 - Descripción General	5
2.2 - Medidas de Duración	5
2.2.1 - Medidas de Duración Basadas Únicamente en el Registro de Aceleración	5
2.2.2 - Medidas de Duración Basadas en Acumulación de Energía	6
2.2.3 - Medidas de Duración Basadas en la Respuesta Estructural	8
2.3 - Escalamiento en Amplitud y su Influencia en la Respuesta Estructural.....	9
2.4 - Forma Espectral y su Influencia en la Respuesta Estructural.....	13
2.5 - Efecto de la Duración en la Respuesta Inelástica y la Probabilidad de Colapso	21
Capítulo 3: Selección de Registros de Aceleración y Descripción de Sistemas Estructurales	26
3.1 - Descripción General	26
3.2 - Selección de Registros	26
3.3 - Corrección de Registros.....	27
3.4 - Sistemas Estructurales Considerados.....	27
3.5 - Definición de Sets de Registros de Aceleración	28
Capítulo 4: Respuesta Inelástica y Probabilidad de Colapso de Sistemas de un Grado de Libertad.....	35
4.1 – Descripción General.....	35
4.2 – Respuesta Inelástica de Sistemas No Colapsados.....	35
4.3 – Probabilidad de Colapso Condicionada al MCE_R	45
Capítulo 6: Conclusiones	51
6.1 – Resumen y Principales Hallazgos	51
6.2 – Limitaciones	53
6.3 – Futuras Líneas de Investigación.....	56
Bibliografía y Referencias.....	58

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de magnitudes (M_w) y distancias epicentrales (R_{epi}) de los registros considerados para el estudio. Los colores representan las bases de datos de las cuales provienen los registros. Las estrellas representan los valores promedio de magnitud y distancia epicentral de los registros provenientes de cada base de datos. ...	26
Figura 2. Espectros de pseudoaceleración correspondientes al nivel del MCE_R para el sitio ubicado en Sacramento, California, y fracciones de amortiguamiento crítico del 2% y 5%. El espectro con 2% de amortiguamiento (línea continua) se obtuvo al modificar el espectro definido para 5% (línea punteada) mediante los factores propuestos por Lin y Chang (2004).	30
Figura 3. Espectros de pseudoaceleración de los 120 registros seleccionados para cada periodo estructural y conjunto de factor de escala. Se muestran los espectros individuales, la mediana, los percentiles 16 y 84, y el espectro objetivo utilizado en el proceso de selección.....	31
Figura 4. Espectros de respuesta de los sub-sets de 40 registros de corta y larga duración para cada periodo de vibración y factor de escala. Las líneas grises muestran los espectros de respuesta de cada registro individual, la línea negra el espectro objetivo para cada periodo de vibración y las líneas roja y azul las medianas de los 40 registros de corta y larga duración, respectivamente.	32
Figura 5. Respuesta inelástica de un oscilador de un grado de libertad ($T_n = 0.5$ s) con comportamiento bilineal degradante ($\alpha = -3\%$) y un quinto de su resistencia lateral elástica sometido a tres registros escalados al nivel del MCE_R , los cuales presentan formas espectrales y duraciones significativas 5-75 similares, pero requieren factores de escala diferentes para alcanzar el mismo nivel de intensidad.	36
Figura 6. Desplazamiento inelástico máximo condicionado al MCE_R y a no colapso para SDOFs con factores de reducción de resistencia $R_d = 2, 3$ y 4 sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.	37
Figura 7. Demanda de ductilidad condicionada al MCE_R y a no colapso para SDOFs con factores de reducción de resistencia $R_d = 2, 3$ y 4 sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.....	39
Figura 8. Desviación estándar logarítmica de la demanda de ductilidad condicionada al MCE_R y a no colapso para SDOFs con factores de reducción de resistencia $R_d = 2, 3$ y 4 sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.	42
Figura 9. Medianas de la demanda de ductilidad condicionada al nivel del MCE_R y a la condición de no colapso de sistemas SDOF con $R_d = 2, 3$ y 4 , e intervalos de confianza del 95% obtenidos mediante muestreo Bootstrap, para conjuntos de corta (SD) y larga (LD) duración con diferentes factores de escala.	43
Figura 10. Modelos de probabilidad acumulada de la demanda de ductilidad condicionada al nivel del MCE_R y a la condición de no colapso para los sistemas SDOF con $R_d = 4$. Las curvas corresponden a distribuciones lognormales ajustadas mediante el método de momentos utilizando la media y la desviación estándar de las demandas de ductilidad obtenidas para cada subconjunto de registros de corta (SD) y larga duración (LD).	44
Figura 11. Probabilidad de colapso condicionada al nivel del MCE_R para sistemas SDOF con factores de reducción de resistencia $R_d = 4, 5$ y 6 , sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.	46
Figura 12. Intervalos de confianza del 95% en la probabilidad de colapso condicionada al nivel del MCE_R para sistemas SDOF con factores de reducción de resistencia $R_d = 4, 5$ y 6 sometidos a conjuntos de corta (tinto) y larga (azul) duración con diferentes factores de escala.....	49

Capítulo 1: Introducción

1.1 - Motivación y antecedentes

Los códigos modernos de diseño sismorresistente establecen requisitos orientados a alcanzar determinados objetivos de desempeño ante diferentes niveles de intensidad sísmica. En términos generales, estos objetivos buscan limitar el daño estructural durante eventos frecuentes y limitar la probabilidad de colapso ante eventos pocos frecuentes y de gran intensidad. Para ello, los códigos emplean requisitos prescriptivos relacionados con la resistencia, la rigidez, la capacidad de deformación, la regularidad y el detallado de los sistemas estructurales, entre otros aspectos (BS EN 2004, Comisión Federal de Electricidad 2015, ASCE 2022, NTCDS 2023).

Aunque estos requisitos proporcionan niveles mínimos de seguridad, su cumplimiento no permite conocer directamente el desempeño sísmico esperado de una estructura ni la incertidumbre asociada con este. En muchos casos, el diseño se basa en procedimientos lineales que representan indirectamente el comportamiento inelástico mediante factores de modificación de la respuesta y límites prescriptivos. Estos procedimientos no reproducen explícitamente la evolución del daño, la degradación de resistencia y rigidez, la inestabilidad dinámica ni la influencia de las diferentes características de los movimientos de terreno. Por consiguiente, el cumplimiento de la normativa no proporciona, por sí solo, una cuantificación explícita de la probabilidad de alcanzar distintos estados de daño o de exceder el estado límite de colapso.

La Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño (PBEE, por sus siglas en inglés), desarrollada e impulsada por el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), representa un avance importante para superar estas limitaciones. Esta metodología permite estimar probabilísticamente las consecuencias de los eventos sísmicos mediante la integración del peligro sísmico específico del sitio, la respuesta estructural y las consecuencias asociadas (Porter 2003, Krawinkler y Miranda 2004, Moehle y Deierlein 2004, Günay y Mosalam 2012). El peligro sísmico se caracteriza generalmente mediante un análisis probabilístico de peligro sísmico, mientras que la respuesta estructural puede obtenerse mediante análisis dinámicos no lineales. De esta manera, el desempeño puede evaluarse ante un intervalo continuo de intensidades, desde movimientos frecuentes y de baja intensidad hasta movimientos poco frecuentes capaces de producir daños severos o colapso.

Entre los diferentes estados límite considerados en esta metodología, el colapso estructural tiene especial importancia debido a su relación directa con la pérdida de vidas, las lesiones, las pérdidas económicas y patrimoniales, la interrupción de actividades y el desplazamiento de la población. En el contexto de esta investigación, el colapso se entiende como la pérdida de estabilidad o de capacidad resistente del sistema estructural hasta un punto en el que este deja de cumplir su función de soportar las cargas gravitacionales o laterales. Este estado puede manifestarse mediante inestabilidad dinámica, deformaciones laterales excesivas y pérdida significativa de resistencia; todos ellos casos que pueden producir el derrumbe parcial o total de la estructura.

Aunque la evaluación probabilística del colapso no es un requisito explícito para la

mayoría de las estructuras diseñadas conforme los códigos convencionales, el marco de la metodología PBEE permite estimar el riesgo asociado con este estado límite. El riesgo de colapso depende tanto de la frecuencia con la que se presentan movimientos del terreno de diferentes intensidades como de la probabilidad condicional de que la estructura colapse ante cada nivel de intensidad. Esta última relación se representa mediante una curva de fragilidad de colapso, mientras que la frecuencia de excedencia de los distintos niveles de intensidad se describe mediante la curva de peligro sísmico del sitio. La integración de ambas relaciones permite calcular la tasa media anual de colapso, λ_c .

La confiabilidad de esta estimación depende, entre otros factores, de la medida de intensidad (IM, por sus siglas en inglés) utilizada para caracterizar los movimientos del terreno. Una IM adecuada debe presentar una relación estrecha con la respuesta estructural y reducir, en la medida de lo posible, la influencia de otros parámetros causales de los movimientos sísmicos. Estas propiedades se describen comúnmente mediante los conceptos de eficiencia y suficiencia (Luco y Cornell, 2007). Una IM es eficiente cuando la variabilidad de la respuesta estructural condicionada a esta es reducida y es suficiente cuando dicha respuesta es aproximadamente independiente de parámetros del evento sísmico, tales como la magnitud del evento y la distancia del sitio a la fuente sísmica.

La pseudoaceleración espectral correspondiente al periodo fundamental de la estructura, $S_a(T_1)$, es históricamente una de las IM más utilizadas para evaluar la respuesta y fragilidad estructural. Sin embargo, diferentes investigaciones han demostrado que $S_a(T_1)$ no caracteriza por completo el potencial de daño de un movimiento del terreno. En particular, la amplitud de las ordenadas espectrales en periodos distintos de T_1 , denominada de manera general como forma espectral, puede influir significativamente en la respuesta inelástica y en la probabilidad de colapso (Baker y Cornell, 2006; Haselton et al., 2011; Eads et al., 2015, 2016).

La selección de registros constituye otra fuente importante de incertidumbre. Para evaluar la respuesta estructural ante niveles elevados de intensidad es frecuente que no exista un número suficiente de registros del movimiento de terreno que presenten simultáneamente la intensidad requerida para ocasionar colapso. Por esta razón, los registros suelen escalarse en amplitud hasta alcanzar un valor objetivo de la IM. No obstante, el uso de factores de escala elevados puede introducir sesgos en la estimación de la respuesta inelástica y de la probabilidad de colapso (Bazzurro y Luco, 2006; Luco y Bazzurro, 2007; Baker, 2007; Zacharenaki et al., 2014; Mehdizadeh et al., 2017; Dávalos y Miranda, 2019a y 2019b).

Además de la forma espectral y del factor de escala, la duración del movimiento fuerte ha sido propuesta como una característica potencialmente relevante para la respuesta sísmica. Su influencia se espera principalmente cuando la estructura desarrolla deformaciones inelásticas importantes, debido a que una mayor duración puede incrementar el número de ciclos de respuesta, la disipación de energía y la acumulación de daño y degradación. Por el contrario, cuando la estructura permanece esencialmente dentro del intervalo elástico, la duración suele tener una influencia limitada sobre las demandas máximas. Diversos estudios han evaluado la relación entre la duración y el potencial de colapso, pero han presentado conclusiones diferentes (Foschaar et al., 2012; Raghunandan y Liel, 2013; Chandramohan et al., 2016; Molazadeh y Saffari, 2018; Fairhurst et al., 2019; Zengin et al., 2020; Montemayor

et al., 2025). Estas diferencias pueden atribuirse, entre otros aspectos, a los parámetros utilizados para cuantificar la respuesta; a las propiedades de los modelos estructurales, incluidos el periodo, el comportamiento histerético y la degradación; y a los procedimientos empleados para seleccionar, escalar y comparar los registros.

Existe un consenso relativamente amplio sobre la influencia de la duración en fenómenos acumulativos, como la generación de deformaciones permanentes en suelos, el desplazamiento de taludes, la demanda de energía histerética, el número de ciclos inelásticos y la fractura por fatiga. Sin embargo, su efecto sobre las demandas máximas y, particularmente, sobre la probabilidad de colapso estructural continúa siendo objeto de discusión. Una dificultad fundamental es que la duración, la forma espectral y los factores de escala utilizados en los análisis pueden estar correlacionados. Por lo tanto, un efecto atribuido aparentemente a la duración podría deberse, al menos parcialmente, a diferencias en la forma espectral de los registros o al sesgo introducido por su escalamiento. La presente investigación surge de la necesidad de separar estos efectos. En particular, se estudia si la influencia atribuida a la duración del movimiento fuerte sobre la probabilidad de colapso permanece cuando se consideran simultáneamente la forma espectral y el factor de escala. Determinar esta relación es importante para establecer si la duración debe incorporarse explícitamente en la selección de registros y en la estimación probabilística del riesgo de colapso. Su inclusión innecesaria aumentaría la complejidad del proceso de selección, mientras que ignorar un efecto relevante podría producir estimaciones sesgadas de la fragilidad y del riesgo estructural.

1.2 - Objetivos y alcances

El objetivo general de esta investigación es evaluar la influencia de la duración del movimiento fuerte sobre la probabilidad de colapso estructural, considerando de manera explícita y simultánea los efectos de la forma espectral y del escalamiento en amplitud de los registros sísmicos. Por otro lado, los objetivos específicos de la investigación son los siguientes:

1. Evaluar la influencia simultánea de la duración, la forma espectral y el factor de escala sobre la probabilidad de colapso de sistemas de un grado de libertad con comportamiento histerético degradante, utilizando $S_a(T_1)$ como medida de intensidad.
2. Determinar si el uso de factores de escala elevados modifica la influencia aparente de la duración sobre la probabilidad de colapso y establecer si este efecto depende del periodo fundamental del sistema.
3. Evaluar si la relación entre la duración y el potencial de colapso permanece después de controlar las diferencias de forma espectral entre los registros.
4. Formular recomendaciones sobre la consideración de la duración durante la selección de registros para evaluaciones sísmicas basadas en desempeño cuyo estado límite de interés sea el colapso estructural.

Los alcances de este estudio se limitan a los sistemas estructurales evaluados, así como a los métodos empleados para cuantificar la intensidad del movimiento de terreno y para caracterizar los efectos de la forma espectral. En particular, la investigación se limita al análisis de sistemas de un grado de libertad con distintos periodos de vibración y

comportamiento histerético degradante. Estos sistemas permiten estudiar de manera controlada y simplificada la influencia de las características de los movimientos del terreno sin introducir la complejidad adicional asociada con la interacción modal y la distribución espacial de las demandas en estructuras de múltiples grados de libertad. Investigaciones adicionales se requieren para examinar si las observaciones de este estudio son aplicables a sistemas más complejos y cómo estas observaciones pueden variar dependiendo de las características de estos sistemas.

La intensidad de los registros se caracteriza mediante la pseudoaceleración espectral correspondiente al periodo fundamental del sistema, $S_a(T_1)$. La forma espectral se evalúa mediante la discrepancia entre el espectro de respuesta elástico de cada registro y un espectro objetivo, mientras que la duración se caracteriza mediante una de las medidas de duración del movimiento fuerte más utilizadas en la literatura reciente, la duración significativa. Los análisis se limitan a un solo nivel de intensidad, correspondiente al evento máximo considerado ajustado al riesgo, MCE_R , utilizando diferentes factores de escala. En consecuencia, este estudio se limita a evaluar los efectos de la duración en la probabilidad de colapso, mientras estudios adicionales son necesarios para evaluar la influencia de la duración en el riesgo ante colapso (el cual debe considerar, entre otras cosas, la combinación de la probabilidad de colapso con el peligro sísmico caracterizado en términos de cualquier medida de intensidad empleada y de la duración del movimiento de terreno). De la misma manera, este estudio no pretende evaluar de manera exhaustiva otros estados límite, parámetros acumulativos de daño ni consecuencias económicas o sociales. Por consiguiente, las recomendaciones derivadas de los resultados de este estudio deben interpretarse dentro de estas delimitaciones.

Capítulo 2: Revisión de Literatura

2.1 - Descripción General

En el presente capítulo se presenta una revisión de la literatura relacionada con los tres aspectos principales considerados en esta investigación: la duración del movimiento fuerte, la forma espectral y el escalamiento en amplitud de registros sísmicos. La revisión se organiza siguiendo la secuencia lógica de la presente investigación. En primer lugar, se describen las principales medidas propuestas para caracterizar la duración de los movimientos del terreno. Posteriormente, se revisan los estudios que han demostrado la influencia del escalamiento en amplitud y de la forma espectral sobre la respuesta estructural, incluyendo el potencial de colapso, ya que ambos factores pueden introducir sesgos en la interpretación del efecto de la duración. Finalmente, se presentan los principales trabajos que han investigado la influencia de la duración del movimiento fuerte sobre la respuesta estructural y el riesgo de colapso.

2.2 - Medidas de Duración

Diversas medidas han sido propuestas para caracterizar la duración de los movimientos del terreno. Algunas de ellas se definen exclusivamente a partir del registro de aceleración, mientras que otras incorporan explícitamente la respuesta de sistemas estructurales. En esta sección se presenta un resumen de las principales medidas de duración utilizadas en la literatura, a partir de una extensa revisión de literatura llevada a cabo por Bommer y Martínez-Pereira (1999). Para una revisión más exhaustiva de los fundamentos de estas medidas, así como de sus ventajas y limitaciones, se remite al lector a los trabajos de Bommer y Martínez-Pereira (1999) y Hancock y Bommer (2006).

2.2.1 - Medidas de Duración Basadas Únicamente en el Registro de Aceleración

A continuación, se describen medidas de duración que se basan únicamente en el tiempo durante el cual se excede un umbral de aceleración del registro. Estas medidas presentan la ventaja de depender únicamente del registro de aceleración y, por lo tanto, ser independientes de la respuesta y de las propiedades del sistema estructural. Una de estas medidas es la Duración Uniforme (D_U) (Bolt, 1973), la cual se define como el tiempo durante el cual las aceleraciones de un registro exceden un umbral de aceleración previamente definido, a_0 . Matemáticamente, se expresa como:

$$D_U = \int_t I[|a(t)| > a_0] dt \quad (1)$$

donde $I[\cdot]$ corresponde a una función indicadora que toma el valor de uno cuando se satisface la condición $|a(t)| > a_0$ y cero en caso contrario; y $a(t)$ corresponde al registro de aceleración.

Otra medida de duración es la Duración Acotada (D_B) (Bolt, 1973), que, de manera análoga a la Duración Uniforme, depende también de un umbral de aceleración definido por el usuario. La Duración Acotada se define como el intervalo de tiempo total desde la primera hasta la última excursión de aceleración fuera del umbral definido. Esto es:

$$D_B = \max_t (t_{|a(t)| > a_0}) - \min_t (t_{|a(t)| > a_0}) \quad (2)$$

donde $t_{|a(t)| > a_0}$ representa el conjunto de instantes en los cuales el valor absoluto de la aceleración excede el umbral de aceleración a_0 .

Una de las principales limitaciones de ambas medidas de duración es su dependencia del valor del umbral de aceleración seleccionado. Aunque la Duración Uniforme suele presentar una menor sensibilidad a este parámetro que la Duración Acotada, ambas pueden variar significativamente cuando cambia el valor de a_0 . Esta diferencia se debe a que la Duración Uniforme integra el tiempo total durante el cual el umbral es excedido, mientras que la Duración Acotada depende únicamente de la primera y última excedencia del umbral. En consecuencia, pequeñas variaciones de a_0 pueden producir cambios importantes en la Duración Acotada, especialmente cuando se utilizan valores elevados de dicho umbral.

2.2.2 - Medidas de Duración Basadas en Acumulación de Energía

Las medidas presentadas en esta sección se basan en parámetros relacionados con la energía acumulada del movimiento del terreno. Si bien estas medidas tampoco consideran explícitamente la respuesta estructural, incorporan características del registro adicionales a la amplitud de las aceleraciones, como el contenido de frecuencias. La energía acumulada puede cuantificarse mediante la integral del cuadrado de la aceleración, la velocidad o el desplazamiento. Una de las medidas más utilizadas es la Intensidad de Arias (Arias, 1970), definida como:

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_r} a(t)^2 dt \quad (3)$$

donde t_r es la duración total del registro y g la aceleración de la gravedad. Una medida basada en la Intensidad de Arias es la duración significativa (Trifunac y Brady, 1975). La duración significativa (D_S) se define como el intervalo de tiempo durante el cual se acumula un porcentaje determinado de la Intensidad de Arias total del registro. Matemáticamente:

$$D_{S_{X-Y}} = t_Y - t_X \quad (4)$$

donde X y Y son los límites inferior y superior del porcentaje de energía acumulada considerados (comúnmente 5% para el límite inferior y 75% o 95% para el límite superior) y las variables t_Y y t_X corresponden a los instantes en los cuales la Intensidad de Arias acumulada alcanza los porcentajes X y Y de la Intensidad de Arias total, respectivamente. La principal ventaja de esta medida de duración es que permite identificar el intervalo temporal correspondiente a la fase fuerte del movimiento fuerte del terreno, al excluir las porciones iniciales y finales del registro asociadas con niveles bajos de energía. Sin embargo, esta medida también requiere definir un intervalo de energía acumulada, por lo que los valores obtenidos dependen de los límites seleccionados. Una desventaja adicional de la duración significativa es que suele incluir porciones intermedias de movimiento de terreno con amplitudes muy bajas, las cuales no generan demandas de desplazamiento importante en los sistemas estructurales.

A partir de la duración significativa se desarrollaron diversas variantes con el propósito de incorporar características adicionales del movimiento del terreno o reducir algunas de sus limitaciones. Trifunac y Westermo (1977), por ejemplo, propusieron una modificación en la

que el registro de aceleración se filtra mediante un conjunto de filtros de banda angosta antes de calcular la Intensidad de Arias. La duración del movimiento fuerte se define entonces como la mínima suma de los intervalos de tiempo que, en conjunto, acumulan el 90% de la Intensidad de Arias, identificando así las porciones del registro donde la energía se concentra con mayor intensidad. Un año después, Saragoni (1977) propuso una medida basada en el ajuste de una distribución del tipo X^2 (chi-cuadrada) a la evolución temporal de la aceleración cuadrática media, definiendo la duración significativa como el intervalo comprendido entre los dos puntos de inflexión de dicha distribución ajustada.

McCann y Shah (1979) propusieron otra medida de duración basada en la evolución temporal de la aceleración cuadrática media (a_{rms}), definida como:

$$a_{rms}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t)^2 dt \quad (5)$$

donde a_{rms} es la raíz de la media del cuadrado de la aceleración, y t_1 y t_2 son los instantes de inicio y final de movimiento fuerte del terreno, respectivamente. En este método, dichos instantes se identifican a partir de la evolución temporal del valor acumulado de a_{rms} , definiéndose finalmente la duración como la diferencia $t_2 - t_1$.

Otras propuestas buscaron caracterizar la duración mediante propiedades estadísticas de la distribución temporal de la energía. Vanmarcke y Lai (1977, 1980) desarrollaron una medida basada en un intervalo de tiempo equivalente en el cual la Intensidad de Arias se distribuye uniformemente sobre un valor promedio constante de a_{rms} . A partir de esta formulación y mediante métodos estocásticos, obtuvieron una expresión para estimar la duración del movimiento fuerte en función de la aceleración máxima del registro y de su periodo predominante.

De manera similar, Zhou y Xie (1984), citados posteriormente por Zhou y Katayama (1985), propusieron una medida basada en la distribución temporal de la energía del movimiento. En este método, el tiempo correspondiente al centro de gravedad de $a^2(t)$ se define como:

$$t_c = \frac{\int_0^{t_r} t \cdot a^2(t) dt}{\int_0^{t_r} a^2(t) dt} \quad (6)$$

donde t_r corresponde al tiempo total del registro de aceleraciones. La duración del movimiento fuerte de terreno se obtiene como dos veces la desviación estándar de $a^2(t)$ con respecto a dicho centro de gravedad t_c :

$$D = 2 \sqrt{\frac{\int_0^{t_r} (t - t_c)^2 a^2(t) dt}{\int_0^{t_r} a^2(t) dt}} \quad (7)$$

Theofanopoulos y Drakopoulos (1986) propusieron otra variación basada en la gráfica de Husid. En esta definición, la duración se identifica mediante la evolución temporal de la Intensidad de Arias acumulada, considerando los intervalos en los cuales la tasa de acumulación de energía supera la tendencia promedio del registro. La identificación del movimiento fuerte se realiza a partir de la inspección de la función propuesta por los autores, evitando la definición directa de límites porcentuales de energía.

Mohraz y Peng (1989) desarrollaron una medida que incorpora la frecuencia natural y el amortiguamiento del sistema mediante un filtro pasa-bajo aplicado al registro de aceleración, cuya frecuencia de corte depende de dichos parámetros estructurales. Posteriormente, la duración del movimiento fuerte se determina aplicando el procedimiento propuesto por McCann y Shah (1979) al registro filtrado.

Theofanopoulos y Watabe (1989) presentaron otra variación de la duración significativa, similar a la propuesta por Zhou y Xie (1984). En esta medida, el final del movimiento fuerte se define mediante el centro de gravedad de los incrementos de la Intensidad de Arias más una desviación estándar, mientras que el inicio corresponde al primer instante en que el incremento de la Intensidad de Arias supera un umbral que corresponde al incremento de la Intensidad de Arias a lo largo de un diferencial de tiempo que el registro posee al final de la duración de movimiento fuerte del terreno. Asimismo, Sarma y Casey (1990) propusieron una medida basada en el concepto de Duración Uniforme. Su procedimiento consiste en calcular la Duración Uniforme para distintos niveles fraccionales de la aceleración máxima y extrapolar la relación obtenida hasta definir un único parámetro de duración. A diferencia de otras definiciones, esta medida no identifica explícitamente los instantes de inicio y final del movimiento fuerte, por lo que su relación temporal con el registro de aceleración resulta menos clara.

