

A new damping scaling factor for Chilean seismicity

J. Muñoz (1), J. de la Llera (1,2), S. Castro (1)

(1) *Research Center for Integrated Disaster Risk Management (CIGIDEN) ANID/FONDAP/1522A0005*

(2) *Pontifical Catholic University of Chile*

1. Resumen

La demanda sísmica se estima usualmente en los códigos de diseño a partir de un análisis modal espectral. Sin embargo, dado que los espectros de diseño solo se definen para un amortiguamiento $\xi = 5\%$, se requiere de información adicional para estimar la respuesta de modos con otros valores de amortiguamiento. La forma usual de hacerlo es mediante el uso de un Factor de Escalamiento de Respuesta por Amortiguamiento (FERA), el que indica cómo debe escalarse el espectro de diseño para distintos valores de amortiguamiento. El FERA es de crítica importancia cuando debe estimarse adecuadamente la respuesta de modos con alto amortiguamiento, como en el caso de estructuras con aislamiento sísmico. En este estudio, se emplea los datos más recientes de sismicidad chilena, y se concluye que la norma NCh2745 debe actualizar su FERA, porque solo entrega resultados adecuados para períodos de vibración en el rango $0.1 s \leq T \leq 1 s$. Por lo tanto, se propone un nuevo FERA, que consiste en una función del período de vibración y del amortiguamiento. Primero, se seleccionaron registros de aceleraciones de la base de datos sísmica SIBER-RISK, considerando magnitud del evento ($M_w \geq 7.0$), aceleración máxima del suelo ($PGA \geq 0.05g$), y distancia al epicentro ($R_e \leq 400 km$). Segundo, se calculó para cada registro considerado el espectro de respuesta RotD50 y el FERA, y se obtuvo luego un FERA mediano como curva objetivo para distintos tipos de suelo, usando como proxy el valor de V_{s30} . Tercero, el modelo propuesto se ajustó a los datos del FERA mediano objetivo con gran precisión ($R^2 > 0.99$). Por último, se comparó el modelo propuesto con la norma NCh2745 y se observaron diferencias importantes, por lo que se concluye que la norma debe ser actualizada.

Palabras clave: factor de modificación de respuesta por amortiguamiento, aislamiento sísmico, diseño

2. Abstract

Seismic demands are commonly estimated in design codes by means of a Response Spectrum Analysis. However, since the design spectrum is defined only for a damping ratio $\xi = 5\%$, additional information is required to estimate the response of modes with different dampings. This issue is usually addressed by defining a Damping Scaling Factor (DSF), which indicates how the design spectrum must be scaled for systems with a different damping ratio. The DSF is of critical importance when highly damped modes must be accurately considered, such as in the case of buildings with seismic isolation. In this study, the most recent Chilean ground motion data was evaluated, and it was concluded that the NCh2745 design code must update its DSF, because it only provides accurate values for periods in the range $0.1 s \leq T \leq 1 s$. Therefore, a new DSF is proposed, consisting of a function of the structural vibration period and damping ratio. First, an initial screening of the records available in the SIBER-RISK Chilean strong-motions seismic database was carried out, considering event magnitude ($M_w \geq 7.0$), peak ground acceleration ($PGA \geq 0.05g$), and epicentral distance $R_e \leq 400 km$. Second, a RotD50 spectra and a DSF was computed for each considered record, and a median target DSF was obtained for different soil types, using V_{s30} as a proxy. Third, the proposed model was fit to the target median DSF for each soil type with great accuracy ($R^2 > 0.99$). Finally, the proposed DSF was compared against the NCh2745 Chilean design code, and important differences were observed. Hence, it is concluded the the design code must be updated.

