



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**EVALUACIÓN DE PERIODOS DEL PRIMER
MODO TRASLACIONAL INFERIDO A PARTIR DE
LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS
INSTRUMENTADOS EN CALIFORNIA**

Memoria de Título presentada por

Sofía Paz Mendoza Zúñiga

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler

Agosto de 2025



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 periodos del primer modo traslacional inferido a partir de la respuesta sísmica de edificios instrumentados en California

Nombre del candidato(a): Sofía Paz Mendoza Zúñiga

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquin ; **Departamento:** Obras civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Emanuel Cruz Doggenweiler, 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

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:

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: 05/09/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02/09/2025

; 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 PERIODOS DEL PRIMER MODO TRASLACIONAL INFERIDO A PARTIR DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS INSTRUMENTADOS EN CALIFORNIA

Sofía Mendoza¹, Cristian Cruz¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile

Resumen

La presente memoria de título corresponde a un estudio estadístico del periodo del primer modo traslacional de edificios instrumentados en California, EE.UU. Para ello, se analizó una base de datos de 1253 periodos provenientes de 150 edificios monitoreados por el programa de instrumentación de movimiento fuerte en edificios de California (CSMIP, por sus siglas en inglés). Para el análisis estadístico se utiliza un modelo lineal de efectos mixtos (LME), el cual permite separar la variabilidad inter e intra edificio. Se estudia la influencia de la altura, la relación de aspecto, el sistema resistente a cargas laterales, y la amplitud de la respuesta estructural, como factores predictores del periodo estructural.

Los resultados obtenidos muestran que la altura es el principal predictor del periodo, seguido del sistema resistente a cargas laterales. Se exploran distintas combinaciones de variables, evaluando el aporte de cada una mediante el incremento en el coeficiente de determinación marginal de la regresión. Se muestra que la combinación de regresores que mejor explican la variabilidad en los datos es aquella que considera la altura, el material, el sistema lateral resistente y la orientación del edificio. A partir de este modelo se obtienen ecuaciones predictoras que dependen únicamente de la altura como variable cuantitativa, diferenciadas según el sistema lateral resistente (marcos resistentes a momento, marcos arriostrado y muros de corte), el material estructural (concreto y acero), y la orientación del edificio (longitudinal o transversal), resultando un total de ocho ecuaciones.

Como parte del análisis estadístico, se verifican los supuestos del modelo, como la normalidad de los efectos aleatorios y de los residuales. Asimismo, se evalúa la influencia de la amplitud en el periodo a través de la máxima razón de deriva de techo (PRDR), encontrando que, si bien PRDR es estadísticamente significativo, su efecto es tan pequeño que puede ser despreciado.

Finalmente, las ecuaciones obtenidas para marcos resistente a momento de acero y concreto se comparan con modelos previos, en particular los propuestos por Goel y Chopra el año 1997 y la norma ASCE-7.

1 Introducción

En la ingeniería sísmica es fundamental contar con métodos para estimar en forma rápida el periodo de una estructura. Una estimación del periodo es importante para el proceso de diseño estructural, ya que el periodo traslacional fundamental es uno de los parámetros más importantes en el análisis dinámico de una estructura, que caracteriza el comportamiento oscilatorio del edificio (Chopra 2012). La norma sísmica ASCE 7-16 (ASCE 2016), requiere que el periodo empleado para determinar la demanda sísmica no se desvíe significativamente de aquellos observados empíricamente en California. Esto se debe a que las propiedades dinámicas reales de un edificio, durante un terremoto, pueden diferir significativamente de los valores especificados como parámetros de entrada para el diseño (Haviland 1976), por ende usar un valor de periodo calculado mediante un modelo de elementos finitos no necesariamente va a coincidir con el periodo real de una estructura durante un terremoto. Para esto, el ASCE 7-16 especifica fórmulas empíricas para estimar el periodo fundamental de vibración de los edificios. Otra aplicación importante de la estimación de periodos corresponde al desarrollo de modelos simplificados de edificios, caracterizados únicamente por su altura, periodo fundamental, y fracción de amortiguamiento modal. Estos modelos se utilizan comúnmente en el análisis de riesgo sísmico regional (e.g., Heresi & Miranda 2022) o en análisis paramétricos que involucran un gran número de edificios (e.g., Cruz & Miranda 2021b).

El Centro para la Ingeniería y Datos de Movimiento Fuerte (CESMD, por sus siglas en inglés) es un centro multidisciplinario cooperativo que reúne los registros sísmicos de edificios instrumentados recopilados por la Agencia Geológica de Estados Unidos (USGS) y la de California (CGS). Los registros sísmicos desde 1970 hasta 2014, de todos los edificios instrumentados en California, fueron analizados por Cruz y Miranda (2021a). Los periodos y fracciones de amortiguamiento inferidas fueron sometidas a una serie de pruebas de confiabilidad, formando una base de datos de más de 1200 periodos de alta calidad. A partir de esta base de datos, Cruz y Miranda (2021a) realizaron un estudio estadístico y entregaron recomendaciones para estimar la fracción de amortiguamiento de edificios. Esta misma base de datos representa una oportunidad para estudiar el comportamiento empírico del periodo fundamental de edificios sometidos a terremotos, y proveer ecuaciones que permitan estimarlo a partir de los atributos generales de un edificio.

La presente memoria tiene por objetivo realizar un análisis de los periodos del primer modo traslacional inferidos a partir de la respuesta sísmica de edificios instrumentados en California, utilizando la base de datos de Cruz y Miranda (2021a). Este trabajo buscará identificar correlaciones entre diversos factores que permitan predecir el periodo de una estructura, para ser utilizadas tanto en el diseño sísmico de edificios, como en modelos numéricos que requieran una estimación rápida del periodo fundamental.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar una evaluación estadística del periodo estructural de edificios instrumentados en California, con el fin de identificar correlaciones entre diferentes factores que permitan predecir el periodo de una estructura.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar qué variables o regresores controlan el periodo de una estructura.
2. Formular una ecuación predictiva que permita estimar el periodo de una estructura a partir de sus características principales.
3. Comparar los modelos propuestos con otras ecuaciones predictivas existentes en la literatura.

3 Marco teórico

3.1 Antecedentes de la investigación

En la literatura existen diversas recomendaciones para estimar el periodo. Una de las primeras bases de datos de periodos la desarrollada por Tanaka (1969), en una época en la que aún no se habían establecido métodos para calcular parámetros estructurales con una precisión satisfactoria. En esta investigación se comparó el periodo de 17 edificios instrumentados, sometidos al terremoto de Saitama, Japón de 1968, con los obtenidos en sismos de menor intensidad, donde se observó cómo aumenta el periodo de una estructura a medida que se incrementa la excitación en la base. Como resultado de este estudio se concluyó que el periodo puede aumentar hasta un 20% en condiciones de vibración fuerte respecto a registros en estado estacionario. Años más tarde, Haviland (1976) planteó la necesidad de una representación cuantitativa de la probabilidad de obtener valores de período y amortiguamiento, ya que, sin estas representaciones probabilísticas, no es posible estimar adecuadamente el riesgo sísmico. Esto se debe a las incertidumbres en las propiedades dinámicas de los edificios, las cuales afectan directamente la predicción de respuestas sísmicas. Frente a esto, armó una gran base de datos de periodos y fracciones de amortiguamiento del primer modo, recopilando resultados de investigaciones que emplearon los registros del terremoto de San Fernando, California el año 1971 y de Saitama, Japón, el año 1968. Sin embargo, se evidenció una escasez de valores de periodo, debido a una insuficiencia de edificios instrumentados ante terremotos fuertes. La mayoría de los datos provenían de edificios sometidos a excitaciones de baja amplitud, como pruebas de carga o vibraciones ambientales.

Uno de los estudios más influyentes fue el de Bertero et al. (1988) en donde analizaron el periodo fundamental inferido de 15 edificios de marcos de hormigón resistentes a momento, a partir de movimientos sísmicos y propusieron una ecuación para estimar el periodo a partir de la altura de los edificios. Los resultados de esta investigación se adoptaron en el código UBC (ICBO 1988) para estimar el periodo en forma aproximada. Goel y Chopra (1997, 1998) desarrollaron fórmulas empíricas mejoradas para estimar el período fundamental de vibración de edificios de marcos de acero resistentes a momentos y edificios de muros de hormigón, respectivamente, a partir de los registros en edificios instrumentados luego del terremoto de Northridge de 1994. Estas recomendaciones son las actualmente empleadas por la norma ASCE 7-16 (ASCE 2016) para el diseño sísmico de edificios en Estados Unidos, las cuales provienen de ajustes de curvas respecto a los datos obtenidos.

Si bien existen algunos estudios más recientes que proporcionan ecuaciones predictoras para el periodo fundamental de edificios, estas comúnmente tienen problemas asociados a la confiabilidad de los periodos inferidos o problemas de metodología. Por ejemplo, Fritz et al. (2009) realizan recomendaciones a partir de una gran base de datos que incluye más de 4000 mediciones de periodos fundamentales, sin embargo, solo 10 de los edificios estudiados fue analizada utilizando métodos confiables de identificación de sistemas (Cruz & Miranda 2021a). Otro caso es Xiang et al. (2020), que presenta problemas de metodología, por ejemplo, realizan fórmulas para estimar el periodo de marcos excéntricos de acero a partir de los datos de un conjunto de únicamente 3 edificios.

3.2 Definición del problema

En la actualidad, existe una escasez de estudios que analicen el periodo fundamental de estructuras utilizando grandes cantidades de datos obtenidos exclusivamente a partir de la respuesta sísmica real de edificios instrumentados. Adicionalmente, los estudios más recientes mencionados en los antecedentes presentan metodologías cuestionables, afectando la calidad de los análisis sísmicos y el diseño estructural. La necesidad de mejorar la predicción del periodo fundamental de un edificio es clave para garantizar una mayor seguridad y eficiencia en el diseño sísmico.

3.3 Periodo de una estructura

El periodo de una estructura corresponde al tiempo que esta tarda en completar un ciclo completo de oscilación o vibración. En la ingeniería sísmica es común trabajar con este parámetro, ya que corresponde a uno de los valores de entrada más importantes para el análisis dinámico de un sistema de

edificios (Haviland, 1976). Esto se debe a que el periodo influye directamente en la determinación de la demanda sísmica sobre la estructura, caracterizando el comportamiento oscilatorio. La norma ASCE 7-16 (ASCE 2016) permite el cálculo de periodo mediante distintas fórmulas predictoras y establece que su determinación debe basarse en un análisis debidamente fundamentado, considerando tanto las propiedades estructurales como las características de deformación de los elementos resistentes, debido que, si la estimación del periodo difiere significativamente de los periodos reales de la estructura, se puede introducir incertidumbre en el diseño.

A menudo, se requiere una estimación rápida del periodo de una estructura, ya que no siempre es práctico crear un modelo específico para cada una. Ya sea evaluar el riesgo regional de una zona o un conjunto de edificios, modelar cada estructura individualmente implica mucho tiempo y recursos. En muchas ocasiones, se utilizan modelos simplificados, pero para estos se necesita una estimación precisa del periodo. Para realizar una ecuación predictiva del periodo, es necesario disponer de una base de datos que contenga periodos ya medidos y llevar a cabo un análisis estadístico. Por lo tanto, se debe estudiar la base de datos a través de inferencia estadística.