Somerville et al. (1997) emplearon la duración significativa comprendida entre el 5% y el 75% de la Intensidad de Arias total. Aunque estos autores atribuyen esta definición a Husid (1969), dicho trabajo no especifica estos límites de integración. En realidad, el intervalo comprendido entre el 5% y el 75% de la Intensidad de Arias fue propuesto posteriormente por Kennedy et al. (1985) y por Ou y Hermann (1990), quienes lo utilizaron como una ventana temporal en la cual el movimiento del terreno puede considerarse aproximadamente aleatorio y estacionario para estimar espectros de respuesta a partir del espectro de amplitudes de Fourier.

2.2.3 - Medidas de Duración Basadas en la Respuesta Estructural

Aunque las medidas descritas en la sección anterior se definen únicamente a partir de las características del registro de aceleración, diversos autores propusieron medidas de duración basadas en la respuesta estructural. En esta sección se presenta un resumen de las principales propuestas desarrolladas bajo este enfoque. A diferencia de las medidas previamente descritas, estas definiciones dependen explícitamente de las características dinámicas del sistema estructural considerado, por lo que una misma excitación sísmica puede dar lugar a diferentes duraciones dependiendo de la estructura analizada.

Pérez (1980) evaluó la respuesta de sistemas de un grado de libertad (SDOF) y definió la duración como el tiempo total durante el cual la velocidad de respuesta de un SDOF excede un umbral previamente establecido. En esencia, esta medida corresponde a una aplicación del concepto de Duración Uniforme a la respuesta estructural.

Zahrah y Hall (1984) propusieron otra medida basada en la respuesta estructural, denominada por los autores como duración efectiva, la cual se define como el intervalo durante el cual ocurre la mayor parte de la respuesta inelástica de un SDOF con demandas de ductilidad $\mu = 3$. En esta propuesta, la duración corresponde al intervalo durante el cual se

disipa entre el 5% y el 75% de la energía inelástica absorbida por la estructura, bajo la hipótesis de que el resto de la energía es disipado mediante el amortiguamiento estructural.

Shahabi y Mostaghel (1984) definieron la duración del movimiento fuerte como el intervalo durante el cual la energía total aplicada a un conjunto de sistemas SDOF es transferida con una intensidad uniforme, caracterizada mediante la denominada aceleración cíclica efectiva. Aunque esta definición se plantea en términos de la respuesta estructural, los autores muestran que puede determinarse directamente a partir de las características del registro de aceleración.

Finalmente, Xie y Zhang (1988) propusieron la denominada duración ingenieril, definida como una duración acotada cuyo umbral corresponde a la aceleración necesaria para producir la fluencia de un sistema SDOF. La aceleración de fluencia se define como:

$$a_Y = \frac{Q_Y}{M \cdot \beta(T_0)} \quad (8)$$

donde Q_Y es la resistencia del sistema, M es la masa total de la estructura y $\beta(T_0)$ es la ordenada espectral de pseudoaceleración con el mismo porcentaje de amortiguamiento y periodo (T_0) de la estructura.

Como puede apreciarse, se han propuesto numerosas definiciones de la duración del movimiento fuerte del terreno, cada una basada en distintos criterios físicos y matemáticos. No obstante, la duración significativa basada en la Intensidad de Arias se ha consolidado como una de las medidas más ampliamente utilizadas en la literatura reciente de ingeniería sísmica, particularmente en estudios orientados a evaluar la influencia de la duración del movimiento en la respuesta inelástica y la probabilidad de colapso de las estructuras. Por esta razón, y con el fin de facilitar la comparación de los resultados obtenidos con los reportados en investigaciones recientes, en el presente estudio se emplea la duración significativa 5-75 como la medida de la duración del movimiento fuerte. Adicionalmente, como se discute en la Sección 3.5, Chandramohan et al. (2016) observaron que esta medida presenta correlaciones relativamente bajas con otros parámetros del movimiento del terreno, lo que favorece el análisis independiente de los efectos de la duración sobre la respuesta estructural.

2.3 - Escalamiento en Amplitud y su Influencia en la Respuesta Estructural

En el marco de la Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño, la evaluación del desempeño estructural ante niveles cercanos al colapso requiere análisis dinámicos no lineales de modelos matemáticos que representen, con el mayor realismo posible, el comportamiento de las estructuras sometidas a movimientos fuertes del terreno. Sin embargo, los registros correspondientes a niveles elevados de intensidad son relativamente escasos en las bases de datos disponibles. Debido a esta limitación, es común modificar la amplitud de registros existentes mediante el escalamiento en amplitud, procedimiento que consiste en multiplicar el historial de aceleraciones por un factor de escala de manera que la medida de intensidad (IM) del registro alcance el nivel requerido para el análisis. Tradicionalmente, la medida de intensidad empleada para este propósito ha sido la pseudoaceleración espectral correspondiente al periodo fundamental de la estructura, $S_a(T_1)$. No obstante, durante las

últimas décadas se ha debatido si el uso de factores de escala elevados puede introducir sesgos en la respuesta estructural y, por consiguiente, en la evaluación de su desempeño.

Al mejor de los conocimientos del autor del presente estudio, las primeras recomendaciones relacionadas con el uso de factores de escala surgieron principalmente a partir de criterios ingenieriles. De acuerdo con la revisión realizada, Krinitzsky y Chang (1977) fueron los primeros en proponer un límite de 4 para los factores de escala; sin embargo, no presentaron una justificación técnica que respaldara dicha recomendación. Posteriormente, Vanmarcke (1979) sugirió limitar el factor de escala a un valor máximo de 2 para análisis de licuefacción y de 4 para sistemas elástico-lineales, con el propósito de evitar modificaciones importantes en las propiedades espectrales de los registros.

No fue sino hasta finales de la década de 1990 cuando comenzaron a desarrollarse investigaciones específicamente orientadas a evaluar el posible sesgo introducido por el escalamiento en amplitud. Shome et al. (1998) estudiaron la influencia del escalamiento sobre diversas medidas de daño, entre ellas la demanda de ductilidad de desplazamiento, la energía histerética normalizada y un índice global de daño, obtenidas a partir de la respuesta de un sistema de múltiples grados de libertad (MDOF). Para ello emplearon un modelo de masas concentradas con un periodo fundamental de 1.05 s, comportamiento postelástico no degradante y sin considerar efectos de segundo orden ($P-\Delta$). Los autores observaron que, al emplear registros con características sismológicas similares (magnitud y distancia del sitio a la fuente) y escalarlos respecto a la mediana de $Sa(T_1)$ del conjunto, la mediana de las medidas de daño resultantes era comparable a la obtenida utilizando registros sin escalar. Con base en estos resultados, recomendaron seleccionar registros compatibles con las características sismológicas del escenario de interés y escalarlos a la mediana de $Sa(T_1)$ estimada mediante un modelo de predicción del movimiento del terreno (GMPE, por sus siglas en inglés, o ley de atenuación), para su utilización en análisis dinámicos no lineales.

De manera similar, Iervolino y Cornell (2005) evaluaron el posible sesgo introducido por el escalamiento en amplitud utilizando sistemas de un grado de libertad (SDOF) con periodos comprendidos entre 0.1 y 4 s, dos niveles de resistencia lateral y comportamiento bilineal con endurecimiento postelástico del 3%. Para el sistema con periodo fundamental de 1.5 s, también analizaron un comportamiento trilineal con pendiente postelástica del 3% y una resistencia lateral equivalente a un octavo de la resistencia elástica. Asimismo, consideraron dos sistemas de múltiples grados de libertad (MDOF), correspondientes a marcos resistentes a momento: uno de concreto reforzado, con periodo fundamental de 0.85 s, y otro de acero, con periodo fundamental de 1.5 s. Ambos fueron representados mediante modelos con plasticidad concentrada y comportamiento degradante por flexión y corte. Los resultados indicaron que el uso de factores de escala de hasta 4 no introducía un sesgo apreciable en las distorsiones máximas de entrepiso, utilizadas como parámetro de demanda ingenieril (EDP, por sus siglas en inglés), para respuestas con demandas de ductilidad de hasta 6.

Un año después, Bazzurro y Luco (2006) investigaron el efecto del escalamiento en amplitud en registros de campo cercano ajustados espectralmente. Para ello, evaluaron la respuesta de sistemas SDOF con comportamiento elastoplástico perfecto (EPP), periodos fundamentales entre 0.0625 y 4 s y factores de reducción de resistencia lateral entre 1 y 8, sometidos a registros reales sin escalar, registros escalados en amplitud y registros ajustados

espectralmente. A diferencia de los trabajos anteriores, sus resultados indicaron que el escalamiento en amplitud podía introducir un sesgo en la estimación del desplazamiento máximo.

Posteriormente, Luco y Bazzurro (2007) profundizaron el análisis del posible sesgo mediante sistemas SDOF con periodos entre 0.1 y 4 s, seis niveles de resistencia lateral y comportamiento bilineal con endurecimiento postelástico del 2%. Adicionalmente, evaluaron un edificio de acero de nueve niveles, estructurado mediante marcos resistentes a momento, con periodo fundamental de 2.3 s y endurecimiento por deformación del 3% respecto a la rigidez elástica de sus vigas y columnas. Los registros se separaron en grupos definidos por su magnitud (M_w) y la distancia más cercana del sitio a la falla (R_{close}), con el propósito de evaluar el sesgo dentro de cada grupo, así como el existente entre grupos con diferentes características sismológicas. Los resultados sugirieron que ambos tipos de escalamiento inducían sesgo en la respuesta de los sistemas SDOF y MDOF y que su magnitud aumentaba con el factor de escala. También observaron que dicho sesgo se reducía cuando los registros presentaban formas espectrales similares.

Debe señalarse que, en los estudios de Bazzurro y Luco (2006) y Luco y Bazzurro (2007), los registros fueron seleccionados únicamente a partir de parámetros causales, como (M_w) y (R_{close}), sin considerar explícitamente su compatibilidad con la demanda sísmica de los sistemas analizados, por ejemplo, mediante $S_a(T_I)$. En el segundo estudio, cada registro de un grupo fue utilizado sucesivamente como movimiento objetivo. Los demás registros se escalaron hasta igualar su ordenada espectral y las respuestas máximas obtenidas antes y después del escalamiento se normalizaron respecto a la respuesta producida por el registro objetivo. Aunque este procedimiento permitió identificar diferencias entre las respuestas, no permitió relacionar directamente la magnitud del sesgo con el factor de escala ni evaluar formalmente su significancia estadística debido a la correlación inherente en sus resultados.

Durante el mismo año, Baker (2007) estudió la respuesta de un edificio de marcos de concreto reforzado de 7 niveles con periodo fundamental de 0.8 s sometido a un set de 40 registros de aceleración escalados al mismo nivel de intensidad, expresada en términos de $S_a(T_I)$. Baker (2007) observó que, cuando los registros son seleccionados en base al parámetro de forma espectral Épsilon (ε , Baker y Cornell 2006), los registros pueden ser escalados sin introducir un sesgo importante en la estimación de la respuesta, mientras que escalar registros seleccionados de manera arbitraria o en base a la magnitud y la distancia del sitio a la falla introduce un sesgo significativo en la estimación de la respuesta. El parámetro ε se define como el número de desviaciones estándar por el cual el logaritmo natural de una ordenada espectral difiere del valor medio estimado por un modelo de predicción del movimiento del terreno para la misma magnitud, distancia del sitio a la falla, mecanismo de ruptura y condiciones de suelo. Matemáticamente:

$$\varepsilon(T) = \frac{\ln S_a(T) - \mu_{\ln S_a}(M,R,T)}{\sigma_{\ln S_a}(T)} \quad (9)$$

donde $\ln S_a(T)$ es el logaritmo natural de la ordenada espectral observada correspondiente a un periodo T , usualmente considerado como T_I ; $\mu_{\ln S_a}$ es el valor medio predicho por la ley de atenuación y $\sigma_{\ln S_a}$ es la desviación estándar logarítmica correspondiente. Los resultados de

este estudio muestran una dependencia relativamente baja de la distorsión máxima de entrepiso respecto al factor de escala empleado; sin embargo, sus resultados también muestran que la estructura estudiada experimentó únicamente excursiones inelásticas de leves a moderadas.

Zacharenaki et al. (2014) evaluaron el sesgo asociado con el escalamiento empleado en análisis dinámicos incrementales (IDA, por sus siglas en inglés; Vamvatsikos y Cornell, 2002). Para ello, consideraron seis sistemas SDOF y dos MDOF. Los sistemas SDOF tenían periodos entre 0.1 y 1.5 s y un comportamiento postelástico degradante representado mediante relaciones fuerza-deformación trilineales que incorporaban degradación cíclica y dentro de cada ciclo. Los sistemas MDOF correspondían a dos edificios de marcos resistentes a momento de acero, diseñados para un sitio en Los Ángeles, California, con periodos fundamentales de 0.93 y 2.34 s. Los modelos consideraban plasticidad concentrada exclusivamente en los extremos de las trabes, suponiendo que las columnas permanecían en el intervalo elástico. Debido a que pocos de los registros disponibles producían incursiones inelásticas significativas, los autores complementaron la base de datos con registros sintéticos. Los resultados indicaron que el sesgo en la estimación de la capacidad de colapso de los sistemas SDOF se concentraba en aquellos de periodo corto ($T_n \leq 0.5$ s), mientras que no se identificó un sesgo significativo en los sistemas MDOF analizados.

Dávalos y Miranda (2019a) evaluaron el sesgo introducido por el uso de factores de escala en la respuesta inelástica, con particular énfasis en la estimación probabilística del colapso. Su objetivo no se limitó a determinar la existencia del sesgo, sino que incluyó cuantificar su magnitud e identificar las condiciones estructurales bajo las cuales podía resultar más significativo. El estudio consideró sistemas SDOF con periodos entre 0.2 y 2 s, resistencias laterales equivalentes a entre un cuarto y la mitad de la resistencia elástica y comportamiento bilineal degradante con una pendiente postelástica negativa equivalente al 3% de la pendiente elástica. También se analizaron cuatro sistemas MDOF correspondientes a marcos de concreto resistentes a momento, con periodos fundamentales entre 0.63 y 1.16 s, modelados mediante plasticidad concentrada y considerando degradación cíclica y dentro de cada ciclo. Cada sistema fue sometido a tres conjuntos de 50 registros de aceleración. Los registros del primer conjunto requerían factores de escala cercanos a 1 para alcanzar la intensidad objetivo; los del segundo, factores cercanos a 5; y los del tercero, factores cercanos a 10. La intensidad objetivo se definió, para el periodo de cada sistema, mediante la ordenada del espectro de peligro uniforme correspondiente a un periodo de retorno de 2475 años. A partir de las probabilidades de colapso y de las respuestas inelásticas de los análisis que no produjeron colapso, los autores concluyeron que el escalamiento en amplitud introducía sesgo en la estimación de la respuesta estructural y que este aumentaba con el factor de escala. Asimismo, observaron que su magnitud dependía del periodo fundamental, la resistencia lateral y el comportamiento postelástico del sistema. Los mayores sesgos se presentaron en estructuras de periodo corto, con menor resistencia lateral y con una mayor pérdida de resistencia dentro de cada ciclo, representada por una pendiente postelástica más negativa.

En un estudio relacionado, Dávalos y Miranda (2019b) analizaron si el sesgo persistía cuando los registros se seleccionaban considerando su forma espectral. Para ello, evaluaron los mismos sistemas estructurales y utilizaron nuevamente tres conjuntos de 50 registros, con

factores de escala aproximadamente iguales a 1, 5 y 10. A diferencia del estudio anterior, los registros se seleccionaron mediante el método del espectro condicionado (Baker, 2011; Jayaram et al., 2011), de manera que los tres conjuntos, condicionados al periodo correspondiente de cada sistema, reprodujeran tanto la forma espectral media objetivo como la variabilidad de las ordenadas espectrales en periodos diferentes del periodo condicionante. De este modo, cada sistema fue sometido a conjuntos de registros con factores de escala considerablemente diferentes, pero con distribuciones de forma espectral similares. Los resultados mostraron que, incluso al controlar la forma espectral de los registros no escalados, el escalamiento en amplitud seguía introduciendo sesgo en la estimación de la respuesta estructural, cuya magnitud aumentaba con el factor de escala. Adicionalmente, los autores compararon distintas características de los registros escalados y no escalados. Estas comparaciones mostraron que, aun cuando la media y la variabilidad de $S_a(T_1)$ eran equivalentes entre los conjuntos, persistían diferencias en otras propiedades del movimiento. En particular, observaron que: 1) las ordenadas del espectro de amplitudes de Fourier y las ordenadas de pseudoaceleración espectral para un amortiguamiento crítico del 1% eran mayores en los registros escalados, lo que indicaba un mayor contenido de energía en determinados intervalos de frecuencia; y 2) la velocidad incremental (Bertero et al., 1978; Anderson y Bertero, 1987) de los registros no escalados tendía a concentrarse en un menor número de pulsos, mientras que los registros escalados contenían un mayor número de pulsos potencialmente dañinos. Los autores atribuyeron el sesgo observado a estas diferencias entre los movimientos escalados y no escalados, las cuales persistían incluso después de controlar el efecto de la forma espectral.

En conjunto, los estudios revisados muestran una evolución en el entendimiento del efecto del escalamiento en amplitud. Mientras que algunas de las primeras investigaciones concluyeron que el uso de factores de escala moderados no introducía sesgos significativos bajo determinadas condiciones, trabajos posteriores mostraron que el sesgo puede depender de la magnitud del factor de escala, de las propiedades dinámicas y del comportamiento inelástico del sistema, así como de las características de los registros seleccionados. En particular, los resultados de Dávalos y Miranda (2019b) indican que el sesgo puede persistir aun cuando se controla la forma espectral, lo que sugiere que otras propiedades del movimiento del terreno, adicionales a la forma espectral, también influyen en la respuesta estructural.

2.4 - Forma Espectral y su Influencia en la Respuesta Estructural

Como se ha mencionado anteriormente, la selección y el escalamiento de registros de aceleración empleados en evaluaciones cercanas al colapso representan algunos de los principales retos dentro del marco de la Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño. Diferentes investigaciones han demostrado que la forma espectral proporciona información adicional a la ordenada espectral en el periodo fundamental de la estructura y que su incorporación permite generar predicciones más precisas de la respuesta estructural. En esta sección se presenta una revisión de las investigaciones realizadas sobre la influencia de la forma espectral en la respuesta estructural, los diferentes parámetros propuestos para caracterizarla y las evaluaciones de su suficiencia y eficiencia.

El desarrollo de medidas de intensidad relacionadas, al menos indirectamente, a la forma de los espectros de respuesta, puede remontarse a hace más de 90 años. Benioff (1934) propuso una medida física del “potencial destructivo” sísmico, S , definida como la integral del desplazamiento máximo de una serie de sismómetros de péndulo no amortiguados con respecto a sus frecuencias. Este estudio no especifica el rango de frecuencias sobre el cual debe integrarse el denominado espectro pendular y menciona que dichos límites “deben determinarse a partir de observaciones en edificaciones”. Housner (1952) propuso otra de estas primeras medidas, definida como el área bajo el espectro de velocidad entre periodos de 0.1 y 2.5 s. En su estudio original, señaló que, si una ciudad contiene un gran número de estructuras cuyos periodos de vibración siguen una distribución de probabilidad uniforme dentro de este intervalo, la medida puede representar la tendencia central de la demanda en el conjunto de estructuras.

Posteriormente, se desarrollaron estudios sobre la forma espectral basados en la relación entre la Velocidad Máxima del Terreno (PGV) y la Aceleración Máxima del Terreno (PGA). Newmark (1973) encontró que la relación entre PGV y PGA varía en función de las condiciones del sitio, resultado posteriormente corroborado por Seed et al. (1976). Zhu et al. (1988) y Tso et al. (1992) mostraron que el cociente entre PGA y PGV proporciona información sobre el contenido de frecuencias del movimiento del terreno y, por lo tanto, constituye una medida aproximada de su forma espectral. En particular, Zhu et al. (1988) encontraron que este cociente influye significativamente en la demanda de ductilidad de sistemas de un grado de libertad (SDOF) con comportamiento bilineal cuando los registros se escalan a un mismo valor de PGA . Asimismo, observaron que, al escalar los registros a un mismo valor de PGV , su influencia sobre las demandas de resistencia disminuía para sistemas con periodos mayores a 0.5 s, mientras que esta tendencia no se presentaba en sistemas de periodos más cortos.

Kennedy et al. (1984) demostraron que la relación entre la ordenada espectral correspondiente al periodo de vibración del primer modo (i.e., $S_a(T_1)$) y el promedio calculado entre dicha ordenada y la correspondiente a un periodo alargado influye en la respuesta no lineal de la estructura. En particular, observaron que, cuando la ordenada promedio es mayor que $S_a(T_1)$, los registros requieren menores factores de escala para producir una determinada demanda de ductilidad que aquellos cuya ordenada promedio es menor que $S_a(T_1)$. Por su parte, Sewell et al. (1996) observaron que el potencial de daño de registros de aceleración está fuertemente relacionado con su forma espectral y que, para registros escalados a un mismo valor de $S_a(T_1)$, la pendiente del espectro en T_1 se relaciona con el potencial de daño del movimiento.

Ordaz y Pérez-Rocha (1998) realizaron un estudio dirigido a estimar factores de reducción de resistencia de sistemas SDOF. Para incorporar el efecto de la forma espectral, utilizaron el cociente entre el desplazamiento espectral correspondiente al periodo fundamental de la estructura, ($S_d(T_1)$) y el desplazamiento máximo del terreno (PGD). Los autores observaron que esta expresión de forma espectral proporciona estimaciones tan precisas como otras formulaciones existentes, con la ventaja adicional de ser aplicable tanto a suelos blandos como a suelos rígidos. De manera similar, Akkar y Miranda (2004) encontraron que la relación entre el desplazamiento inelástico y el desplazamiento elástico de sistemas SDOF

de periodo corto es sensible al cociente entre la ordenada de pseudovelocidad correspondiente al periodo fundamental ($S_v(T_1)$) y PGV , especialmente en sistemas con menor resistencia lateral, es decir, con factores de reducción de resistencia mayores a 4. Al incorporar este cociente en la predicción de las demandas de desplazamiento inelástico, los autores redujeron la dispersión de los resultados hasta en un 50%.

La importancia de considerar varias ordenadas espectrales también fue señalada por Shome y Cornell (1999), quienes encontraron que la dispersión de la distorsión máxima de entrepiso se reduce considerablemente cuando los registros se seleccionan condicionando tanto la ordenada espectral correspondiente al segundo modo de vibración ($S_a(T_2)$), como a $S_a(T_1)$. Asimismo, observaron que la probabilidad de colapso condicionada únicamente a $S_a(T_1)$ puede diferir significativamente de la probabilidad condicionada adicionalmente a $S_a(T_2)$ o $S_a(T_3)$, dado un mismo valor de $S_a(T_1)$.

Durante las últimas dos décadas, diversos investigadores han propuesto parámetros específicamente orientados a representar la forma espectral. Una parte importante de estos estudios ha buscado condensar dicha información en un solo valor escalar o en una medida vectorial formada por ($S_a(T_1)$) y un parámetro complementario. En general, se ha observado que incorporar estas medidas junto con la ordenada espectral correspondiente al periodo fundamental mejora la predicción de la respuesta máxima de los sistemas estructurales. A continuación, se resumen algunos de los parámetros más relevantes identificados en la literatura.

Cordova et al. (2000) propusieron una medida denominada R_{Sa} , definida como el cociente entre la ordenada espectral en un periodo alargado y la ordenada correspondiente al periodo de primer modo, $S_a(T_1)$. Los autores recomiendan considerar un periodo alargado igual a $2 \cdot T_1$. Matemáticamente, este parámetro se expresa como:

$$R_{Sa} = \frac{S_a(T_f)}{S_a(T_1)} \quad (10)$$

donde T_1 es el periodo de primer modo de vibración y T_f representa el periodo asociado a la pérdida de rigidez del sistema. Los autores atribuyeron los beneficios de esta medida al fenómeno denominado “elongación del periodo”. Ellos proponen que una vez que la estructura experimenta daño, su periodo de vibración aumenta como consecuencia de la pérdida de rigidez. Por consiguiente, para un mismo valor $S_a(T_1)$, los registros con mayores ordenadas espectrales en el periodo alargado pueden resultar más dañinos para la estructura. Cordova et al. (2000) combinaron R_{Sa} con $S_a(T_1)$ en un solo parámetro denominado S^* , calculado como el producto de $S_a(T_1)$ y R_{Sa} elevado a una potencia α ; es decir, como una combinación geométrica de ambas medidas. Los autores encontraron una reducción significativa de la dispersión en la estimación de la respuesta estructural máxima, evaluada mediante las distorsiones máximas de entrepiso condicionadas a esta medida de intensidad. Estas observaciones fueron confirmadas por Mehanny y Deierlein (2000), quienes encontraron que incorporar R_{Sa} , calculado utilizando el periodo asociado a la rigidez secante obtenida de un análisis estático no lineal, junto con ($S_a(T_1)$), reducía la variabilidad entre registros en la estimación de la distorsión máxima de entrepiso.