Keywords: damping scaling factor, seismic isolation, seismic design code

3. Introducción

3.1. Contexto general

Los códigos de diseño modernos suelen emplear Análisis Modal Espectral para estimar la demanda sísmica de las estructuras para diseñarlas (e.g., [1–3]). Esto requiere estimar las respuestas modales máximas de la estructura, y luego la respuesta física máxima a través de alguna regla de combinación modal (e.g., SRSS, CQC). Para cada modo, se estima la respuesta de pseudo aceleración a partir de un espectro de diseño de aceleración espectral en función del período de vibración, y luego este valor se utiliza para calcular otras respuestas de interés (e.g., deriva de entrepiso modal máxima). Los códigos de diseño típicamente contienen solo un espectro de diseño, válido para un oscilador de un grado de libertad (1 GDL) con amortiguamiento $\xi = 5\%$, sin embargo, dado que las respuestas de un sistema de 1 GDL dependen de dos parámetros—su período de vibración T y su fracción de amortiguamiento ξ —y no todos los modos tienen necesariamente el mismo amortiguamiento, se debería proveer de un espectro para diferentes valores de amortiguamiento. Una solución práctica a este problema es el uso de un Factor de Escalamiento de Respuesta por Amortiguamiento (FERA), que modula el espectro de diseño construido para $\xi = 5\%$ para obtener la demanda sísmica de un sistema de 1 GDL con otra fracción de amortiguamiento. Típicamente, el FERA se define como (e.g., [4,5]):

$$\eta(T, \xi) = \frac{S_d(T, \xi)}{S_a(T, \xi = 5\%)} = \frac{S_a(T, \xi)}{S_a(T, \xi = 5\%)} \quad (1)$$

Donde $S_d(T, \xi)$ y $S_a(T, \xi)$ son los espectros de desplazamiento y pseudo-aceleración, respectivamente, para un sistema de 1 GDL con período de vibración T y amortiguamiento ξ .

3.2. FERA en Chile y otros países

Diferentes expresiones han sido propuestas para el FERA en la literatura y en los códigos de diseño (e.g., [1,2,6,7]). En particular, la norma chilena NCh2745 para el diseño de estructuras con aislamiento sísmico [3] considera las siguientes expresiones¹:

$$\eta(T, \xi) = \frac{1}{B} = B_o - [B_o - 1] \exp(-a|\xi - 0.05|T) \quad (2)$$

$$B_o(\xi) = 2 \left(\frac{1 + \xi}{1 + 14.68\xi^{0.865}} \right) \quad (3)$$

, donde T es el período de vibración, ξ la fracción de amortiguamiento, y a es un parámetro que depende del tipo de suelo. Estas expresiones fueron obtenidas considerando la respuesta de nueve registros espectro-compatibles, y se ha observado que sobreestiman la reducción de la respuesta para algunas combinaciones de período T y amortiguamiento ξ , y por tanto deben ser actualizadas para incluir los datos sísmicos más recientes.

3.3. La base de datos sísmica SIBER-RISK

El proyecto SIBER-RISK generó una base de datos de uso público [8] con registros de aceleraciones del suelo procesados de forma consistente, obtenidos de RENADIC, del Centro Sismológico Nacional, y de COSMOS Virtual Data Center [9–11]. Más de 8,000 registros sísmicos triaxiales se encuentran disponibles, provenientes de más de 1,900 terremotos chilenos, junto con su metadata (e.g., ubicación del hipocentro, mecanismo de falla, ubicación y Vs30 de la estación sísmica). Todas las señales han sido procesadas con el mismo procedimiento, incluyendo un filtro pasabanda Butterworth de cuarto orden, detección automática de la llegada de onda P, y un nuevo algoritmo basado en rjMCMC para la corrección de la línea base. La base de datos contiene registros de eventos chilenos de gran magnitud, incluyendo los terremotos de Algarrobo 1985 ($M_w = 8.0$), Maule 2010 ($M_w =$

¹ En realidad, la norma NCh2745 define el factor $B = 1/\eta$. La notación fue levemente adaptada por consistencia con el resto del artículo

8.8), Pisagua 2014 ($M_w = 8.1$), e Illapel 2015 ($M_w = 8.3$), y se actualiza recurrentemente. Los registros sísmicos de la base de datos SIBER-RISK fueron considerados para este estudio para proponer un nuevo FERA para la norma chilena NCh2745.