3.4 Modelos estadísticos

La inferencia estadística es una rama de la estadística con la cual se puede hacer estimaciones y predicciones utilizando la información disponible. Esta disciplina permite sacar conclusiones a partir de datos recopilados de una muestra representativa, empleando diversos métodos estadísticos, entre los cuales se encuentra el ajuste de curvas. El ajuste de curvas es una técnica que busca modelar la relación entre variables mediante funciones matemáticas, sin embargo, este proceso estadístico sólo proporciona un modelo aproximado para el conjunto de datos observados. Si no se entiende cómo un parámetro varía en función de otro, no se puede predecir si la ecuación ajustada seguirá siendo válida fuera del rango de los datos observados (Moore, 2007). Por lo tanto, no garantiza que las conclusiones sean aplicables a toda la población.

Otro método estadístico útil y ampliamente utilizado son las regresiones lineales, que emplean un enfoque lineal sencillo para predecir una variable cuantitativa Y en función de una o más variables predictoras X (James et al., 2014). Si bien esta herramienta es valiosa para predecir respuestas cuantitativas, en este estudio se dispone de una base de datos que incluye múltiples mediciones del periodo de un mismo edificio durante diferentes terremotos, lo que introduce variabilidad en los datos. Debido a esta variabilidad, no es posible utilizar una regresión lineal convencional. Para realizar inferencia estadística, es necesario cumplir con los siguientes supuestos: (1) linealidad, (2) homocedasticidad e (3) independencia (Cruz & Miranda 2021a). Para abordar el incumplimiento del supuesto de independencia, se utilizará un modelo lineal de efectos mixtos, el cual permite separar la variabilidad total en dos componentes: una asociada a diferencias entre edificios y otra correspondiente a variaciones dentro de cada edificio, considerando que las observaciones son independientes entre sí.

Un modelo lineal de efectos mixtos (LME) es un tipo de modelo estadístico, el cual se utiliza principalmente para describir las relaciones entre una variable de respuesta y algunas covariables en datos que están agrupados según uno o más factores de clasificación (Pinheiro & Bates, 2000). Estos datos presentan tanto efectos fijos como efectos aleatorios, los efectos fijos corresponden a parámetros asociados con una población entera, mientras que los efectos aleatorios están asociados con unidades experimentales individuales seleccionadas al azar de una población.

En algunos casos, los modelos lineales de efectos mixtos pueden incluir más de un efecto aleatorio, lo que se conoce como efectos aleatorios anidados (*nested random effects*). Según el enfoque presentado por Pinheiro y Bates (2000) este tipo de estructura corresponde a un modelo que considera efectos aleatorios en dos niveles, de modo que uno se encuentra dentro del otro. Un ejemplo de ello es cuando se registran múltiples observaciones en subcategorías contenidas dentro de un grupo principal. La incorporación de efectos anidados permite capturar la relación estadística entre observaciones pertenecientes a una misma agrupación.

En este estudio, se utiliza un modelo lineal de efectos mixtos que considera efectos aleatorios anidados, el cual se define a continuación.

$$\ln(T_{ijk}) = \beta_0 + b_i + \sum_{m=1}^N \beta_m X_{mi} + d_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

donde T_{ijk} es la k-ésima observación del periodo en la dirección j-ésima del i-ésimo edificio; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ son los coeficientes de los efectos fijos; X_{mi} representa regresores de efectos fijos conocidos; b_i denota el efecto aleatorio del edificio i ; ε_{ijk} son los residuales y d_{ij} corresponde al efecto aleatorio de LT anidado dentro del edificio. Este término representa la orientación del edificio la cual puede ser en la dirección longitudinal (L) o transversal (L), esto significa que para un mismo edificio i , pueden existir distintos registros dependiendo de su orientación.

Este modelo asume que tanto los efectos aleatorios como los errores residuales siguen una distribución normal, permitiendo considerar diferentes varianzas entre niveles de variables categóricas. Esto se presenta mediante los siguientes supuestos:

$$b_i \sim N(0, \sigma_b^2) \quad (2)$$

$$d_{ij} \sim N(0, \sigma_d^2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2 \delta_{mijk}^2) \quad (4)$$

En la Ecuación (4) se considera δ_m , que indica la relación de las desviaciones estándar del m-ésimo estrato respecto al primer estrato de la variable categórica con $m = \{2, \dots, S\}$, donde S es el número total de estratos. Este ajuste permite modelar la heterocedasticidad en la varianza residual entre categorías, y fue implementado a través del uso de pesos en las regresiones.

Para evaluar la influencia de los coeficientes de los efectos fijos, es común analizar su significancia estadística mediante el valor p entregado por la regresión. El valor p representa un concepto fundamental en el análisis estadístico, ya que indica la probabilidad de que el resultado obtenido se deba al azar, bajo la suposición de que no existe ningún efecto real (hipótesis nula). Cuando el valor p es pequeño, se puede inferir que existe una relación entre el predictor y la variable de respuesta (James et al., 2014), lo que sugiere que dicha relación es estadísticamente significativa. Por esta razón, un valor p bajo permite rechazar la hipótesis nula y se interpreta que es poco probable que la relación observada haya ocurrido solo por azar.

El rango típico del valor p para rechazar la hipótesis nula varía entre el 1% y el 5%, dependiendo de la disciplina. En el caso de la ingeniería, es habitual adoptar un valor arbitrario menor al 5% como criterio para determinar si un efecto es estadísticamente significativo.

3.5 Normativa y estudios previos

3.5.1 Period formulas for moment-resisting frame buildings (1997)

En el año 1997, Rakesh K. Goel y Anil K. Chopra (1997) realizaron un estudio en el que desarrollaron fórmulas mejoradas para estimar los periodos fundamentales de edificios con marcos resistentes a momento (moment-resisting frame), tanto de concreto como de acero, a partir de un análisis de regresión aplicado a una base de datos de edificios instrumentados en California. La investigación se basó en registros obtenidos de 8 terremotos ocurridos en California, considerando un total de 37 registros para edificios de concreto y 53 registros para edificios de acero. El estudio también incluye una evaluación del desempeño de las fórmulas empíricas contenidas en los códigos de diseño estructural vigentes en Estados Unidos al momento del estudio. Se indica que, aunque las fórmulas de dichos códigos tienden a entregar periodos generalmente más cortos que los medidos, estas pueden ser ajustadas para lograr una mejor correlación con los datos observados. Los resultados de la investigación se presentan a continuación.

$$T_{Concrete-MF} = 0.017 \cdot H^{0.92} \quad (5)$$

$$T_{Steel-MF} = 0.035 \cdot H^{0.80} \quad (6)$$

donde T corresponde al periodo en segundos y H a la altura del edificio en metros. Estas ecuaciones fueron producto del ajuste a los datos medidos por los autores, utilizando modelos de regresión estadística, y han servido como base para posteriores recomendaciones normativas.

3.5.2 ASCE-7 (2022)

La norma ASCE/SEI-7-22 (ASCE, 2022), titulada “Cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras”, corresponde a la versión más reciente de la normativa utilizada en Estados Unidos para solicitaciones en edificaciones. Constituye un documento de referencia ampliamente empleado en el área de la ingeniería estructural. Esta norma representa una herramienta fundamental que busca garantizar la protección, seguridad y bienestar de las personas mediante criterios de diseño estructural adecuados.

Para el cálculo del periodo fundamental en segundos, la normativa establece la siguiente ecuación:

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \quad (7)$$

donde h_n corresponde a la altura estructural, y los coeficientes C_t y x son definidos en la Tabla 2.8-2 de la norma. En el caso de edificios con sistema de marcos resistente a momento, se indican distintos valores según el material estructural (concreto o acero) en unidades del sistema internacional, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$T_{Concrete-MF} = 0.047 \cdot H^{0.9} \quad (8)$$

$$T_{Steel-MF} = 0.072 \cdot H^{0.80} \quad (9)$$

Las ecuaciones (8) y (9) utilizadas por la ASCE-7 derivan del estudio de Goel y Chopra mencionado anteriormente, ajustado mediante la resta de una desviación estándar.

4 Metodología de investigación

4.1 Edificios analizados y variables consideradas

La base de datos original utilizada cuenta con un total de 1335 respuestas sísmicas de 154 edificios, obtenidas a partir del Centro de Datos de Movimientos Fuertes para la Ingeniería (2015). De este total, sólo se utilizaron 1253 registros correspondientes a 150 edificios, debido a que fueron previamente evaluados a partir de una prueba de confiabilidad denominada “amplificación dinámica”. Esta métrica constituye un indicador de fiabilidad especialmente eficaz para evaluar el nivel de excitación de los dos primeros modos de vibración (Cruz & Miranda, 2019).

El sistema lateral de los edificios se clasificó en tres categorías: muros de corte (SW o Shear Walls), marcos resistente a momento (MF o Moment Frames) y marcos arriostrados (BF o Brace Frames). En cuanto a material se consideraron los siguientes: concreto (Concrete), acero (Steel), mixto (Mixed), mampostería (Masonry) y madera (Wood). No obstante, las categorías de mampostería y madera fueron agrupadas debido a su baja cantidad de registros. La Figura 4.1 presenta un histograma que resume la distribución de registros utilizados según el sistema estructural.

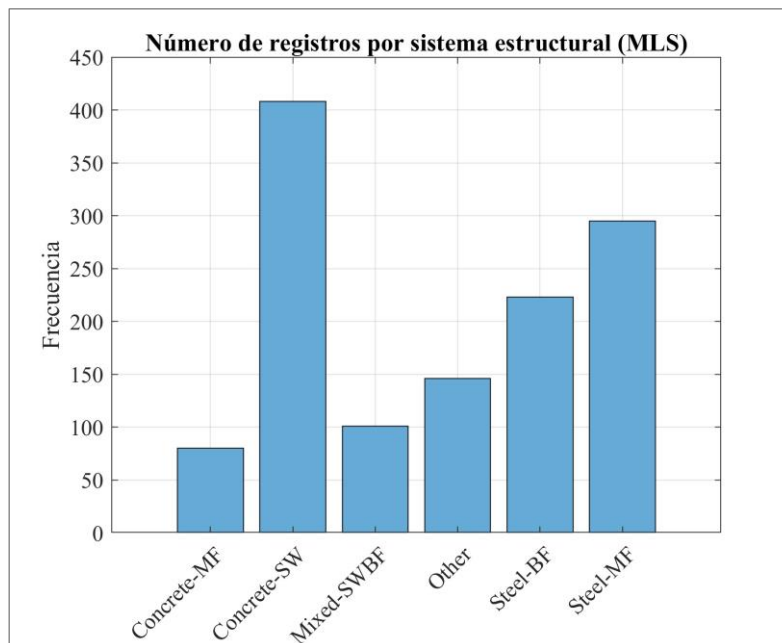


Figura 4.1. Histograma de registros sísmicos por sistema lateral resistente a cargas laterales.

En esta base de datos, para un mismo edificio se cuenta con registros de uno o más terremotos. Se definieron las siguientes variables como efectos fijos: periodo (T), altura del edificio (H), relación de aspecto (AR), razón de deriva del techo (PRDR), utilizada para investigar la dependencia de la amplitud, y el material con su sistema lateral resistente (MLS). Por otro lado, se definieron como efectos aleatorios las siguientes variables categóricas: el identificador del edificio (Edificio) y la dirección de análisis, longitudinal o transversal (LT). Debido a que cada edificio cuenta con al menos un registro por dirección, se incorporaron efectos anidados en el modelo: LT se consideró como un efecto aleatorio anidado dentro del efecto aleatorio Edificio, lo cual se representa mediante la variable categórica key, que combina el nombre del edificio y su dirección, equivalente al uso de Edificio:LT en el modelo estadístico. Esta estructura jerárquica permite representar adecuadamente la dependencia entre registros en diferentes direcciones para un mismo edificio.