Vamvatsikos y Cornell (2005) estudiaron los beneficios estadísticos de utilizar un vector de medidas de intensidad, particularmente $S_a(T_1)$ en combinación con la ordenada espectral correspondiente a otro periodo. A partir de resultados de análisis dinámicos incrementales (Vamvatsikos y Cornell, 2002) de tres edificios con periodos fundamentales de 1.8, 2.4 y 4 s, observaron que las intensidades asociadas con la menor variabilidad para un nivel determinado de demanda no necesariamente correspondían al periodo fundamental de la estructura. Los autores observaron que la menor variabilidad en la respuesta estimada usando $S_a(T_1)$ como la IM se obtenía únicamente cuando la estructura permanecía elástica y su respuesta estaba dominada por el primer modo de vibración. Este estudio utilizó la misma forma funcional propuesta por Cordova et al. (2000) para calcular R_{Sa} . Sin embargo, a diferencia de Shome y Cornell (1999), quienes consideraron los primeros dos modos de vibración, y de Mehanny y Deierlein (2000) y Cordova et al. (2000), quienes fijaron uno de los periodos en el periodo fundamental, Vamvatsikos y Cornell (2005) buscaron las combinaciones de dos o tres periodos cuyas ordenadas espectrales produjeran la mínima dispersión para cada nivel de demanda. Los autores observaron que los periodos óptimos variaban con el nivel de demanda y que, en términos generales, la separación entre ellos aumentaba a medida que la respuesta estructural se volvía más intensa. Asimismo, encontraron reducciones importantes de la dispersión al incluir una o dos ordenadas espectrales adicionales. En el intervalo no lineal, por ejemplo, la dispersión de la demanda disminuyó de 0.75, obtenido al utilizar PGA , a aproximadamente 0.4 al utilizar $S_a(T_1)$, a alrededor de 0.25 al emplear la ordenada correspondiente al periodo óptimo y a menos de 0.2 al utilizar conjuntamente las ordenadas de los dos periodos óptimos. Finalmente, el estudio propuso una manera de estimar una medida escalar que incorporara todas las ordenadas espectrales dentro de un determinado intervalo de periodos. Sin embargo, los autores señalaron que esta formulación no era indispensable, ya que podían obtenerse reducciones importantes mediante vectores formados por dos o tres ordenadas espectrales.

Durante el mismo año, Baker y Cornell (2005) propusieron una medida de intensidad vectorial compuesta por la ordenada espectral correspondiente al periodo de primer modo y el parámetro Épsilon, (ε), definido en la Ecuación (9). El estudio también presentó una metodología para incorporar medidas de intensidad vectoriales en la estimación probabilística de la demanda estructural. De manera similar a estudios anteriores, Baker y Cornell (2005) postularon la importancia de considerar la forma espectral y la asociaron tanto con los efectos de modos superiores, en periodos menores que el fundamental, como con la elongación del periodo producida cuando la estructura incursiona en el intervalo inelástico, en periodos mayores que el fundamental. Los autores propusieron ε como una medida de forma espectral al observar que los registros con valores positivos de ε tienden a presentar espectros con forma de “pico”; es decir, las ordenadas en periodos adyacentes a T_1 tienden a ser menores que la ordenada en T_1 . Por el contrario, los registros con valores negativos de ε tienden a presentar espectros con forma de “valle”, en los cuales las ordenadas alrededor de T_1 son mayores que la correspondiente a T_1 .

Esta interpretación se basa en que un valor positivo de ε indica que $S_a(T_1)$ es mayor que el valor medio esperado. Debido a que las ordenadas espectrales correspondientes a distintos periodos no están perfectamente correlacionadas, una ordenada superior al promedio en T_1

no implica que las ordenadas de los periodos vecinos también sean superiores al promedio, lo que puede producir un pico en el espectro. De manera análoga, una ordenada inferior al promedio en T_I puede generar una forma espectral de valle. Dados los efectos postulados de los modos superiores y de la elongación del periodo, para dos registros con el mismo valor de $S_a(T_I)$, aquel con menor valor de ε tendería a producir una mayor demanda estructural. Los autores estudiaron un edificio de concreto con marcos resistentes a momento y 15 modelos generalizados de este mismo sistema estructural, sometidos a dos conjuntos de 40 registros de aceleración. Los registros fueron seleccionados sin considerar previamente su valor de ε , con el propósito de obtener una muestra aproximadamente aleatoria de este parámetro. Tras comparar curvas de demanda sísmica estimadas utilizando $S_a(T_I)$, el vector formado por $S_a(T_I)$ y la magnitud y el vector formado por $S_a(T_I)$ y ε , los autores concluyeron que las estimaciones basadas únicamente en $S_a(T_I)$ tendían a sobreestimar la demanda y recomendaron incorporar ε como medida de forma espectral.

En un estudio posterior, Baker y Cornell (2006) propusieron una metodología para seleccionar registros a partir de la magnitud, la distancia y el valor esperado de ε para un sitio determinado. El procedimiento consiste en identificar movimientos cuya forma espectral sea compatible con un espectro objetivo, denominado Espectro de Media Condicionada (EMC). Los autores plantearon que la magnitud y la distancia de los registros seleccionados podían omitirse como criterios explícitos cuando la forma de sus espectros, una vez escalados a la intensidad condicionante, fuera compatible con el EMC. Al comparar la respuesta de un edificio de concreto con marcos resistentes a momento sometido a cuatro conjuntos de registros seleccionados mediante estrategias diferentes, los autores encontraron que la tendencia central de las demandas de desplazamiento producidas por los registros seleccionados a partir del EMC era menor que la obtenida con registros seleccionados arbitrariamente o mediante parámetros causales y prácticamente idéntica a la producida por registros seleccionados con base en el valor esperado de ε . Sin embargo, las reducciones en la variabilidad de la respuesta fueron mínimas tanto para los registros seleccionados mediante ε como para los seleccionados mediante el EMC. Los autores también propusieron como alternativa seleccionar y escalar los registros utilizando la media geométrica de las ordenadas espectrales comprendidas dentro de un determinado intervalo de periodos, comparándola con la media correspondiente del EMC. El procedimiento de selección de registros basado en el EMC fue desarrollado con mayor profundidad por Baker (2011).

Mousavi et al. (2011) propusieron un parámetro alternativo de forma espectral denominado Eta, (η), definido mediante una combinación lineal del parámetro ε propuesto por Baker y Cornell (2005) y una variante de este calculada utilizando las observaciones y predicciones de PGV en lugar de $S_a(T_I)$. Matemáticamente:

$$\eta = a_1 \varepsilon_{(S_a)} + a_2 \varepsilon_{(PGV)} \quad (11)$$

donde a_1 y a_2 son constantes determinadas por medio de una regresión, $\varepsilon_{(S_a)}$ corresponde al mismo valor de ε discutido previamente y descrito en la Ecuación (10) y $\varepsilon_{(PGV)}$ es el número de desviaciones estándar que el logaritmo natural de PGV de un registro difiere del valor medio estimado por un GMPE para los mismos parámetros causales, condiciones de sitio y mecanismo de ruptura correspondientes al registro. A partir de análisis dinámicos

incrementales de sistemas SDOF con periodos entre 0.1 y 2.0 s, ductilidades entre 2 y 12 y comportamiento trilineal degradante, sometidos a 78 registros de aceleración, los autores observaron correlaciones relativamente débiles entre $\varepsilon_{(S_a)}$ y la intensidad que producía el colapso. Después de evaluar diferentes combinaciones lineales de valores de Épsilon calculados a partir de $S_a(T_1)$, PGA , PGV y PGD , concluyeron que la combinación de $\varepsilon_{(PGV)}$ y $\varepsilon_{(S_a)}$ proporcionaba un mejor parámetro para usar junto con $S_a(T_1)$ como una mejor medida de intensidad. Los autores atribuyeron la mayor correlación entre η y la intensidad de colapso, medida en términos de $S_a(T_1)$ en comparación con la obtenida mediante $\varepsilon_{(S_a)}$, a que η caracteriza de manera más adecuada la forma espectral.

Bojórquez y Iervolino (2011) propusieron una medida de intensidad vectorial compuesta por $S_a(T_1)$ y un parámetro de forma espectral denominado N_p . Este parámetro se define como el cociente entre la media geométrica de las ordenadas espectrales comprendidas entre el periodo de primer modo T_1 y un periodo alargado T_N , y la ordenada espectral correspondiente al periodo fundamental. Matemáticamente:

$$N_p = \frac{S_{a_{avg}}([T_1, T_N])}{S_a(T_1)} \quad (12)$$

$$S_{a_{avg}}([T_1, T_N]) = (\prod_{i=1}^N S_a(T_i))^{1/N}, \quad T_i \in [T_1, T_N] \quad (13)$$

donde N es el número de periodos empleados para calcular $S_{a_{avg}}$ y $S_a(T_i)$ son las ordenadas de pseudoaceleración correspondientes a cada periodo T_i consideradas dentro del intervalo comprendido entre T_1 y T_N . Los autores propusieron N_p como una medida de forma espectral en periodos mayores a T_1 , sin incluir periodos menores a T_1 . La medida vectorial fue evaluada en términos de eficiencia, suficiencia y robustez frente al factor de escala mediante análisis no lineales de sistemas SDOF con comportamiento bilineal y dos sistemas MDOF correspondientes a marcos resistentes a momento de concreto y acero. Los sistemas fueron sometidos a tres conjuntos de registros que incluían movimientos ordinarios, registros clasificados como “tipo pulso” y registros de “banda angosta”. El estudio encontró que la incorporación de N_p junto con $S_a(T_1)$ producía reducciones de hasta 70% en la variabilidad de la respuesta estructural respecto a la obtenida utilizando únicamente $S_a(T_1)$, siempre que se seleccionara un valor razonable de T_N , recomendado como al menos dos veces el periodo fundamental. Los autores también propusieron una medida escalar, I_{Np} , definida como una combinación geométrica de $S_a(T_1)$ y N_p , con el propósito de simplificar la incorporación de esta medida en los análisis probabilísticos de peligro sísmico.

Varios de los estudios anteriormente mencionados, entre ellos Cordova et al. (2000), Mehanny y Deierlein (2000), Vamvatsikos y Cornell (2005), Baker y Cornell (2006) y Bojórquez y Iervolino (2011), consideraron medidas obtenidas al promediar diferentes ordenadas espectrales dentro de un intervalo de periodos. Con excepción del trabajo de Baker y Cornell (2006), enfocado principalmente a una metodología de selección de registros basadas en este promedio y en el EMC, la mayoría de estos estudios propuso medidas vectoriales que combinan $S_a(T_1)$ con un parámetro complementario de forma espectral. De acuerdo con la revisión realizada, el primer trabajo que estudió este promedio como una medida escalar específicamente para la estimación del colapso estructural fue desarrollado por Eads et al. (2013, 2015), quienes examinaron diferentes rangos y distribuciones de

periodos para el promedio de las ordenadas espectrales y evaluaron su eficiencia y suficiencia. Estos autores analizaron Sa_{avg} , definida como la media geométrica de ordenadas espectrales equidistantes comprendidas entre periodos $a \cdot T_1$ y $b \cdot T_1$, donde a y b son constantes positivas y $b > a$. Matemáticamente:

$$Sa_{avg}(T_1 \cdot [a, b]) = (\prod_{i=1}^N S_a(T_i))^{1/N}, \quad T_i \in [a \cdot T_1, b \cdot T_1] \quad (14)$$

donde $S_a(T_i)$ representa cada una de las ordenadas espectrales dentro del intervalo $[a \cdot T_1, b \cdot T_1]$ y N es el número total de ordenadas incluidas en el promedio geométrico. El estudio recomendó utilizar un rango de periodos asimétrico, considerando ordenadas correspondientes a periodos más cortos y largos a T_1 , con $a = 0.2$ y $b = 3.0$. Los autores evaluaron la eficiencia y suficiencia de Sa_{avg} y $S_a(T_1)$ a partir de análisis dinámicos no lineales de 396 modelos genéricos de marcos resistentes a momento, 252 modelos genéricos de muros de corte y 30 edificios con marcos de concreto reforzado. Los resultados mostraron que Sa_{avg} era considerablemente más eficiente que $S_a(T_1)$, con reducciones promedio de entre 40% y 54% en la variabilidad de la intensidad de colapso respecto a la obtenida utilizando $S_a(T_1)$. Asimismo, los resultados sugirieron que Sa_{avg} era más suficiente que $S_a(T_1)$ respecto a la magnitud, la distancia y ε .

Posteriormente, Eads et al. (2016) propusieron un parámetro de forma espectral denominado $SaRatio$, definido como el cociente entre $S_a(T_1)$ y Sa_{avg} :

$$SaRatio = \frac{S_a(T_1)}{Sa_{avg}(T_1 \cdot [a, b])} \quad (15)$$

donde $S_a(T_1)$ es la ordenada espectral correspondiente al periodo fundamental y Sa_{avg} es la misma media geométrica definida en la Ecuación (14). Los autores no propusieron este parámetro para utilizarlo como parte de un vector en combinación con $S_a(T_1)$, sino como una herramienta para explicar la relación entre la forma espectral, representada por Sa_{avg} , y la intensidad de colapso medida mediante $S_a(T_1)$, así como la reducción en la variabilidad obtenida al utilizar una u otra medida. Para dos registros con el mismo valor de $S_a(T_1)$, aquel que presente un mayor Sa_{avg} tendrá un menor valor de $SaRatio$ y, de acuerdo con los autores, un mayor potencial de daño.

El estudio mostró además que $SaRatio$ presentaba una correlación más alta con la intensidad de colapso que otros parámetros espectrales, entre ellos ε , η y N_p . En un trabajo relacionado, Eads et al. (2013) demostraron que incluir periodos menores que T_1 mejora la estimación de la respuesta de sistemas SDOF, los cuales, por definición, no presentan efectos de modos superiores. A diferencia de la mayoría de los estudios anteriores, en la propuesta original de $SaRatio$ los autores no atribuyeron su alta correlación con la capacidad de colapso, ni la eficiencia de Sa_{avg} , exclusivamente a la consideración de periodos mayores que T_1 o a la captura de la elongación del periodo fundamental. En cambio, los autores señalaron que la incorporación de ordenadas espectrales tanto menores como mayores que T_1 proporciona información adicional sobre las características del movimiento del terreno, incluidos los pulsos de aceleración responsables de las respuestas elásticas máximas de osciladores con periodos ubicados a ambos lados de T_1 .

Marafi et al. (2016) propusieron otra medida de intensidad que incorpora explícitamente un parámetro de forma espectral. Esta medida, dependiente de la ductilidad y denominada IM_{comb} , se define como una combinación geométrica de $S_a(T_1)$, un parámetro de forma espectral denominado SS_a y una medida de duración, específicamente la duración significativa 5-75. El parámetro SS_a se define como la integral del espectro de pseudoaceleración con 5% de amortiguamiento entre el periodo fundamental y un periodo alargado $\alpha \cdot T_1$, normalizada por el área de un rectángulo de altura $S_a(T_1)$ y ancho $(\alpha-1) \cdot T_1$. Matemáticamente:

$$SS_a(T_1, \alpha) = \frac{\int_{T_1}^{\alpha \cdot T_1} S_a(T) dT}{S_a(T_1)(\alpha-1)T_1} \quad (16)$$

donde T_1 es el periodo fundamental del sistema, $S_a(T)$ es la ordenada del espectro de pseudoaceleración correspondiente al periodo T y $\alpha \cdot T_1$ representa el periodo alargado utilizado como límite superior de la integración. El cociente entre el periodo alargado y el periodo fundamental, α , se define como el producto de una constante C_α , con valor de 1.3, y la raíz cuadrada de la ductilidad del sistema, μ . Una vez definido SS_a , la medida combinada se expresa matemáticamente como:

$$IM_{comb} = S_a(T_1) \cdot D_{S_{5-95}}^{C_{dur}} \cdot SS_a^{C_{shape}} \quad (17)$$

donde los exponentes determinan la contribución relativa de $S_a(T_1)$, la duración significativa y la forma espectral a la intensidad sísmica. Estos exponentes fueron obtenidos mediante análisis de regresión y toman valores de $C_{dur} = 0.07$ y $C_{shape} = 0.49$ para estructuras frágiles y de $C_{dur} = 0.11$ y $C_{shape} = 0.72$ para estructuras dúctiles. Marafi et al. (2016) evaluaron la eficiencia y suficiencia tanto de IM_{comb} como de SS_a mediante sistemas SDOF con comportamiento elastoplástico perfecto, sistemas SDOF con comportamiento bilineal degradante y sistemas MDOF correspondientes a marcos de concreto resistentes a momento. Al comparar IM_{comb} con otras medidas de intensidad, entre ellas $S_a(T_1)$, observaron mejoras en eficiencia y suficiencia para predecir los factores de reducción de resistencia correspondientes a un nivel de ductilidad determinado. Asimismo, para los sistemas con comportamiento bilineal degradante, observaron mejoras en la predicción de factores de reducción de resistencia que conducen al colapso. Los autores atribuyeron la eficiencia de IM_{comb} a la inclusión explícita de la duración y a que el parámetro de forma espectral SS_a depende de la ductilidad del sistema y representa la denominada elongación del periodo.

En conjunto, los estudios revisados muestran de manera consistente que la forma espectral ejerce una influencia importante en la respuesta estructural y que la incorporación de la información adicional a $S_a(T_1)$ permite reducir la incertidumbre en su estimación. No obstante, en el presente estudio no se adopta una métrica específica de forma espectral como medida de intensidad complementaria. En su lugar, como se describe en la Sección 3.5, se seleccionan conjuntos de registros con diferentes factores de escala cuyos espectros de respuesta se asemejan al espectro objetivo. Posteriormente, dentro de cada conjunto se identifican los registros con mayores y menores duraciones, de manera que el efecto de la duración pueda evaluarse bajo condiciones de forma espectral comparables.

2.5 - Efecto de la Duración en la Respuesta Inelástica y la Probabilidad de Colapso

El efecto de la duración en la respuesta inelástica y la probabilidad de colapso ha sido objeto de un amplio debate en la literatura a lo largo de las últimas décadas. Mientras algunos estudios sostienen que su influencia es marginal en comparación con la de otras características del movimiento, investigaciones más recientes han propuesto que la duración puede tener un efecto significativo y que debería considerarse explícitamente en la estimación de la capacidad de colapso de las estructuras. En particular, varios estudios han intentado aislar su influencia de la correspondiente a otras características del movimiento, especialmente la forma espectral. Las investigaciones existentes difieren ampliamente en sus metodologías, los parámetros de respuesta evaluados y los modelos estructurales considerados, entre otros aspectos. Esta sección presenta una revisión de los estudios más relevantes sobre el tema. Para una revisión más extensa de la influencia de la duración en diferentes parámetros de respuesta, se refiere al lector al trabajo de Hancock y Bommer (2006).

Uno de los primeros estudios sobre la influencia de la duración en el potencial de daño de los registros de aceleración fue realizado por Sewell (1992), quien evaluó su efecto sobre los factores de reducción de resistencia requeridos para alcanzar un mismo nivel de demanda en términos de ductilidad, energía histerética y medidas de daño acumulado. Tras analizar la respuesta de 91 sistemas SDOF sometidos a un conjunto de 262 registros de aceleración, el autor concluyó que los factores de reducción de resistencia y, por consiguiente, el potencial de daño de los registros, no presentaban una correlación apreciable con su duración. Asimismo, propuso que la demanda sísmica podía caracterizarse adecuadamente sin considerar explícitamente la duración del movimiento. Estas observaciones fueron respaldadas por Bazzurro y Cornell (1994), Shome et al. (1998) y Shome (1999), quienes evaluaron sistemas MDOF y concluyeron que la respuesta estructural era poco dependiente de la duración. Estos estudios también señalaron la dificultad de separar los efectos de la duración de los producidos por otras características del movimiento.

Cornell (1997) evaluó la variación con la duración de los factores de reducción de resistencia requeridos para alcanzar cuatro niveles de ductilidad en función de la duración. Asimismo, estudió las diferencias entre espectros inelásticos de ductilidad constante obtenidos para conjuntos de registros con distintas duraciones. El autor concluyó que no existía una dependencia clara del daño estructural respecto a la duración cuando la medida de daño utilizada era la demanda de ductilidad. Cuando se consideraba la energía histerética, únicamente se observaba una dependencia reducida para estructuras de periodo largo y niveles elevados de daño. En particular, Cornell (1997) señaló que, para muchas medidas de respuesta o demandas estructurales de interés, existía poca dependencia de la duración del registro y planteó que esto podía indicar que no era necesario considerarla o que aún no se había identificado la medida de respuesta adecuada para representar sus efectos. En las memorias del mismo taller, Krawinkler (1997) evaluó la influencia de la duración del movimiento fuerte sobre índices de daño acumulado para una ductilidad objetivo $\mu = 4$ y no encontró una correlación aparente entre ambas variables. Asimismo, señaló que las medidas de duración disponibles no incorporaban la resistencia del sistema estructural ni la dependencia de las ordenadas espectrales respecto al periodo, por lo que la ausencia de

correlación con el daño no resultaba inesperada. El autor resumió las dificultades encontradas al indicar que había dedicado considerables esfuerzos a correlacionar el daño acumulado con la duración, pero con resultados limitados.

Bommer et al. (2004) estudiaron la influencia de la duración en estructuras de mampostería, en las que se esperaba un efecto más pronunciado debido a su comportamiento altamente degradante. Para ello, analizaron sistemas SDOF con periodos entre 0.1 y 0.5 s, representativos de mecanismos de falla por cortante en el plano, sometidos a 473 registros de aceleración. Con el propósito de identificar las características del movimiento con mayor influencia en el daño, los autores evaluaron la correlación entre diferentes parámetros del movimiento y la degradación de resistencia de los sistemas. Las mayores correlaciones se obtuvieron con un parámetro estimado como el promedio de las ordenadas espectrales comprendidas entre el periodo fundamental y un periodo alargado. Los autores atribuyeron el aumento de la correlación al incluir periodos superiores al fundamental a la elongación del periodo producida por la pérdida de rigidez, ya que, a medida que el sistema se degrada, su respuesta pasa a estar influenciada por ordenadas espectrales en periodos mayores a T_1 . En particular, observaron que las mayores correlaciones se obtenían al promediar las ordenadas espectrales entre T_1 y periodos comprendidos entre $1.7T_1$ y $3.0T_1$. Posteriormente, evaluaron la hipótesis de que la dispersión de la respuesta podía reducirse incorporando adicionalmente una medida de duración. Para ello, analizaron la influencia de diferentes medidas de duración sobre la respuesta condicionada a la pseudoaceleración espectral promedio. Los resultados mostraron una correlación positiva entre la duración y el daño estructural; sin embargo, la elevada variabilidad de la respuesta sugirió que otras características del movimiento también desempeñaban un papel importante en su potencial de daño.

Iervolino et al. (2006) evaluaron estadísticamente la influencia de la duración en la respuesta inelástica de sistemas SDOF con periodos entre 0.1 y 4 s, distintos comportamientos postelásticos y diferentes niveles de ductilidad, sometidos a seis conjuntos de registros con diversos intervalos de duración. Los autores concluyeron que el efecto de la duración sobre la demanda máxima de ductilidad era insignificante, independientemente del periodo o del comportamiento postelástico del sistema. En contraste, observaron que la duración influía considerablemente en parámetros acumulados, como la demanda de ductilidad histerética, definida a partir de la energía histerética disipada normalizada por el producto de la resistencia lateral y del desplazamiento de fluencia, y el número equivalente de ciclos, el cual representa la energía histerética acumulada en términos de un número equivalente de ciclos de amplitud correspondiente a la máxima deformación alcanzada. A partir de estos resultados, propusieron que la duración podía ignorarse para medidas de demanda basadas en la respuesta máxima, pero debía considerarse para aquellas relacionadas con la energía o la acumulación de daño. Estas conclusiones fueron respaldadas por Hancock y Bommer (2007), quienes estudiaron ocho edificios con muros de concreto reforzado sometidos a 30 registros de diferentes duraciones, previamente escalados y ajustados espectralmente. Los autores encontraron que la correlación entre la duración y las medidas de respuesta máxima era reducida, mientras que su correlación con las medidas de respuesta acumulada era considerablemente mayor.

Aunque la influencia de la duración en la respuesta estructural había sido estudiada ampliamente, las investigaciones anteriores no se enfocaron específicamente en su efecto sobre el potencial de colapso. Ibarra y Krawinkler (2005) realizaron un estudio paramétrico de la capacidad de colapso de sistemas SDOF con comportamiento histerético degradante. Los sistemas variaban en periodo de vibración, capacidad de ductilidad, pendiente postelástica, nivel de degradación cíclica, efectos de segundo orden y modelo histerético. Aunque el objetivo principal no era cuantificar explícitamente el efecto de la duración, los autores estudiaron la influencia de la degradación cíclica cuando los sistemas eran sometidos a registros de larga duración, como parte de su evaluación de los parámetros que controlaban la capacidad de colapso. Los resultados mostraron que la influencia de la degradación cíclica aumentaba para registros de mayor duración, especialmente en sistemas de periodo corto o moderado. Sin embargo, las diferencias máximas en la capacidad de colapso no excedieron el 15%, por lo que los autores concluyeron que su contribución no era significativa.

Raghunandan y Liel (2013) realizaron uno de los primeros estudios enfocados explícitamente en la influencia de la duración sobre la respuesta inelástica y el colapso de estructuras de concreto reforzado. Para ello, llevaron a cabo análisis dinámicos incrementales (Vamvatsikos y Cornell, 2002) de 17 arquetipos de edificios con marcos resistentes a momento, cuyos periodos fundamentales variaban entre 0.6 y 2.73 s y cuyas capacidades de ductilidad, determinadas mediante análisis estáticos no lineales, se encontraban entre 2.1 y 15.9. Los modelos permitían representar la degradación cíclica y dentro de cada ciclo, así como los efectos de segundo orden P- Δ . Los edificios fueron clasificados en dos grupos: marcos modernos o dúctiles y marcos antiguos o no dúctiles. Estos fueron sometidos a un conjunto de 76 registros, compuesto por 68 movimientos reales y ocho simulados, con duraciones significativas 5-95 comprendidas entre 1.1 y 271.3 s. A partir de los resultados de los análisis dinámicos incrementales, las autoras utilizaron modelos de regresión lineal generalizados para estudiar la relación entre la duración y la ordenada de desplazamiento inelástico asociada con el colapso. Al observar que dicha ordenada tendía a disminuir al aumentar la duración, concluyeron que esta desempeñaba un papel importante en la capacidad de colapso. Asimismo, sugirieron que su influencia era mayor en estructuras con mayor ductilidad. Las autoras atribuyeron esta tendencia a que las estructuras más dúctiles pueden resistir movimientos cortos de gran intensidad, mientras que, durante eventos prolongados, su capacidad de disipación de energía se consume progresivamente. En contraste, las estructuras menos dúctiles pueden agotar su capacidad de disipación incluso durante movimientos de corta duración, por lo que la influencia adicional de esta variable resulta menor.

