



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**Evaluación de la variación del periodo y fracción de
amortiguamiento del primer modo con la amplitud de la
respuesta estructural de edificios instrumentados en
California**

Memoria de Título presentada por

Tomás Ignacio Espinosa Palau

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Cristian Cruz Doggenweiler

Enero de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: **Evaluación de la variación del periodo y fracción de amortiguamiento del primero modo con la amplitud de la respuesta estructural de edificios instrumentados en California**

Nombre del candidato(a): Tomás Ignacio Espinosa Palau

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Cruz, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 15/05/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15/05/2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL PERIODO Y FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO DEL PRIMER MODO CON LA AMPLITUD DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS INSTRUMENTADOS EN CALIFORNIA

Tomás Ignacio Espinosa Palau¹, Cristian Cruz Doggenweiler²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

1 Resumen

Se analiza la variación del período y la fracción de amortiguamiento del primer modo de vibración en función de la amplitud de la respuesta estructural, utilizando registros sísmicos de un conjunto de edificios instrumentados en California. El estudio se basa en la identificación modal mediante un método de minimización modal en el dominio del tiempo, aplicado a registros de movimientos sísmicos y en la aplicación de pruebas de confiabilidad para validar los resultados obtenidos.

Como principal aporte, se amplía una base de datos existente utilizada por Cruz & Miranda (2021), incorporando datos correspondientes al período 2014 al 2025, y alcanzando un total de 1.276 estimaciones confiables obtenidas a partir de 63 edificios instrumentados. La amplitud de la respuesta estructural se caracteriza mediante la razón máxima de deriva de techo (PRDR), lo que permite evaluar la dependencia de los parámetros modales con distintos niveles de demanda sísmica.

Los resultados evidencian que los parámetros modales del primer modo presentan un aumento inicial a medida que incrementa la amplitud de la respuesta estructural, hasta un nivel en el cual el periodo y fracción de amortiguamiento se saturan para amplitudes mayores de PRDR, comportamiento que también ha sido observado en la literatura disponible. Por otra parte, se observa que, para el periodo, el sistema estructural resistente a cargas laterales del edificio influye en la variación con la amplitud, mientras que para la fracción de amortiguamiento no es posible establecer una conclusión similar con los datos actualmente disponibles.

2 Introducción

Para el diseño de edificios, el análisis modal es una herramienta fundamental para estimar la respuesta de las estructuras frente a las demandas sísmicas o de viento que puedan afectarla. Este método, requiere conocer el período fundamental y la fracción de amortiguamiento crítico. El período puede obtenerse con las matrices de masa y rigidez del modelo estructural, mientras el amortiguamiento es más difícil de estimar, debido a que no puede obtenerse directamente a partir de las propiedades mecánicas del sistema. Esto se debe a que hay una variedad de mecanismos de disipación de energía, el cual es un fenómeno complejo puesto a que existen múltiples fuentes de disipación de energía involucradas, y en general se sabe muy poco de cómo actúan individualmente y aún menos sobre su combinación (Tamura, 2013).

El desafío en la estimación precisa del periodo y fracción de amortiguamiento radica en que ambos son sensibles a la amplitud de la respuesta estructural. Si bien es razonable asumir que la masa de un edificio se mantiene constante, su rigidez puede variar considerablemente con la amplitud de la respuesta estructural (Çelebi et al., 1993), lo que introduce incertidumbre en la estimación de los periodos modales. Esta incertidumbre es aún mayor en el caso de las razones de amortiguamiento modales, ya que no se pueden obtener directamente a partir de las propiedades mecánicas del edificio y suelen estimarse mediante modelos empíricos. La mayoría de los valores utilizados se basan en mediciones de vibraciones de baja amplitud, como vibraciones ambientales, lo que produce incertidumbre cuando se emplean para estimar la respuesta frente a movimientos sísmicos.

Tradicionalmente, los ingenieros han asumido un valor constante de amortiguamiento para todos los modos de vibración, simplificando así el análisis modal. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que esta suposición puede no ser adecuada. Se ha observado que, a bajas amplitudes de respuesta, la fracción de amortiguamiento tiende a aumentar a razones de derivas de techo (PRDR, peak roof drift ratio) menores a 0.01% (A. P. Jeary, 1986). No obstante, por sobre ese umbral, el amortiguamiento se satura e incluso puede disminuir, alcanzando un máximo que podría estabilizarse o incluso disminuir (Spence & Kareem, 2014). En el caso de movimientos sísmicos, esta saturación ocurre a valores más altos de PRDR (Cruz & Miranda, 2017).

Entender cómo se relacionan los períodos y coeficientes de amortiguamiento obtenidos a través de vibraciones ambientales con los que estiman mediante un movimiento sísmico es útil para estimar de forma más precisa la respuesta estructural de edificaciones existentes. Utilizar valores no representativos de los parámetros dinámicos puede llevar a subestimar o sobreestimar las demandas sísmicas. En este sentido, estimar las propiedades dinámicas directamente desde registros de vibraciones ambientales ha sido una gran alternativa debido a su bajo costo y simplicidad operativa. No obstante, los valores obtenidos representan el comportamiento de la estructura bajo excitaciones de muy baja amplitud, por lo que se requiere un modelo que permita proyectar estas estimaciones hacia el rango de demanda sísmica (Cruz & Miranda, 2021). Esto se ve limitado, por la escasez de edificios que cuenten con múltiples registros sísmicos a distintas intensidades de respuesta.

En este contexto, investigaciones recientes han buscado caracterizar la dependencia de los parámetros modales respecto de la amplitud de respuesta sísmica. Un aporte significativo lo realizaron Cruz & Miranda (2021), quienes mediante un análisis sistemático de más de 1300 respuestas sísmicas de 154 edificios instrumentados evaluaron el comportamiento del período y la fracción de amortiguamiento del primer modo en función del PRDR, concluyendo que, si bien la razón máxima de deriva de techo era estadísticamente significativa para la predicción de la razón de amortiguamiento del primer modo, su efecto era marginal. Argumentaron que, en la mayoría de los edificios, la falta de correlación podría deberse a que no se cubría adecuadamente el rango necesario de amplitud de respuesta estructural para observar una tendencia de aumento lineal con la amplitud de respuesta de la estructura. Sin embargo, en aquellos casos donde sí se contaba con suficientes datos, se pudo observar un aumento evidente del período y fracción de amortiguamiento como también del PRDR, seguido de una saturación para valores de razones de derivas de techo superiores a aproximadamente 0.1%, lo que refuerza la necesidad de seguir investigando.

El proyecto FONDECYT de Iniciación No. 11230258 busca comprender mejor la dependencia de la amplitud del período fundamental y la fracción de amortiguamiento, mediante el análisis de registros de vibraciones ambientales y sísmicas de edificaciones. En este marco, el trabajo desarrollado por Espinoza (2025) aporta antecedentes relevantes al estimar el período y la fracción de amortiguamiento del primer modo a partir de registros sísmicos de 32 edificios de California, proporcionando una base de datos complementaria al trabajo realizado por (Cruz & Miranda, 2021), en el cual se tiene una gran amplitud de demanda sísmica.

3 Objetivos

- **Objetivo general:** Analizar la variación del periodo y la fracción de amortiguamiento del primer modo en relación con la amplitud de la máxima deriva de techo, bajo movimientos sísmicos, en un conjunto de edificios instrumentados en California.
- **Objetivo específico 1:** Aportar evidencia sobre los movimientos sísmicos ocurridos entre los años 2014 y 2024 en el conjunto de edificios instrumentados en California.
- **Objetivo específico 2:** Evaluar la relación entre la deriva máxima de techo con el periodo y fracción de amortiguamiento del primer modo de vibrar.
- **Objetivo específico 3:** Comparar los resultados obtenidos con los hallazgos previos.

4 Edificios analizados

En este estudio se complementa la base de datos de 31 edificios ubicados en California mediante la incorporación de registros sísmicos correspondientes al periodo 2014 al 2025, complementando el trabajo desarrollado por (Cruz & Miranda, 2021), quienes compilaron periodos y fracciones de amortiguamiento del primer modo a partir de movimientos sísmicos ocurridos entre 1971 y 2014. Estos edificios son monitoreados por el “California Strong Motion Instrumentation Program” (CSMIP), y sus registros están disponibles a través del “Center For Engineering Strong Motion Data”. En el presente estudio se incorporaron 309 datos confiables para dichos edificios, los cuales, en conjunto con el trabajo realizado por Espinoza (2025), conforma una base de datos de 1276 para periodos y fracciones de amortiguamiento, correspondientes a un total de 63 edificios analizados. (Ver Tabla 4-1).

Tabla 4-1: Resumen de datos.