4.2 Selección y ajuste del modelo estadístico

Para identificar las variables o regresores que influyen en el periodo de una estructura, se empleó un modelo lineal de efectos mixtos (LME), el cual permitió obtener resultados separando la variabilidad

entre edificios de aquella explicada por las demás variables. Para emplear este modelo, se aplicó el logaritmo natural a los regresores T , H , AR y $PRDR$, con el fin de linealizar las relaciones y facilitar la interpretación de los resultados como cambios proporcionales, mientras que la variable MLS se mantuvo como categórica.

Se exploraron diversas combinaciones de regresores para los efectos fijos, con el fin de evaluar cuáles contribuían de forma significativa a explicar el comportamiento del periodo. Para esto, se utilizó el Software MATLAB (2024), mediante la función *fitlme*, especificando el método de máxima verosimilitud restringida (*REML*) para la estimación de los parámetros. La calidad del ajuste de cada modelo se evaluó mediante el coeficiente de determinación marginal R^2 , desarrollado por Nakagawa y Schielzeth (2013), el cual cuantifica el porcentaje de varianza explicada exclusivamente por los efectos fijos. Este indicador permitió identificar qué combinaciones de variables aportaban una mayor capacidad para explicar la variabilidad del periodo estructural.

Se identificaron las ecuaciones predictivas que explicaron la mayor parte de la variabilidad de los datos. Estas ecuaciones fueron graficadas para la dirección de análisis longitudinal y transversal.

4.3 Dependencia de la amplitud (PRDR)

Con el fin de investigar la posible influencia de la amplitud de respuesta sobre el periodo estructural, se analizó la relación entre el periodo T y la razón de deriva de techo $PRDR$. Cabe destacar que para este análisis sólo se consideraron 1245 registros, debido a que se filtraron los valores de amplitud mayores a cero. Para esta nueva base de datos, se filtró considerando únicamente aquellos edificios que contaran con 4 o más registros de periodos. Con este filtro se realizó una regresión lineal entre $\ln(T)$ y $\ln(PRDR)$ para el conjunto de datos de cada edificio.

A partir de las regresiones obtenidas, se construyó un histograma con las pendientes obtenidas para cada modelo individual y se ajustó una curva de distribución normal mediante el método de los momentos, utilizando como parámetros la media y desviación estándar muestrales. Para facilitar la comparación con la distribución teórica, el histograma fue normalizado como función de densidad de probabilidad (PDF). Posteriormente, con el objetivo de determinar si la pendiente promedio es estadísticamente distinta de cero, se construyó un intervalo de confianza del 95% para la media, utilizando la distribución t de Student.

Se aplicó una normalización a los registros de periodo, utilizando como referencia un valor T_0 obtenido a partir de las regresiones ajustadas para cada edificio, evaluando un $PRDR$ de 10^{-4} , dado que esta magnitud pertenece al rango con mayor cobertura de los datos observados (Espinoza, 2025). A partir de esto, se determinó la razón entre cada periodo registrado y su correspondiente T_0 . Luego, esta razón se graficó tanto en escala normal como en escala logarítmica, con el objetivo de evaluar el comportamiento del periodo en función de la amplitud a través de una regresión lineal.

4.4 Validación de supuestos del modelo

Siempre que se realiza un análisis estadístico, en particular modelos de regresión, es necesario verificar que se cumplan los supuestos planteados por el modelo. En ese caso, la validación se realizó para los efectos aleatorios b_i (Ecuación (2)), los efectos anidados d_{ij} (Ecuación (3)) y los residuales del modelo ε_{ijk} (Ecuación (4)), con el objetivo de confirmar los supuestos del modelo lineal de efectos mixtos de la Ecuación (1).

Para los residuales, se utilizó un gráfico de residuales, en el que se observó la distribución de los errores con respecto a los valores ajustados del modelo, verificando qué tan cercanos se encuentran de la recta $y = 0$. Por otro lado, para evaluar la normalidad de los efectos aleatorios se construyó un histograma que permitió observar la simetría y forma de la distribución, y posteriormente se elaboró un gráfico Q-Q plot, el cual sirvió para comparar los cuantiles teóricos (eje X) con los cuantiles empíricos (eje Y), analizando qué tan alineados están los puntos respecto a la línea de referencia. Este procedimiento también se aplicó a los residuales para complementar la validación.

4.5 Comparación con ecuaciones de la literatura

Se compararon los resultados obtenidos para marcos resistente a momento de concreto y acero, con las ecuaciones propuestas en el estudio realizado por Goel y Chopra (1997), y en la normativa vigente ASCE-7 (2022). La evaluación se realizó mediante gráficos, en los que se representaron las curvas obtenidas junto con las ecuaciones de referencia, lo que permitió visualizar el grado de ajuste y consistencia con la literatura técnica.

5 Análisis y resultados

5.1 Modelo ajustado y parámetros obtenidos

Se muestran a continuación los resultados obtenidos al aplicar el modelo lineal de efectos mixtos descrito en la Ecuación (1), considerando distintas combinaciones de regresores como efectos fijos.

Tabla 5.1. Resultados regresiones con diferentes efectos fijos

Regresión modal	R ²
1. Parámetros relacionados a la interacción suelo-estructura	
$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H) + \beta_2 D_{LT}$	0.76
$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 \ln(AR) + \beta_2 D_{LT}$	0.51
$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H) + \beta_2 \ln(AR) + \beta_3 D_{LT}$	0.76
2. Altura del edificio y dependencia de la amplitud	
$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H) + \beta_2 \ln(PRDR)$	0.79
3. Altura del edificio y material	
$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H) + \beta_2 D_{LT} + \sum_{m=3}^{M+1} (\beta_m D_{(m-1)}^{mat})$	0.79
4. Altura del edificio, material y sistema lateral	
$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H) + \beta_2 D_{LT} + \sum_{m=3}^{Q+1} \beta_m D_{(m-1)}^{MLS}$	0.82
5. Altura del edificio, amplitud, material y sistema lateral	
$\ln(T) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H) + \beta_2 D_{LT} + \beta_3 \ln(PRDR) + \sum_{m=4}^{Q+1} \beta_m D_{m-1}^{MLS}$	0.85

La Tabla 5.1 presenta los modelos lineales de efectos mixtos evaluados, junto con su respectivo coeficiente de determinación marginal R². En cuanto a los parámetros relacionados a la interacción suelo-estructura, la altura del edificio H resultó ser el regresor que mejor explicó la variabilidad del periodo estructural alcanzando un R² de 0.76. Si bien también se analizó la combinación de regresores que incluía tanto la altura como la relación de aspecto, no se obtuvo una diferencia significativa en el ajuste, esto se debe a que ambos parámetros son colineales, es decir, están altamente correlacionados entre sí ya que AR puede determinarse a partir de H lo cual genera redundancia en el modelo. Por ende, la altura del edificio se consideró como variable explicativa base en los modelos estadísticos subsecuentes.

Los modelos que entregaron mayor R² marginal fueron aquellos que incorporaron variables estructurales adicionales. El Modelo 4 incluyó la variable categórica MLS, la cual representa el material y sistema lateral resistente de cada edificio. Este modelo mostró un aumento del 6% en el R² marginal respecto al modelo que sólo consideraba la altura. Este resultado se debe a que el sistema lateral determina cómo la estructura responde ante fuerzas horizontales, influyendo directamente en su rigidez y por lo tanto en su periodo. Asimismo, el Modelo 5, que además consideró la deriva de techo (PRDR), presentó un incremento adicional del 3% con respecto al Modelo 4. Este último modelo se analiza con más detalle en la sección 5.2.

Para la regresión del Modelo 4 se tomó como categoría de referencia Concrete-MF, la cual no aparece de manera explícita en la Tabla 5.2 por corresponder al grupo base. Dado que MATLAB por defecto

asume que para todos los niveles categóricos se tiene una misma varianza sigma, se incorporaron pesos relativos a Concrete-MF con el objetivo de introducir variabilidad entre grupos y corregir la heterocedasticidad de la regresión. A continuación, se presentan los resultados obtenidos..

Tabla 5.2. Resultados regresión Modelo 4 con efecto fijo material y sistema lateral (MLS)

Coefficientes efectos fijos (95%)								
Nombre	β	Estimado	SE	tStat	DF	pValue	Lower	Upper
Intercepto	β_0	-3.378	0.155	-21.801	1245	0.000	-3.682	-3.074
LT_T	β_2	0.055	0.024	2.305	1245	0.021	0.008	0.102
ln(H)	β_1	0.994	0.035	28.056	1245	0.000	0.924	1.063
MLS Concrete-SW	β_3	-0.600	0.104	-5.783	1245	0.000	-0.804	-0.397
MLS Mixed-SWBF	β_4	-0.528	0.131	-4.046	1245	0.000	-0.785	-0.272
MLS Other	β_5	-0.277	0.135	-2.047	1245	0.041	-0.542	-0.012
MLS Steel-MF	β_6	-0.016	0.110	-0.143	1245	0.886	-0.232	0.200
MLS Steel-BF	β_7	-0.280	0.117	-2.395	1245	0.017	-0.510	-0.051
Parámetros de covarianza de efectos aleatorios (95%)								
Edificio	σ_b	0.330	–	–	–	–	–	–
Edificio:LT	σ_d	0.191	–	–	–	–	–	–
Residual	σ_ε	0.277	–	–	–	–	–	–

Como se definió anteriormente, un valor p menor al 5% sugiere que la probabilidad de que el coeficiente asociado sea igual a cero es baja, lo que indica que la variable podría tener un efecto significativo en el modelo. En la Tabla 5.2 se observa que el valor p correspondiente al efecto anidado LT es de 0.021, lo que sugiere que en promedio sí existe una diferencia significativa en el periodo según la dirección considerada. Sin embargo, este resultado corresponde a un promedio en toda la regresión. Si se quisiera evaluar si existe diferencia significativa dentro de alguna categoría específica, sería necesario incorporar un término de interacción entre la variable LT y MLS, permitiendo analizar caso a caso.

Por otra parte, para la categoría Steel-MF se obtuvo un valor p de 0.886, muy superior al umbral de 0.05, lo que indica que no existe evidencia estadísticamente significativa de que dicha categoría difiera del grupo de referencia utilizado (Concrete-MF). Esto puede explicarse considerando que ambas categorías corresponden a marcos resistentes a momento, lo que sugiere que la diferencia entre los edificios de concreto y de acero dentro de este sistema estructural no tiene un efecto relevante en el periodo.

Cabe señalar que en los resultados presentados en la Tabla 5.2 no se incluyó el término de interacción entre las variables H y MLS, dado que los valores p asociados a dichos términos fueron elevados (entre 0.6 y 0.8), lo que sugiere una falta de significancia estadística. Por esta razón todas las regresiones estimadas presentan una curva en el espacio logarítmico con una pendiente en común, diferenciándose únicamente en el intercepto según la categoría. Mientras que el intercepto varía en una magnitud pequeña (entre 0.001-0.002) entre direcciones, debido a que en la mayoría de los casos los registros longitudinales y transversales presentan valores similares o con diferencias mínimas. Esto y lo anterior se puede observar gráficamente en la Figura 5.1 presentada a continuación.