Uno de los estudios más reconocidos sobre el efecto de la duración en la probabilidad de colapso fue realizado por Chandramohan et al. (2016). Los autores evaluaron la capacidad de colapso de un edificio de cinco niveles con marcos dúctiles de acero resistentes a momento y de una columna de concreto reforzado perteneciente a un puente. El estudio utilizó la duración significativa 5-75, debido a que, entre las medidas evaluadas, esta presentaba correlaciones relativamente bajas con medidas de intensidad convencionales, como $S_a(T_1)$, así como con la forma espectral. Con el propósito de separar los efectos de la duración de los correspondientes a otras características del movimiento, los autores formaron 73 pares de registros con formas espectrales similares, pero duraciones significativas 5-75 diferentes.

Cada pareja estaba integrada por un registro de corta duración, definida como menor que 25 s, y uno de larga duración, mayor que 25 s. Para construir las parejas, los registros de corta duración fueron escalados de manera que el promedio de sus ordenadas espectrales entre 0.05 y 6.0 s fuera igual al correspondiente al registro de larga duración. Posteriormente, las diferencias entre los espectros se cuantificaron mediante la suma de los errores cuadrados y se seleccionaron las parejas que presentaban los menores errores. Los factores de escala se limitaron a un valor máximo de 5. Las medias geométricas de duración significativa de los conjuntos de corta y larga duración fueron de 6 y 42 s, respectivamente. Los autores propusieron que, al utilizar registros con formas espectrales similares, las diferencias en la capacidad de colapso podían atribuirse principalmente a sus distintas duraciones. A partir de análisis dinámicos incrementales, observaron que la mediana de la intensidad de colapso, definida como la intensidad asociada con una probabilidad de colapso del 50%, era 29% menor para los registros de larga duración en el edificio de acero y 17% menor en la columna de concreto reforzado.

Con base en estos resultados, Chandramohan et al. (2016) recomendaron considerar explícitamente la duración, junto con la forma espectral, en la estimación del riesgo de colapso. Asimismo, sugirieron que algunos estudios anteriores pudieron no identificar un efecto significativo debido a que los modelos empleados no representaban adecuadamente la degradación de resistencia y rigidez o los efectos de segundo orden, o bien porque los sistemas no experimentaron incursiones inelásticas suficientes para desarrollar los mecanismos de degradación y desestabilización asociados con el colapso. Desde la publicación de Chandramohan et al. (2016), diversos estudios han evaluado la influencia de la duración utilizando registros denominados “espectralmente equivalentes”, ya sea mediante la selección de movimientos con formas espectrales similares o mediante su ajuste espectral. Estas investigaciones han propuesto que la duración desempeña un papel importante en el potencial de los registros para inducir colapso (p. ej., Molazadeh y Saffari, 2018; Pan et al., 2018; Fairhurst et al., 2019; Liapopoulou et al., 2020; Zengin et al., 2020).

Zengin et al. (2020) señalaron que la selección de registros con formas espectrales similares permite separar los efectos de la duración de otras características del movimiento únicamente de manera parcial, lo que puede conducir a interpretaciones incorrectas sobre su influencia en el potencial de colapso. Los autores indicaron que, aun cuando dos registros presenten formas espectrales similares, sus patrones de acumulación de energía pueden diferir significativamente. Para evaluar esta hipótesis, incorporaron, además de la forma espectral, la pendiente de la curva de Husid como parámetro adicional. Los resultados indicaron que las distorsiones máximas de entrepiso no presentaban una dependencia apreciable respecto a la duración, mientras que las medidas de daño acumulado, como el Índice Modificado de Park-Ang, sí resultaban significativamente afectadas. Asimismo, aunque la mediana de las intensidades de colapso de los registros de larga duración fue menor que la correspondiente a los registros de corta duración, las diferencias entre sus capacidades de colapso fueron menores que las reportadas en el estudio de Chandramohan et al. (2016).

De acuerdo con la revisión realizada, el estudio más reciente enfocado en la influencia de la duración sobre la probabilidad de colapso fue desarrollado por Montemayor et al. (2025). A diferencia de investigaciones anteriores, este trabajo no intentó aislar la duración de las

demás características del movimiento. En su lugar, empleó medidas de intensidad de nueva generación (NGIM, por sus siglas en inglés), entre ellas Sa_{avg} (Eads et al., 2015) y $FIV3$ (Dávalos y Miranda, 2019c; Dávalos y Miranda, 2020), las cuales presentan correlaciones más elevadas con el colapso y mayor eficiencia y suficiencia que medidas convencionales, como $S_a(T_1)$. En este estudio, siete edificios modernos con marcos resistentes a momento (seis de concreto reforzado y uno de acero) fueron sometidos a un conjunto de 269 registros mediante análisis dinámicos incrementales, con el propósito de determinar las intensidades que producían el colapso de cada estructura. Los autores concluyeron que las asociaciones observadas entre la duración y el colapso se explicaban principalmente por otras características del movimiento del terreno. Asimismo, observaron que la incorporación explícita de duración significativa reducía la variabilidad de las intensidades de colapso estimadas mediante modelos de predicción basados en $S_a(T_1)$; sin embargo, esta reducción se volvía prácticamente insignificante cuando se utilizaban Sa_{avg} o $FIV3$ como variables predictivas. Estos resultados indicaron que la duración no aportaba información adicional importante para la predicción del colapso cuando se empleaban medidas de intensidad más eficientes. Los autores también concluyeron que, en algunos casos, la inclusión explícita de la duración podía introducir sesgos importantes, ya fuera sobreestimando o subestimando la capacidad de colapso, por lo que no recomendaron su consideración explícita en la estimación de dicha capacidad.

Si bien diversos estudios han considerado, directa o indirectamente, los efectos simultáneos de la forma espectral y la duración sobre la probabilidad de colapso, la interacción entre la forma espectral, la duración y el sesgo introducido por el escalamiento en amplitud ha recibido menor atención. Debido a que el uso de factores de escala puede introducir sesgos que sobreestimen o subestimen la influencia aparente de la duración sobre el potencial de colapso, particularmente cuando la medida de intensidad es la más utilizada actualmente, $S_a(T_1)$, resulta fundamental evaluar estos efectos de manera concurrente. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es cuantificar la influencia de la duración en la probabilidad de colapso utilizando registros con formas espectrales comparables, distinguiéndola del sesgo asociado con el uso de factores de escala elevados, con el propósito de formular recomendaciones sobre la consideración de la duración y el empleo de dichos factores en la estimación de la probabilidad de colapso.

Capítulo 3: Selección de Registros de Aceleración y Descripción de Sistemas Estructurales

3.1 - Descripción General

El presente capítulo describe las bases de datos de registros de aceleración consideradas en este estudio. Asimismo, se presenta una descripción de los sistemas estructurales analizados, incluyendo sus propiedades dinámicas y su comportamiento post-elástico. Finalmente, se presentan los parámetros utilizados para caracterizar la duración de los registros, la forma espectral y el sesgo introducido por el escalamiento en amplitud, así como el proceso empleado para seleccionar los conjuntos de registros de aceleración con base en dichos parámetros.

3.2 - Selección de Registros

Todos los registros utilizados en este estudio fueron obtenidos de las siguientes bases de datos:

- NGA-West2 (Ancheta et al., 2014).
- SIBER-RISK Strong Motion Database (Castro et al., 2022).
- Kyoshin (K-NET) y Kiban Kyoshin (KiK-NET) Databases (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019).

Dado que el nivel de desempeño evaluado en este estudio corresponde al de colapso, se excluyeron todos los registros producidos por eventos con magnitudes $M_w \leq 5.0$.

El sitio considerado se encuentra en la ciudad de Sacramento, California, en las coordenadas 38.57944°N , -121.49085°W . El peligro sísmico del sitio incluye contribuciones

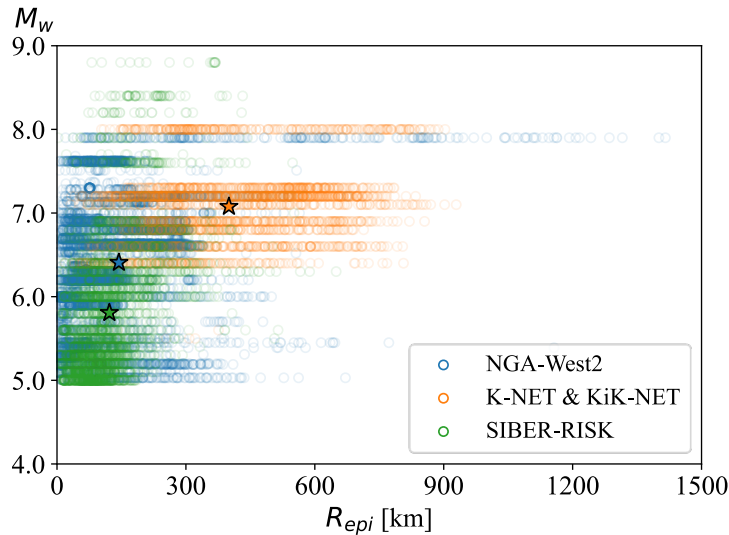


Figura 1. Distribución de magnitudes (M_w) y distancias epicentrales (R_{epi}) de los registros considerados para el estudio. Los colores representan las bases de datos de las cuales provienen los registros. Las estrellas representan los valores promedio de magnitud y distancia epicentral de los registros provenientes de cada base de datos.

de fuentes corticales y de subducción, por lo que Sacramento puede estar expuesto a movimientos del terreno con duraciones tanto cortas como largas. Además, las intensidades objetivo consideradas para este sitio permiten identificar un número suficiente de registros sin requerir sistemáticamente factores de escala muy elevados. Esta característica facilita la evaluación de registros asociados con los diferentes niveles de intensidad considerados en el estudio. La Figura 1 presenta la distribución de magnitudes (M_w) y distancias epicentrales (R_{epi}) de los registros considerados. Los diferentes marcadores identifican la base de datos de procedencia de cada registro, mientras que las estrellas negras representan la magnitud y la distancia epicentral promedio correspondientes a cada base de datos. La mayor parte de los registros corresponde a eventos con magnitudes entre 5 y 8, aunque la base de datos SIBER-RISK incluye algunos eventos chilenos con magnitudes de hasta 8.8. Las distancias epicentrales varían entre aproximadamente 0.44 y 1500 km, aunque la mayoría de los registros se concentra a distancias menores que 500 km. Las distancias epicentrales promedio son 143.98 km para los registros seleccionados de NGA-West2, 400.09 km para los procedentes de K-NET y KiK-NET y 121.90 km para los seleccionados de SIBER-RISK. Cada registro asociado con una determinada combinación de evento y estación cuenta con dos componentes horizontales ortogonales del movimiento del terreno. Para efectos del procedimiento de selección y de los análisis desarrollados en esta investigación, cada componente horizontal se considera como un registro individual. Esta decisión permite ampliar el número de registros disponibles y facilita su clasificación en términos de duración, forma espectral y factor de escala requerido para alcanzar la intensidad objetivo.

3.3 - Corrección de Registros

Los registros obtenidos de NGA-West2 ya contaban con el procesamiento correspondiente, mientras que los procedentes de las bases de datos de Chile y Japón requirieron una corrección adicional. Por lo tanto, además del filtrado inicial por magnitud, estos registros fueron sometidos a una corrección por línea base y, posteriormente, a un filtro Butterworth pasa-banda de cuarto orden, con frecuencias de corte de 0.1 y 30 Hz.

3.4 - Sistemas Estructurales Considerados

En este estudio se consideran 25 sistemas de un grado de libertad, correspondientes a la combinación de cinco periodos de vibración, $T_n = 0.2, 0.5, 1.0, 2.0$ y 3.0 s, y cinco factores de reducción de resistencia lateral, $R_d = 2, 3, 4, 5$ y 6 . El factor R_d se define como:

$$R_d = \frac{m \cdot S_a(T, \xi)}{F_y} \quad (18)$$

donde m es la masa del sistema; $S_a(T, \xi)$ es la ordenada pseudoaceleración espectral correspondiente al periodo natural T y fracción de amortiguamiento del sistema ξ ; y F_y es la resistencia lateral del sistema.

Con la finalidad de representar el efecto desestabilizador asociado con la inestabilidad dinámica (Miranda y Akkar 2003), es decir, con los efectos de segundo orden $P-\Delta$, todos los sistemas presentan un comportamiento histerético bilineal con una pendiente postelástica negativa equivalente al 3% de su rigidez elástica. Asimismo, se considera una fracción de

amortiguamiento crítico $\zeta = 2\%$ para todos los sistemas. Como se explica con mayor detalle en la Sección 3.5, este valor se seleccionó para incrementar las demandas de desplazamiento inelástico y las probabilidades de colapso asociadas con las intensidades consideradas para el sitio.

El colapso de un sistema de un grado de libertad se define como la condición en la cual su respuesta, medida en este estudio mediante la demanda de desplazamiento lateral, crece sin límite ante un incremento infinitesimal de la intensidad del movimiento. En los sistemas con comportamiento bilineal degradante considerados, esta condición se alcanza cuando el desplazamiento es suficientemente grande para que la resistencia del sistema se reduzca a cero. En lo sucesivo, este valor se denomina desplazamiento de colapso, Δ_c . Dado que el desplazamiento de fluencia es proporcional a la resistencia lateral del sistema y, por lo tanto, depende del valor asignado de R_d , se espera que los sistemas con menor resistencia lateral (es decir, con mayores valores de R_d) presenten probabilidades de colapso superiores a las de los sistemas con mayor resistencia lateral y menores valores de R_d .

3.5 - Definición de Sets de Registros de Aceleración

El objetivo de este estudio es evaluar la influencia de la duración en la probabilidad de colapso, considerando simultáneamente los efectos de la forma espectral y del escalamiento en amplitud. Para ello, los registros obtenidos y procesados a partir de las bases de datos descritas en la Sección 3.2 se clasificaron de acuerdo con el factor de escala, SF , requerido para amplificar o reducir cada registro hasta alcanzar una intensidad objetivo.

La medida de intensidad empleada en este estudio es la ordenada de pseudoaceleración espectral, $S_a(T_I)$, correspondiente a una fracción de amortiguamiento crítico del 2%. Debido a que la influencia de la duración se evalúa comparando probabilidades de colapso condicionadas al nivel del Sismo Máximo Considerado ajustado al Riesgo, MCE_R , el factor de escala se define como el cociente entre la ordenada espectral correspondiente a este nivel de intensidad y la ordenada del espectro de respuesta del registro sin escalar, evaluadas para el mismo periodo y fracción de amortiguamiento crítico. Matemáticamente:

$$SF = \frac{S_{a,MCE_R}(T, \zeta)}{S_a(T, \zeta)} \quad (19)$$

donde $S_{a,MCE_R}(T, \zeta)$ es la ordenada espectral correspondiente al nivel del MCE_R , evaluada para el periodo de vibración T y la fracción de amortiguamiento crítico del sistema ζ , mientras que $S_a(T, \zeta)$ es la ordenada de pseudoaceleración espectral del registro sin escalar, calculada para el mismo periodo y fracción de amortiguamiento.

De esta manera, para cada combinación de registro y periodo estructural se calculó el factor de escala requerido para alcanzar la ordenada correspondiente al MCE_R . Posteriormente, para cada uno de los cinco periodos considerados, los registros se clasificaron en tres grupos:

- Registros con factores de escala iguales o menores que 2.0, denominados en lo sucesivo como el conjunto con $SF \approx 1$.
- Registros con factores de escala entre 4.0 y 6.0, denominado como el conjunto con $SF \approx 5$.

- Registros con factores de escala entre 9.0 y 11.0, denominado como el conjunto con $SF \approx 10$.

Los registros cuyos factores de escala no se encontraban dentro de estos intervalos no fueron considerados para la conformación de dichos conjuntos. La notación $SF \approx 1$, $SF \approx 5$ y $SF \approx 10$ se utiliza como una denominación general de cada grupo, cuyos límites exactos son los indicados anteriormente.

Como se menciona en la Sección 3.4, todos los sistemas SDOF cuentan con una fracción de amortiguamiento crítico $\zeta = 2\%$. Se adoptó un valor menor que el convencional de 5% con el propósito de incrementar las intensidades espectrales y, con ello, acentuar las demandas de desplazamiento inelástico y las probabilidades de colapso de los sistemas. Sin embargo, las ordenadas correspondientes al nivel del MCE_R se encuentran definidas originalmente para una fracción de amortiguamiento crítico del 5%. Para estimar las intensidades del MCE_R correspondientes a un amortiguamiento del 2%, las ordenadas del espectro con 5% de amortiguamiento se modificaron mediante los factores propuestos por Lin y Chang (2004). Estos dependen tanto del periodo de vibración como de la fracción de amortiguamiento crítico y se definen como el cociente entre la ordenada espectral correspondiente al amortiguamiento de interés y aquella correspondiente al 5%, para un mismo periodo. Por lo tanto:

$$S_{a,MCE_R}(T, \zeta) = B(T, \zeta) S_{a,MCE_R}(T, 5\%) \quad (20)$$

El factor de modificación se calcula como:

$$B(T, \zeta) = 1 - \frac{aT^{0.30}}{(T+1)^{0.65}}, \quad a = 1.303 + 0.436\ln(\zeta) \quad (21)$$

donde ζ es la fracción de amortiguamiento crítico a la cual se desea convertir la ordenada espectral y T es el periodo de vibración. La Figura 2 presenta los espectros de pseudoaceleración correspondientes al nivel del MCE_R , obtenidos a partir del espectro de diseño definido mediante dos periodos de transición en ASCE/SEI 7-22 (American Society of Civil Engineers, 2022), para fracciones de amortiguamiento crítico del 2% y 5%. Como se observa, la reducción del amortiguamiento de 5% a 2% incrementa las ordenadas espectrales en todos los periodos, con mayores incrementos en periodos cortos y menores en periodos largos.

Una vez definidos los conjuntos de registros de aceleración con base en su factor de escala, se seleccionaron aquellos que presentaban formas espectrales similares. Para ello, se cuantificaron las diferencias de forma espectral entre los registros candidatos, con el propósito de minimizar las diferencias entre los espectros de respuesta seleccionados para los distintos conjuntos de factor de escala. Debe señalarse que la tendencia central de la forma espectral de los registros que requieren factores de escala elevados, por ejemplo, $SF \approx 10$, no necesariamente coincide con la correspondiente a registros que requieren factores menores, como $SF \approx 1$, para alcanzar una misma intensidad objetivo. Los registros que requieren mayores factores de escala tienden a estar asociados con eventos de menor magnitud o con estaciones ubicadas a mayores distancias de la fuente. Debido a los efectos de la magnitud del evento y la atenuación geométrica, su contenido de frecuencias puede diferir del correspondiente a registros producidos por eventos de mayor magnitud o registrados a

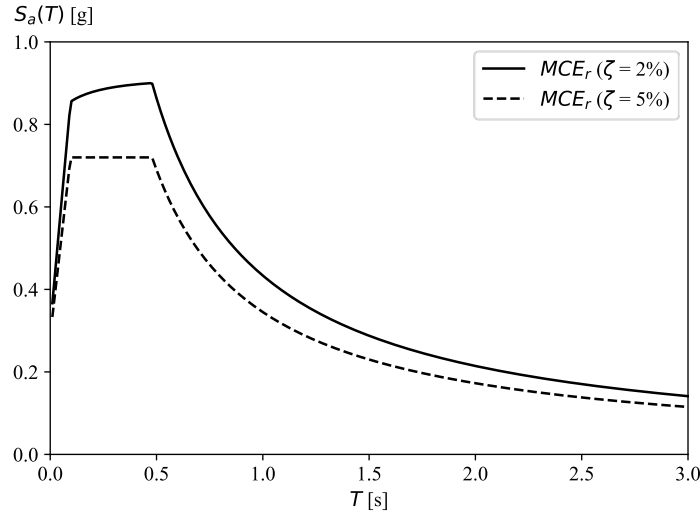


Figura 2. Espectros de pseudoaceleración correspondientes al nivel del MCE_R para el sitio ubicado en Sacramento, California, y fracciones de amortiguamiento crítico del 2% y 5%. El espectro con 2% de amortiguamiento (línea continua) se obtuvo al modificar el espectro definido para 5% (línea punteada) mediante los factores propuestos por Lin y Chang (2004).

menores distancias, los cuales requieren generalmente factores de escala más bajos para alcanzar una misma intensidad. Esta observación es consistente con los resultados de Dávalos y Miranda (2019b), quienes encontraron que, incluso cuando la forma espectral promedio del espectro de respuesta con 5% de amortiguamiento es similar entre conjuntos de registros con diferentes factores de escala, los espectros promedio de amplitudes de Fourier y los espectros de respuesta promedio con fracciones de amortiguamiento crítico menores pueden presentar diferencias considerables.

Para seleccionar registros cuyas formas espectrales difieran lo menos posible entre los tres conjuntos de factor de escala, se definió un espectro objetivo como la mediana de todos los espectros de pseudoaceleración correspondientes al conjunto con $SF \approx 1$ con fracción de amortiguamiento crítico $\zeta = 2\%$. Este conjunto se utilizó como referencia debido a que se considera que presenta el menor sesgo en la probabilidad de colapso asociado con el escalamiento en amplitud. Al utilizar el mismo espectro objetivo para los tres grupos, se procura minimizar las diferencias entre la forma espectral de los conjuntos con $SF \approx 1$, $SF \approx 5$ y $SF \approx 10$. Una vez definido el espectro objetivo, la forma espectral de cada registro se caracterizó mediante el error cuadrático medio (MSE , por sus siglas en inglés) entre su espectro de respuesta y el espectro objetivo, siguiendo el procedimiento propuesto por Power et al. (2004). El MSE se calculó utilizando 150 periodos comprendidos entre 0.01 y 10 s, distribuidos uniformemente en escala logarítmica mediante 50 valores por cada década de periodo; es decir, 50 valores entre 0.01 y 0.1 s, 50 entre 0.1 y 1.0 s, y 50 entre 1 y 10 s. El error cuadrático medio entre el espectro de respuesta de un registro y el espectro objetivo se define como:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (\varepsilon(T_i) - \bar{\varepsilon})^2 \quad (22)$$

donde n es el número de periodos considerados, igual a 150 en este estudio; $\varepsilon(T_i)$ es el error logarítmico entre la ordenada del espectro objetivo y la correspondiente al espectro de

respuesta del registro para el periodo T_i ; y $\bar{\varepsilon}$ es el promedio de los errores logarítmicos calculados para los n periodos. Estas cantidades se calculan como:

$$\varepsilon(T_i) = \ln \left(\frac{S_{a,Obj}(T_i)}{S_a(T_i)} \right) \quad (23)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \varepsilon(T_i) \quad (24)$$

donde $S_{a,Obj}(T_i)$ es la ordenada del espectro objetivo para el periodo T_i y $S_a(T_i)$ es la ordenada del espectro de respuesta del registro para el mismo periodo de vibración. Al sustraer el error logarítmico medio, $\bar{\varepsilon}$, la Ecuación (23) elimina la diferencia promedio de amplitud entre ambos espectros y cuantifica principalmente las diferencias entre sus formas espectrales.

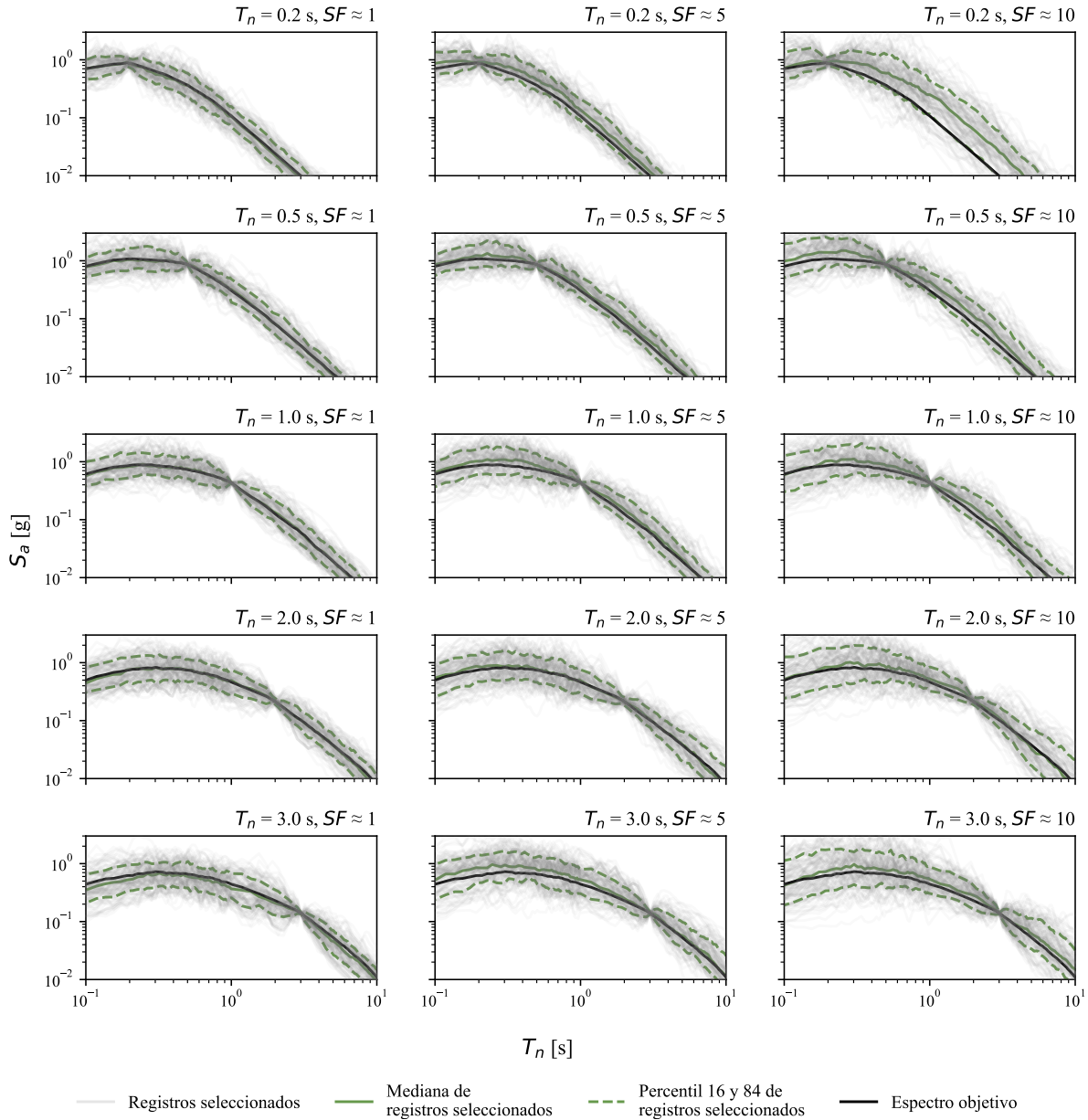


Figura 3. Espectros de pseudoaceleración de los 120 registros seleccionados para cada periodo estructural y conjunto de factor de escala. Se muestran los espectros individuales, la mediana, los percentiles 16 y 84, y el espectro objetivo utilizado en el proceso de selección.