Autor	Nº de datos confiables
C. Cruz (2021)	768
E. Espinoza (2024)	199
T. Espinosa (2025)	309
Nº de Total	1276

Para la obtención de los parámetros modales a partir de los registros sísmicos se utilizó el método de minimización modal en el dominio del tiempo, descrito en la Sección 5.1. Los resultados obtenidos fueron sometidos a pruebas de confiabilidad descritos en la Sección 5.2, correspondientes a criterios propuestos por Cruz & Miranda (2019). En el análisis de los datos se consideraron únicamente aquellos datos que cumplieron con todos los test de confiabilidad, quedando los edificios agrupados según el sistema resistente lateral en la dirección de análisis, dado que un mismo edificio puede presentar diferentes sistemas resistentes en sus direcciones longitudinal y transversal. El histograma según la altura y sistema lateral se puede observar en Figura 4-1.

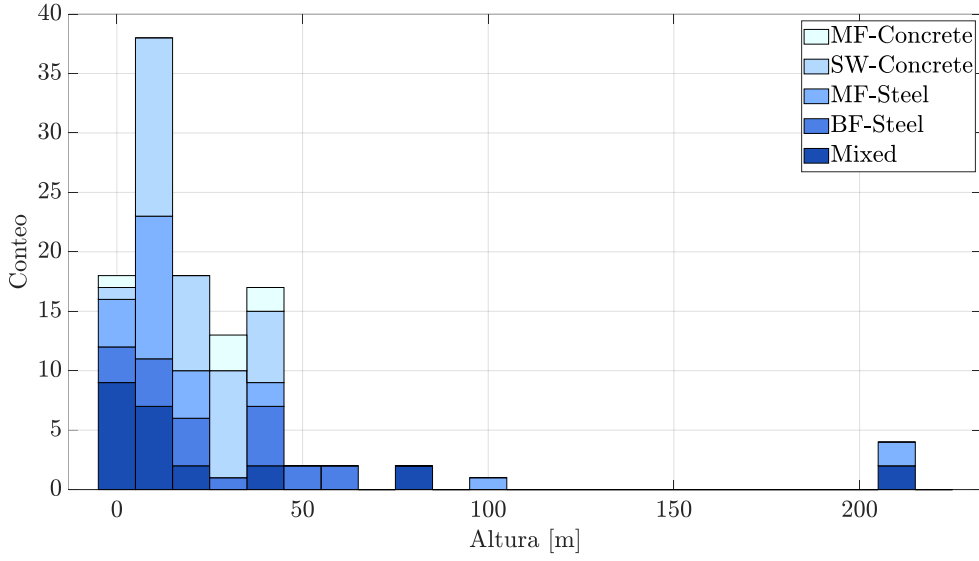


Figura 4-1: Histograma con altura de edificio, agrupados según el sistema lateral resistente las diferentes direcciones del edificio. MF: Moment frames; SW: Shear walls; BF: Braced frames.

5 Identificación de sistemas

5.1 Minimización modal en el dominio del tiempo

Este método busca los períodos modales, las fracciones de amortiguamiento y las formas modales con los cuales se minimice la diferencia entre las aceleraciones $u(\ddot{t})$ medidas por los diferentes sensores entre los pisos del edificio y la aceleración relativa predicha $\ddot{u}(t)$, obtenidas mediante un análisis de tiempo-historia de la estructura. El método empleado en este trabajo corresponde a una adaptación del propuesto originalmente por (Beck & Jennings, 1980), y es el mismo que se empleó en las investigaciones que armaron la base de datos de parámetros modales que se busca expandir en esta memoria (Cruz & Miranda, 2021; Espinoza, 2024). La respuesta predicha se calcula como:

$$\ddot{u}_j(t) = \sum_{n=1}^{N_m} \Gamma_n \Phi_{nj} \ddot{D}_n(t) \quad (1)$$

Donde N_m es número de modos considerados, Γ_n es el factor de participación modal del n-ésimo modo, Φ_{nj} la forma modal del n-ésimo modo evaluado en el nivel en el que se encuentra el respectivo sensor y \ddot{D}_n es la aceleración del sistema de un grado de libertad equivalente para este modo, cuando es sometido a un movimiento en la base $\ddot{u}_g(t)$. El objetivo del método es minimizar la función de error definida como:

$$J(\theta) = \sum_{j=1}^{N_{sen}} \sum_{i=1}^{\tau} \frac{[\ddot{u}_j(i\Delta t) - \ddot{u}_j(i\Delta t)]^2}{\sum_{k=1}^{\tau} [\ddot{u}_j(k\Delta t)]^2} \quad (2)$$

Donde N_{sen} es el número de sensores que se encuentran sobre el nivel del suelo; Δt y τ es la discretización del tiempo y número de datos que fueron capturados por los sensores, respectivamente. Además, se debe considerar que θ es el conjunto de parámetros que define el modelo, dado por:

$$\theta = \left(\begin{array}{c} \left\{ \begin{array}{c} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{c} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{array} \right\}; \left[\begin{array}{ccc} \Gamma_1 \Phi_{11} & \dots & \Gamma_N \Phi_{N1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Gamma_1 \Phi_{1N_{sen}} & \dots & \Gamma_1 \Phi_{NN_{sen}} \end{array} \right] \end{array} \right) \quad (3)$$

Donde T_n es el período modal y ξ_n es la fracción de amortiguamiento del n-ésimo modo. El procedimiento consiste en iterar la respuesta de cada piso considerando el movimiento registrado en la base y en todos los pisos que tengan sensores, variando tanto los períodos modales como los coeficientes de amortiguamiento, hasta que se alcance un mínimo de error que se considerara aceptable en la función objetivo.

Para minimizar la función objetivo definida en la Ecuación (2) se utilizó el software MATLAB con la función `fmincon`, la cual encuentra el mínimo con las restricciones que tenga el problema, de modo de converger al óptimo global. Para llevar a cabo esto, se empleó un modelo simplificado de edificio basado en vigas continuas, en donde la estructura que se evalúa se idealiza como un sistema combinado de vigas de flexión y corte. El sistema simplificado se discretizó en grados de libertad horizontales correspondientes a cada nivel del edificio, permitiendo determinar la respuesta dinámica global de la estructura frente a movimientos sísmicos.

5.2 Confiabilidad de los resultados

Los resultados obtenidos mediante la identificación de sistemas deben ser confiables, ya que existen diversos factores que pueden afectar su validez, como la sensibilidad que tengan los sensores al registrar el sismo, el nivel de excitación de los modos y su contribución a la respuesta de la estructural. Un resultado obtenido mediante la identificación de sistemas se considera que es confiable cuando los parámetros dinámicos permiten reproducir la respuesta estructural observada. Para garantizar esto, se establecen una serie de pruebas de confiabilidad que se aplican en cada uno de los sismos registrados.

Las pruebas de confiabilidad fueron propuestas por Cruz & Miranda (2019), y tienen como objetivo descartar aquellos factores de amortiguamiento y periodos de los distintos modos que no sean confiables. Cada resultado debe cumplir cada una de las tres pruebas que se describirán a continuación para ser considerada confiable.

5.2.1 Factores de amplificación dinámica (DAF)

El factor de amplificación dinámica permite determinar el nivel de excitación de los dos primeros modos, ya que considera cuanto se amplifica el movimiento registrado en el techo en comparación con la base. Para este análisis, se emplea un amortiguamiento del 1%, y se determina el factor de amplificación dinámica como el cociente entre la aceleración espectral en el techo con la aceleración espectral en la base del edificio, estableciendo la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{\bar{S}_a^{Techo}(T_n)}{\bar{S}_a^{Suelo}(T_n)} \quad (4)$$

donde $\overline{S_a}(T_n)$ corresponde a la aceleración del espectro de la estructura con 1% de amortiguamiento para el techo y el suelo respectivamente, en un rango de periodos definido por $[0.9 \cdot T_n, 1.1 \cdot T_n]$, más 0.01 g. Los criterios en donde los dos primeros modos se consideran confiables son:

$$R_1 \geq 2.2 \quad (5)$$

$$R_2 \geq 1.6 \quad (6)$$

Donde R_1 define el criterio para el primer modo y R_2 define el criterio para el segundo modo.

5.2.2 Contribución modal de Arias (MC)

La contribución modal de Arias mide la contribución relativa con la que cada modo contribuye a la respuesta estructural calculada en los pisos instrumentados del edificio. Este criterio, establece una contribución mínima del 5% para el modo evaluado, para descartar aquellos que no tengan una contribución significativa y evitar obtener fracciones de amortiguamiento que podrían no ser confiables. El factor de contribución modal de Arias, MC_n , se define como la contribución relativa del n-ésimo modo, siendo calculada como.

$$MC_n = \frac{\sum_{j=1}^{N_{sen}} \sum_{k=1}^{\tau} [\ddot{u}_{nj}(k\Delta t)]^2}{\sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_{sen}} \sum_{k=1}^{\tau} [\ddot{u}_{ij}(k\Delta t)]^2} \quad (7)$$

En esta expresión, \ddot{u}_{nj} corresponde a la aceleración relativa calculada para el n-ésimo modo en el nivel j. El parámetro Δt representa el intervalo tiempo de los datos, mientras τ corresponde a la cantidad total de datos capturados por los sensores. El número de sensores que fueron considerados viene dado por N_{sen} , y N_m representa el número total de modos considerados en el análisis.