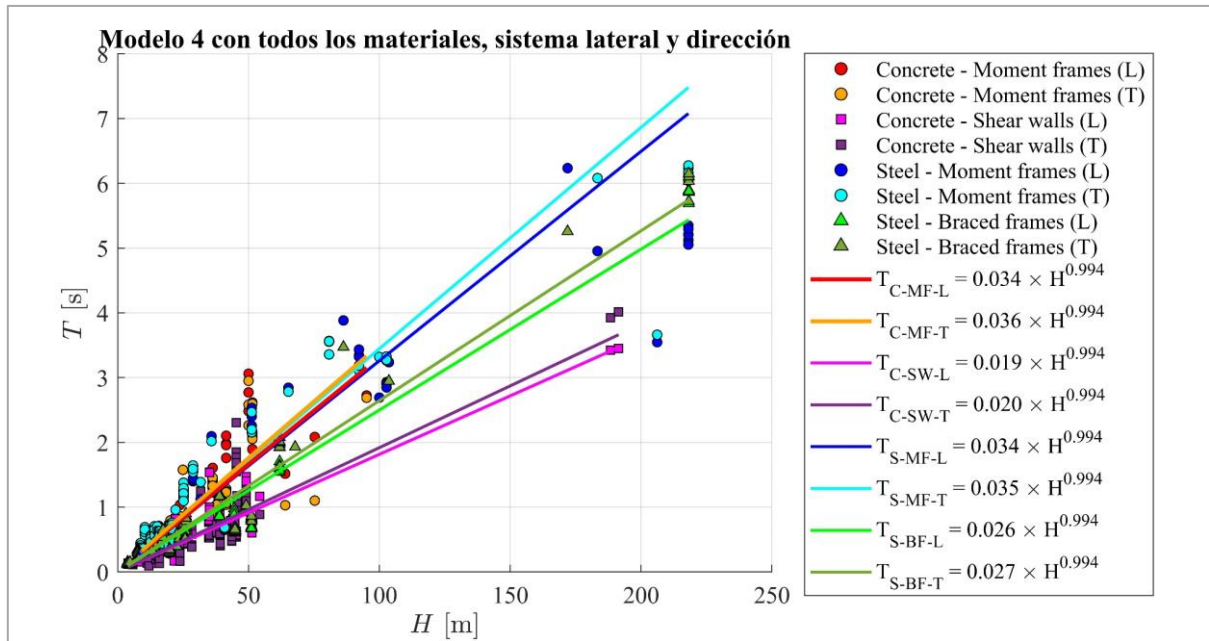


Figura 5.1. Periodo en función de la altura del edificio, diferenciado por materiales, sistema lateral resistente y dirección de análisis, con regresiones ajustadas mediante LME.

La Figura 5.1 muestra las curvas obtenidas a partir del Modelo 4, cuyos coeficientes se presentan en la Tabla 5.2, diferenciando por material (concreto y acero), sistema lateral resistente (Moment Frames, Shear Walls y Braced Frames), y dirección del registro: longitudinal (L) o transversal (T). A continuación, se presentan las gráficas separadas por material y tipo de sistema lateral permitiendo una mejor visualización y comparación.

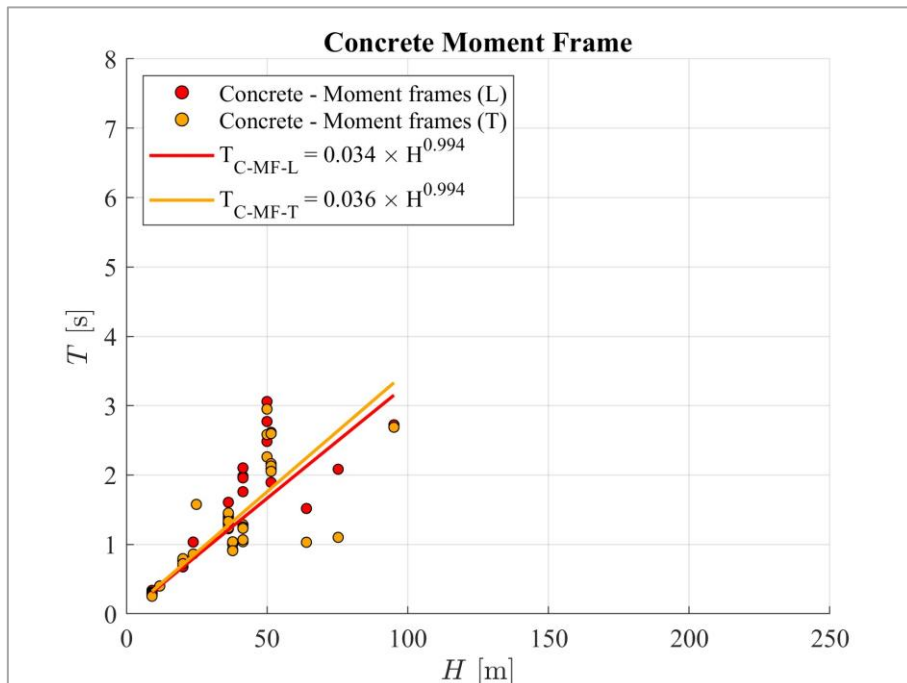


Figura 5.2. Periodo en función de la altura del edificio para marcos resistentes a momento de concreto, con regresiones ajustadas mediante LME.

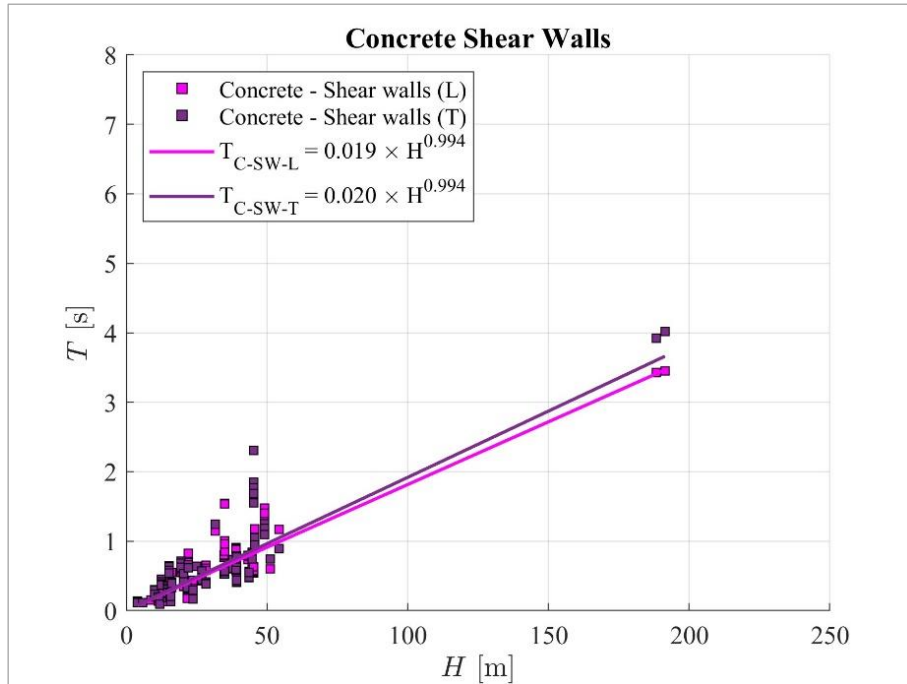


Figura 5.3. Periodo en función de la altura del edificio para muros de corte de concreto, con regresiones ajustadas mediante LME.

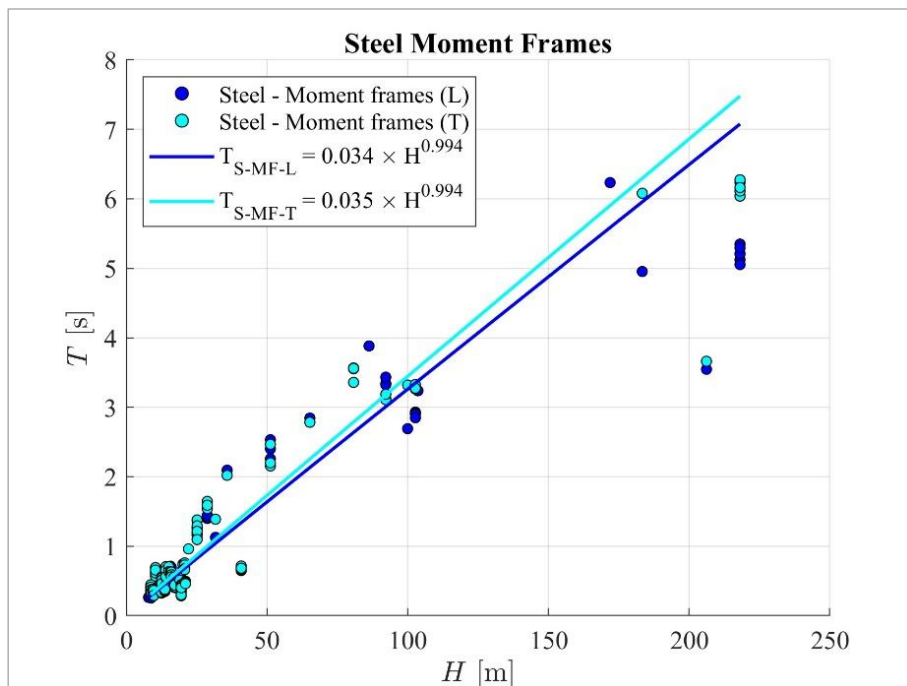


Figura 5.4. Periodo en función de la altura del edificio para marcos resistentes a momento de acero, con regresiones ajustadas mediante LME.

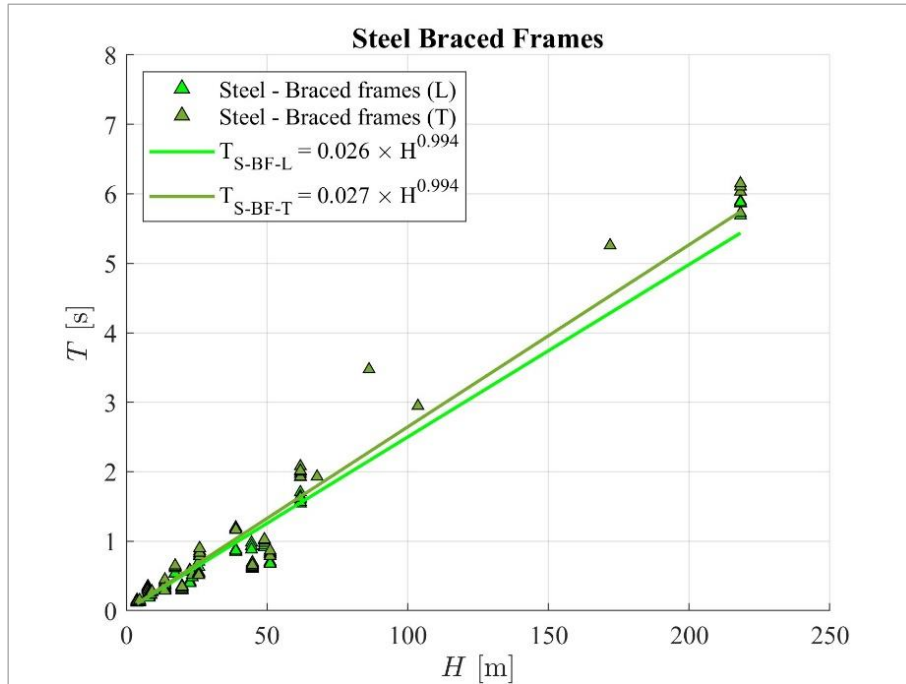


Figura 5.5. Periodo en función de la altura del edificio para marcos arriostrados de acero, con regresiones ajustadas mediante LME.