Una vez calculado el MSE de cada registro, se seleccionaron los 120 registros con valores más bajos y se descartaron los restantes. Como resultado, para cada periodo estructural y grupo de factor de escala se obtuvieron conjuntos de 120 registros con formas espectrales aproximadamente similares, pero con factores de escala diferentes entre los grupos. La Figura 3 presenta los espectros de respuesta de los 120 registros seleccionados para cada periodo estructural y conjunto de factor de escala, junto con el espectro objetivo correspondiente, la mediana y los percentiles 16 y 84 de los espectros seleccionados. En términos generales, las medianas de los espectros seleccionados presentan formas similares a las de los espectros objetivo. Las principales diferencias se observan en los sistemas de periodo corto, particularmente para $T_n = 0.2$ y 0.5 s, en el conjunto con $SF \approx 10$, cuyas medianas espectrales

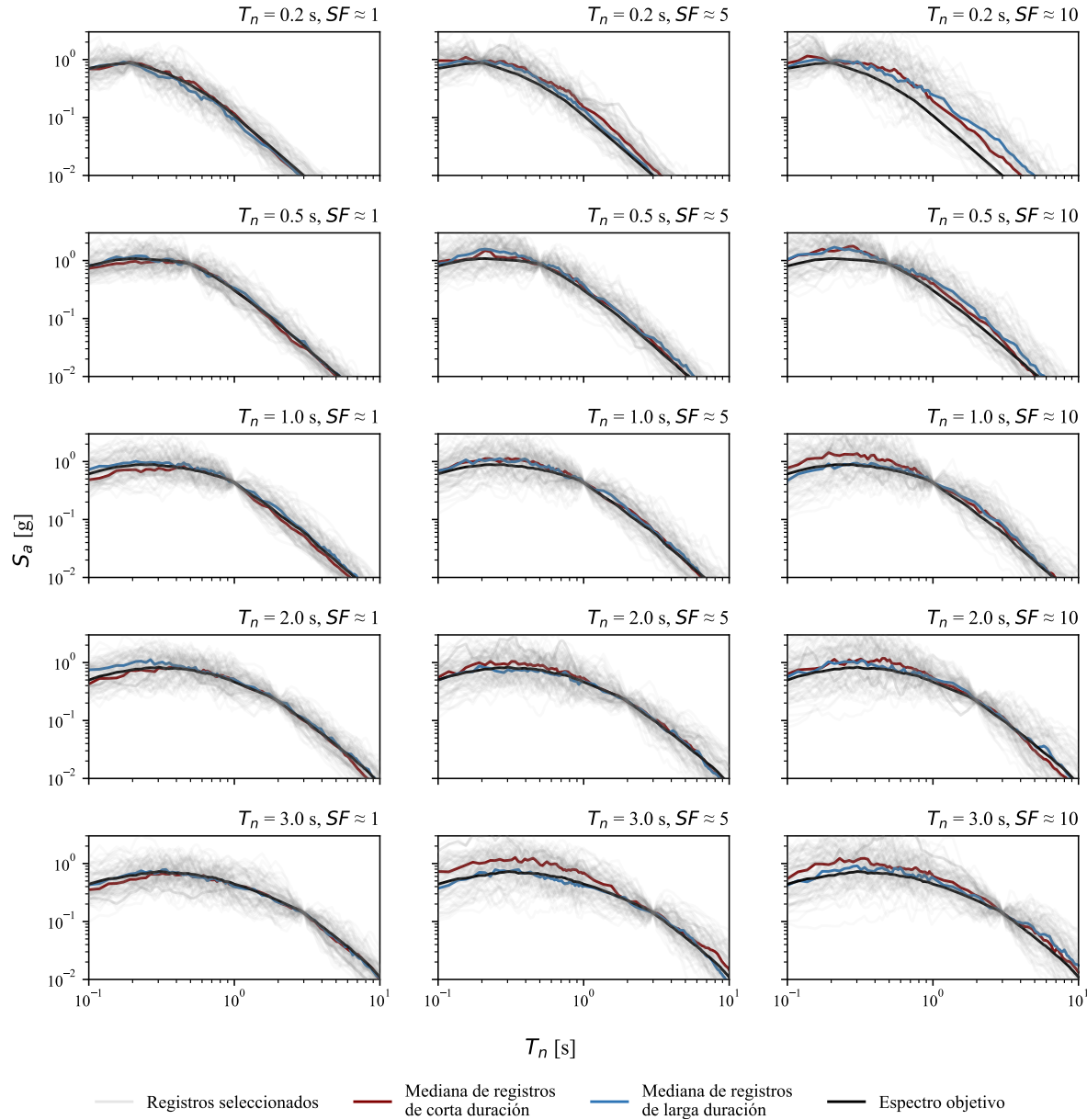


Figura 4. Espectros de respuesta de los sub-sets de 40 registros de corta y larga duración para cada periodo de vibración y factor de escala. Las líneas grises muestran los espectros de respuesta de cada registro individual, la línea negra el espectro objetivo para cada periodo de vibración y las líneas roja y azul las medianas de los 40 registros de corta y larga duración, respectivamente.

superan al espectro objetivo en periodos superiores al fundamental. Como se señaló anteriormente, es esperable que la forma espectral de los registros que requieren factores de escala elevados difiera de la correspondiente a los registros con factores más bajos, a partir de los cuales se definió el espectro objetivo. Por lo tanto, el procedimiento de selección reduce estas diferencias, pero no las elimina completamente. No obstante, el objetivo principal del estudio es comparar la probabilidad de colapso y la respuesta inelástica de sistemas sometidos a registros que, dentro de cada conjunto de periodo y factor de escala, presentan formas espectrales similares entre sí, pero duraciones diferentes. Asimismo, se anticipa que las diferencias residuales de forma espectral observadas en los sistemas de periodo corto y en el conjunto con $SF \approx 10$ pueden producir mayores demandas inelásticas y probabilidades de colapso que las obtenidas con los conjuntos de factores de escala menores. Este efecto deberá considerarse al interpretar los resultados posteriores.

Una vez definidos los conjuntos de 120 registros con formas espectrales similares, dentro de cada conjunto se definieron dos subconjuntos, conformados por los 40 registros con las menores duraciones significativas 5-75 y los 40 registros con las mayores duraciones significativas 5-75. Este tamaño de muestra se seleccionó con el propósito de mantener un número suficiente de registros para los análisis posteriores y, al mismo tiempo, maximizar la diferencia de duración entre ambos subconjuntos. En lo sucesivo, estos subconjuntos se denominarán SD (*Short Duration*) para los registros de menor duración y LD (*Long Duration*) para los registros de mayor duración. En este estudio se adopta la duración significativa 5-75 como medida de duración siguiendo las recomendaciones de Chandramohan et al. (2016), quien, tras evaluar diferentes medidas de duración, observó que esta presenta correlaciones relativamente bajas con otras características del movimiento, como $S_a(T_1)$. Por consiguiente, el uso de esta medida permite evaluar el efecto de la duración con una menor interferencia de otras características del movimiento del terreno. Asimismo, el uso de esta medida de duración permite que los resultados de este estudio sean comparables a los resultados de estudios recientes.

Como resultado del procedimiento descrito anteriormente, se obtienen seis conjuntos de 40 registros para cada periodo de vibración de los sistemas SDOF: dos conjuntos con $SF \approx 1$, dos con $SF \approx 5$ y dos con $SF \approx 10$. Cada par de conjuntos correspondiente a un mismo nivel de factor de escala está conformado por un conjunto de corta duración (SD) y uno de larga duración (LD). Asimismo, las formas espectrales de los seis conjuntos permanecen similares entre sí para cada periodo estructural considerado. La Figura 4 presenta los espectros de respuesta correspondientes a los subconjuntos de corta y larga duración para cada periodo de vibración y cada nivel de factor de escala. Si bien no es posible reproducir exactamente el espectro objetivo (particularmente en el intervalo de altas frecuencias), los registros seleccionados representan adecuadamente la forma espectral objetivo, con las mismas excepciones observadas en la Figura 3 para los sistemas de periodo corto y el conjunto con $SF \approx 10$. Asimismo, las tendencias centrales de los espectros correspondientes a cada pareja de subconjuntos SD y LD son muy similares, lo que confirma que la separación de los registros en función de su duración no modifica de manera apreciable la forma espectral obtenida mediante el procedimiento de selección descrito anteriormente.

La Tabla 1 presenta las duraciones medianas de los subconjuntos SD y LD para cada

periodo de vibración y nivel de factor de escala. El cociente entre las medianas de duración de los subconjuntos LD y SD varía entre 2.4 y 10.5, observándose los mayores valores para los conjuntos con factores de escala cercanos a la unidad. Estos resultados muestran que fue posible obtener diferencias importantes de duración entre los subconjuntos, manteniendo simultáneamente formas espectrales comparables, lo que constituye la base metodológica para evaluar posteriormente la influencia de la duración en la respuesta estructural y la probabilidad de colapso.

En los resultados de la Tabla 1 puede apreciarse también que las medianas de duración tienden a incrementar conforme aumenta el factor de escala. Esta tendencia puede atribuirse, al menos parcialmente, a que los registros que requieren factores de escala mayores suelen corresponder a eventos registrados a mayores distancias de la fuente. Debido a la atenuación del movimiento durante su propagación, los registros provenientes de fuentes más alejadas presentan, en promedio, menores intensidades y, por lo tanto, requieren factores de escala mayores para alcanzar una misma intensidad objetivo. Al mismo tiempo, estos registros tienden a presentar duraciones significativas mayores, lo que explica la tendencia observada en la Tabla 1.

Tabla 1. Medianas de duración significativa 5-75 de cada conjunto de registros de aceleración.

T_n	$SF \approx 1$		$SF \approx 5$		$SF \approx 10$	
	SD	LD	SD	LD	SD	LD
0.2 s	1.78 s	12.55 s	3.23 s	17.87 s	4.12 s	16.06 s
0.5 s	1.69 s	16.30 s	3.24 s	16.00 s	4.90 s	17.94 s
1.0 s	2.63 s	27.59 s	5.73 s	17.64 s	7.38 s	18.12 s
2.0 s	4.61 s	33.86 s	7.51 s	17.99 s	8.82 s	23.19 s
3.0 s	4.09 s	18.64 s	7.635 s	20.29 s	8.94 s	22.71 s

Capítulo 4: Respuesta Inelástica y Probabilidad de Colapso de Sistemas de un Grado de Libertad

4.1 – Descripción General

En este Capítulo se presentan y discuten los resultados de los análisis dinámicos no lineales de los sistemas descritos en la Sección 3.4, sometidos a los conjuntos de registros obtenidos mediante el procedimiento de selección presentado en la Sección 3.5. En particular, se analizan las demandas de desplazamiento inelástico y las probabilidades de colapso obtenidas al escalar los registros al nivel de intensidad correspondiente al MCE_R .

4.2 – Respuesta Inelástica de Sistemas No Colapsados

Como se mencionó en la Sección 2.3, Dávalos y Miranda (2019b) encontraron que, incluso cuando los registros presentan formas espectrales similares, el uso de factores de escala elevados puede introducir sesgo en la estimación de la respuesta inelástica y de la probabilidad de colapso. Esto plantea la posibilidad de que parte de las diferencias que algunos estudios anteriores atribuyeron a la duración (p. ej., Chandramohan et al., 2016; Molazadeh y Saffari, 2018; Pan et al., 2018; Fairhurst et al., 2019; Liapopoulou et al., 2020) también esté asociada con los factores de escala utilizados o con otras diferencias entre los registros seleccionados. Una de las hipótesis evaluadas en este estudio es que, para registros escalados a una misma intensidad y con duraciones y formas espectrales comparables, aquellos que requieren factores de escala mayores pueden producir demandas estructurales superiores. No obstante, debido a que los movimientos pertenecientes a los distintos conjuntos corresponden a registros diferentes, las variaciones de respuesta no pueden atribuirse exclusivamente al factor de escala, ya que también pueden intervenir otras características de la fuente, la trayectoria, las condiciones de sitio, el contenido de frecuencia y el contenido de pulsos dañinos de los movimientos.

Como ejemplo ilustrativo, la Figura 5 presenta la respuesta inelástica de un oscilador de un grado de libertad con periodo $T_n = 0.5$ s, factor de reducción de resistencia $R_d = 5$ y pendiente postelástica negativa equivalente al 3% de su rigidez elástica, sometido a tres registros de aceleración. Estos movimientos presentan formas espectrales consideradas similares de acuerdo con el criterio de selección adoptado en este estudio, pues pertenecen a los conjuntos de 120 registros seleccionados para el mismo periodo estructural y para los tres intervalos de factor de escala. Además, sus duraciones significativas 5-75 son muy similares y varían únicamente entre 15.6 y 15.84 s. A pesar de estas similitudes, las respuestas presentan diferencias importantes. El registro con un factor de escala cercano a la unidad, $SF = 1.05$, produce la menor incursión inelástica y un desplazamiento residual de aproximadamente 6.7 cm. El registro con $SF = 4.6$ produce una demanda inelástica mayor y un desplazamiento residual cercano a 18.1 cm. Finalmente, el movimiento con $SF = 9.63$ conduce al sistema a alcanzar el criterio de colapso definido en la Sección 3.4 antes de concluir la historia de aceleraciones.

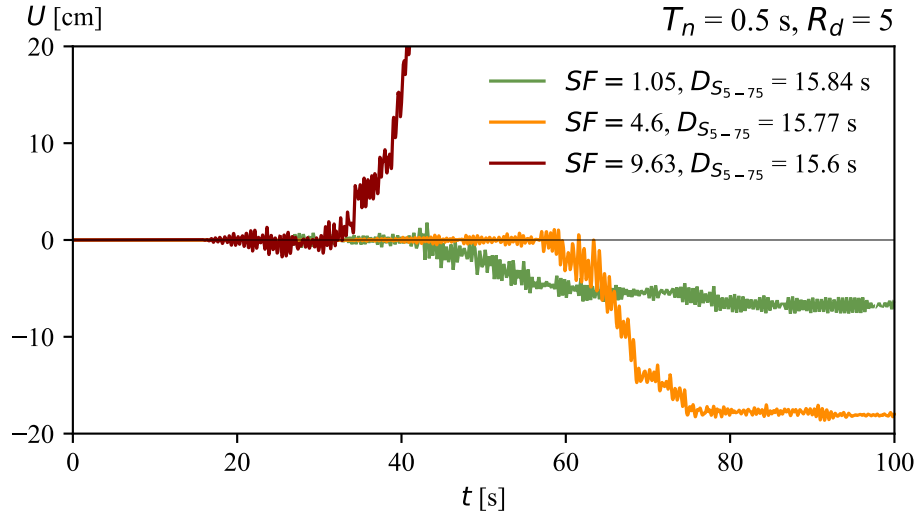


Figura 5. Respuesta inelástica de un oscilador de un grado de libertad ($T_n = 0.5$ s) con comportamiento bilineal degradante ($\alpha = -3\%$) y un quinto de su resistencia lateral elástica sometido a tres registros escalados al nivel del MCE_R , los cuales presentan formas espectrales y duraciones significativas 5-75 similares, pero requieren factores de escala diferentes para alcanzar el mismo nivel de intensidad.

Este ejemplo presenta un comportamiento consistente con la hipótesis de que el uso de factores de escala elevados puede asociarse con mayores demandas inelásticas. Sin embargo, debido a que se comparan tres registros distintos, no permite atribuir las diferencias observadas exclusivamente al factor de escala. Su propósito es únicamente ilustrar el fenómeno cuya tendencia estadística se analiza posteriormente mediante los conjuntos completos de registros, considerando simultáneamente las variaciones de factor de escala y duración significativa.

La Figura 6 muestra los resultados de los análisis dinámicos no lineales de los sistemas de un grado de libertad con resistencias laterales comprendidas entre un medio y una cuarta parte de la resistencia requerida para permanecer en el rango elástico, en términos del desplazamiento máximo del sistema, S_{di} , condicionado al nivel de intensidad del MCE_R y a la condición de no colapso (NC). Se presentan únicamente los resultados correspondientes a $R_d = 2, 3$ y 4 debido a que una fracción considerable de los sistemas con $R_d = 5$ y 6 alcanzan colapso en la intensidad del MCE_R . La muestra más pequeña corresponde al sistema con $T_n = 0.2$ y $R_d = 4$, para el cual únicamente 10 de los 40 registros no inducen colapso. Por esta razón, las tendencias observadas en esta figura deben interpretarse en conjunto con los resultados de la probabilidad de colapso presentados en la Sección 4.3. Como referencia, el desplazamiento de fluencia, U_y , de cada sistema se presenta mediante una línea negra punteada. En términos generales, se observa un incremento del desplazamiento máximo al reducirse la resistencia lateral o incrementarse el periodo estructural. Sin embargo, debe recordarse que S_{di} corresponde a una medida dimensional del desplazamiento y, por lo tanto, parte de este incremento responde al hecho de que los sistemas de mayor periodo presentan también desplazamientos de fluencia mayores.

Para los sistemas con $R_d = 2$, las medianas del desplazamiento máximo (representadas mediante cuadrados en la Figura 6) son muy similares entre los conjuntos SD y LD. Esto

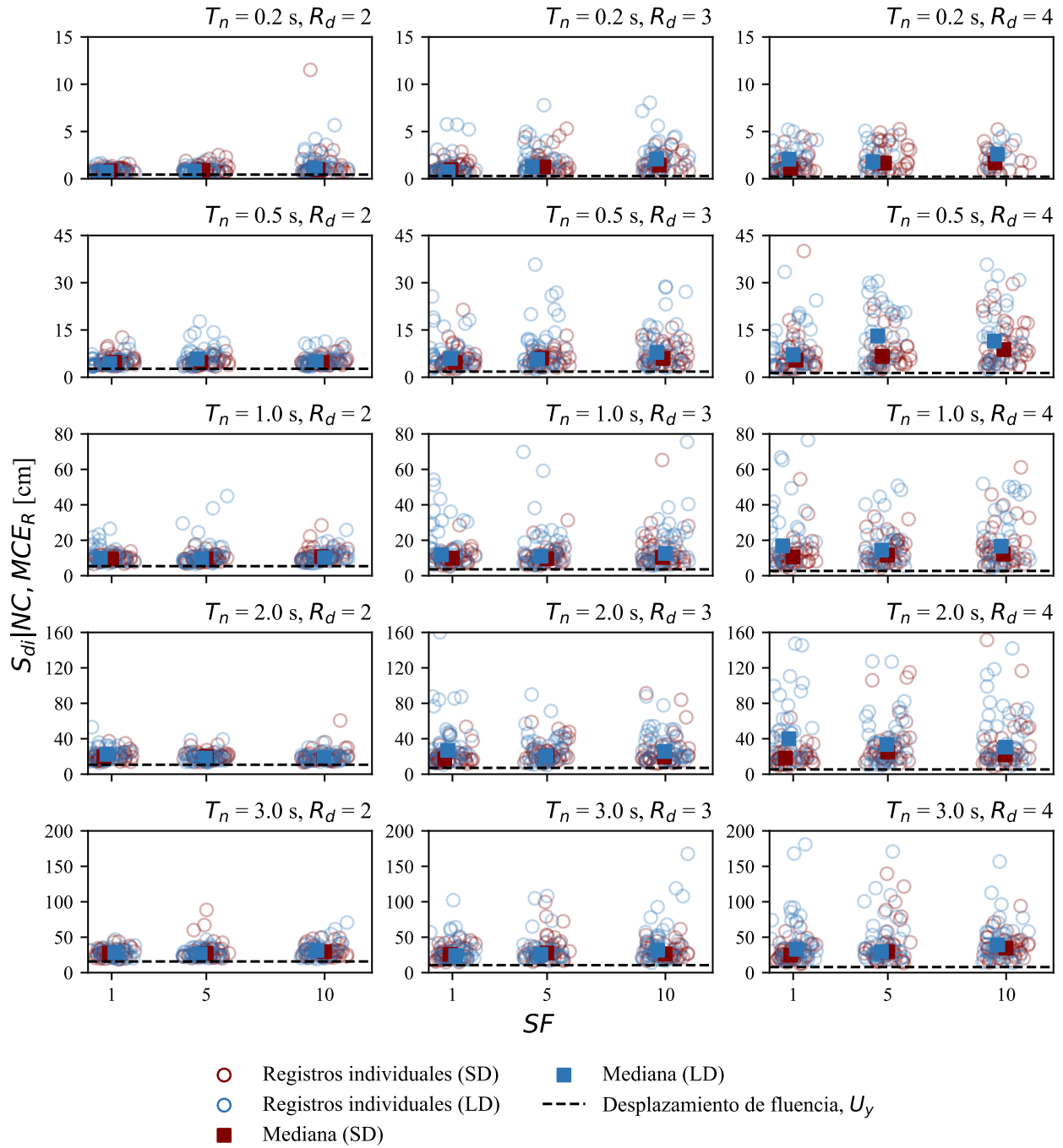


Figura 6. Desplazamiento inelástico máximo condicionado al MCE_R y a no colapso para SDOFs con factores de reducción de resistencia $R_d = 2, 3$ y 4 sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.

resulta consistente con el hecho de que estos sistemas presentan incursiones inelásticas relativamente pequeñas. En los sistemas con $R_d = 3$ y 4 , donde las incursiones inelásticas son mayores, se observan incrementos modestos de la demanda máxima asociados a los conjuntos LD. Sin embargo, la magnitud de estas diferencias en la tendencia central continúa siendo pequeña en comparación con la dispersión existente entre registros individuales.

Asimismo, se aprecia una tendencia general de incremento de la demanda de desplazamientos laterales al aumentar el factor de escala, en especial en los sistemas de periodo corto ($T_n = 0.2$ y 0.5 s). No obstante, esta tendencia no es igualmente marcada para todos los periodos estructurales y debe interpretarse con cautela, ya que los conjuntos con diferentes factores de escala están conformados por registros distintos y conservan diferencias residuales en otras características del movimiento del terreno. Finalmente, no se observa una variación sistemática de la diferencia entre los conjuntos SD y LD conforme aumenta el factor de escala. Por lo tanto, la Figura 6 no proporciona evidencia clara de una interacción consistente entre la duración y el factor de escala sobre la respuesta máxima condicionada a no colapso.

La Figura 7 presenta los mismos resultados de la Figura 6, expresados ahora en términos de la demanda de ductilidad, μ , condicionada al nivel de MCE_R y a la condición de no colapso. Al normalizar la respuesta mediante el desplazamiento de fluencia, esta figura permite comparar de manera más directa el nivel de incursión inelástica entre sistemas con distintos periodos estructurales. Las observaciones generales descritas para la Figura 6 continúan siendo aplicables. Para los sistemas con $R_d = 2$, las diferencias entre las medianas de los conjuntos SD y LD son prácticamente inexistentes. Para $R_d = 3$ y, especialmente, para $R_d = 4$, se observa una tendencia consistente, aunque pequeña, de mayores demandas de ductilidad en los conjuntos LD. Esta tendencia es particularmente visible en los sistemas de periodo corto y moderado. Sin embargo, la diferencia entre las medianas continúa siendo considerablemente menor que la dispersión existente entre registros individuales, por lo que su magnitud debe interpretarse con cautela.

Asimismo, se observa un incremento en la demanda de ductilidad conforme aumenta el factor de escala, particularmente para los sistemas con $T_n = 0.2$ y 0.5 s. No obstante, es importante recordar que, como se mostró en las Figuras 3 y 4, las formas espectrales promedio de los conjuntos con $SF \approx 10$ para estos periodos difieren ligeramente de las correspondientes a los conjuntos con $SF \approx 1$ y $SF \approx 5$, presentando ordenadas espectrales en periodos mayores a T_I . Esto implica que el incremento observado en la demanda de ductilidad para los conjuntos con mayores factores de escala no puede atribuirse exclusivamente al escalamiento en amplitud. Parte de esta diferencia podría estar asociada a las diferencias residuales en la forma espectral o incluso, en un sentido más amplio, a otras características del movimiento del terreno que no fueron consideradas explícitamente durante el procedimiento de selección.