5.2.3 Intervalos de confiabilidad mejorados (ERI)

Los intervalos de confiabilidad permiten cuantificar la sensibilidad que tendrán los parámetros modales en la función objetivo descrita en la Ecuación (1). Se ha observado que es más difícil producir cambios en el valor de la función objetivo producto de una variación de la fracción de amortiguamiento, por lo que identificar este parámetro de forma confiable es más complejo y su estimación puede volverse poco precisa. Por esta razón, es necesario redefinir la función objetivo (Cruz & Miranda, 2019), realizando una nueva identificación de sistema iterando la fracción de amortiguamiento y filtrando los registros del suelo y del techo. Así, la nueva función objetivo es.

$$J_s = \sum_{k=1}^{\tau} [\ddot{u}_R^F(k\Delta t) - \ddot{u}_R^E(k\Delta t)]^2 \quad (8)$$

Donde τ corresponde al número de datos que registran los sensores y Δt el intervalo de tiempo de los datos. Además, \ddot{u}_R^F es la aceleración medida filtrada de techo y \ddot{u}_R^E corresponde a la aceleración estimada de techo.

En general, el modo fundamental tiene una mayor influencia en la respuesta estructural, lo que implica que la sensibilidad de la función objetivo respecto de sus fracciones de amortiguamiento sea mayor en comparación a cuando se tienen modos superiores. Por esta razón, la longitud máxima permitida del intervalo se definió respecto a la frecuencia modal, aplicando un criterio más estricto para el modo fundamental que para los modos superiores.

La longitud del intervalo de fiabilidad mejorados corresponde al rango de valores de la fracción de amortiguamiento que producen un incremento del 50% en el valor de la función objetivo J_s . Es por esto, que solo se consideran confiables los modos cuyos intervalos de confiabilidad mejorados sean menores al límite máximo establecido, como se muestra a continuación.

6 Resultados

6.1 Normalización de resultados

Se relacionan los parámetros modales del primer modo, como el periodo y la razón de amortiguamiento con la amplitud de respuesta estructural para cada sismo analizado. La amplitud de la respuesta estructural se caracterizó mediante la razón máxima deriva de techo (Peak Roof Drift Ratio, PRDR), la cual, para cada dirección de análisis se define como el máximo desplazamiento del techo con respecto al suelo, normalizado por la altura total del edificio. Para cada dirección en estudio que contara con más de cuatro registros confiables, se aplicó un ajuste no lineal a los datos. Dicho ajuste corresponde a un modelo logarítmico- exponencial, seleccionado debido a que se observó un buen ajuste para cada dirección. A continuación, se presenta la forma funcional empleada.

$$Y = \beta_1 \cdot \ln x \cdot e^{-\beta_2 \cdot x} + \beta_0 \quad (9)$$

Donde Y corresponde a los parámetros modales – ya sea período o fracción de amortiguamiento-, x es la deriva de techo (PRDR) y $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ son los parámetros del modelo de ajuste no lineal en donde el término β_2 debe ser mayor que 0, ya que impide que Y aumente indefinidamente cuando PRDR aumenta.

Con el objetivo de comparar todos los resultados obtenidos para todos los edificios analizados, se aplicó una normalización de los parámetros modales. Para llevar a cabo este proceso, cada dato fue normalizado utilizando el ajuste no lineal, evaluando la forma funcional definida en la Ecuación (9) en un valor representativo de $x = 10^{-4}$. Para determinar el valor representativo de $PRDR_{REF}$ que permitiera interpolar la mayor cantidad de edificios, se evaluaron distintos valores de PRDR en aquellas direcciones de edificios que contaban con más de cuatro registros confiables, con el objetivo de identificar el valor de $PRDR_{REF}$ con el que se considere la mayor cantidad de direcciones y también de registros, lo cual se observa en las Figura 6-3 y Figura 6-4. Este valor fue determinado a partir de dos casos: en donde el valor de PRDR se encontraba dentro del rango del ajuste, la dirección de análisis del edificio se consideró válida para la comparación de todos los resultados; por el contrario, cuando el PRDR se encontraba fuera del rango de ajuste para la dirección de análisis, esta se excluye del análisis, con el fin de mantener la precisión y confiabilidad de los resultados, evitando subestimar o sobrestimar la respuesta estructural frente a sismos. En las Figura 6-1 y Figura 6-2, se presentan edificios en los que es posible interpolar el ajuste para obtener la normalización correspondiente, así como casos en los que se requiere extrapolar el modelo, en donde la dirección del edificio queda descartada para el análisis.

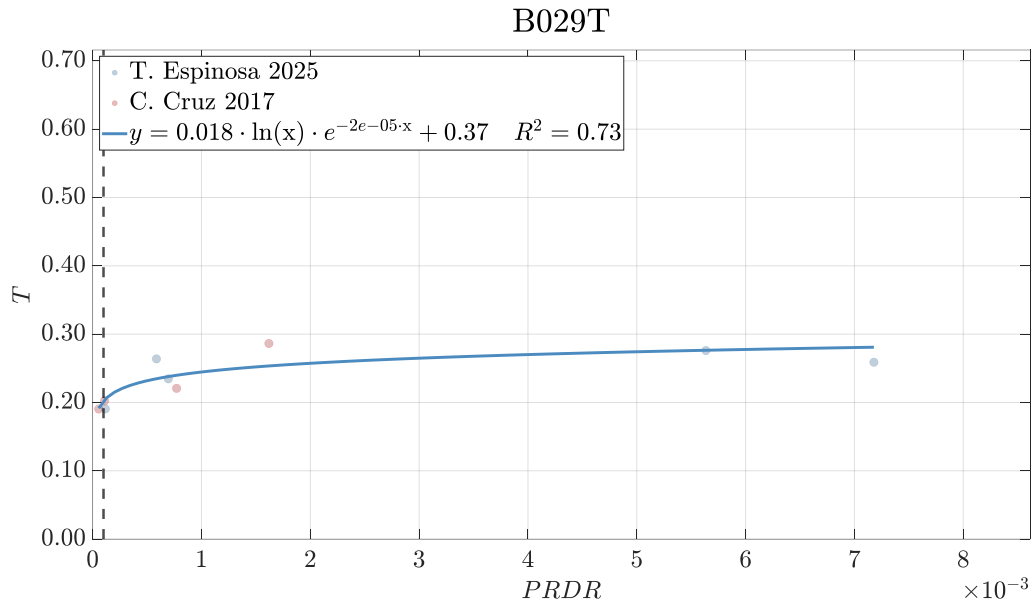


Figura 6-1: Edificio en donde se puede interpolar la línea de tendencia para realizar normalización de los datos.

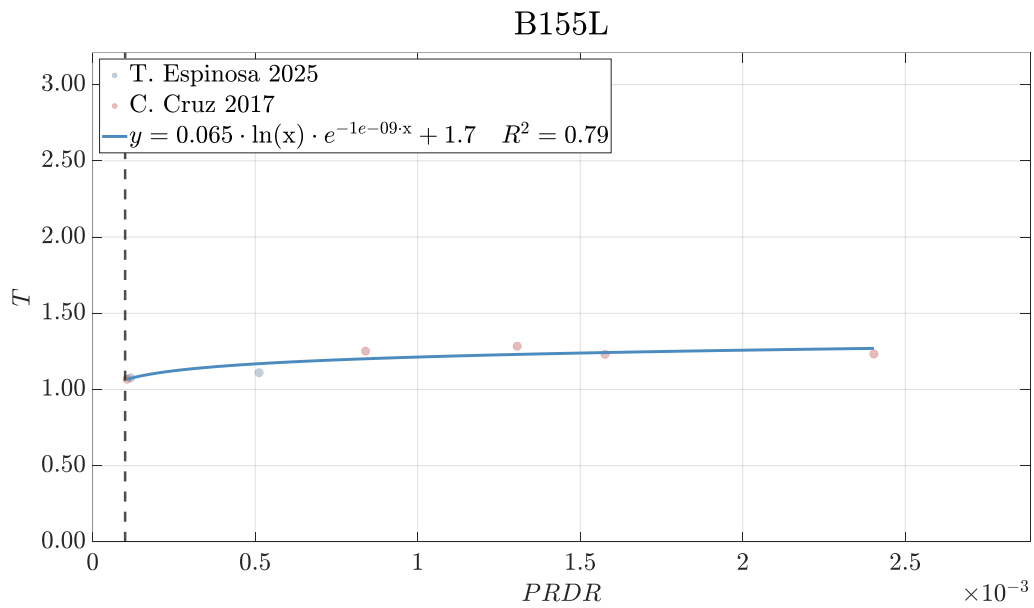


Figura 6-2: Edificio en donde no se puede interpolar la línea de tendencia para realizar normalización de los datos.