En la Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5 se observa en todas las categorías que el periodo asociado a la dirección transversal (T) es mayor que el correspondiente a la dirección longitudinal (L). Esto se explica porque la dirección T para este caso coincide con la dimensión más corta del edificio, la cual suele ser estructuralmente más flexible.

Respecto al sistema lateral, se observa que los edificios con marcos resistente a momento (Moment Frames) caracterizados por una menor rigidez lateral, presentan los mayores periodos. Por el contrario, las estructuras con muros de corte (Shear Walls), que aportan una rigidez considerable al sistema, presentan los menores periodos. En una posición intermedia se encuentran los marcos arriostrados (Braced Frames), cuyo comportamiento combina cierta flexibilidad con mecanismos adicionales de rigidez.

5.2 Evaluación de la dependencia de la amplitud

Como se observa en el Modelo 5 de la Tabla 5.1, el incluir la razón de deriva de techo (PRDR) como efecto fijo aumenta el R^2 marginal en un 3% con respecto al Modelo 4 analizado previamente. A pesar de que este aumento adicional es relativamente pequeño, no deja de ser relevante, por lo que se consideró pertinente realizar un análisis más profundo para evaluar el efecto específico al incluir esta variable. Para esto es necesario analizar su coeficiente beta asociado a PRDR en el nuevo modelo, así como su valor p con el fin de determinar significancia estadística.

En la Tabla 5.3 se observa que el coeficiente beta asociado a PRDR β_8 , tiene un valor de 0.046. Si bien este valor es pequeño y no mejora significativamente la estimación del periodo, el valor p asociado es prácticamente cero. Esto indica que PRDR es un parámetro estadísticamente significativo, por lo que se investigó con mayor detalle la dependencia de la amplitud utilizando la razón de deriva del techo.

Para evaluar la dependencia del periodo con respecto a la amplitud, se construyó el histograma presentado en la Figura 5.6, el cual representa las pendientes promedio obtenidas a partir de los modelos ajustados individualmente para los 108 edificios que cuentan con cuatro o más registros de periodo.

Tabla 5.3. Resultados regresión Modelo 5 con efecto fijo material, sistema lateral y PRDR

Coeficientes efectos fijos (95%)								
Nombre	β	Estimado	SE	tStat	DF	pValue	Lower	Upper
Intercepto	β_0	-2.876	0.143	-20.154	1236	0.000	-3.156	-2.596
LT_T	β_2	0.044	0.023	1.970	1236	0.049	0.000	0.089
ln(H)	β_1	0.977	0.032	30.287	1236	0.000	0.914	1.041
MLS Concrete-SW	β_3	-0.606	0.099	-6.103	1236	0.000	-0.801	-0.411
MLS Mixed-SWBF	β_4	-0.557	0.123	-4.536	1236	0.000	-0.798	-0.316
MLS Other	β_5	-0.319	0.126	-2.542	1236	0.011	-0.566	-0.073
MLS Steel-MF	β_6	-0.081	0.105	-0.770	1236	0.441	-0.288	0.126
MLS Steel-BF	β_7	-0.307	0.111	-2.771	1236	0.006	-0.525	-0.090
ln(PRDR)	β_8	0.046	0.002	27.472	1236	0.000	0.043	0.049
Parámetros de covarianza de efectos aleatorios (95%)								
Edificio	σ_b	0.544	-	-	-	-	-	-
Edificio:LT	σ_d	0.424	-	-	-	-	-	-
Residual	σ_ε	0.241	-	-	-	-	-	-

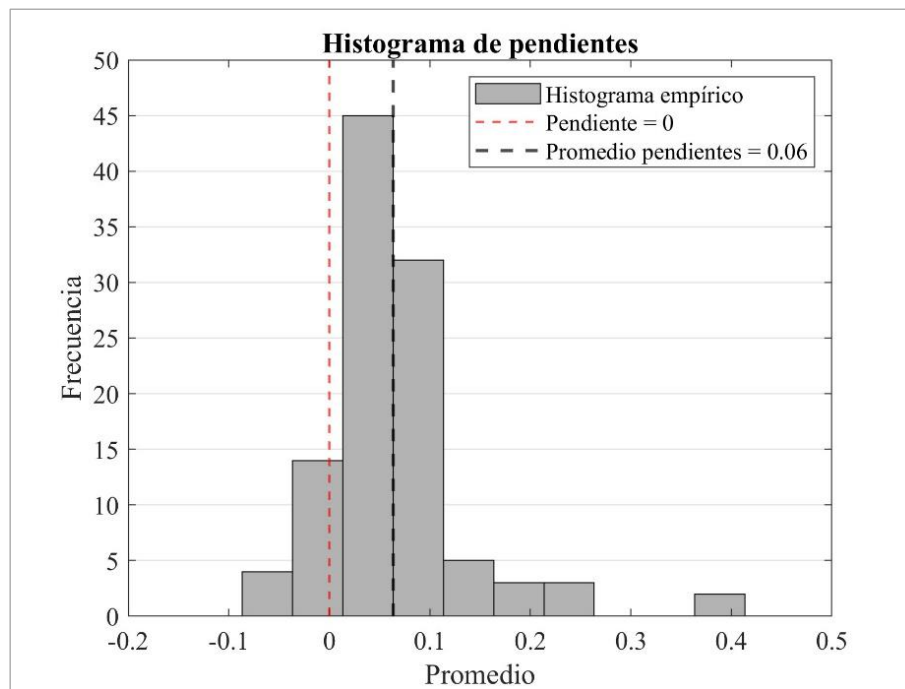


Figura 5.6. Histograma de pendientes promedio de la regresión entre ln(T) y ln(PRDR) para los edificios con cuatro o más registros de periodo.

En la Figura 5.6 se observa que el promedio de pendientes obtenidas fue de 0.06. Al comparar este valor con el coeficiente β_8 asociado a PRDR en el Modelo 5 de la Tabla 5.3, se ve que ambas magnitudes son similares, sin embargo, no son idénticas. Esta diferencia se debe a que el promedio de pendientes corresponde a la media de múltiples regresiones individuales, realizadas edificio por edificio, mientras que el coeficiente β_8 proviene de un único modelo ajustado globalmente sobre todos los datos normalizados

Por otra parte, visualmente se aprecia que el valor promedio se encuentra alejado del cero, lo que sugiere una posible correlación entre el periodo y la amplitud. Sin embargo, esto no implica necesariamente que la pendiente sea estadísticamente distinta de cero. Para confirmar esta diferencia, se realizó el análisis

mediante la curva de distribución normal ajustada y el intervalo de confianza del 95% del modelo presentados a continuación.

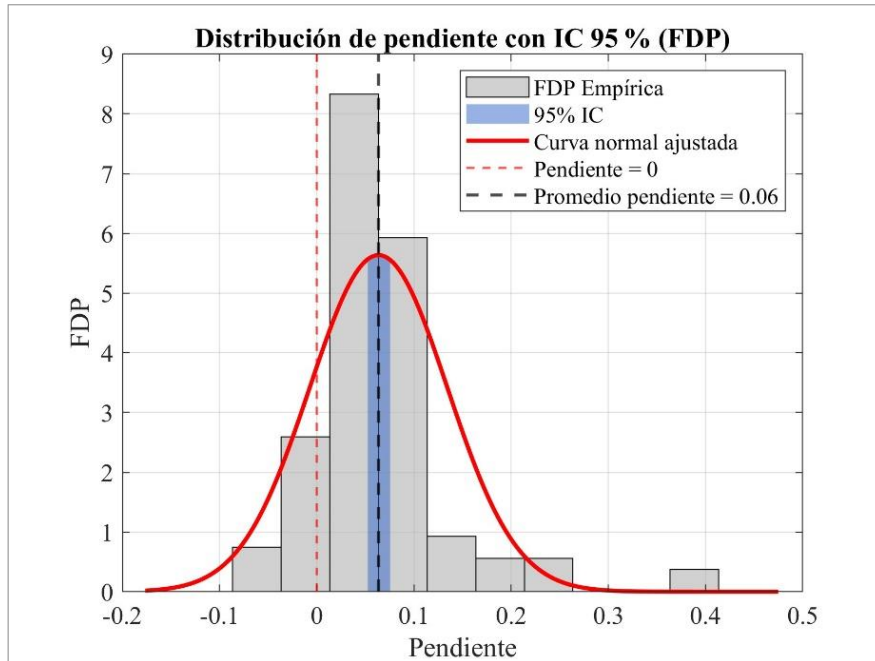


Figura 5.7. Distribución empírica de la pendiente estimada con curva normal ajustada e intervalo de confianza del 95%.

En la Figura 5.7 se observa que la distribución de los valores sigue aproximadamente un comportamiento normal, centrado en una pendiente media de 0.06. Además, existe una diferencia estadísticamente significativa respecto al valor cero, ya que el intervalo de confianza del 95% no lo incluye. Por lo tanto, se concluye que la amplitud de respuesta influye en el periodo, sin embargo, su efecto es tan pequeño que se puede despreciarse. Este resultado es consistente con los presentados en la Tabla 5.3, donde el valor p asociado al coeficiente PRDR es inferior al 5%, siendo prácticamente igual a cero.

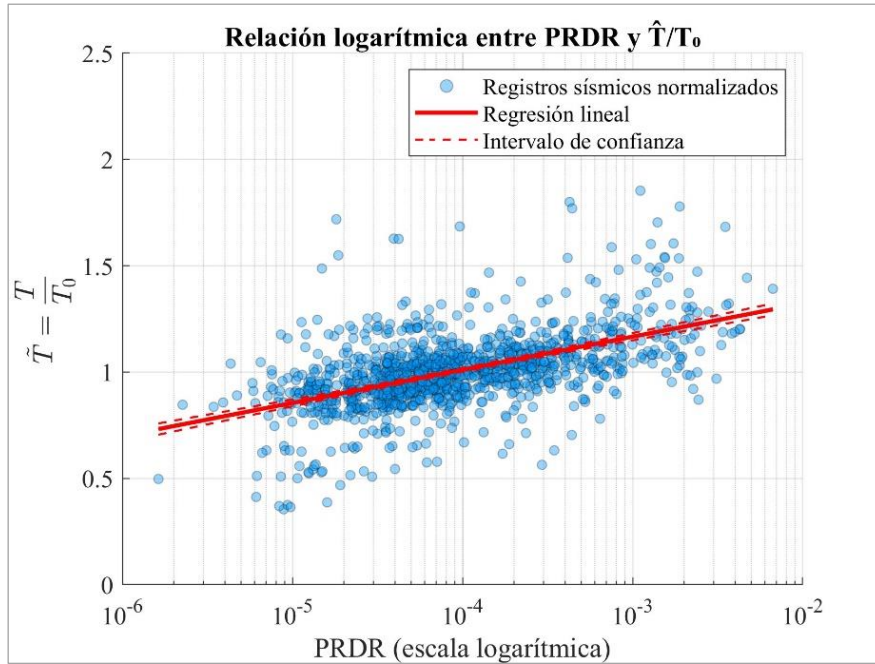


Figura 5.8. Relación entre el periodo normalizado y la razón de deriva de techo PRDR para los edificios con cuatro o más registros de periodo.

En la Figura 5.8 se presentan los resultados de la normalización de cada registros de periodos, utilizando el valor T_0 obtenido a partir de la regresión ajustada para cada edificio, evaluando un PRDR de 10^{-4} , debido a que, como se mencionó en el capítulo 4.3, esta magnitud corresponde al rango con mayor cobertura de los datos. Además, se muestra una regresión lineal de los datos junto con los intervalos de confianza de esta tendencia central. La regresión, realizada en escala logarítmica, evidencia una tendencia lineal creciente, lo cual sugiere que a mayor deformación lateral, mayor es el periodo estructural, confirmando de manera gráfica que la pendiente estimada es distinta de cero. A pesar de observarse cierta dispersión, la relación se refuerza gracias a lo mencionado anteriormente con intervalo de confianza de la Figura 5.7.