Esta observación constituye uno de los resultados más relevantes del presente estudio. Aun cuando la tendencia central de los espectros de respuesta fue utilizada explícitamente como criterio de selección, igualar dicha tendencia no elimina completamente las diferencias entre conjuntos de registros con distintos factores de escala. En consecuencia, aislar el efecto de la duración utilizando únicamente criterios de equivalencia espectral resulta considerablemente más complejo de lo que generalmente se asume en la literatura. Por ejemplo, para el sistema con $T_n = 0.2$ s, las tendencias centrales de las formas espectrales correspondientes a los conjuntos SD y LD con $SF \approx 1$ son prácticamente coincidentes, como se observa en la Figura 4. En este caso, la demanda de ductilidad resulta muy similar para R_d

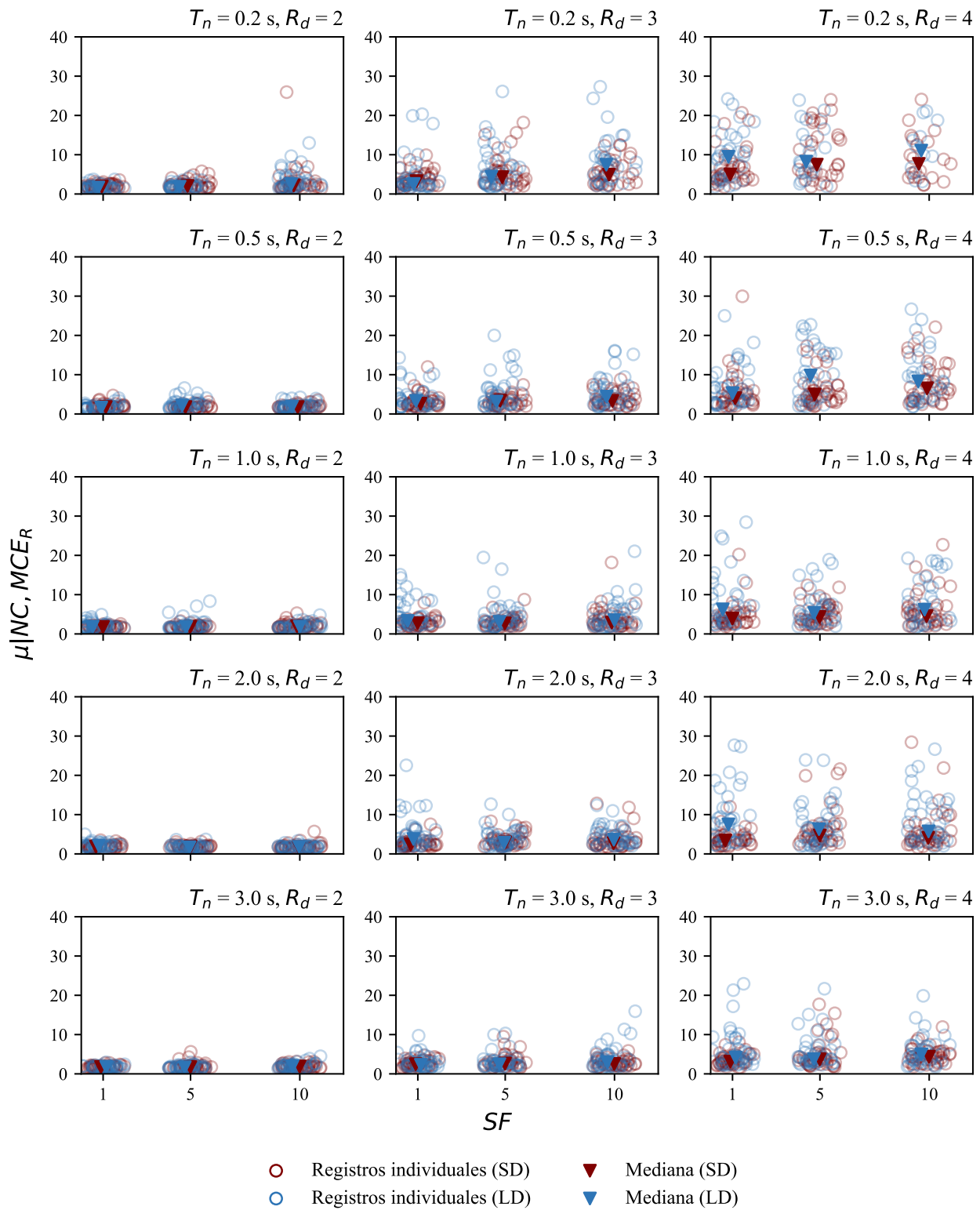


Figura 7. Demanda de ductilidad condicionada al MCE_R y a no colapso para SDOFs con factores de reducción de resistencia $R_d = 2, 3$ y 4 sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.

$= 3$ y ligeramente mayor para los registros de larga duración cuando $R_d = 4$. Estos resultados son consistentes con la posibilidad de que la duración tenga cierta influencia sobre la respuesta inelástica cuando las diferencias espectrales son mínimas. Sin embargo, no permiten atribuir dicho incremento exclusivamente a la duración, ya que aún permanecen diferencias residuales entre los registros que no fueron controladas explícitamente durante el procedimiento de selección. En los conjuntos con $SF \approx 5$ y $SF \approx 10$, las formas espectrales de los registros SD y LD permanecen similares entre sí, pero ambas difieren ligeramente de la forma espectral objetivo. Esto sugiere que parte de las diferencias observadas entre registros de corta y larga duración podría estar influenciada también por el uso de factores de escala elevados y por las diferencias residuales asociadas a dichos conjuntos. En consecuencia, los resultados indican que el efecto tradicionalmente atribuido a la duración puede verse sobreestimado si la influencia del factor de escala y de estas diferencias residuales no se considera explícitamente durante la interpretación de los resultados.

Además del ligero incremento observado en la tendencia central de la demanda de ductilidad, la Figura 7 muestra un aumento importante de la dispersión de la respuesta conforme los sistemas experimentan mayores incursiones inelásticas. Esta observación resalta la limitada eficiencia de $S_a(T_l)$ como medida de intensidad para predecir la demanda de desplazamientos inelásticos, ya que, conforme aumenta el nivel de no linealidad, las respuestas producidas por registros individuales presentan una dispersión considerablemente mayor alrededor de la tendencia central. En términos prácticos, esto implica que, al utilizar $S_a(T_l)$ como medida de intensidad, es necesario emplear un mayor número de registros para estimar la respuesta de sistemas con menor resistencia lateral con un mismo nivel de confiabilidad.

Con el fin de cuantificar la variabilidad de la demanda de ductilidad, la Figura 8 presenta la desviación estándar del logaritmo natural de la ductilidad para los mismos sistemas y conjuntos de registros analizados anteriormente. A diferencia de las Figuras 6 y 7, donde las diferencias entre las medianas son relativamente pequeñas, en la Figura 8 se observa una tendencia más consistente: para prácticamente todos los sistemas y la mayoría de los niveles de factor de escala, los conjuntos LD presentan una mayor variabilidad que los correspondientes conjuntos SD. Esta diferencia indica que, aun cuando $S_a(T_l)$ y las tendencias centrales de las formas espectrales sean comparables, las respuestas producidas por registros de larga duración presentan una mayor dispersión entre movimientos individuales. Una posible explicación es que los registros de mayor duración contienen un mayor número de pulsos dañinos y, por lo tanto, más oportunidades para producir incursiones inelásticas. La amplitud, duración y distribución temporal de estos pulsos pueden variar considerablemente entre registros, generando trayectorias de respuesta diferentes en sistemas no lineales, aun cuando los movimientos presenten valores similares de $S_a(T_l)$ y formas espectrales medias similares. Por consiguiente, $S_a(T_l)$ resulta menos eficiente para predecir la demanda de los conjuntos LD que la de los conjuntos SD. Esta observación es importante y no se había mencionado en estudios previos. No obstante, dado que estas características no se cuantificaron explícitamente, la mayor dispersión no puede atribuirse exclusivamente a la duración. Asimismo, debe recordarse que la variabilidad mostrada se encuentra condicionada a la ausencia de colapso. Debido a que el número de registros que permanece en esta condición no es igual para todos los sistemas y conjuntos, especialmente en los casos con

menor resistencia lateral, parte de las diferencias observadas puede estar influenciada por los distintos tamaños de muestra y por la exclusión de las respuestas que alcanzaron el colapso. Otra posible explicación de la mayor variabilidad en la respuesta de los conjuntos LD es que las duraciones de estos registros abarcan un intervalo mucho más amplio que las de los conjuntos SD, lo cual podría contribuir a incrementar la variabilidad de la demanda estructural.

Adicionalmente, se observa un incremento general en la variabilidad de la demanda conforme aumenta el factor de escala, particularmente para sistemas de periodo corto y moderado ($T_n = 0.2, 0.5$ y 1.0 s). Esta observación, junto con el incremento moderado de la tendencia central mostrado en la Figura 7, es consistente con la limitada robustez de $S_a(T_I)$ respecto al escalamiento en amplitud. Dávalos y Miranda (2019b) observaron que los registros que requieren factores de escala elevados para alcanzar una determinada intensidad pueden diferir de aquellos que requieren factores cercanos a la unidad en características que no quedan completamente representadas por $S_a(T_I)$ o incluso por la forma espectral, entre ellas el contenido de pulsos potencialmente dañinos. Al escalar los registros, estas características también son amplificadas, lo que puede aumentar tanto la demanda como su variabilidad.

Como se describió en la Sección 3.5, durante el procedimiento de selección se buscó minimizar las diferencias entre las tendencias centrales de las formas espectrales, pero no se buscó igualar la variabilidad de las ordenadas espectrales en periodos diferentes de T_I . Por ello, aunque los conjuntos presentan espectros medianos similares, persisten diferencias en la dispersión espectral y en otras características de los movimientos del terreno. Estas diferencias pueden contribuir a la mayor dispersión de la demanda observada en algunos conjuntos de larga duración. Asimismo, pueden amplificarse al utilizar factores de escala elevados e influir tanto en la tendencia central como en la variabilidad de la respuesta. En consecuencia, los resultados sugieren que parte de las diferencias atribuidas a la duración en estudios anteriores podría estar influenciada por el escalamiento en amplitud y por otras características no controladas, incluso cuando los registros son considerados “espectralmente equivalentes”.

Dada la variabilidad observada en las demandas individuales y el número limitado de registros disponibles para cada subconjunto, resulta importante cuantificar la incertidumbre asociada a la estimación de sus medianas antes de interpretar las diferencias entre los conjuntos SD y LD. La Figura 9 presenta las medianas de la demanda de ductilidad condicionada al nivel del MCE_R y a la condición de no colapso, junto con sus respectivos intervalos de confianza del 95%. Debido a que no se supone una distribución probabilística específica para las medianas de la demanda de ductilidad, estos intervalos se estimaron mediante un procedimiento de muestreo Bootstrap. Para cada sistema y subconjunto de registros se generaron 10,000 muestras con reemplazo a partir de las demandas correspondientes a los análisis que no produjeron colapso; posteriormente, se calculó la mediana de cada muestra y se definieron los límites del intervalo mediante los percentiles 2.5 y 97.5 de las medianas resultantes. En los sistemas con $R_d = 2$, las medianas correspondientes a los conjuntos SD y LD son prácticamente iguales y sus intervalos de confianza son estrechos, lo que resulta consistente con las incursiones inelásticas reducidas observadas

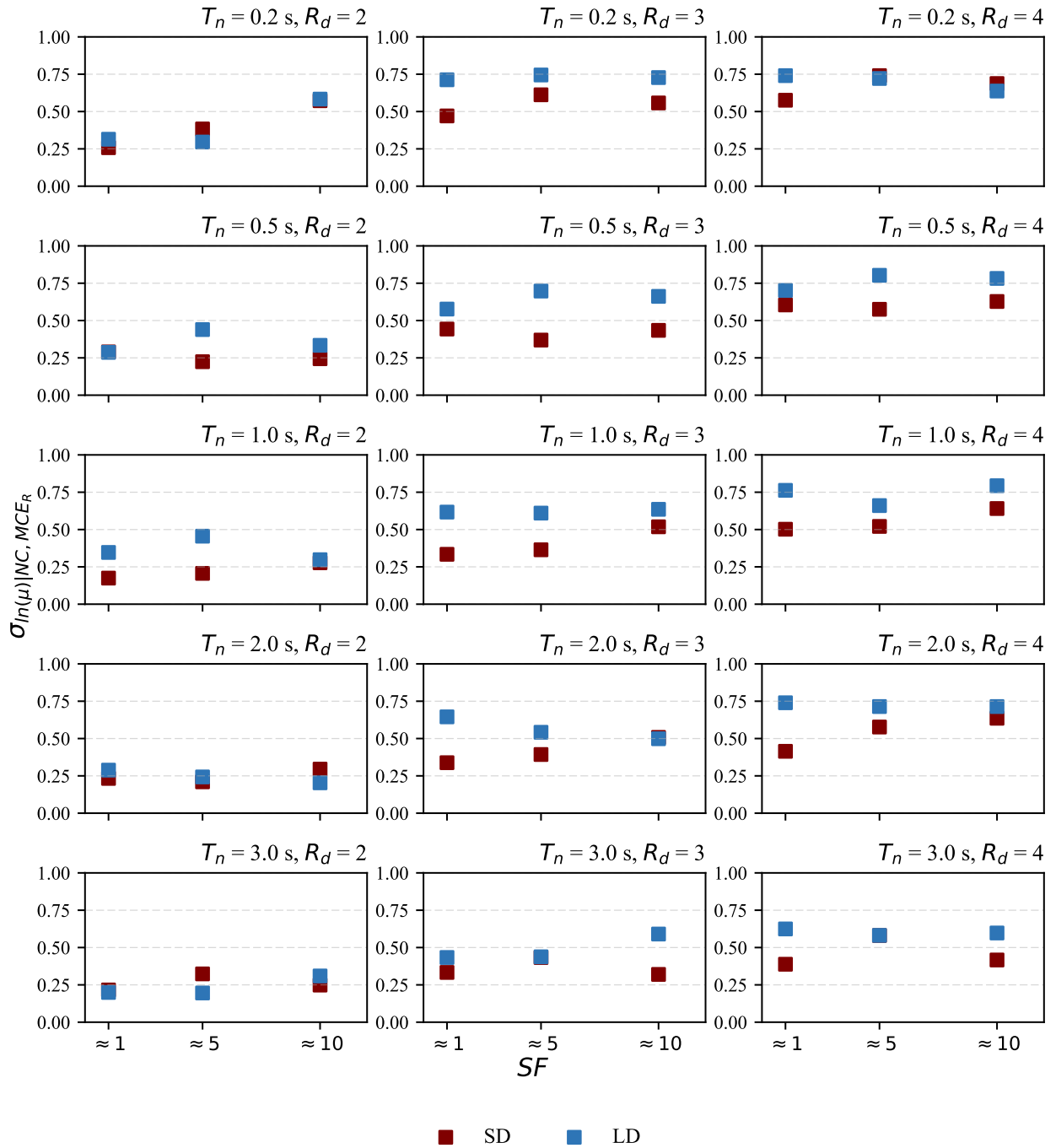


Figura 8. Desviación estándar logarítmica de la demanda de ductilidad condicionada al MCE_R y a no colapso para SDOFs con factores de reducción de resistencia $R_d = 2, 3$ y 4 sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.

previamente. Al disminuir la resistencia lateral, particularmente para $R_d = 4$, aumentan tanto las diferencias entre las medianas como la amplitud de sus intervalos de confianza. No obstante, en una parte importante de los casos se observa un traslape considerable entre los intervalos correspondientes a SD y LD, lo que indica que las diferencias entre las medianas son pequeñas en relación con la incertidumbre asociada a su estimación. En algunos sistemas, especialmente aquellos de menor resistencia lateral, los conjuntos LD presentan medianas mayores e intervalos más amplios. Sin embargo, estas tendencias no se observan de manera

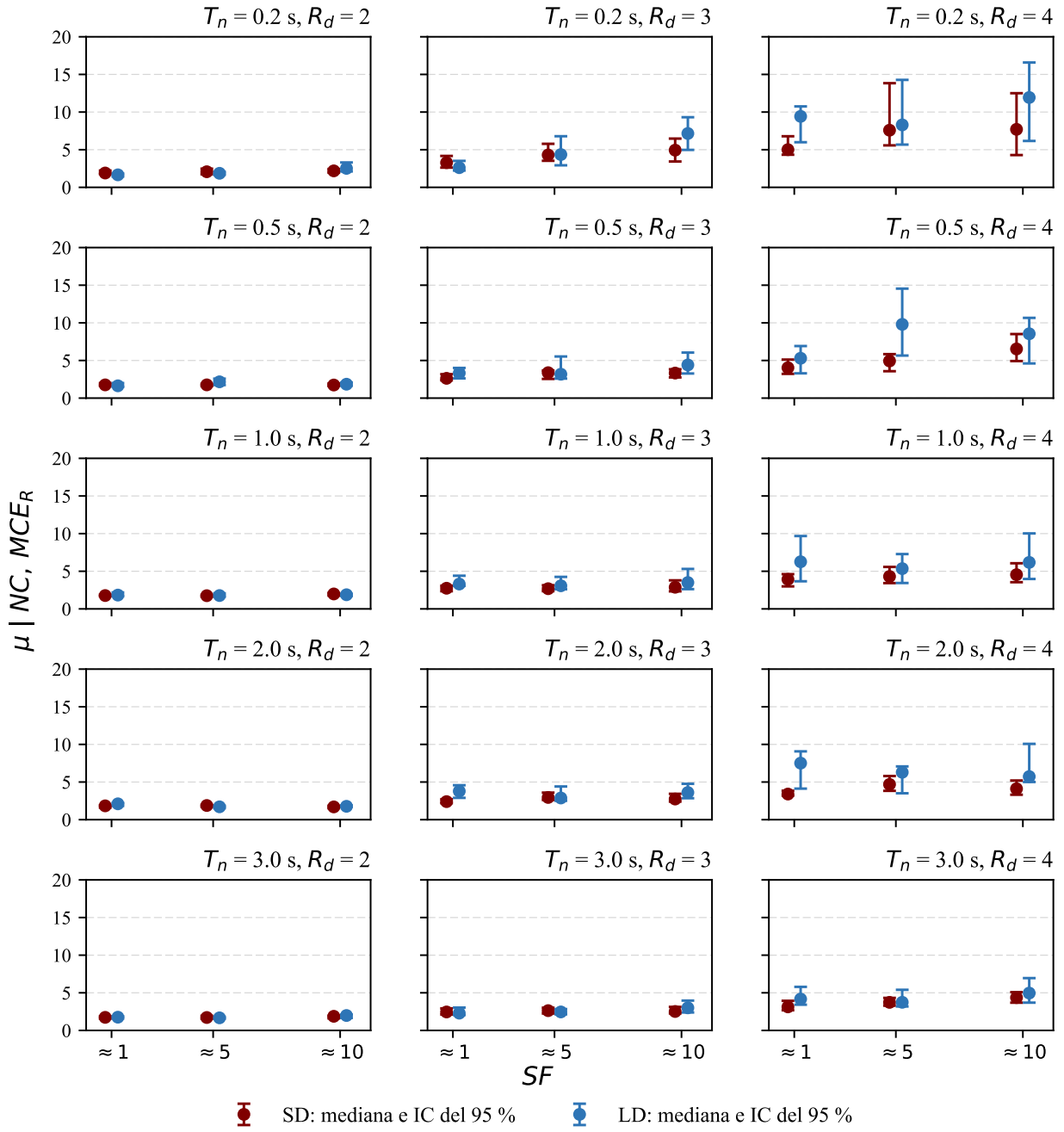


Figura 9. Medianas de la demanda de ductilidad condicionada al nivel del MCE_R y a la condición de no colapso de sistemas SDOF con $R_d = 2, 3$ y 4 , e intervalos de confianza del 95% obtenidos mediante muestreo Bootstrap, para conjuntos de corta (SD) y larga (LD) duración con diferentes factores de escala.

uniforme para todos los periodos y factores de escala.

Debe recordarse que estas estimaciones se encuentran condicionadas a la ausencia de colapso. Por lo tanto, el número de respuestas utilizado para estimar cada mediana puede variar entre 10 y 40 registros. Los intervalos más amplios reflejan tanto la mayor variabilidad entre las respuestas individuales como la mayor incertidumbre asociada con tamaños de muestra reducidos. Además, el traslape o la separación de los intervalos proporciona una indicación visual de la incertidumbre de las medianas, pero no constituye por sí sola una

prueba formal de diferencias estadísticamente significativas entre los conjuntos SD y LD. Aunque las diferencias entre las medianas son generalmente moderadas, la mayor dispersión observada para los conjuntos LD puede tener consecuencias importantes sobre la probabilidad de exceder niveles elevados de demanda. En particular, dos conjuntos con medianas similares pueden conducir a probabilidades de excedencia considerablemente diferentes si sus dispersiones no son iguales.

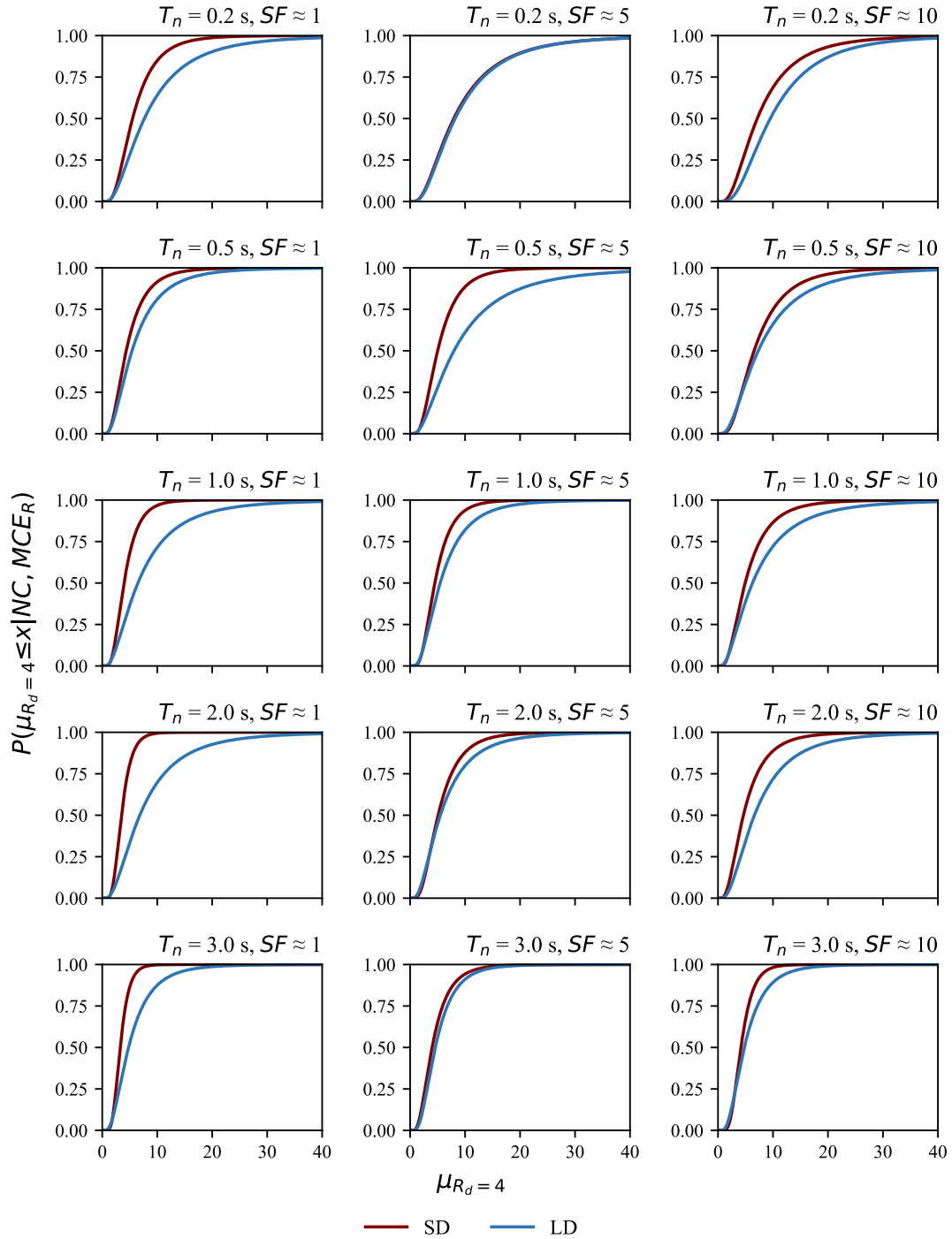


Figura 10. Modelos de probabilidad acumulada de la demanda de ductilidad condicionada al nivel del MCE_R y a la condición de no colapso para los sistemas SDOF con $R_d = 4$. Las curvas corresponden a distribuciones lognormales ajustadas mediante el método de momentos utilizando la media y la desviación estándar de las demandas de ductilidad obtenidas para cada subconjunto de registros de corta (SD) y larga duración (LD).

Para ilustrar esta consecuencia probabilística, la Figura 10 presenta modelos acumulados de probabilidad de la demanda de ductilidad para sistemas SDOF con $R_d = 4$, condicionados al nivel del MCE_R y a la condición de no colapso. Los modelos se obtuvieron mediante el método de momentos, ajustando una distribución lognormal cuyos primeros dos momentos corresponden a los estimados a partir de las demandas de ductilidad de cada subconjunto. Por lo tanto, las curvas no representan directamente las distribuciones empíricas, sino modelos lognormales ajustados a partir de la tendencia central y la dispersión observadas. Para un determinado valor de ductilidad en el eje de las abscisas, cada curva representa la probabilidad estimada de observar una demanda igual o inferior a dicho valor. De manera equivalente, uno menos esta probabilidad corresponde a la probabilidad de exceder ese nivel de ductilidad.