4. Metodología

Se implementó un programa en Python 3 para calcular el nuevo FERA a partir de un conjunto de registros sísmicos obtenidos de SIBER-RISK. Primero, se filtró la base de datos, seleccionando solo eventos con magnitud $M_w \geq 7.0$, mientras que solo se consideraron aquellas estaciones con una distancia epicentral $R_e \leq 400$ km y una aceleración máxima $PGA \geq 0.05g$. Los registros también se clasificaron de acuerdo a su tipo de suelo en cuatro categorías: A ($V_{s30} > 900 \frac{m}{s}$), B ($900 \frac{m}{s} \geq V_{s30} > 500 \frac{m}{s}$), C ($500 \frac{m}{s} \geq V_{s30} > 350 \frac{m}{s}$), y D ($350 \frac{m}{s} \geq V_{s30} > 180 \frac{m}{s}$). Los registros con $V_{s30} < 180 \frac{m}{s}$ no fueron considerados, dato que se requiere de un espectro de sitio para su análisis, de acuerdo a la norma NCh2745. Después del filtrado inicial, un total de 146 registros cumplieron con los criterios anteriores y fueron considerados para los análisis, con 26 registros en suelo A, 53 en suelo B, 33 en suelo C, y 34 en suelo F. La Figura 3 resume la distribución de las principales propiedades de los registros considerados.

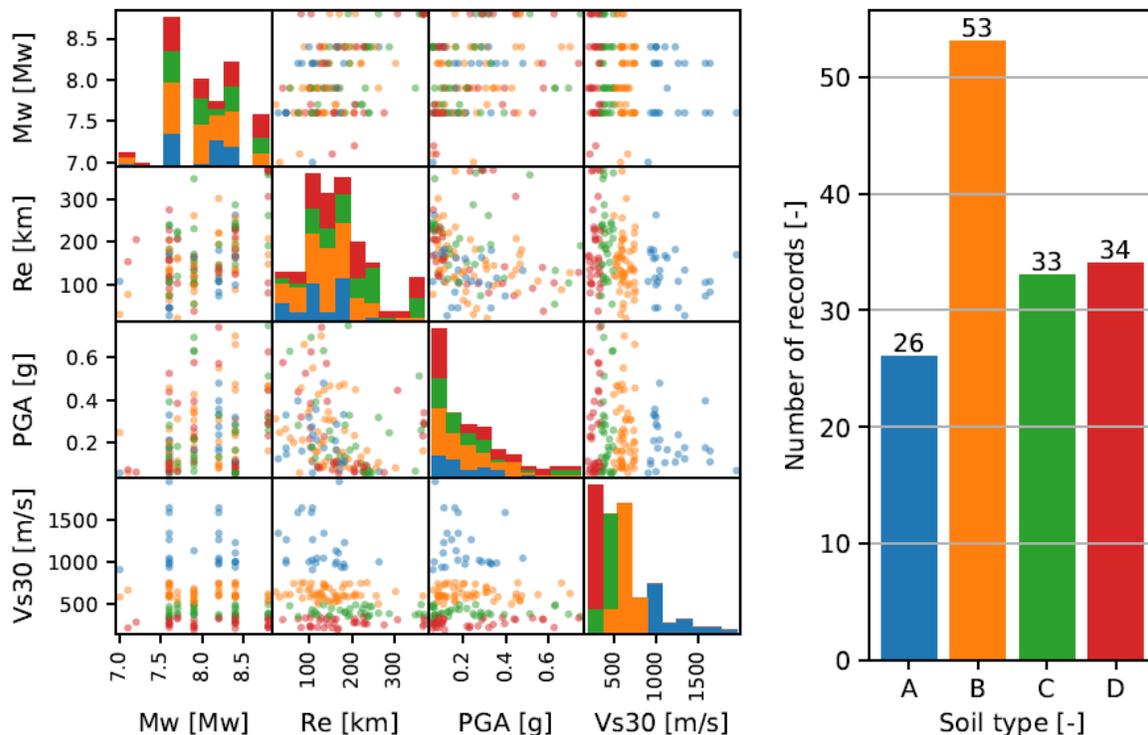


Figura 1: Izquierda: histogramas y gráficos de dispersión de las principales propiedades de los registros considerados, tales como magnitud M_w , distancia al epicentro R_e , aceleración máxima del suelo PGA , y velocidad promedio de onda de corte en los primeros 30 m del suelo V_{s30} . Derecha: número de registros sísmicos considerados por cada tipo de suelo. El código de colores es el mismo en ambos gráficos