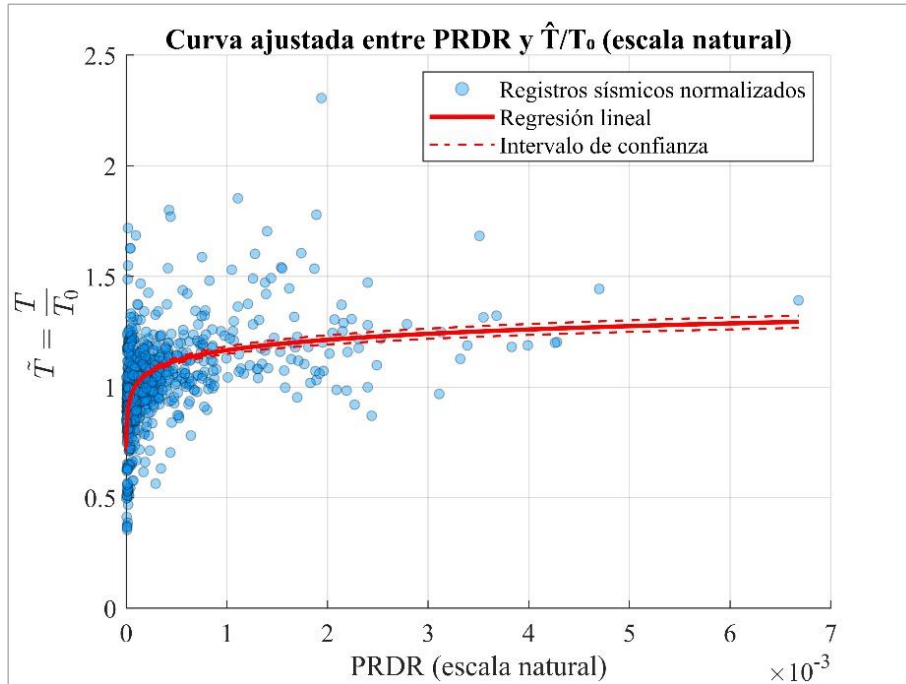


Figura 5.9. Relación entre el periodo normalizado y la razón de deriva de techo PRDR en escala natural, para los edificios con cuatro o más registros de periodo.

En la Figura 5.9 se presenta la misma relación mostrada en la figura anterior pero representada en escala natural. Se observa un comportamiento no lineal, con un crecimiento progresivo del periodo normalizado a medida que PRDR aumenta, particularmente hasta un valor cercano a 10^{-3} aproximadamente. A partir de este punto, la curva tiene a estabilizarse, lo que sugiere una posible saturación del efecto de la amplitud, sin embargo, esta estabilización también podría estar influida por una mayor dispersión y una menor cantidad de datos en ese rango, lo que reduce la variabilidad observada.

5.3 Análisis de residuales

En este estudio se establecieron los supuestos mostrados en las Ecuaciones (2), (3) y (4), los cuales plantea que tanto los efectos aleatorios como los errores residuales siguen una distribución normal. A continuación, se presentan los resultados de la verificación de estos supuestos estadísticos para el modelo definido en la Ecuación (1).

5.3.1 Gráfico de residuales

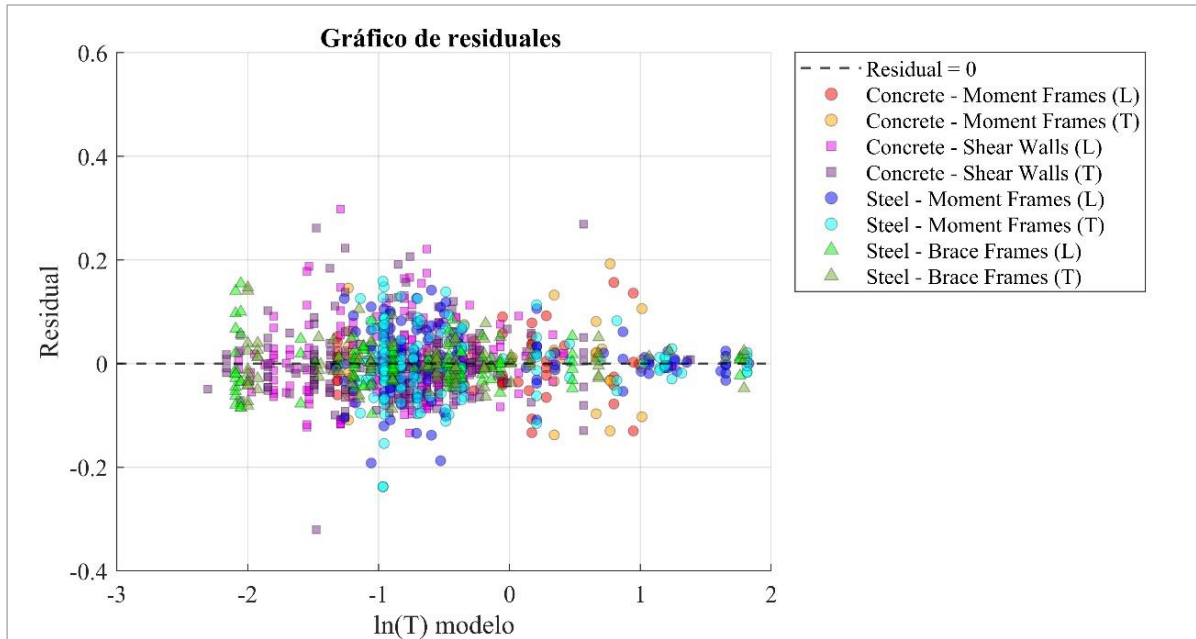


Figura 5.10. Gráfico de residuales del modelo ajustado en función de los valores estimados de $\ln(T)$, clasificados por material, sistema lateral y dirección.

La Figura 5.10 muestra los residuales del modelo lineal de efectos mixtos. En general, se observa que los puntos se distribuyen de manera aleatoria en torno al valor cero, sin evidenciar patrones sistemáticos ni formas específicas, lo que sugiere que el modelo captura adecuadamente la relación lineal entre las variables y que los residuales siguen una distribución normal. Además, se aprecia una mayor concentración de los puntos en la zona cercana al cero, por la superposición de colores, lo cual refuerza la idea de un buen ajuste y sugiere la ausencia de problemas de no linealidad o heteroscedasticidad.

Este comportamiento es complementado con el análisis Q-Q plot y su histograma asociado, el cual permite evaluar visualmente el cumplimiento del supuesto de normalidad tanto de los residuales como de los efectos aleatorios.

5.3.2 Verificación de normalidad y aleatoriedad

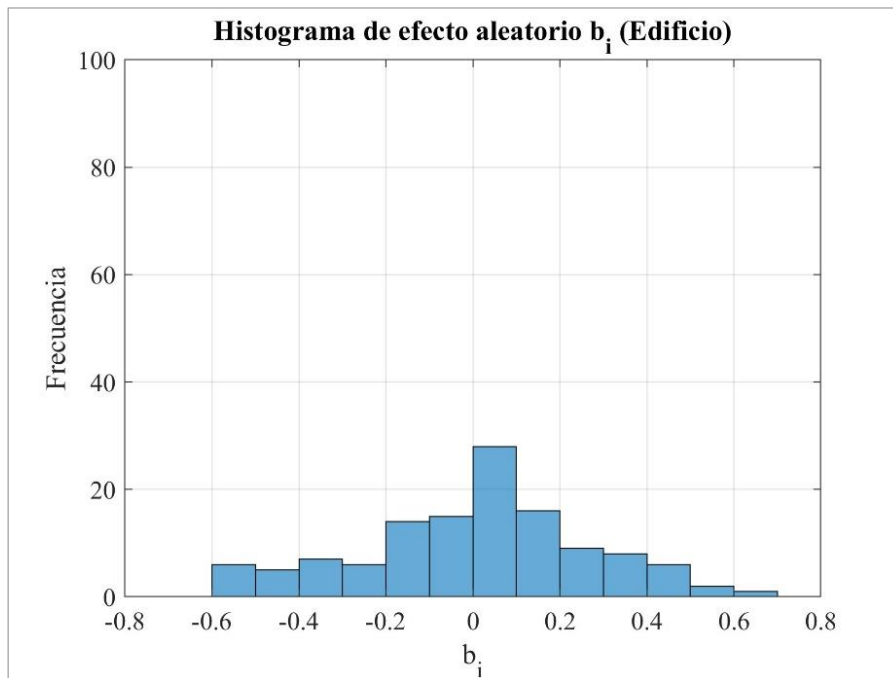


Figura 5.11. Histograma del efecto aleatorio b_i por edificio en el modelo lineal de efectos mixtos.

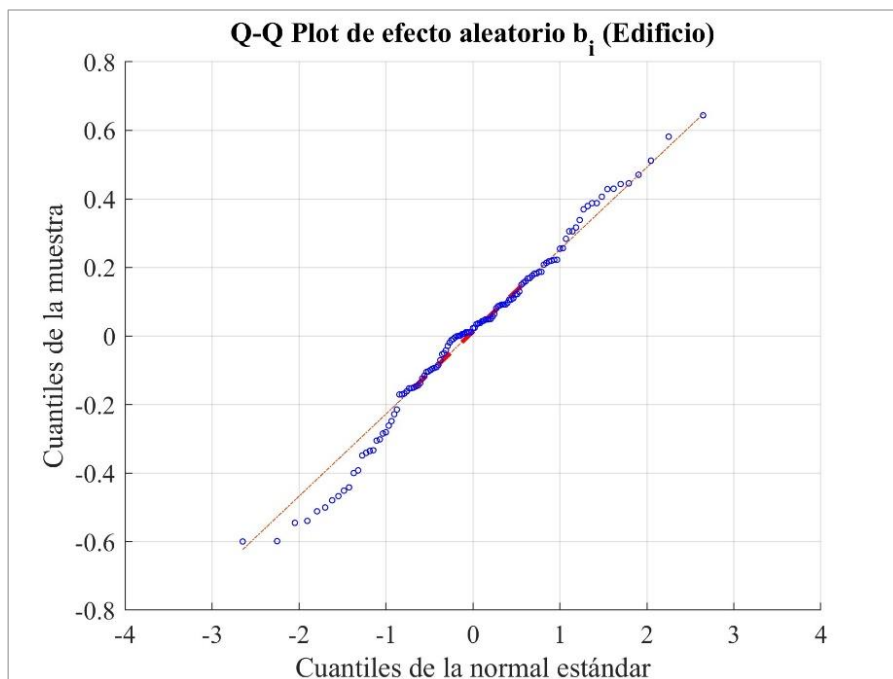


Figura 5.12. Q-Q plot del efecto aleatorio b_i por edificio, para evaluar el supuesto de normalidad.

En la Figura 5.11 se presenta el histograma del efecto aleatorio b_i asociado a cada edificio. La distribución tiene una forma aproximadamente normal, aunque no completamente simétrica, con una leve inclinación hacia valores positivos, evidenciada por una mayor frecuencia a la derecha del cero. Esto puede observarse en la Figura 5.12 donde, a pesar de que la mayoría de los puntos se alinean en torno a la recta teórica de la normal estándar, se observan algunas desviaciones en los extremos. Sin embargo, estas diferencias no son lo suficientemente significativas como para afectar el cumplimiento del supuesto de normalidad para este componente.