Para la mayoría de los sistemas y niveles de factor de escala, las curvas correspondientes a los conjuntos LD se encuentran desplazadas hacia la derecha o presentan una transición más gradual que las de los conjuntos SD. En los intervalos de ductilidad de mayor interés ingenieril, este comportamiento se traduce generalmente en una menor probabilidad acumulada y, por consiguiente, en una mayor probabilidad de excedencia para los conjuntos LD. La diferencia entre las curvas no depende únicamente de las medianas, sino también de la mayor dispersión observada en varios conjuntos de larga duración. Así, aun cuando las medianas SD y LD sean comparables, una mayor dispersión puede extender la cola superior del modelo ajustado e incrementar la probabilidad estimada de alcanzar demandas elevadas.

En conjunto, los resultados de esta sección muestran que, una vez controlada parcialmente la forma espectral y el nivel de escalamiento, la duración de los registros produce diferencias relativamente pequeñas en la tendencia central de la respuesta inelástica condicionada a la no ocurrencia de colapso. Sin embargo, los registros de larga duración tienden a generar una mayor dispersión de la demanda, lo cual puede traducirse en diferencias apreciables en la probabilidad de exceder niveles elevados de ductilidad. Al mismo tiempo, los resultados evidencian que parte de estas diferencias puede estar influenciada por el factor de escala requerido para alcanzar la intensidad objetivo y por otras características del movimiento del terreno que no fueron controladas explícitamente durante el proceso de selección de registros.

4.3 – Probabilidad de Colapso Condicionada al MCE_R

La sección anterior mostró que, al condicionar la respuesta a la no ocurrencia de colapso, la duración de los registros produce diferencias relativamente pequeñas en la tendencia central de la demanda inelástica, aunque se observan incrementos más consistentes en la variabilidad de dicha demanda para los conjuntos de registros de larga duración. Si bien estos resultados permiten evaluar la respuesta de los sistemas que permanecen estables, desde el punto de vista del diseño sísmico resulta de mayor interés cuantificar la influencia de estas características del movimiento del terreno sobre la probabilidad de alcanzar el estado límite de colapso. En esta sección se presentan las probabilidades de colapso de los sistemas SDOF condicionadas al nivel de intensidad del MCE_R . A diferencia de la sección anterior, en la cual únicamente se analizaron los registros que no produjeron colapso, aquí se consideran los 40 registros que conforman cada subconjunto de corta (SD) y larga duración (LD), estimando la

probabilidad de colapso como la fracción de registros que inducen inestabilidad dinámica en el sistema.

La Figura 11 presenta las probabilidades de colapso condicionadas al nivel del MCE_R para los sistemas SDOF con $R_d = 4, 5$ y 6 sometidos a los subconjuntos de corta y larga duración y cada subconjunto de factor de escala. A diferencia de la sección anterior, en esta

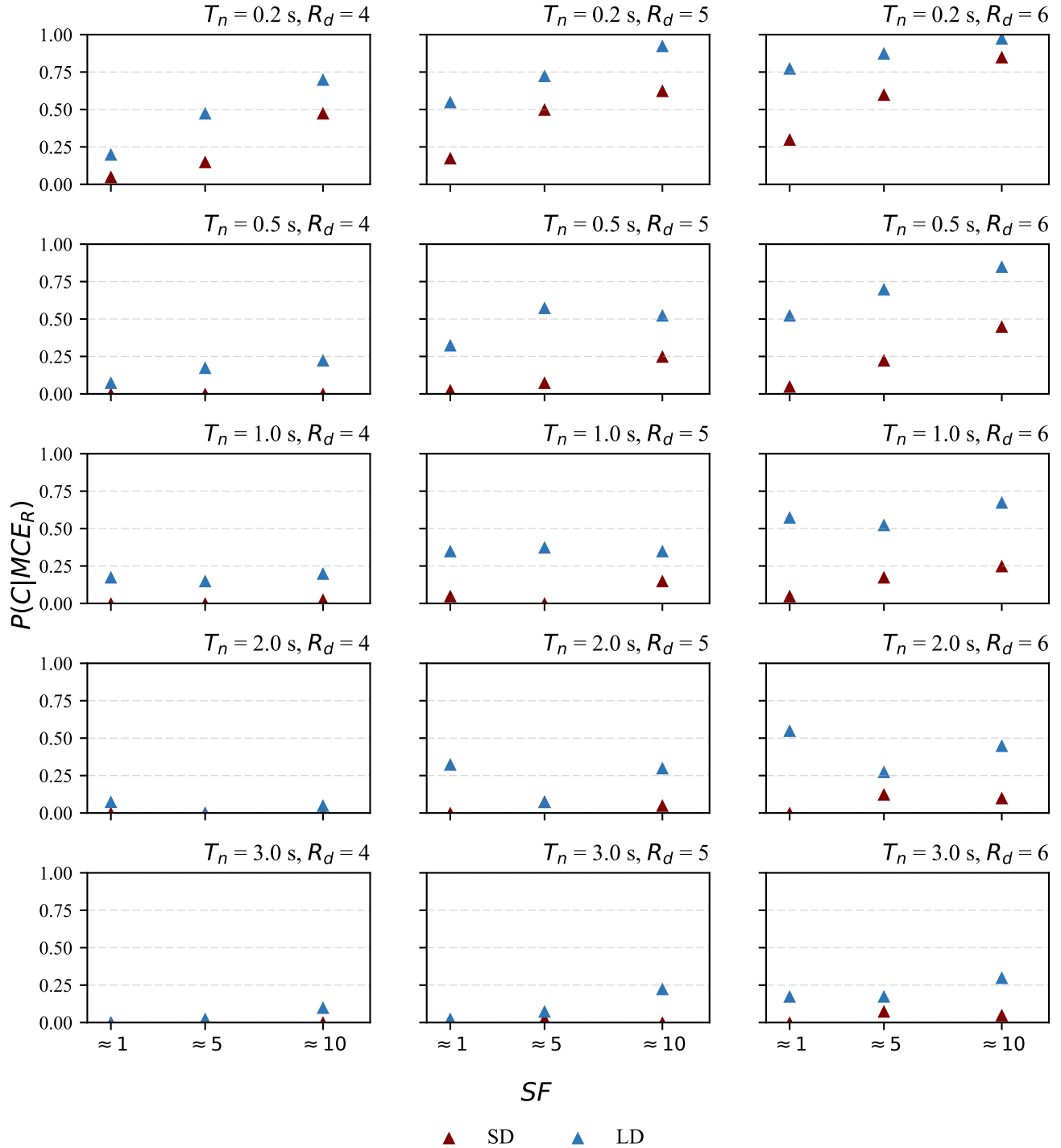


Figura 11. Probabilidad de colapso condicionada al nivel del MCE_R para sistemas SDOF con factores de reducción de resistencia $R_d = 4, 5$ y 6 , sometidos a los diferentes sets de registros de aceleración de corta (tinto) y larga (azul) duración.

sección se presentan únicamente los resultados correspondientes a resistencias laterales menores debido a que los sistemas con mayor resistencia lateral presentan probabilidades de colapso relativamente bajas y, en algunos casos, ninguno de los 40 registros de un subconjunto induce colapso. En estas condiciones, la estimación de la probabilidad de colapso presenta una incertidumbre considerable, dificultando la identificación de diferencias asociadas con la duración de los registros o su factor de escala. La misma observación es aplicable a los sistemas $T_n = 2.0$ y 3.0 s con $R_d = 4$, los cuales presentan probabilidades de colapso tan bajas que no permiten una evaluación de dichos resultados.

La Figura 11 muestra que, a medida que incrementa el factor de escala empleado para alcanzar la intensidad del MCE_R , la probabilidad de colapso tiende a aumentar. Vale la pena recordar que, por construcción, los registros fueron seleccionados de tal forma que las tendencias centrales de las formas espectrales fueran similares entre los distintos subconjuntos. Estos resultados son consistentes con las observaciones de Dávalos y Miranda (2019b), quienes notaron que incluso si la forma espectral entre grupos de registros es similar, la probabilidad de colapso tiende a ser sobreestimada al hacer uso de factores de escala altos y el sesgo tiende a ser mayor a medida que incrementa el factor de escala. Evidentemente, el sesgo parece ser más pronunciado y sistemático en sistemas de periodo corto ($T_n = 0.2$ y 0.5 s), que en sistemas de periodo moderado a largo ($T_n = 1.0, 2.0$ y 3.0 s). Como se muestra en la Figuras 3 y 4, para los sistemas de periodo corto, la tendencia central de las formas espectrales difiere entre los conjuntos con diferente SF , presentando mayores ordenadas espectrales en periodos más largos que T_l . El mayor sesgo por factores de escala observado en sistemas de periodo corto puede estar asociado, al menos parcialmente, a estas diferencias en formas espectrales. En sistemas con periodos más largos, el sesgo persiste, aunque con menor magnitud, lo cual sugiere que utilizar registros con formas espectrales similares, al menos en términos de tendencia central, reduce mas no elimina el sesgo por el escalamiento en amplitud.

Dávalos y Miranda (2019b) notaron que los registros que requieren factores de escala mayores para alcanzar una determinada intensidad corresponden muchas veces a registros con mayores distancias de la fuente al sitio y por consecuencia poseen mayores duraciones significativas. Esto lleva a registros que requieren factores de escala altos a contener un mayor número de pulsos dañinos y por ende a estimar mayores probabilidades de colapso. Los resultados mostrados en la Figura 11 complementan estas observaciones. Considere, por ejemplo, el sistema con $T_n = 0.5$ s sometido a los subconjuntos LD con diferente factor de escala. Como se muestra en la Tabla 1, las medianas de duración de estos subconjuntos son relativamente similares: 16.30 s para el subconjunto con $SF \approx 1$, 16.0 s para el subconjunto con $SF \approx 5$ y 17.94 s para el subconjunto $SF \approx 10$. A pesar de tener medianas de duración similares, la probabilidad de colapso de estos sistemas sometidos a los registros LD tiende a incrementar a medida que incrementa el factor de escala. Esto sugiere que el sesgo por el uso de factores de escala no solo persiste a pesar de tener formas espectrales similares, sino también persiste si se cuenta con duraciones significativas similares.

En términos generales, en la Figura 11 se observa también que la probabilidad de colapso es mayor para los subconjuntos de larga duración en comparación a los de corta duración. En ninguno de los casos analizados se observa que un subconjunto SD produzca una

probabilidad de colapso superior a la de su contraparte LD. Sin embargo, la magnitud de estas diferencias depende tanto del sistema estructural como del factor de escala empleado para alcanzar una intensidad objetivo. Por ejemplo, para el sistema con $T_n = 0.2$ s y $R_d = 6$, la probabilidad de colapso corresponde a 30% para el subconjunto SD y 77.5% para el subconjunto LD cuando $SF \approx 1$, lo cual representa una diferencia de 47.5%. Para los subconjuntos con $SF \approx 5$, estas probabilidades corresponden a 60% y 87.5%, respectivamente (una diferencia de 27.5%), mientras que para $SF \approx 10$ corresponden a 85% y 97.5% (una diferencia de 12.5%). Es decir, para sistemas de periodo corto con resistencias laterales menores, las diferencias observadas entre los subconjuntos SD y LD tienden a reducirse de manera importante a medida que aumenta el factor de escala. En los sistemas de periodo moderado y largo ($T_n = 1.0, 2.0$ y 3.0 s) no se aprecia un comportamiento tan consistente como en los sistemas de periodo corto. Sin embargo, los resultados indican que el efecto aparente de la duración varía dependiendo del factor de escala empleado, y en algunos casos, puede ser sobreestimado. Por ejemplo, para el sistema con $T_n = 3.0$ s y $R_d = 6$, la probabilidad de colapso corresponde a 0% para el subconjunto SD y 17.5% para el subconjunto LD cuando $SF \approx 1$, a 7.5% y 17.5% cuando $SF \approx 5$, y a 5% y 30% cuando $SF \approx 10$.

Si bien la Figura 11 permite identificar diferencias en las probabilidades de colapso entre los distintos subconjuntos de registros, dichas probabilidades fueron estimadas a partir de únicamente 40 registros por subconjunto. En consecuencia, resulta necesario evaluar la incertidumbre asociada a estas estimaciones para la correcta interpretación de las diferencias observadas. Con este propósito, la Figura 12 presenta intervalos de confianza del 95% para las probabilidades de colapso obtenidos mediante muestreo Bootstrap con reemplazo. Los intervalos de confianza confirman las tendencias observadas en la Figura 11. Para la mayoría de los sistemas de periodo corto y moderado ($T_n = 0.2, 0.5$ y 1.0 s), los subconjuntos de larga duración presentan probabilidades de colapso mayores que sus correspondientes subconjuntos de corta duración. Asimismo, en varios de estos casos los intervalos de confianza correspondientes a los subconjuntos SD y LD presentan un traslape reducido o incluso nulo, lo que indica que las diferencias entre sus probabilidades de colapso son importantes en relación con la incertidumbre asociada a su estimación y respalda las tendencias identificadas previamente. Por el contrario, para los sistemas de periodo largo ($T_n = 2.0$ y 3.0 s), donde las probabilidades de colapso son considerablemente menores, los intervalos de confianza de los subconjuntos SD y LD presentan un traslape importante, indicando que las diferencias observadas entre ambos subconjuntos deben de interpretarse con mayor precaución, particularmente para los subconjuntos con $SF \approx 5$, donde la probabilidad de colapso producida por los registros LD parece ser menor que la de los subconjuntos con $SF \approx 1$.

También resulta interesante observar que la amplitud de los intervalos de confianza no permanece constante entre sistemas. En general, estos tienden a ser mayores cuando las probabilidades de colapso se encuentran alrededor de valores intermedios y menores cuando las probabilidades son cercanas a cero o la unidad. Este comportamiento es una consecuencia esperada de la estimación de una proporción a partir de un número finito de observaciones. Finalmente, se aprecia que, para varios sistemas de periodo corto, el incremento en el factor de escala no sólo reduce la diferencia entre las probabilidades de colapso estimadas para los subconjuntos SD y LD, como se observó en la Figura 11, sino que también conduce a un

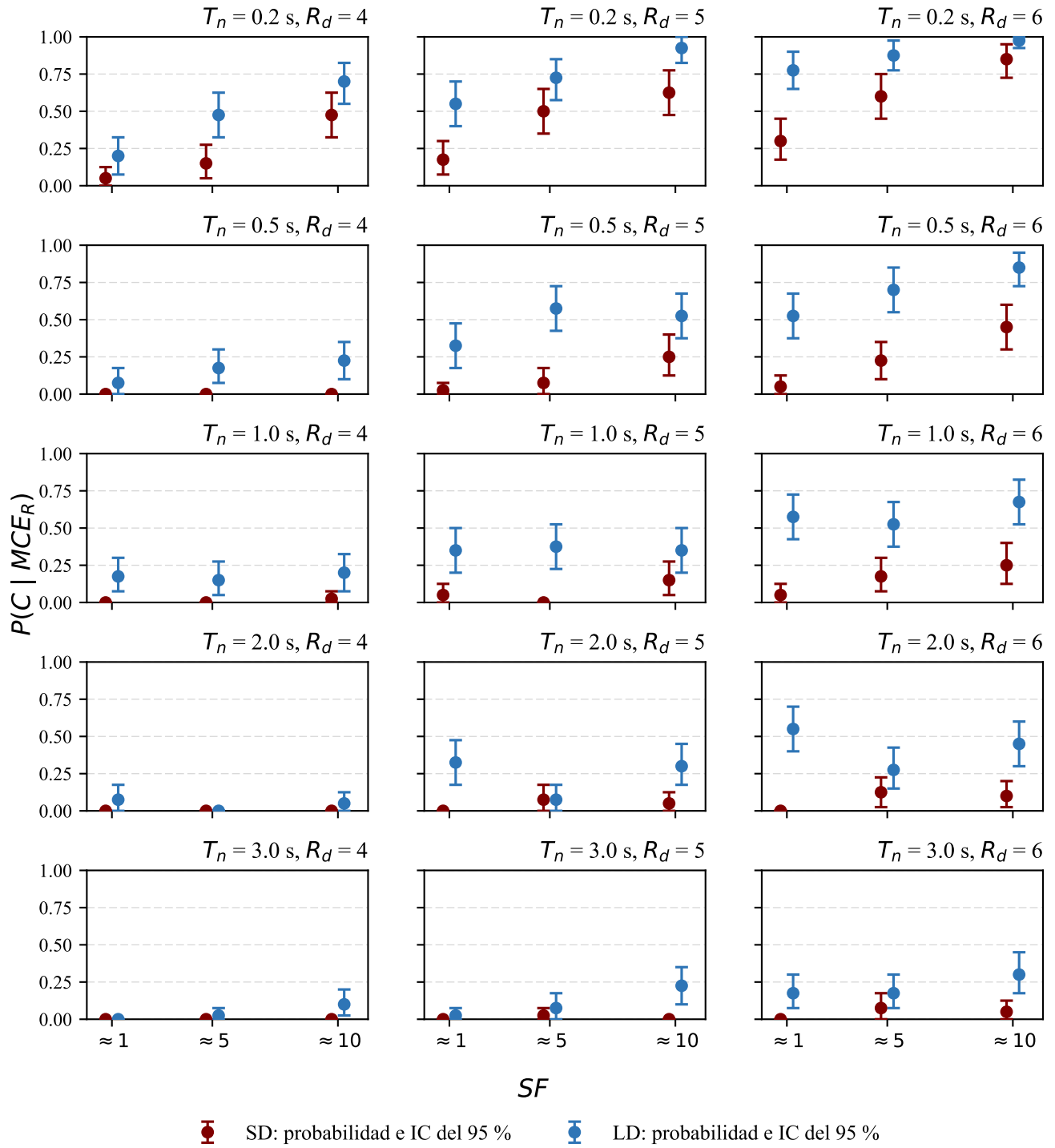


Figura 12. Intervalos de confianza del 95% en la probabilidad de colapso condicionada al nivel del MCE_R para sistemas SDOF con factores de reducción de resistencia $R_d = 4, 5$ y 6 sometidos a conjuntos de corta (tinto) y larga (azul) duración con diferentes factores de escala.

mayor traslape entre sus intervalos de confianza. Este resultado proporciona evidencia adicional de que la magnitud aparente del efecto de la duración sobre la probabilidad de colapso depende del nivel de escalamiento empleado en los registros, reforzando la importancia de considerar explícitamente el efecto del factor de escala al interpretar la influencia de la duración del movimiento del terreno.

En conjunto, los resultados presentados en esta sección indican que la magnitud del efecto que se atribuye a la duración significativa sobre la probabilidad de colapso depende del nivel de escalamiento empleado para los registros. En consecuencia, estudios realizados con registros que requieren factores de escala elevados podrían observar diferencias distintas entre registros de corta y larga duración que estudios realizados con registros poco escalados. Asimismo, los resultados muestran que la interacción entre la duración significativa y el factor de escala depende también del periodo estructural y de la resistencia lateral del sistema, por lo que la influencia de la duración no puede considerarse independiente del procedimiento de escalamiento utilizado durante la selección de registros. Finalmente, el hecho de que las tendencias observadas en las probabilidades de colapso se mantengan, en términos generales, al considerar la incertidumbre asociada a su estimación, proporciona respaldo adicional a esta interpretación. En este sentido, los resultados sugieren que el factor de escala no sólo influye directamente sobre la probabilidad de colapso, sino también sobre la magnitud del efecto que se atribuye a la duración significativa, aspecto que, hasta donde conoce el autor, no ha sido documentado explícitamente en estudios previos.

Capítulo 6: Conclusiones

6.1 – Resumen y Principales Hallazgos

El principal objetivo de la ingeniería sísmica es prevenir el colapso estructural. Por ello, resulta de suma importancia cuantificar, en términos probabilísticos, el riesgo de colapso del entorno construido. Los métodos convencionales de diseño no permiten una estimación explícita de este riesgo y, en su lugar, asumen que éste es aceptablemente bajo siempre que se satisfagan una serie de requisitos prescriptivos basados, en su mayoría, en procedimientos de análisis lineales. Los avances en el campo de la Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño permiten estimar el riesgo de colapso combinando modelos estructurales capaces de reproducir adecuadamente el comportamiento esperado de las estructuras con el peligro sísmico específico del sitio de interés. Sin embargo, para reducir la incertidumbre asociada a estas estimaciones es necesario identificar qué características de los movimientos del terreno controlan el potencial de daño estructural y, particularmente, su capacidad para inducir el colapso.

Dentro de este contexto, la influencia de la duración del movimiento fuerte del terreno sobre el potencial de colapso estructural ha sido objeto de un creciente interés durante las últimas décadas. Los primeros estudios en el tema llegaron a un consenso general de que la duración tiene un efecto poco significativo sobre la respuesta inelástica máxima e incluso algunos concluyeron que tampoco influye de manera importante en la probabilidad de colapso. En contraste, investigaciones más recientes sugieren que la duración desempeña un papel importante en la estimación de dicha probabilidad y, por lo tanto, debe considerarse explícitamente en evaluaciones sísmicas basadas en desempeño. La gran mayoría de estos estudios parten de la premisa de que, para dos registros con formas espectrales similares, cualquier diferencia en sus intensidades de colapso puede atribuirse principalmente a diferencias en su duración. Sin embargo, hasta donde conoce el autor de esta tesis, ninguno de estos estudios evalúa de manera explícita el posible sesgo introducido por el uso de factores de escala elevados, aun cuando los registros presenten formas espectrales semejantes. Este aspecto podría afectar la interpretación del efecto atribuido a la duración.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de la duración del movimiento fuerte del terreno sobre la probabilidad de colapso estructural considerando, además de la forma espectral, los efectos asociados al escalamiento en amplitud. Para ello, se desarrolló una base de datos de registros provenientes de sismos corticales y de subducción. Para cada registro y periodo estructural de interés se calculó el factor de escala necesario para alcanzar una intensidad objetivo correspondiente al Sismo Máximo Considerado ajustado al Riesgo (MCE_R). Posteriormente, los registros fueron clasificados en tres grupos de acuerdo con el rango de factor de escala requerido y, dentro de cada grupo, se seleccionaron los 120 registros cuyas formas espectrales presentaban la menor diferencia respecto a una forma espectral objetivo. Finalmente, cada conjunto fue dividido en los 40 registros con las duraciones significativas 5–75 más cortas y los 40 con las más largas. De esta manera se obtuvieron subconjuntos con formas espectrales similares y factores de escala dentro de un mismo rango, pero con duraciones significativamente diferentes. Sobre estos subconjuntos se evaluó la respuesta de sistemas de un grado de libertad con periodos de vibración entre 0.2 y 3.0 s,

resistencias laterales comprendidas entre un medio y un sexto de la resistencia elástica requerida y comportamiento bilineal degradante, estudiando tanto la respuesta máxima de los sistemas que no colapsaron como la probabilidad de colapso correspondiente a cada sistema y subconjunto de registros.

Consistente con las observaciones de Dávalos y Miranda (2019b), los resultados muestran que el uso de factores de escala introduce un sesgo en la estimación tanto de la respuesta inelástica como de la probabilidad de colapso, incluso cuando los registros presentan formas espectrales similares. Asimismo, los resultados sugieren que dicho sesgo no desaparece aun cuando los subconjuntos de registros presentan tanto formas espectrales como duraciones significativas similares. Esto sugiere que las diferencias en el potencial de colapso entre registros con formas espectrales semejantes no pueden atribuirse exclusivamente a diferencias en su duración significativa. De ser así, registros con formas espectrales y duraciones similares producirían probabilidades de colapso comparables independientemente del factor de escala requerido para alcanzar la intensidad objetivo, lo cual no fue observado en esta investigación.

En el caso de la respuesta máxima condicionada a la no ocurrencia de colapso, se observó que la duración produce únicamente incrementos marginales en la mediana de la demanda inelástica. Sin embargo, tanto la elevada dispersión de las respuestas individuales como los intervalos de confianza obtenidos para las medianas indican que dichos incrementos no deben atribuirse directamente a la duración. Por otra parte, para prácticamente todos los sistemas estructurales y subconjuntos analizados, la variabilidad de la demanda de ductilidad fue mayor en los registros de larga duración que en los de corta duración. Este comportamiento podría atribuirse, al menos parcialmente, a varios factores: (1) la disminución del número de registros que no producen colapso conforme aumenta el factor de reducción de resistencia lateral, particularmente en los subconjuntos de larga duración; (2) diferencias en la dispersión de las ordenadas espectrales en periodos distintos de T_l , aun cuando la tendencia central de las formas espectrales sea similar; (3) el hecho de que los subconjuntos de larga duración abarcan un intervalo considerablemente mayor de duraciones; y (4) la presencia de un mayor número de pulsos potencialmente dañinos en registros de larga duración que requieren factores de escala elevados, característica que no es capturada por $S_a(T_l)$ y que puede incrementar la variabilidad de la respuesta no lineal. Dado que ninguno de estos mecanismos fue evaluado de manera independiente, el incremento observado en la variabilidad no puede atribuirse exclusivamente a la duración. No obstante, los resultados indican que, cuando se emplea $S_a(T_l)$ como medida de intensidad, la incertidumbre en la estimación de la respuesta estructural tiende a ser mayor para registros de larga duración que para registros de corta duración. En otras palabras, $S_a(T_l)$ parece perder eficiencia cuando se utilizan registros de larga duración que además requieren factores de escala elevados.

Para todos los sistemas estructurales y subconjuntos analizados, la probabilidad de colapso condicionada al nivel del MCE_R estimada para los registros de larga duración fue mayor que la correspondiente a sus contrapartes de corta duración. Este comportamiento es consistente con investigaciones recientes que han observado incrementos en la probabilidad de colapso al emplear registros de mayor duración cuando $S_a(T_l)$ se utiliza como medida de intensidad. Sin embargo, los resultados muestran también que la magnitud de estas

diferencias depende del rango de factores de escala considerado, así como del periodo de vibración y de la resistencia lateral del sistema estructural. En particular, para los sistemas de periodo corto, las diferencias entre registros de corta y larga duración tienden a reducirse conforme aumenta el factor de escala. En los sistemas de periodo moderado y largo no se observa una tendencia tan sistemática; sin embargo, las diferencias entre subconjuntos continúan dependiendo del nivel de escalamiento empleado. Estos resultados muestran que la magnitud del efecto que se atribuye a la duración depende también del factor de escala utilizado para los registros y sugieren que parte del efecto reportado en investigaciones previas podría estar influenciado por el escalamiento en amplitud, aun cuando los registros presenten formas espectrales similares.