EL código desarrollado en Python 3 sigue el algoritmo descrito a continuación:

1. Para cada registro, el espectro de respuesta RotD50 fue calculado con el método de Newmark con aceleración constante, considerando valores de amortiguamiento entre 2% y 50%.
2. Para cada registro, el FERA fue calculado para cada valor de amortiguamiento y período de vibración, de acuerdo a la Ec. (1).
3. Se calculó la mediana del FERA en cada período de vibración T , para cada valor de amortiguamiento ξ .

4. El modelo de FERA propuesto en la Ec. (4) se ajustó al FERA median—con y sin considerar el tipo de suelo—usando el paquete *symfit* de Python 3.

El siguiente modelo por tramos se propuso para el FERA:

$$\eta(T, \xi) = \begin{cases} 1 - \frac{a_1}{1 + e^{-a_2 T - a_3}} \ln \frac{\left(\frac{\xi}{0.05}\right)}{\xi^{c_1}} & , T \leq T_1 \\ 1 - \frac{b_1}{(1 + T)^{b_2}} \ln \frac{\left(\frac{\xi}{0.05}\right)}{\xi^{c_1}} & , T > T_1 \end{cases} \quad (4)$$

Como se puede apreciar en la Ec. (4), el modelo tiene 7 parámetros (i.e. $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, T_1$) que pueden ajustar para cada tipo de suelo. El paquete *symfit* de Python 3 se empleó para el ajuste, pues usa un algoritmo iterativo para ajustar cada una de las ramas, sujeto a restricciones definidas por el usuario, que en este caso correspondieron a forzar la continuidad de la función.

5. Resultados y análisis

Cuando el procedimiento descrito fue aplicado a los registros, sin considerar clasificación por el tipo de suelo, se obtuvieron los resultados de la Figura 2. El gráfico de la izquierda muestra el FERA $\eta(T, \xi)$ como una función del período de vibración T , para distintos valores de amortiguamiento ξ , mostrados con distintos colores. Las líneas segmentadas corresponden al FERA mediano calculado con los registros de SIBER-RISK, mientras que las líneas sólidas representan el modelo propuesto. Por otro lado, el gráfico de la derecha muestra el FERA obtenido del modelo contra el FERA mediano obtenido de los datos, junto con una función identidad para usar como referencia en la comparación. Se puede apreciar que el modelo propuesto se ajusta adecuadamente a los datos.

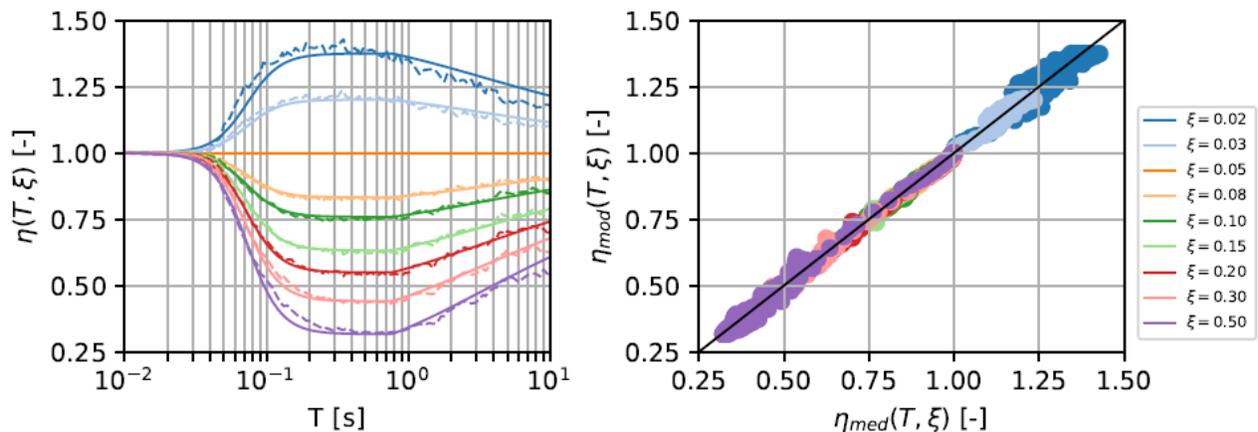


Figura 2: Izquierda: FERA mediano (línea segmentada) y el modelo propuesto (línea continua) como funciones del período. Derecha: predicciones de FERA del modelo propuesto contra los datos. Una función identidad se muestra para efectos de facilitar la comparación. Ambos gráficos se presentan para diferentes amortiguamientos y sin clasificación por tipo de suelo.