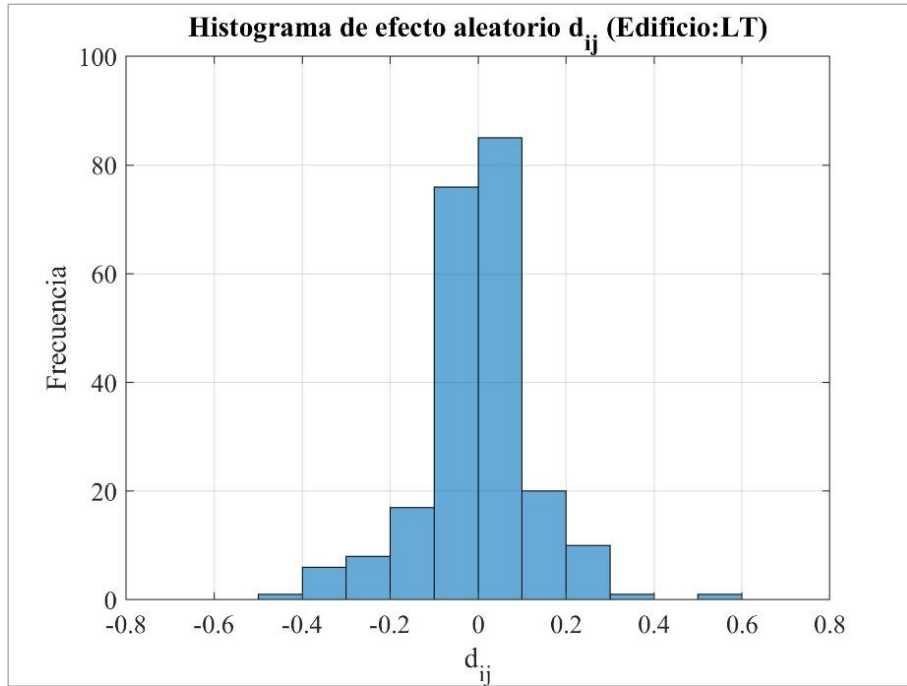


Figura 5.13. Histograma del efecto aleatorio d_{ij} por edificio en el modelo lineal de efectos mixtos.

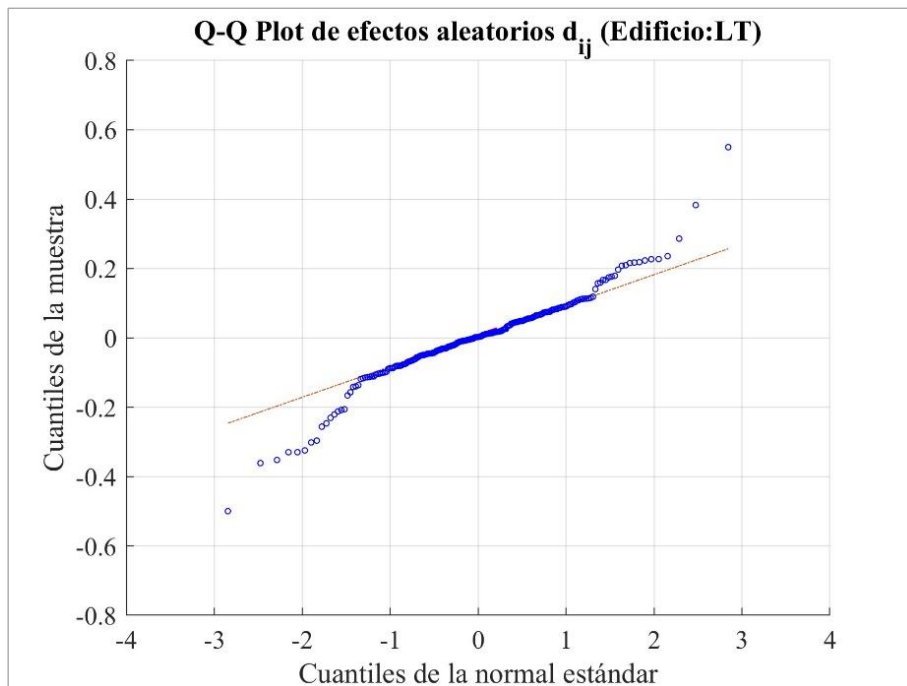


Figura 5.14. Q-Q plot del efecto aleatorio d_{ij} por edificio, para evaluar el supuesto de normalidad.

En la Figura 5.13 se presenta el histograma del efecto aleatorio d_{ij} , correspondiente al efecto aleatorio anidado Edificio:LT. A diferencia del componente b_i , esta distribución se muestra más simétrica y centrada en torno al cero, con una dispersión menor. Mientras que Figura 5.14 muestra un ajuste razonable a la distribución normal, aunque con algunas desviaciones más pronunciadas en las colas. Esto sugiere que el supuesto de normalidad es aceptable para este componente, sin embargo existen algunas observaciones atípicas que se alejan de los cuantiles teóricos esperados.

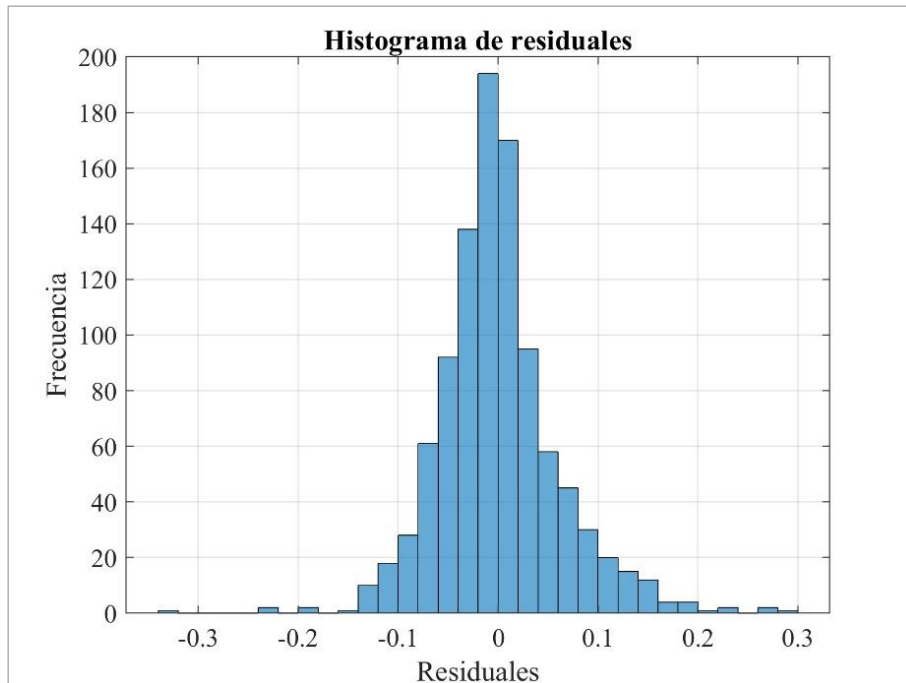


Figura 5.15. Histograma de residuales ε_{ijk} por edificio en el modelo lineal de efectos mixtos.

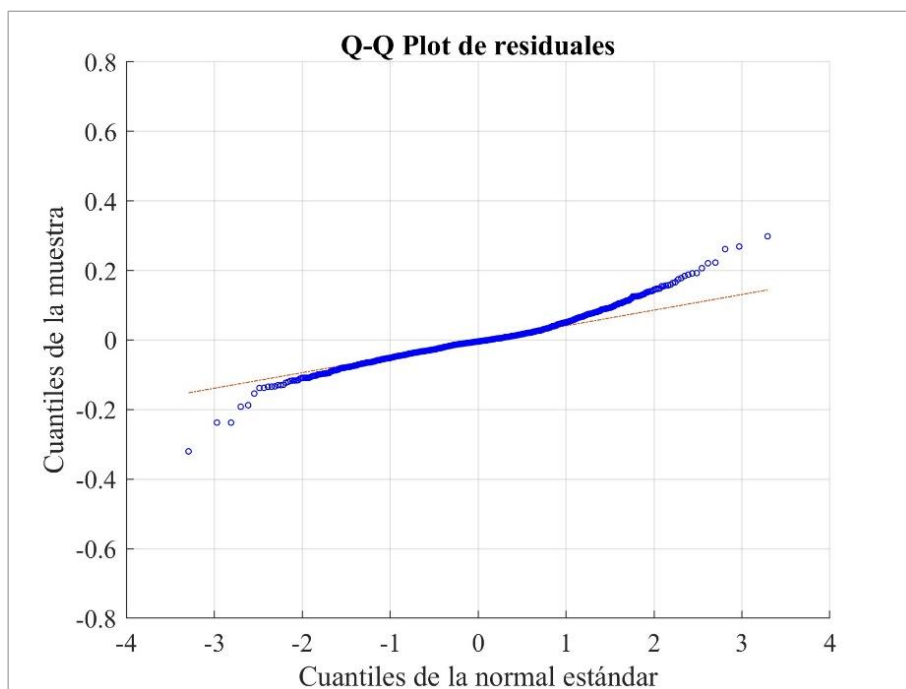


Figura 5.16. Q-Q plot del efecto aleatorio ε_{ijk} por edificio, para evaluar el supuesto de normalidad.

En las Figuras Figura 5.15 y Figura 5.16 se analiza el comportamiento de los errores residuales. El histograma muestra una distribución simétrica y más centrada en torno al cero, mientras que el Q-Q plot presenta un alineamiento adecuado con la recta teórica, salvo por leves desviaciones en los extremos. Ambas figuras confirman el supuesto de normalidad en los errores.

5.4 Comparación gráfica con modelos normativos

Con el objetivo de evaluar la consistencia del modelo propuesto respecto a estimaciones ampliamente aceptadas, se presenta una comparación gráfica entre la ecuación obtenida en este estudio y los modelos empíricos establecidos por Goel y Chopra (1997) y la normativa ASCE-7 (2022).

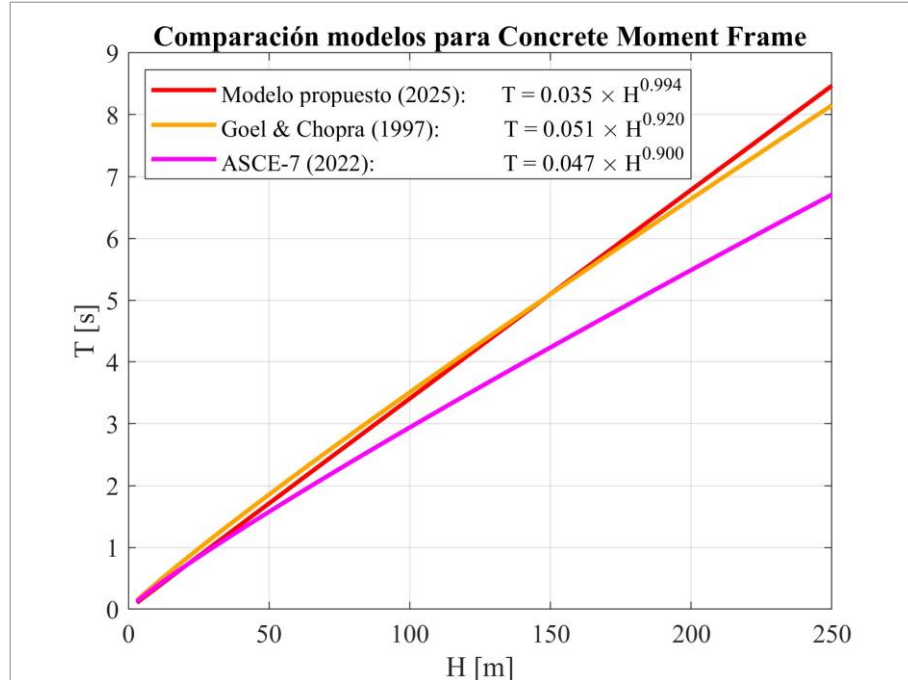


Figura 5.17. Comparación entre modelo propuesto y modelos normativos para estructuras tipo Concrete Moment Frames.