Los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones importantes para la evaluación del riesgo sísmico mediante análisis dinámicos no lineales. Como se discutió anteriormente, el número de registros capaces de inducir el colapso de estructuras diseñadas conforme a reglamentos modernos es limitado. Por ejemplo, de los 21,540 registros del movimiento del terreno disponibles en la base de datos NGA-West2 (Ancheta et al., 2014), únicamente 29 (lo que equivale a una fracción del 0.13%) corresponden a eventos de magnitud igual o mayor a 7.4 registrados a distancias Joyner y Boore (R_{jb}) menores a 3 km. De manera similar, únicamente el 1.53% de los registros disponibles en esta base de datos corresponden a eventos con magnitudes mayores o iguales a 7.0 y distancias R_{jb} menores a 50 km. Estos registros son de particular interés, ya que los eventos de gran magnitud registrados a distancias cortas tienen un mayor potencial de producir movimientos del terreno de alta intensidad y, por lo tanto, de inducir el colapso sin requerir factores de escala elevados. Por esta razón, resulta común recurrir al escalamiento en amplitud para alcanzar los niveles de intensidad requeridos durante las evaluaciones de desempeño. Metodologías ampliamente utilizadas, como el análisis dinámico incremental (Vamvatsikos y Cornell, 2002), requieren precisamente el empleo de factores de escala elevados para inducir el colapso estructural. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que dichos factores de escala pueden introducir un sesgo tanto en la estimación de la probabilidad de colapso como en la interpretación de la influencia de distintas características del movimiento del terreno. En conjunto, los resultados no permiten concluir que la duración significativa, por sí sola, sea la responsable del incremento observado en la probabilidad de colapso. Más bien, muestran que cuando $S_a(T_I)$ se emplea como medida de intensidad, la estimación de la probabilidad de colapso parece estar influenciada por un conjunto de características del movimiento (entre ellas la duración y el factor de escala) cuyos efectos no pueden aislarse completamente únicamente mediante el emparejamiento de las formas espectrales. En consecuencia, la evaluación del efecto de la duración debería realizarse considerando explícitamente el nivel de escalamiento empleado y reconociendo las limitaciones de utilizar $S_a(T_I)$ como única medida de intensidad para caracterizar movimientos capaces de inducir respuestas altamente no lineales.

6.2 – Limitaciones

Los resultados presentados en esta investigación aportan evidencia sobre la interacción entre la duración del movimiento del terreno, el factor de escala y la estimación de la respuesta inelástica y la probabilidad de colapso. Sin embargo, las conclusiones obtenidas

deben interpretarse dentro del alcance y las hipótesis bajo las cuales fue desarrollado el estudio. Varias decisiones metodológicas fueron adoptadas con el propósito de aislar, en la medida de lo posible, la influencia de la duración y del factor de escala; no obstante, dichas decisiones implican limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados y al extrapolarlos a otros problemas de ingeniería sísmica. Las principales limitaciones de esta investigación se resumen a continuación:

- La presente investigación empleó la pseudoaceleración espectral $S_a(T_1)$ como medida de intensidad para condicionar tanto la respuesta inelástica como la probabilidad de colapso. Si bien esta es la medida de intensidad más utilizada en la práctica y en evaluaciones sísmicas basadas en desempeño, diversos estudios han mostrado que presenta limitaciones importantes para predecir respuestas altamente no lineales con una alta confiabilidad. En particular, $S_a(T_1)$ no captura explícitamente características del movimiento como el contenido de pulsos dañinos, la distribución de energía en diferentes periodos o el contenido de frecuencias asociado a movimientos de larga duración. Asimismo, esta medida es susceptible al uso de factores de escala elevados, lo cual constituye precisamente una de las motivaciones de esta investigación. En consecuencia, las conclusiones obtenidas deben interpretarse como válidas para análisis condicionados a $S_a(T_1)$ y no necesariamente extrapolarse a otras medidas de intensidad potencialmente más eficientes, suficientes o robustas. Adicionalmente, todos los análisis se realizaron considerando una fracción de amortiguamiento crítico del 2%, por lo que no se evaluó la influencia del amortiguamiento estructural sobre los resultados obtenidos.
- La duración del movimiento del terreno fue caracterizada mediante la duración significativa 5–75, siguiendo las recomendaciones de Chandramohan et al. (2016) y siendo consistente con estudios recientes. Sin embargo, como se mostró en la Sección 2.2, existen numerosas medidas de duración propuestas en la literatura, las cuales cuantifican distintos aspectos del movimiento y no necesariamente presentan la misma relación con la respuesta estructural. Asimismo, la metodología empleada consistió en dividir cada conjunto de registros en los subconjuntos con las 40 duraciones más cortas y las 40 más largas, por lo que la influencia de la duración se evaluó comparando dos grupos extremos y no un continuo de valores de duración. En consecuencia, las tendencias observadas en esta investigación corresponden específicamente a la definición de duración adoptada y al procedimiento de clasificación empleado.
- La metodología de selección de registros consideró explícitamente únicamente tres características: el factor de escala requerido para alcanzar la intensidad objetivo, la similitud de la forma espectral y la duración significativa. No se impusieron restricciones explícitas sobre parámetros causales como la magnitud del evento, la distancia entre la fuente y el sitio, el mecanismo de falla o las condiciones locales del suelo. Si bien una selección consistente con la desagregación del peligro sísmico del sitio produciría registros provenientes de un intervalo más reducido de

estos parámetros, dicha estrategia habría impedido implementar la metodología propuesta para separar simultáneamente los efectos de la forma espectral, el factor de escala y la duración. En consecuencia, parte de las diferencias observadas entre subconjuntos podrían estar influenciadas por diferencias en estas características del movimiento del terreno, además de la duración significativa.

- El procedimiento de selección buscó minimizar la diferencia entre cada espectro de respuesta individual y una forma espectral objetivo. Como consecuencia, la similitud entre subconjuntos se logró principalmente en términos de la tendencia central de sus formas espectrales, sin controlar explícitamente la dispersión de las ordenadas espectrales en periodos distintos de T_1 . Esta decisión permitió evaluar el ajuste espectral registro por registro y posteriormente clasificar los registros según su duración. Sin embargo, diferencias residuales en la variabilidad espectral pueden influir tanto en la dispersión de la respuesta estructural como en la probabilidad de colapso, por lo que parte de las diferencias observadas entre subconjuntos podría estar asociada a dichas diferencias y no únicamente a la duración del movimiento o incluso al factor de escala empleado.
- Los resultados obtenidos corresponden exclusivamente a sistemas de un grado de libertad con comportamiento bilineal degradante y pendiente post-elástica negativa constante. Aunque este tipo de modelos constituye una herramienta ampliamente utilizada para estudiar tendencias generales relacionadas con el colapso estructural, no representa la diversidad de mecanismos de comportamiento observados en estructuras reales. En particular, no se consideraron diferentes modelos histeréticos, mecanismos de degradación alternativos, interacción entre modos de vibración ni estructuras de múltiples grados de libertad. En consecuencia, la generalización de los resultados a edificios reales debe realizarse con cautela.
- Cada subconjunto estuvo conformado por únicamente 40 registros de aceleración. Si bien este tamaño de muestra es consistente con numerosos estudios previos y permitió mantener diferencias importantes entre las duraciones de los subconjuntos, introduce incertidumbre estadística tanto en la estimación de las medianas de respuesta como en la probabilidad de colapso. Esta incertidumbre fue evaluada mediante intervalos de confianza obtenidos por muestreo Bootstrap; sin embargo, un mayor número de registros permitiría reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones.
- La presente investigación evaluó la respuesta estructural y la probabilidad de colapso condicionadas exclusivamente al nivel de intensidad correspondiente al Sismo Máximo Considerado ajustado al Riesgo (MCE_R). En consecuencia, no se estimó explícitamente el riesgo anual de colapso, el cual requiere evaluar la respuesta estructural para múltiples niveles de intensidad, construir funciones de fragilidad e integrarlas con la curva de peligro sísmico del sitio. La elección de un único nivel de intensidad permitió desarrollar la metodología propuesta para separar los efectos del factor de escala, la forma espectral y la duración, pero

dificulta extender directamente los resultados hacia estimaciones más completas de riesgo sísmico.

6.3 – Futuras Líneas de Investigación

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten identificar diversas líneas de trabajo que podrían contribuir a mejorar la comprensión de la influencia de la duración del movimiento fuerte del terreno en la respuesta estructural y la probabilidad de colapso, considerando de manera simultánea los efectos del escalamiento en amplitud y la forma espectral. Entre las más importantes se encuentran las siguientes:

- Una de las principales líneas de investigación consiste en repetir el procedimiento desarrollado en esta tesis empleando medidas de intensidad diferentes a $S_a(T_1)$. Debido a que esta medida presenta limitaciones importantes en términos de eficiencia, suficiencia y robustez frente al uso de factores de escala, resulta de particular interés evaluar si medidas de intensidad de nueva generación, capaces de representar de manera más adecuada el contenido energético y el contenido de pulsos dañinos del movimiento del terreno, reducen las diferencias observadas entre registros de corta y larga duración. De esta manera sería posible determinar en qué medida los efectos observados en esta investigación son consecuencia de la duración del movimiento y en qué medida provienen de las limitaciones propias de la medida de intensidad utilizada. Cabe mencionar que el autor de la presente tesis ha continuado con esta línea de investigación y ha observado que, cuando se emplean medidas de intensidad de nueva generación que están fuertemente correlacionadas con el colapso estructural, tales como $S_{a_{avg}}$ (Eads et al. 2015) y $FIV3$ (Dávalos y Miranda, 2019c, Dávalos y Miranda, 2020) el efecto aparente de la duración significativa se vuelve esencialmente despreciable (Montemayor et al. 2025).
- La metodología desarrollada en esta tesis buscó igualar la tendencia central de las formas espectrales de los diferentes subconjuntos de registros. Sin embargo, diferencias residuales en la dispersión de las ordenadas espectrales podrían contribuir a las diferencias observadas en la respuesta estructural. En consecuencia, resulta conveniente investigar si los resultados persisten una vez se adopten procedimientos de selección que permitan controlar simultáneamente tanto la tendencia central como la variabilidad de las formas espectrales, con el fin de evaluar si ello reduce las diferencias observadas entre registros de corta y larga duración. Sin embargo, la base de datos de registros de aceleración tendría que ser más amplia para poder lograr una selección de registros que considere también este aspecto.
- Los resultados presentados corresponden a sistemas de un grado de libertad con comportamiento bilineal degradante. Una extensión natural de esta investigación consiste en evaluar estructuras de múltiples grados de libertad, diferentes sistemas estructurales y modelos histeréticos con distintas características de degradación de resistencia y rigidez. Esto permitiría establecer la generalidad de las tendencias

observadas y evaluar la influencia de la duración en estructuras con mecanismos de respuesta más complejos.

- Finalmente, resulta de especial interés extender la metodología propuesta hacia estimaciones explícitas del riesgo anual de colapso. Para ello sería necesario evaluar la respuesta estructural en múltiples niveles de intensidad sísmica, desarrollar funciones de fragilidad consistentes con los criterios de selección propuestos en esta investigación e integrar dichas funciones con la curva de peligro sísmico del sitio, todo ello considerando simultáneamente los efectos de la forma espectral y el escalamiento en amplitud. Este tipo de estudios permitiría determinar en qué medida las tendencias observadas al nivel del MCE_R se traducen en diferencias significativas en el riesgo anual de colapso de las estructuras.

Bibliografía y Referencias

- Akkar, S., & Miranda, E. (2004). Improved displacement modification factor to estimate maximum deformations of short period structures. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,” ASCE/SEI 7–22 (2021).
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S. J., ... & Donahue, J. L. (2014). NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 989-1005.
- Anderson, J. C., & Bertero, V. V. (1987). Uncertainties in establishing design earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, 113(8), 1709-1724.
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. In R. J. Hansen (Ed.), *Seismic design for nuclear power plants* (pp. 438–483). MIT Press.
- Baker, J. W., & Cornell, A. C. (2005). A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(10), 1193-1217.
- Baker, J. W., & Cornell, A. C. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9), 1077-1095.
- Baker, J. W. (2007). Measuring bias in structural response caused by ground motion scaling. In *Proceedings of the 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 8, pp. 1-8).
- Baker, J. W. (2011). Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 322-331.
- Bazzurro, P., & Cornell, C. A. (1994). Seismic hazard analysis of nonlinear structures. I: Methodology. *Journal of Structural Engineering*, 120(11), 3320-3344.
- Bazzurro, P., & Luco, N. (2006). Do scaled and spectrum-matched near-source records produce biased nonlinear structural responses. In *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering* (pp. 18-22).
- Benioff, H. (1934). The physical evaluation of seismic destructiveness. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 24(4), 398–403.
- Bertero, V. V., Mahin, S. A., & Herrera, R. A. (1978). Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6(1), 31-42.
- Bojórquez, E., & Iervolino, I. (2011). Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 996-1008.
- Bolt, B. A. (1973). Duration of strong ground motions. In *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 1, pp. 1304–1313).

- Bommer, J. J., & Martínez-Pereira, A. (1999). The effective duration of earthquake strong motion. *Journal of Earthquake Engineering*, 3(02), 127-172.
- Bommer, J. J., Magenes, G., Hancock, J., & Penazzo, P. (2004). The influence of strong-motion duration on the seismic response of masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2(1), 1-26.
- Castro, S., Benavente, R., Crempien, J. G., Candia, G., & De La Llera, J. C. (2022). A consistently processed strong-motion database for Chilean earthquakes. *Seismological Research Letters*, 93(5), 2700-2718.
- CFE (2015), Capítulo de Diseño por sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC-DS).
- Chandramohan, R., Baker, J. W., & Deierlein, G. G. (2016). Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records. *Earthquake Spectra*, 32(2), 927-950.
- Cordova, P. P., Deierlein, G. G., Mehanny, S. S., & Cornell, C. A. (2000, September). Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. In *The second US-Japan workshop on performance-based earthquake engineering methodology for reinforced concrete building structures* (Vol. 20, No. 0, p. 0). Berkeley, CA, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Cornell, A. C. (1997). Does duration really matter? In *Proceedings of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities* (pp. 125–133). National Center for Earthquake Engineering Research.
- Dávalos, H., & Miranda, E. (2019a). Evaluation of the scaling factor bias influence on the probability of collapse using $S_a(T_1)$ as the intensity measure. *Earthquake Spectra*, 35(2), 679-702.
- Dávalos, H., & Miranda, E. (2019b). Evaluation of bias on the probability of collapse from amplitude scaling using spectral-shape-matched records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(8), 970-986.
- Dávalos, H., & Miranda, E. (2019c). Filtered incremental velocity: A novel approach in intensity measures for seismic collapse estimation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(12), 1384-1405.
- Dávalos, H., & Miranda, E. (2020). Evaluation of FIV3 as an intensity measure for collapse estimation of moment-resisting frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 146(10), 04020204.
- Eads, L., Miranda, E., & Lignos, D. G. (2013). *Seismic collapse risk assessment of buildings: Effects of intensity measure selection and computational approach* (Report No. 184). The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.

- Eads, L., Miranda, E., & Lignos, D. G. (2015). Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(12), 2057-2073.
- Eads, L., Miranda, E., & Lignos, D. (2016). Spectral shape metrics and structural collapse potential. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(10), 1643-1659.
- En, B. S. (2004). 1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Fairhurst, M., Bebamzadeh, A., & Ventura, C. E. (2019). Effect of ground motion duration on reinforced concrete shear wall buildings. *Earthquake Spectra*, 35(1), 311-331.
- Foschaar, J. C., Baker, J. W., & Deierlein, G. G. (2012, September). Preliminary assessment of ground motion duration effects on structural collapse. In *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*. Lisbon, Portugal. Portugal: WCEE.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Günay, S., & Mosalam, K. M. (2013). PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(6), 829-858.
- Hancock, J., & Bommer, J. J. (2006). A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage. *Earthquake Spectra*, 22(3), 827-845.
- Hancock, J., & Bommer, J. J. (2007). Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(4), 291-299.
- Haselton, C. B., Baker, J. W., Liel, A. B., & Deierlein, G. G. (2011). Accounting for ground-motion spectral shape characteristics in structural collapse assessment through an adjustment for epsilon. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 332-344.
- Housner, G. W. (1952). *Intensity of ground motion during strong earthquakes* (2nd Technical Report, Office of Naval Research Contract N6onr-244, Task Order 25, Project NR-081-095). Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology.
- Ibarra, L. F., & Krawinkler, H. (2005). *Global collapse of frame structures under seismic excitations* (Report No. 152). The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.
- Iervolino, I., & Cornell, C. A. (2005). Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, 21(3), 685-713.
- Iervolino, I., Manfredi, G., & Cosenza, E. (2006). Ground motion duration effects on nonlinear seismic response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(1), 21-38.

Jayaram, N., Lin, T., & Baker, J. W. (2011). A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance. *Earthquake Spectra*, 27(3), 797-815.

Kennedy, R. P., Kincaid, R. H., Short, S. A., & Woodward-Clyde Consultants, W. C. (1985). *Engineering characterization of ground motion. Task II. Effects of ground motion characteristics on structural response considering localized structural nonlinearities and soil-structure interaction effects*. Volume 2 (No. NUREG/CR--3805-Vol. 2). Structural Mechanics Associates, Inc., Newport Beach, CA (USA).

Krawinkler, H. (1997). Impact of duration/energy in design. In *Proceedings of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities* (pp. 115–123). National Center for Earthquake Engineering Research.

Krawinkler, H., & Miranda, E. (2004). Performance-based earthquake engineering. In Y. Bozorgnia & V. V. Bertero (Eds.), *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering* (pp. 560–635). CRC Press.

Krinitzsky, E. L., & Chang, F. K. (1977). *State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the United States: Report 7. Specifying peak motions for design earthquakes* (Miscellaneous Paper No. S-73-1, Report 7). U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory.

Liapopoulou, M., Bravo-Haro, M. A., & Elghazouli, A. Y. (2020). The role of ground motion duration and pulse effects in the collapse of ductile systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(11), 1051-1071.

Lin, Y. Y., & Chang, K. C. (2004). Effects of site classes on damping reduction factors. *Journal of Structural Engineering*, 130(11), 1667-1675.

Luco, N., & Bazzurro, P. (2007). Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear structural drift responses?. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 1813-1835.

Luco, N., & Cornell, C. A. (2007). Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions. *Earthquake Spectra*, 23(2), 357-392.

Marafi, N. A., Berman, J. W., & Eberhard, M. O. (2016). Ductility-dependent intensity measure that accounts for ground-motion spectral shape and duration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(4), 653-672.

McCann Jr, M. W., & Shah, H. C. (1979). Determining strong-motion duration of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(4), 1253-1265.

Mehanny, S. S. F., & Deierlein, G. G. (2000). *Modeling and assessment of seismic performance of composite frames with reinforced concrete columns and steel beams* (Report No. 135). The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.

- Mehdizadeh, M., Mackie, K. R., & Nielson, B. G. (2017). Scaling bias and record selection for quantifying seismic structural demand. *Journal of Structural Engineering*, 143(9), 04017117.
- Miranda, E., & Akkar, S. D. (2003). Dynamic instability of simple structural systems. *Journal of Structural Engineering*, 129(12), 1722-1726.
- Moehle, J., & Deierlein, G. G. (2004, August). A framework methodology for performance-based earthquake engineering. In *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering* (Vol. 679, p. 12). WCEE Vancouver.
- Mohraz, B., & Peng, M. M. (1989). Use of a low-pass filter in determining the duration of strong ground motion. *Publication PVP-182, Pressure Vessels and Piping Division, ASME, New York, USA*, 197-200.
- Molazadeh, M., & Saffari, H. (2018). The effects of ground motion duration and pinching-degrading behavior on seismic response of SDOF systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 333-347.
- Montemayor, D., Miranda, E., & Dávalos, H. (2025). Evaluation of the Effects of Ground Motion Duration on Structural Collapse. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 54(11), 2727-2747.
- Mousavi, M., Ghafory-Ashtiany, M., & Azarbakht, A. (2011). A new indicator of elastic spectral shape for the reliable selection of ground motion records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(12), 1403-1416.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. (2019). Nied k-net, kik-net. *National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience*.
- Newmark, N. M. (1973). *A study of vertical and horizontal earthquake spectra* (Report No. WASH-1255). Directorate of Licensing, U.S. Atomic Energy Commission.
- Ordaz, M., & Pérez-Rocha, L. E. (1998). Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic systems: a new approach. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27(9), 889-901.
- Ou, G. B., & Herrmann, R. B. (1990). Estimation theory for peak ground motion. *Seismological Research Letters*, 61(2), 99-107.
- Pan, Y., Ventura, C. E., & Liam Finn, W. D. (2018). Effects of ground motion duration on the seismic performance and collapse rate of light-frame wood houses. *Journal of Structural Engineering*, 144(8), 04018112.
- Perez, V. (1980). Spectra of amplitudes sustained for a given number of cycles: an interpretation of response duration for strong-motion earthquake records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(5), 1943-1954.

Porter, K. A. (2003). An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology. In *Proceedings of ninth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering* (Vol. 52, pp. 3729-3735).

Power, M. S., Youngs, R. R., & Chin C. -C. (2004). Design ground motion library. In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects* (pp. 778-786).

Raghunandan, M., & Liel, A. B. (2013). Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse. *Structural Safety*, 41, 119-133.

Saragoni, G. R. (1977). The $\alpha\beta\gamma$ method for the characterization of earthquake accelerograms. In *Proceedings of the 6th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 1, pp. 357-362).

Sarma, S. K., & Casey, B. J. (1990). Duration of strong motion in earthquakes. In *Proceedings of the 9th European conference on earthquake engineering* (pp. 174-183).

Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, J., & Idriss, I. M. (1976). Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(4), 1323-1342.

Sewell, R. T. (1992). Effects of duration on structural response factors and on ground-motion damageability. In *Proceedings, SMIP'92: Seminar on Seismological and Engineering Implications of Recent Strong-Motion Data* (pp. 7-1-7-15). California Strong Motion Instrumentation Program.

Sewell, R. T., Toro, G. R., McGuire, R. K., & Nuclear Regulatory Commission. (1996). *Impact of ground motion characterization on conservatism and variability in seismic risk estimates* (No. NUREG/CR--6467). Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Engineering Technology.

Shahabi, M., & Mostaghel, N. (1984). Strong ground motion duration and effective cyclic acceleration. In *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 2, pp. 843-850).

Shome, N., Cornell, C. A., Bazzurro, P., & Carballo, J. E. (1998). Earthquakes, records, and nonlinear responses. *Earthquake Spectra*, 14(3), 469-500.

Shome, N., & Cornell, C. A. (1999). *Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures* (Report No. RMS-35). Reliability of Marine Structures Program, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.

Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1), 199-222.

Theofanopoulos, N., & Drakopoulos, J. (1986). A study of strong ground motion duration of earthquakes in Greece. In *Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 1, pp. 3.2/65-3.2/67). Lisbon, Portugal.

- Theofanopoulos, N. A., & Watabe, M. (1989). A new definition of strong motion duration and comparison with other definitions. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1989(404), 133-144.
- Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581-626.
- Trifunac, M. D., & Westermo, B. (1977). A note on the correlation of frequency-dependent duration of strong earthquake ground motion with the modified Mercalli intensity and the geologic conditions at the recording stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(3), 917-927.
- Tso, W. K., Zhu, T. J., & Heidebrecht, A. C. (1992). Engineering implication of ground motion A/V ratio. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(3), 133-144.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2005). Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(13), 1573-1600.
- Vanmarcke, E. H., & Lai, S.-S. P. (1977). *Strong-motion duration of earthquakes* (Research Report No. R77-16). Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Vanmarcke, E. H. (1979). *Representation of earthquake ground motion: Scaled accelerograms and equivalent response spectra* (State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, Report No. 14; Miscellaneous Paper S-73-1). U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Vanmarcke, E. H., & Lai, S. S. P. (1980). Strong-motion duration and RMS amplitude of earthquake records. *Bulletin of the seismological Society of America*, 70(4), 1293-1307.
- Xie, L. L., & Zhang, X. (1988). Engineering duration of strong motion and its effects on seismic damage. In *Proceedings of the 9th World Conf. on Earthquake Engineering* (pp. 307-312).
- Zacharenaki, A., Fragiadakis, M., Assimaki, D., & Papadrakakis, M. (2014). Bias assessment in incremental dynamic analysis due to record scaling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 158-168.
- Zahrah, T. F., & Hall, W. J. (1984). Earthquake energy absorption in SDOF structures. *Journal of Structural Engineering*, 110(8), 1757-1772.
- Zengin, E., Abrahamson, N. A., & Kunnath, S. (2020). Isolating the effect of ground-motion duration on structural damage and collapse of steel frame buildings. *Earthquake Spectra*, 36(2), 718-740.
- Zhou, Y., & Katayama, T. (1985). Effects of magnitude, epicentral distance and site conditions on the duration of strong ground motion. *Seisan Kenkyu*, 37(12), 524-527.

Zhou, Y., & Xie, L. (1984). A new definition of duration of strong ground motion. In *Proceedings of the Chinese National Conference on Earthquake Engineering*. Shanghai, China. (In Chinese).

Zhu, T. J., Heidebrecht, A. C., & Tso, W. K. (1988). Effect of peak ground acceleration to velocity ratio on ductility demand of inelastic systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 16(1), 63-79.