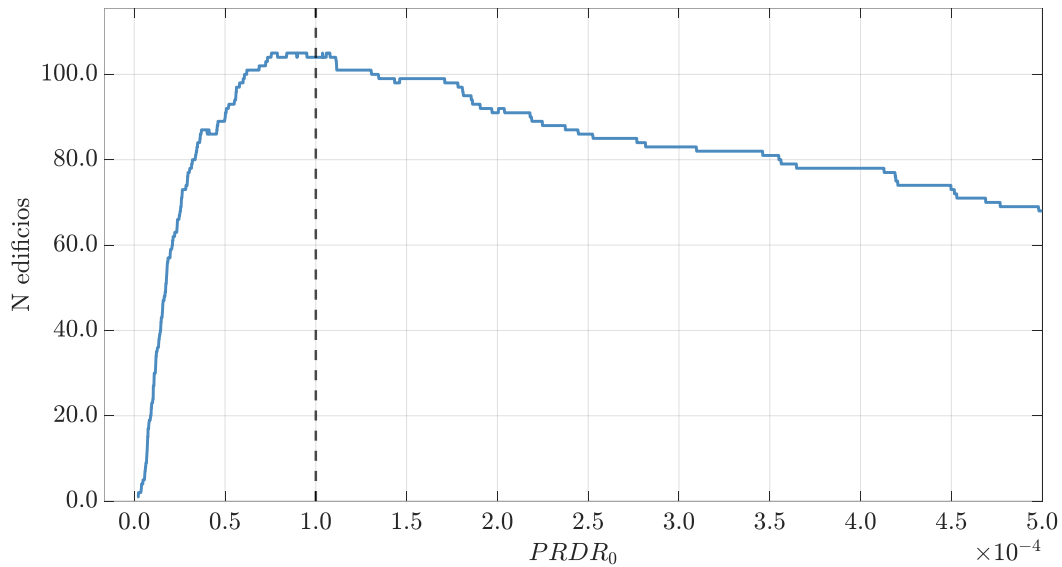


Figura 6-3: Número de edificios cuyo rango de datos incluyen el valor de PRDR_0.

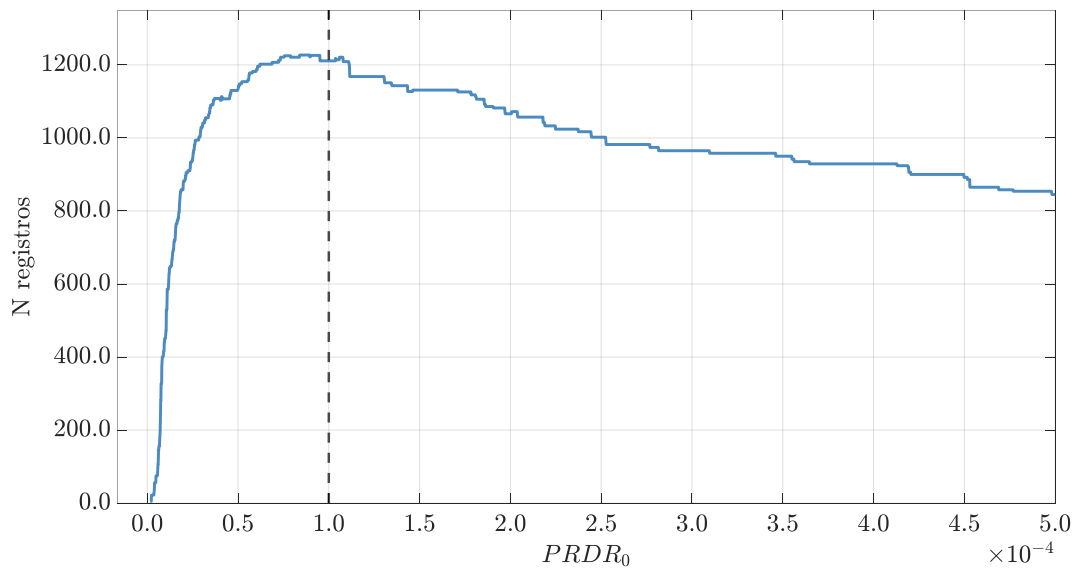


Figura 6-4: Número de registros disponibles por valor de PRDR_0, considerando edificios que cumplen con el criterio.

Se determinó que un $PRDR_{REF} = 10^{-4}$ permitía considerar el 92.5% de direcciones correspondiente a los distintos edificios, lo que se traduce en un total de 95.5% de registros disponibles en la base de datos, por lo que es un buen valor para realizar la normalización y tener la mayor cantidad de datos disponibles.

6.2 Efectos de amplitud en el periodo y fracción de amortiguamiento

Una vez completado el proceso de normalización de los parámetros modales para todos los edificios, se grafican todos los resultados tanto para el periodo como la fracción de amortiguamiento como se puede observar en las Figura 6-5 y Figura 6-6.

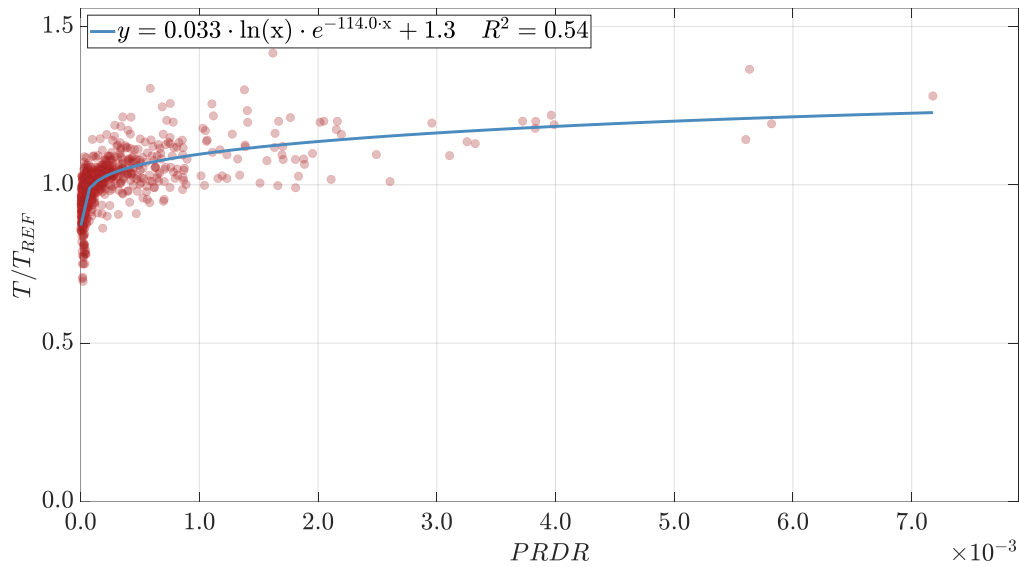


Figura 6-5: Periodo normalizado en función del $PRDR_0$ de todos los edificios.

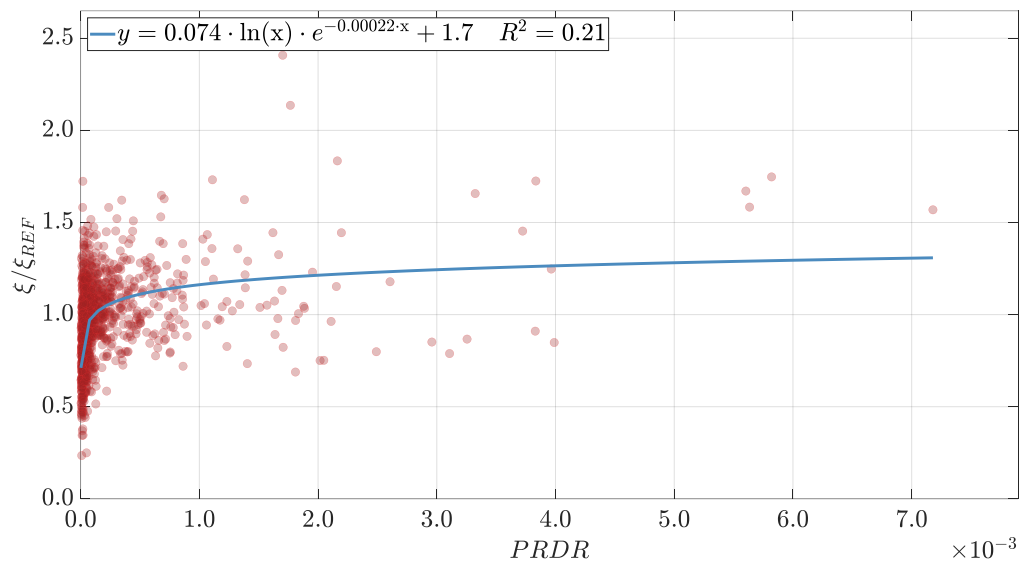


Figura 6-6: Fracción de amortiguamiento normalizado en función del $PRDR_0$ de todos los edificios.

Para ambos parámetros modales, se puede observar inicialmente un incremento en sus valores a medida que aumenta $PRDR$, seguido de una fase de saturación para valores mayores de este, lo cual indica que los parámetros modales tienden a estabilizarse.