La Figura 3 muestra resultados análogos, cuando el modelo propuesto fue ajustado para cada tipo de suelo por separado. Se puede apreciar algunas diferencias entre estas curvas y las presentadas en la Figura 2.

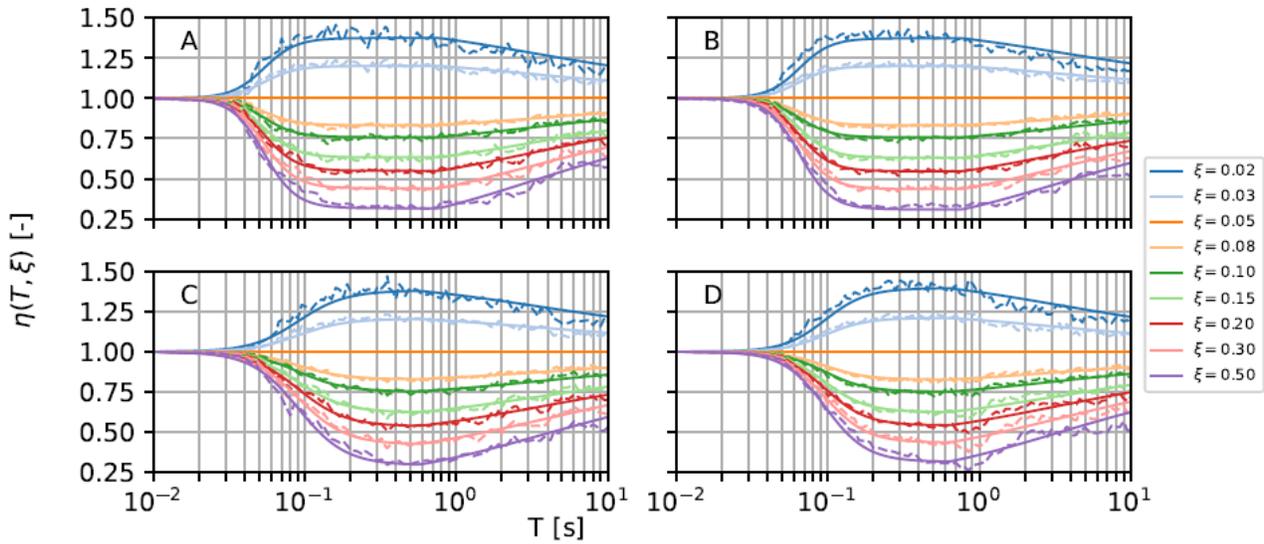


Figura 3: FERA mediano propuesto (líneas continuas) y calculado de los datos (líneas segmentadas) como función del período, para cada tipo de suelo (A, B, C y D), y diferentes amortiguamientos

Por último, la Tabla 1 resume los parámetros óptimos ajustados para el modelo propuesto. El FERA fue solo ajustado para valores de período de vibración $T \geq T_0 = 0.02 \text{ s}$, y se asumió un valor $\eta = 1$ para períodos menores, dado que se apreció una variabilidad despreciable para todos los valores de amortiguamiento desde ese punto. Nótese que cada fila de la Tabla 1 contiene la lista de parámetros del modelo FERA. La primera fila corresponde al modelo sin clasificación por tipo de suelo, mientras que las demás filas corresponden al ajuste por tipo de suelo. La última columna muestra que el ajuste fue adecuado en todos los casos, con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.99$.