Al observar Figura 5.17 se presentan los resultados para edificios de concreto con marcos resistentes a momento. Es posible notar que el modelo propuesto presenta una gran similitud con el modelo de Goel y Chopra, lo cual se explica en parte porque ambos estudios utilizaron bases de datos similares. Aunque en este estudio se contó con una mayor cantidad de registros, se trabajó principalmente con los mismos edificios instrumentados en California al igual que en el estudio original. Por otro lado, las alturas superiores a los 50 metros aproximadamente, la normativa ASCE-7 entrega periodos menores, lo que refleja un enfoque más conservador, esto se debe a que la norma utiliza la ecuación de Goel y Chopra menos una desviación estándar, buscando garantizar la seguridad del diseño estructural.

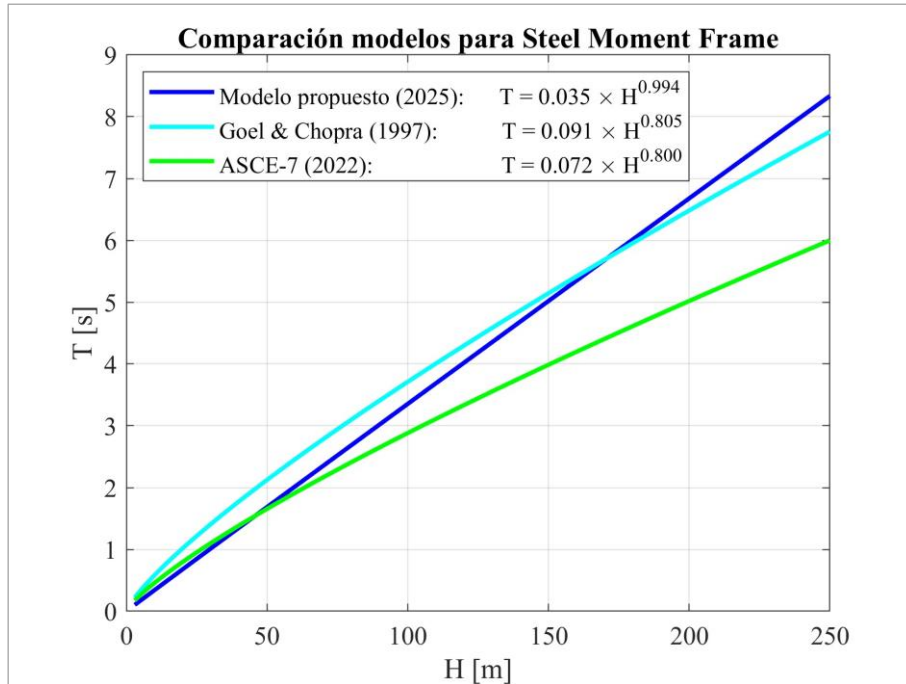


Figura 5.18. Comparación entre modelo propuesto y modelos normativos para estructuras tipo Steel Moment Frames.

En la Figura 5.18 se presentan los resultados para edificios de acero con marcos resistentes a momento. A diferencia del gráfico anterior, la curva correspondiente al estudio de Goel y Chopra muestra una menor similitud con el modelo propuesto, sobreestimando los periodos hasta aproximadamente los 160 metros de altura. Esto también se ve en la curva del código ASCE-7, donde para alturas inferiores a 50 metros entrega valores de periodos mayores al modelo propuesto, lo cual resulta inesperado considerando que esta normativa se basa en los resultados de Goel y Chopra menor una desviación estándar. Para analizar esto en mayor detalle, se incorporó al gráfico la curva del modelo propuesto sumando y restando una desviación estándar, lo que permite visualizar el rango de variabilidad estimado.

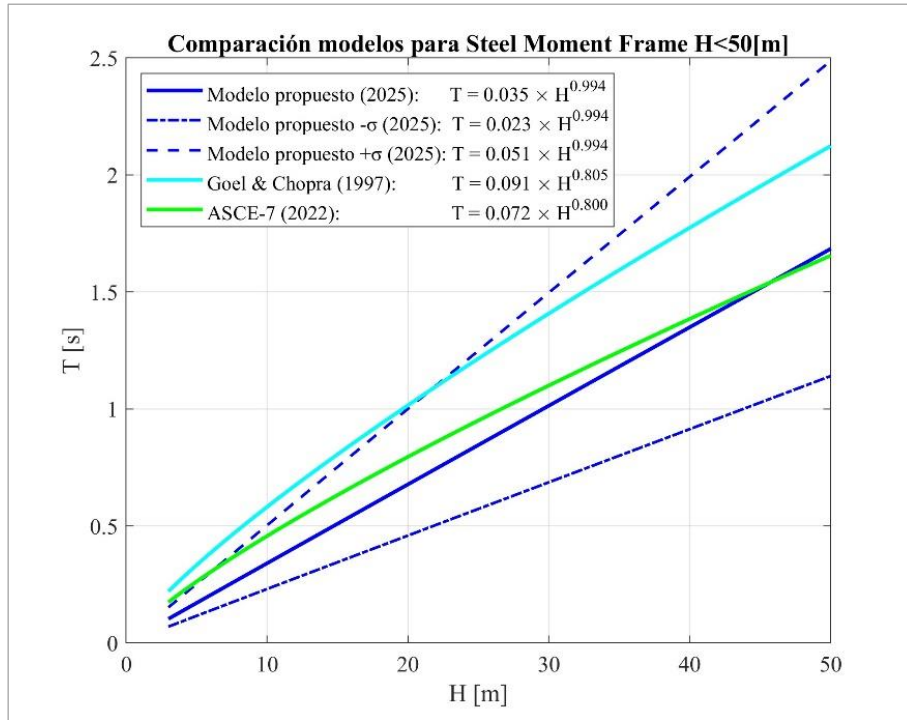


Figura 5.19. Comparación entre modelo propuesto y modelos normativos para estructuras tipo Steel Moment Frames, con altura máxima 50 metros.

Los espectros de diseño sísmico definidos en la normativa presentan aceleraciones espectrales más altas para periodos cortos, disminuyendo a medida que el periodo aumenta. Por ende al observar la Figura 5.19 se ve como el modelo de Goel y Chopra y la normativa ASCE-7 tienden a sobreestimar los periodos en comparación con el modelo propuesto en edificios de menor altura, esto sugiere un enfoque menos conservador en estas referencias. Esto implica que, al estimar periodos más cortos a menor altura, el modelo propuesto situaría a las estructuras en una zona del espectro sísmico con mayores aceleraciones, lo que se traduce en una mayor demanda sísmica en comparación con los modelos normativos.

6 Conclusiones

En esta memoria de título se realizó una evaluación estadística del periodo estructural de edificios instrumentados en California. A partir del análisis de 1253 registros de periodos (una base de datos considerablemente mayor a la utilizada por Goel y Chopra en su estudio de 1997) fue posible identificar con mayor fiabilidad las principales variables que influyen en la estimación del periodo. Entre estas destacan la altura, el material y el sistema lateral resistente de la estructura, obteniéndose un R marginal del 82%. Además se evidenció que la amplitud es un factor relevante en cuanto al periodo, obteniéndose un R marginal del 85%. Este aumento del 3% en la varianza fue atribuido al incorporar la razón de deriva de techo (PRDR), sin embargo el análisis estadístico realizado reveló que su efecto es bajo como para considerarse un regresor significativo en la ecuación final.

Se desarrolló una ecuación predictiva mediante un modelo lineal de efectos mixtos (LME) específico para cada combinación de material y sistema lateral resistente. Este modelo permitió capturar tanto la relación entre las variables estructurales y el periodo, como también la variabilidad entre edificios. Este modelo al incorporar efectos fijos y aleatorios permitió modelar adecuadamente la estructura jerárquica de los datos, considerando que un mismo edificio podría presentar múltiples registros sísmicos. Esto permitió separar la variabilidad atribuible a las características estructurales de la asociada a diferencias entre registros dentro de un mismo edificio, lo que resultó en estimaciones más precisas y representativas del periodo estructural.

Finalmente, la ecuación desarrollada para edificios de muros resistentes a momento fue comparada con modelos existentes en la literatura. En el caso de estructuras de concreto no se observaron diferencias significativas, sin embargo estructuras de acero se identificó una tendencia en la normativa a adoptar ecuaciones más conservadoras, las que podrían sobreestimar el periodo en ciertos casos, particularmente para edificios de menor altura.

7 Referencias

- ASCE. (2016). *Minimum design loads for buildings and other structures* (ASCE/SEI 7-16). American Society of Civil Engineers (ASCE).
- ASCE. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures : provisions*. American Society of Civil Engineers.
- Bertero, V. V, Bendimerad, F. M., & Shah, H. C. (1988). *Fundamental period of reinforced concrete moment-resisting frame structures*. <http://blume.stanford.edu>
- Center for Engineering Strong Motion Data. (2015, August 1). *Center for engineering strong motion data*. <http://strongmotioncenter.org>
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Pearson Education, Inc.
- Cruz, C., & Miranda, E. (2019). Reliability of damping ratios inferred from the seismic response of buildings. *Engineering Structures*, 184, 355–368. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.056>
- Cruz, C., & Miranda, E. (2021a). Damping ratios of the first mode for the seismic analysis of buildings. *Journal of Structural Engineering*, 147(1), 04020300. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002873](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002873)
- Cruz, C., & Miranda, E. (2021b). Insights into damping ratios in buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(3), 916–934.
- Espinoza, E. (2025). *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*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Fritz, W. P., Jones, N. P., Asce, M., Igusa, T., & Asce, A. M. (2009). Predictive models for the median and variability of building period and damping. *Journal of Structural Engineering*, 135(5), 576.
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1997). Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 123(11), 1454–1461.
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1998). Period formulas for concrete shear wall buildings. *Journal of Structural Engineering*, 124(4), 426–433.
- Haviland, R. (1976). *A study of the uncertainties in the fundamental translational periods and damping values for real buildings*.
- Heresi, P., & Miranda, E. (2022). Structure-to-structure damage correlation for scenario-based regional seismic risk assessment. *Structural Safety*, 95(November 2021), 102155.
- ICBO. (1988). *Uniform Building Code - Structural Engineering Design Provisions*. International Conference of Building Officials (ICBO).
- James, G. (Gareth M., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2014). *An introduction to statistical learning : with applications in R*. Springer.
- José C. Pinheiro, & Douglas M. Bates. (2000). Mixed-Effects Models in S and S-PLUS. In Springer. Springer.
- MathWorks. (2024). *MATLAB (version 24.1.0. R2024a)*. MathWorks Inc.
- Moore, H. (2007). *MATLAB® para ingenieros* (Primera). Pearson Education, Inc.
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133–142.
- Tanaka, T., Yoshizawa, S., Osawa, Y., & Morishita, T. (1969). Period and damping of vibration in actual buildings during earthquakes. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 47, 1073–1092.

Xiang, Y., Naeim, F., & Zareian, F. (2020). Evaluation of natural periods and modal damping ratios for seismic design of building structures. *Earthquake Spectra*, 36(2), 629–646.