6.3 Influencia del sistema lateral

Los edificios analizados presentan una serie de sistemas laterales, por este motivo, se separaron en las diferentes categorías; marcos arriostrados de acero (BF-Steel, categoría base), marcos resistentes a momentos de hormigón (MF-Concrete), marcos resistentes a momentos de acero (MF-Steel), muros de corte de hormigón (SW-Concrete), y una categoría mixta que considera sistemas laterales de madera, albañilería, entre otros (Mixed). Para determinar si el sistema lateral influye en la estimación del periodo y fracción de amortiguamiento, se realizó un análisis estadístico mediante una regresión no lineal, utilizando la siguiente forma funcional.

$$Y = \beta_0^{(1)} \cdot \ln x \cdot e^{-\beta_1^{(1)} \cdot x} + \beta_2^{(1)} + \sum_{n=2}^{N_{cat}-1} D_n \cdot (\beta_0^{(n)} \cdot \ln x \cdot e^{-\beta_1^{(n)} \cdot x} + \beta_2^{(n)}) \quad (10)$$

En donde $\beta_0^{(1)}, \beta_0^{(n)}, \beta_1^{(1)}, \beta_1^{(n)}, \beta_2^{(1)}, \beta_2^{(n)}$ representan los parámetros del modelo de ajuste no lineal, los terminos $\beta_2^{(1)}, \beta_2^{(n)}$ deben ser mayor que 0, y donde (1) representa la categoría base (BF-Steel). Además, N_{cat} corresponde al número de categorías evaluadas y D_n es la variable indicadora (dummy) asociada a la categoría n, la cual toma el valor 1 si la dirección de análisis pertenece a dicha categoría y 0 en caso contrario. Se aplicó el estadístico t-student a cada coeficiente de las variables categóricas, y posteriormente se evaluó su significancia mediante el p-value, donde la hipótesis nula establece que no existe un efecto significativo entre los grupos de interés. Para rechazar esta hipótesis, el valor de p-value debe ser menor al 5%. Los resultados obtenidos se pueden observar en Tabla 6-1 y Tabla 6-2.

Tabla 6-1: Parámetros variables categóricas para el periodo.

n	Variable	Cantidad de datos	$\beta_2^{(n)}$	p-value	$\beta_0^{(n)}$	p-value	$\beta_1^{(n)}$	p-value
1	BF-Steel	192	1.246	0.000e-00	0.026	0.000e-00	-72.246	9.686e-01
2	MF- Concrete	54	0.032	0.000e-00	0.003	0.000e-00	0.000	0.000e-00
3	MF-Steel	271	0.163	0.000e-00	0.019	0.000e-00	0.000	0.000e-00
4	SW-Concrete	544	0.096	0.000e-00	0.011	0.000e-00	0.000	0.000e-00
5	Mixed	215	0.056	0.000e-00	0.006	0.000e-00	0.000	0.000e-00

Tabla 6-2: Parámetros variables categóricas para la fracción de amortiguamiento.

n	Variable	Cantidad de datos	$\beta_2^{(n)}$	p-value	$\beta_0^{(n)}$	p-value	$\beta_1^{(n)}$	p-value
1	BF-Steel	192	1.270	0.000e-00	0.032	0.000e-00	-49.967	9.812e-01
2	MF- Concrete	54	0.006	1.432e-11	0.000	0.000e-00	0.000	0.000e-00
3	MF-Steel	271	0.015	0.000e-00	0.000	0.000e-00	0.000	0.000e-00
4	SW-Concrete	544	0.416	0.000e-00	0.041	0.000e-00	0.000	0.000e-00
5	Mixed	215	0.590	0.000e-00	0.062	0.000e-00	0.000	0.000e-00

Como se puede observar en las Tablas Tabla 6-1 y Tabla 6-2 los parámetros del término exponencial son, para efectos prácticos, nulos para las variables categóricas, excepto para la categoría base, por lo que dicho término se descarta de la ecuación. Debido a esto, evalúa nuevamente el efecto del sistema lateral sin considerar dicho termino, utilizando la siguiente ecuación.

$$Y = \beta_0^{(1)} \cdot \ln x + \beta_1^{(1)} + \sum_{n=2}^{N_{cat}-1} D_n \cdot (\beta_0^{(n)} \cdot \ln x + \beta_1^{(n)}) \quad (11)$$

Los resultados obtenidos para esta segunda ecuación, utilizada para evaluar la significancia del sistema lateral, se presenta en las Tabla 6-3 y

Tabla 6-4.

Tabla 6-3: Parámetros variables categóricas para el periodo.

n	Variable	Cantidad de datos	$\beta_1^{(n)}$	p-value	$\beta_0^{(n)}$	p-value
1	BF-Steel	192	1.240	0.000e-00	0.025	4.441e-16
2	MF- Concrete	54	0.071	1.846e-01	0.008	1.957e-01
3	MF-Steel	271	0.192	3.508e-07	0.021	6.355e-08
4	SW-Concrete	544	0.161	2.154e-05	0.017	1.278e-05
5	Mixed	215	0.081	1.390e-02	0.009	9.530e-03

Tabla 6-4: Parámetros variables categóricas para la fracción de amortiguamiento.

n	Variable	Cantidad de datos	$\beta_1^{(n)}$	p-value	$\beta_0^{(n)}$	p-value
1	BF-Steel	192	1.517	0.000e-00	0.056	5.688e-06
2	MF- Concrete	54	-0.424	4.896e-02	-0.045	6.317e-02
3	MF-Steel	271	-0.264	8.250e-02	-0.030	5.898e-02
4	SW-Concrete	544	0.236	1.222e-01	0.024	1.363e-01
5	Mixed	215	0.406	2.355e-03	0.041	2.988e-03

En el caso del periodo, los parámetros de todas las categorías resultan significativos, a excepción de la categoría MF-Concrete, ya que no hay suficientes datos de marcos resistentes a momentos de hormigón para concluir que la categoría tiene un comportamiento diferente a la categoría base. En este caso, puede utilizarse la categoría base para estimar el periodo, dado que no hay una diferencia estadísticamente significativa al utilizar los parámetros estimados para dicha categoría. Las gráficas para cada categoría se pueden observar a continuación.

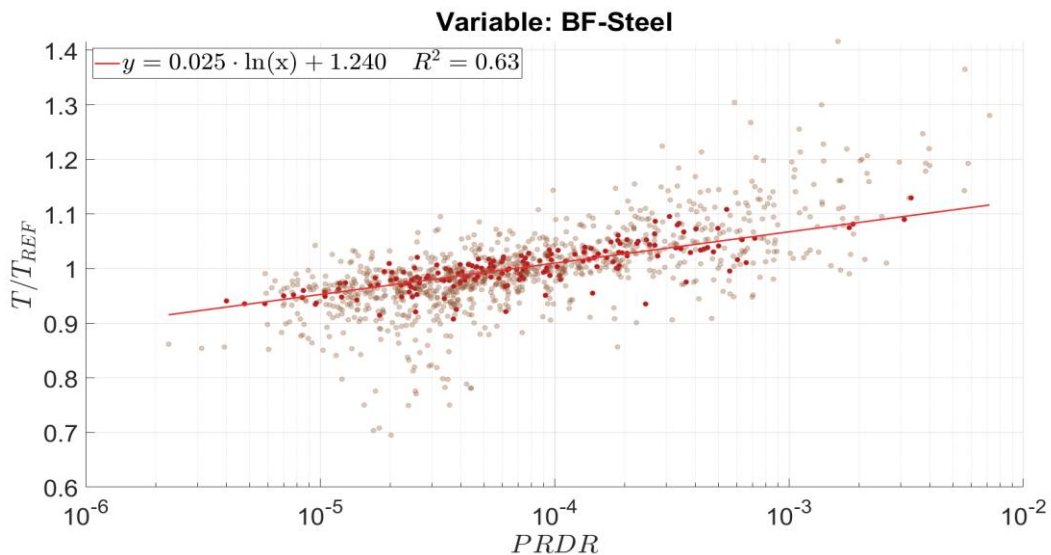


Figura 6-7: Regresión lineal periodo variables categórica BF-Steel.

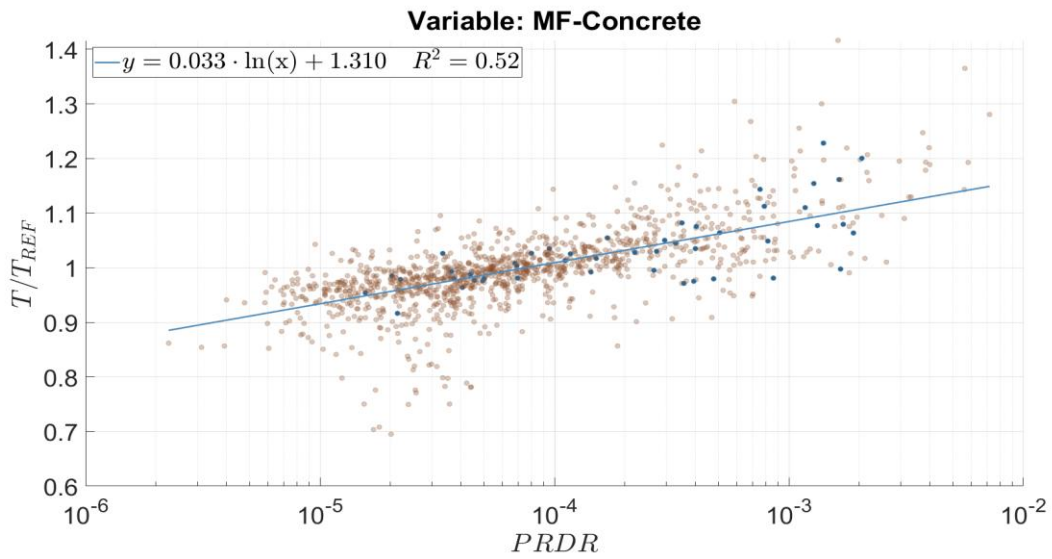


Figura 6-8: Regresión lineal periodo variables categórica MF-Concrete.

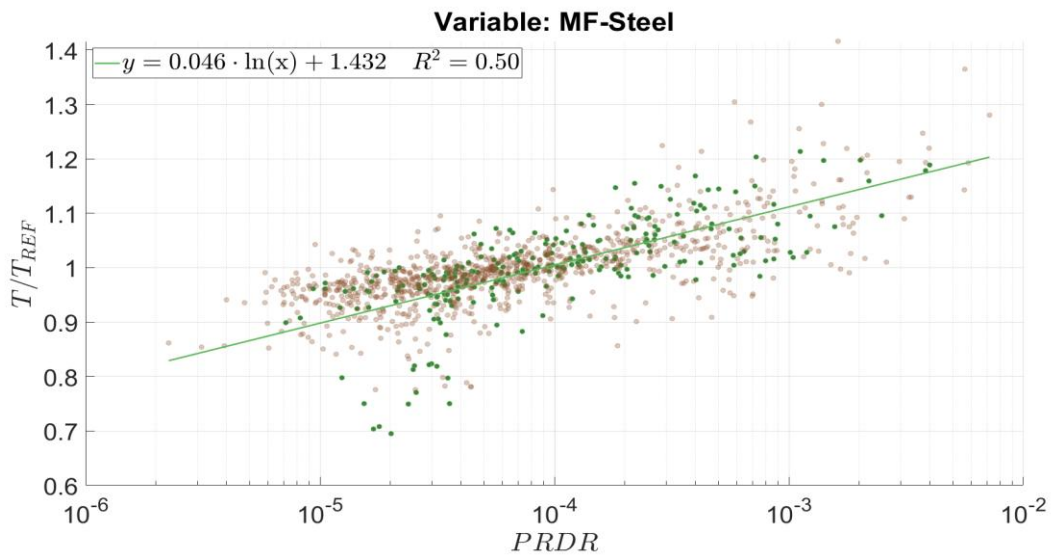


Figura 6-9: Regresión lineal periodo variables categórica MF-Steel.

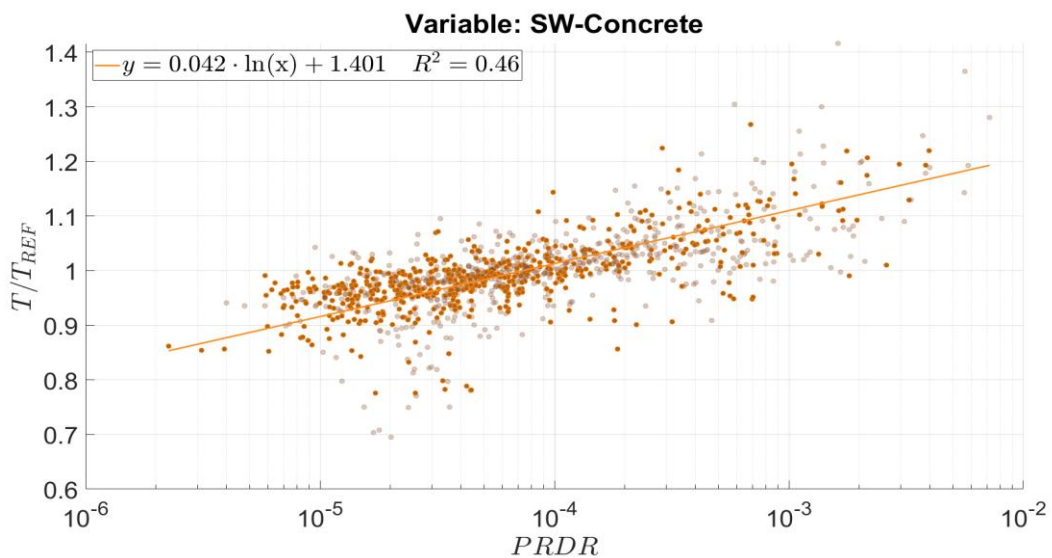


Figura 6-10: Regresión lineal periodo variables categórica SW-Concrete.

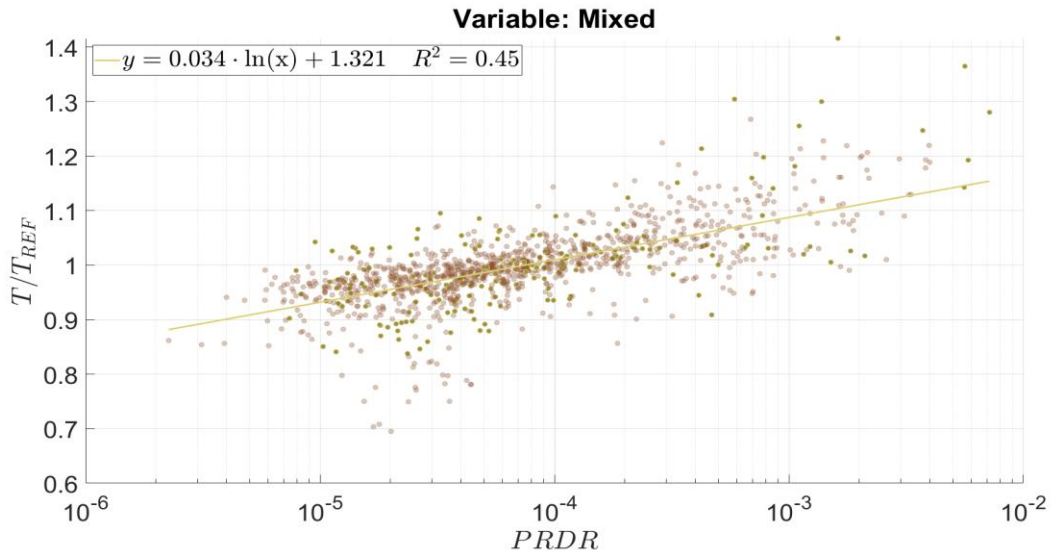


Figura 6-11: Regresión lineal periodo variables categórica Mixed.

Considerando la dispersión y la cantidad de datos disponibles para cada categoría, el BF-Steel presenta la mayor correlación para la regresión realizada. Con estos resultados, se puede determinar que el sistema lateral si es influyente para estimar el periodo en función del PRDR.

Para la fracción de amortiguamiento, el término de la pendiente no es significativo para las variables categóricas, a excepción de la categoría base. Debido a esto, se evalúa nuevamente la ecuación sin considerar el término de la pendiente para las variables categóricas, utilizando la siguiente expresión.

$$Y = \beta_0^{(1)} \cdot \ln x + \beta_1^{(1)} + \sum_1^n D_n \cdot \beta_1^{(n)} \quad (12)$$

Los resultados obtenidos para esta ecuación, en el caso de la fracción de amortiguamiento, se presentan en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5: Parámetros variables categóricas para la fracción de amortiguamiento.

n	Variable	Cantidad de datos	$\beta_1^{(n)}$	p-value	$\beta_0^{(n)}$	p-value
1	BF-Steel	192	1.670	0.000e-00	0.072	0.000e-00
2	MF- Concrete	54	-0.059	8.742e-02	-	-
3	MF-Steel	271	-0.011	5.815e-01	-	-
4	SW-Concrete	544	0.011	6.050e-01	-	-
5	Mixed	215	0.010	5.624e-02	-	-

6.4 Comparación con otros estudios

En el estudio realizado por Cruz & Miranda (2021) se estimaron el periodo y fracción de amortiguamiento del primer modo de vibrar en función a la máxima deriva de techo. Para ello, los autores normalizaron los datos utilizando un $PRDR_{REF}$ definido como el menor valor observado para el periodo y fracción de amortiguamiento para cada edificio en particular. Esta normalización puede

generar una extrapolación de las ecuaciones ajustadas o para algunos edificios, especialmente aquellos con un rango reducido de amplitudes registradas. Como consecuencia, en dicho estudio no se observó una relación clara entre la fracción de amortiguamiento y el PRDR, tal como se muestra en la Figura 6-12.

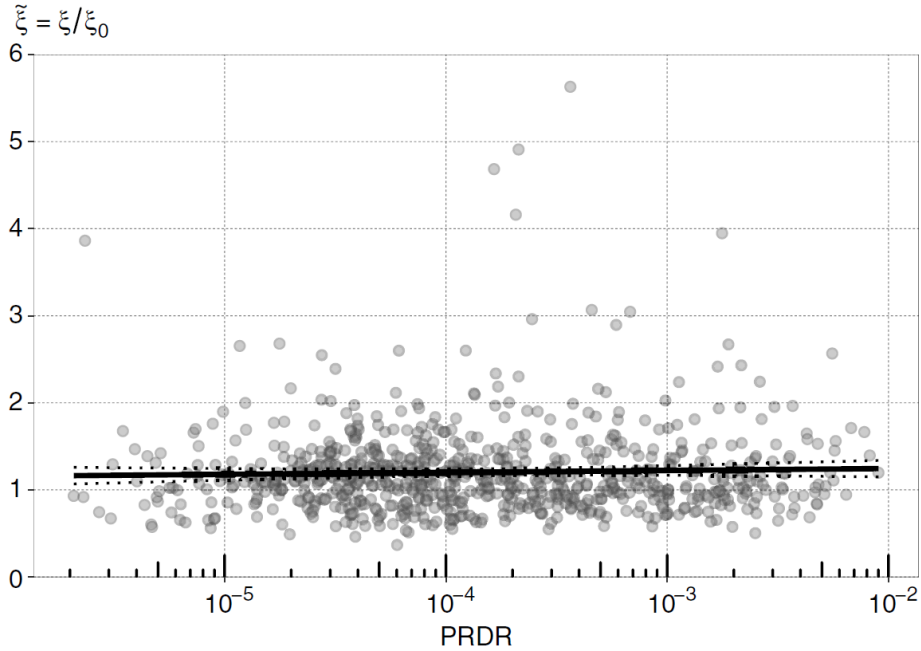


Figura 6-12: Fracción de amortiguamiento normalizada en relación al PRDR (Cruz & Miranda, 2021).

Por otra parte, la saturación observada a altas amplitudes en estudios basados en vibraciones ambientales si fue apreciada en los realizado por Cruz & Miranda (2021); sin embargo, el rango en el cual se observa un aumento de los parámetros modales en relación con el aumento del PRDR no se logra identificar con claridad. Esto se atribuye a la falta de datos en rangos de baja amplitud, lo que podría haber llevado a que muchos parámetros estimados se ubicaran dentro del rango donde ocurre dicha saturación. En el presente estudio se identificó el inicio de la saturación de los parámetros modales se produce para valores de PRDR aproximadamente de 10^{-4} .

En la misma línea, pero en el caso ambiental, Tamura (2012) determinó que la saturación ocurre para valores de PRDR del orden de 10^{-5} a 10^{-4} , y que posteriormente se produce una saturación y posible disminución de la fracción de amortiguamiento. En comparación con este estudio, se puede observar que ambos casos se tiene un aumento aproximadamente lineal de la fracción de amortiguamiento hasta un cierto valor de PRDR, a partir el cual esta se satura, como se puede observar en la Figura 6-13. La ecuación utilizada para realizar la comparación es:

$$Y = \frac{\frac{0.93}{H} + 470 \cdot \frac{x}{H} - 0.0018}{\frac{0.93}{H} + 470 \cdot \frac{PRDR_{ref}}{H} - 0.0018} \quad (13)$$

En donde el término H corresponde al promedio de las alturas de los edificios analizados en el estudio. El término x representa el PRDR, mientras que el término Y corresponde a la fracción de amortiguamiento, y el $PRDR_{ref}$ es el PRDR estimado anteriormente.

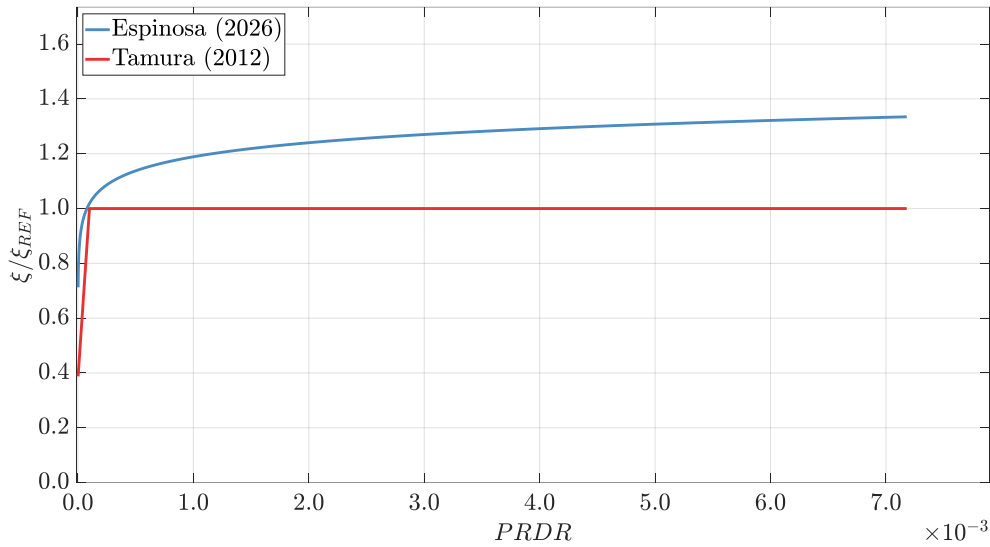


Figura 6-13: Comparación de resultados con Tamura (2012).

La saturación observada en el caso ambiental también se presenta en los edificios analizados en el presente estudio a partir de registros sísmicos, ubicándose dentro del rango estimado por Tamura (2012). Del mismo modo, se identifica una zona en donde el periodo y fracción de amortiguamiento aumentan con la amplitud, pero posteriormente se mantienen aproximadamente constante. A diferencia de lo observado en el caso ambiental, no es posible apreciar un posterior decrecimiento de estos parámetros modales debido a la limitada disponibilidad de datos asociados a grandes amplitudes.

Por otra parte Davenport & Hill-Carroll (1986) estudiaron una serie de edificios sometidos a movimientos sísmicos, en los que separaron su comportamiento en dos categorías. En primer lugar, consideraron los edificios de hormigón, distinguiendo entre aquellos de más de 20 pisos y los que tenían entre 5 y 20 pisos. En segundo lugar, analizaron los edificios de acero, diferenciando entre los que tenían más de 20 pisos y los que tenían entre 5 y 20 pisos, como se puede observar en las Figura 6-14 y Figura 6-15, respectivamente. Las ecuaciones utilizadas para comparar edificios de menos de 20 pisos y más de 20 pisos de hormigón son las siguientes:

$$Y = \frac{0.03 \cdot x^{0.11}}{0.03 \cdot PRDR_{ref}^{0.11}} \quad (14)$$

$$Y = \frac{0.025 \cdot x^{0.11}}{0.025 \cdot PRDR_{ref}^{0.11}} \quad (15)$$

Mientras las ecuaciones para comparar los resultados obtenidos con Davenport & Hill-Carroll (1986), para edificios acero de menos de 20 pisos y más de 20 pisos, son las siguientes:

$$Y = \frac{0.03 \cdot x^{0.075}}{0.03 \cdot PRDR_{ref}^{0.075}} \quad (16)$$

$$Y = \frac{0.02 \cdot x^{0.11}}{0.02 \cdot PRDR_{ref}^{0.11}} \quad (17)$$

En donde x e Y representa el PRDR y la fracción de amortiguamiento, respectivamente, y el $PRDR_{ref}$ corresponde al valor estimado previamente.

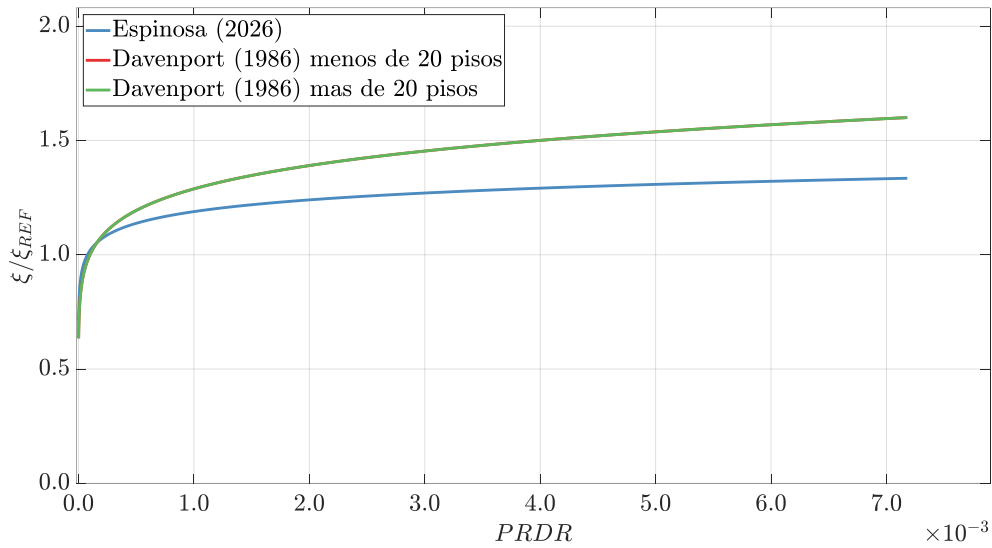


Figura 6-14: Comparación de resultados de edificios de hormigón con Davenport & Hill-Carroll (1986).

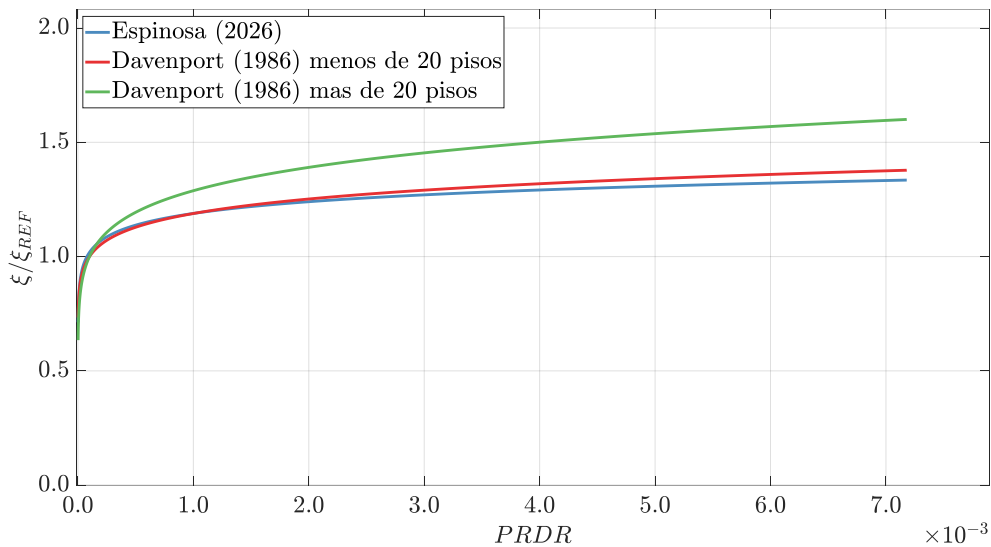


Figura 6-15: Comparación de resultados edificios de acero con Davenport & Hill-Carroll (1986).

Como se puede observar en las figuras, en ambos casos el comportamiento del aumento inicial de la razón de amortiguamiento en relación con la razón de máxima deriva de techo es similar; sin embargo, una vez superado un PRDR de 10^{-4} , la saturación del parámetro no coincide en términos de magnitud, aunque si en su tendencia de decrecimiento de la pendiente. En particular, los valores propuestos por (Davenport & Hill-Carroll, 1986) presentan un decaimiento rápido para amplitudes de respuesta mayores.

Finalmente, (Bernal et al., 2015), en su estudio de respuestas sísmicas de edificios de hormigón y acero, observó igualmente una tendencia de un aumento lineal inicial, seguida de una posterior saturación de la fracción de amortiguamiento a medida que aumentaba la aceleración espectral. Sin embargo, cabe señalar que (Bernal et al., 2015) emplean la aceleración espectral como parámetro para caracterizar la

amplitud de la respuesta estructural, mientras que en este estudio la amplitud de la respuesta se caracteriza mediante la razón máxima de deriva de techo (PRDR), lo que dificulta una comparación directa entre los valores asociados al inicio de la saturación.

7 Conclusiones

Este trabajo analizó la dependencia de la amplitud del periodo y la fracción de amortiguamiento, a partir de la respuesta sísmica de un conjunto de edificios instrumentados en California. Para esto, se utilizó la base de datos de parámetros modales generada Cruz & Miranda (2021), quienes analizaron todos los sismos registrados entre 1970 y comienzos de 2014. Se realizó un estudio sistemático de todos los edificios que contaban con cuatro o más datos confiables, lo que resultó en un total de 63 edificios. Para estos 63 edificios, se analizaron todos los terremotos ocurridos entre 2014 y 2024 en dos etapas: El trabajo de Espinoza (2024) que incorporó 199 nuevos registros confiables, mientras que en el presente estudio se estudiaron 309. La ampliación de la base de datos constituye uno de los principales aportes del presente trabajo, ya que permite un estudio más detallado de la variación de los parámetros modales a diferentes amplitudes de respuesta de la estructura.

Se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos, normalizando los datos con el fin de obtener resultados comparables y agregables entre edificios. Los resultados evidencian una evidente correlación entre los parámetros modales en estudio (periodo y fracción de amortiguamiento del primer modo traslacional, en cada dirección) y la amplitud de la respuesta estructural. La amplitud de la respuesta fue medida como la máxima razón de deriva de techo (PRDR, por sus siglas en inglés). Se observa que el comportamiento en ambos casos es creciente para niveles bajos de amplitud de respuesta y que, posteriormente, tienden a saturarse a valores mayores a 10^{-4} de PRDR. Esta tendencia es consistente con observaciones de estudios previos basados en vibraciones ambientales.

En cuanto a la influencia del sistema lateral, este resulta determinante para estimar el período fundamental en función de la máxima deriva de techo. Las diferentes categorías analizadas permiten observar que existen diferencias significativas entre estas. En contraste, no fue posible identificar una influencia estadísticamente significativa del sistema lateral sobre la fracción de amortiguamiento con la información disponible actualmente.

La comparación con estudios previos muestra que los resultados obtenidos en esta investigación son consistentes con las tendencias reportadas en la literatura disponible, tanto en estudios basados en movimientos sísmicos como aquellos basados en movimientos ambientales. En particular, para la fracción de amortiguamiento se observa un incremento inicial de este a medida que aumenta la amplitud de la respuesta estructural, seguido de una saturación del parámetro modal en amplitudes mayores, lo cual también ha sido observado en los estudios realizados por Tamura (2012), Davenport & Hill-Carroll (1986) y Bernal et al. (2015).

8 Agradecimientos

Este trabajo contó con el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través del proyecto FONDECYT de Iniciación No. 11230258. Se agradece el apoyo brindado para la ejecución de esta investigación. Los registros utilizados fueron obtenidos del Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD), reconociéndose el esfuerzo asociado a la instrumentación, mantención de los equipos, así como el procesamiento y difusión de los registros.

Agradezco a mis padres por el apoyo constante entregado durante estos años de estudio, el cual fue fundamental para mi formación académica y para poder llevar este proceso de la mejor manera posible. Asimismo, agradezco a mi pareja por su apoyo incondicional, motivación constante, comprensión a lo largo de este camino, así como por estar siempre disponible para brindar ayuda cuando fuera necesario, acompañándome desde antes del inicio de este proceso hasta su culminación.

9 Referencias

- A. P. Jeary. (1986). Damping in tall buildings—a mechanism and a predictor. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 14(5), 733–750.
- Beck, J. L., & Jennings, P. C. (1980). Structural identification using linear models and earthquake records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(2). <https://doi.org/10.1002/eqe.4290080205>
- Bernal, D., Döhler, M., Kojidi, S. M., Kwan, K., & Liu, Y. (2015). First mode damping ratios for buildings. *Earthquake Spectra*, 31(1), 367–381. <https://doi.org/10.1193/101812EQS311M>
- Çelebi, M., Phan, L. T., & Marshall, R. D. (1993). Dynamic characteristics of five tall buildings during strong and low-amplitude motions. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/tal.4320020102>
- Cruz, C., & Miranda, E. (2017). Evaluation of Damping Ratios for the Seismic Analysis of Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 143(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001628](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001628)
- Cruz, C., & Miranda, E. (2019). Reliability of damping ratios inferred from the seismic response of buildings. *Engineering Structures*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.056>
- Cruz, C., & Miranda, E. (2021). Damping Ratios of the First Mode for the Seismic Analysis of Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 147(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002873](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002873)
- Davenport, A. G., & Hill-Carroll, P. (1986). Damping in tall buildings: Its variability and treatment in design. *Building Motion in Wind*, 42–57.
- Espinoza, E. (2024). *Análisis de la variación del periodo y fracción de amortiguamiento del primer modo con la amplitud de la respuesta estructural de edificios instrumentados en California*. [Memoria]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Spence, S. M. J., & Kareem, A. (2014). Tall Buildings and Damping: A Concept-Based Data-Driven Model. *Journal of Structural Engineering*, 140(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000890](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000890)
- Tamura, Y. (2012). Amplitude Dependency of Damping in Buildings and Critical Tip Drift Ratio High-Rise Buildings Amplitude Dependency of Damping in Buildings and Critical Tip Drift Ratio. In *Original Publication: International Journal of High-Rise Buildings* (Vol. 1, Number 1). www.ctbuh.org
- Tamura, Y. (2013). Damping in Buildings and Estimation Techniques. In A. Tamura Yukio and Kareem (Ed.), *Advanced Structural Wind Engineering* (pp. 347–376). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54337-4_13