Tabla 1: Parámetros del modelo FERA para distintos tipos de suelo

Soil	T_1	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	c_1	R^2
All	0.7678	0.2769	9.6260	3.6780	0.3291	0.3030	0.0998	0.9955
A	0.7686	0.2773	11.9396	4.0821	0.3352	0.3327	0.0994	0.9929
B	0.7718	0.2812	11.3777	4.1580	0.3334	0.2978	0.0947	0.9936
C	0.5725	0.2871	6.6817	2.7799	0.3240	0.2804	0.0944	0.9927
D	0.6385	0.2741	7.4066	3.1590	0.3192	0.3136	0.1161	0.9906

Con el objetivo de ilustrar mejor el efecto del tipo de suelo en las curvas de FERA, la Figura 4 compara las curvas mostradas de la Figura 3 para el modelo propuesto, al graficar en una misma figura las curvas correspondientes a distintos tipos de suelo. Se puede apreciar que la diferencia entre tipos de suelo es más significativa para amortiguamientos altos y períodos cortos.

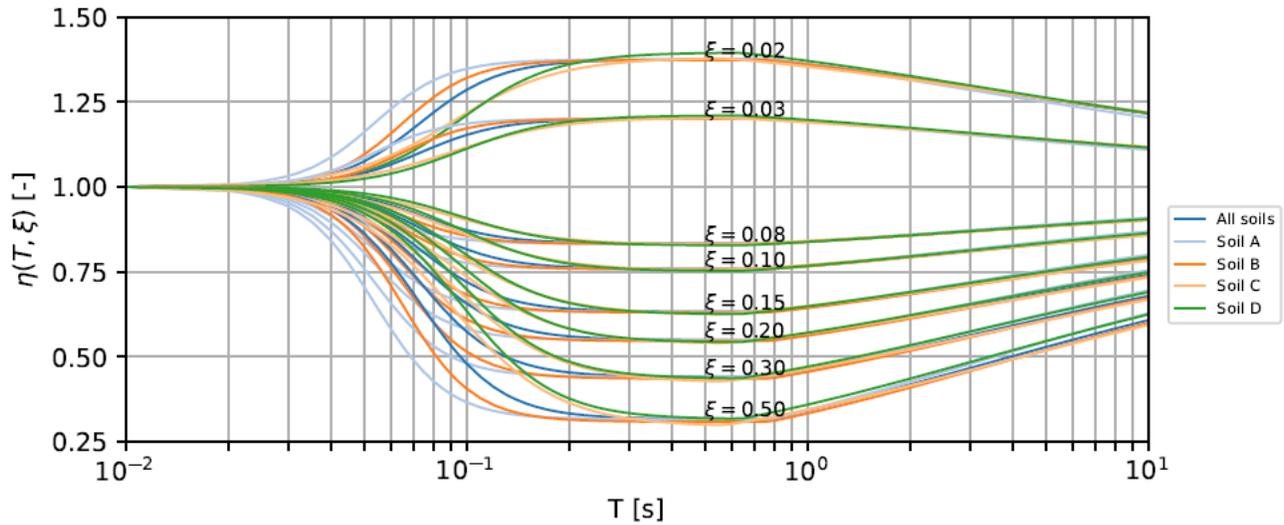


Figura 4: Comparación del modelo de FERA propuesto, para distintos tipos de suelo

Para facilitar la comparación de los resultados previos, la Figura 5 ilustra la variable $\varepsilon(T, \xi) = \frac{\eta_{soil}(T, \xi)}{\eta_{all}(T, \xi)}$ para distintos valores de amortiguamiento. Esta variable se define como la razón entre el FERA de un tipo de suelo ($\eta_{soil}(T, \xi)$), y el FERA obtenido sin clasificar por tipo de suelo ($\eta_{all}(T, \xi)$). Un valor de $\varepsilon(T, \xi) = 1$ indica que la curva de FERA obtenida sin filtrar por tipo de suelo se puede usar con precisión, sin importar el tipo de suelo, para esa combinación de período y amortiguamiento. Por otro lado, un valor $\varepsilon(T, \xi) > 1$ significa que usar $\eta_{all}(T, \xi)$ sobrestima el escalamiento de la respuesta, mientras que un valor $\varepsilon(T, \xi) < 1$ corresponde a una subestimación de $\eta_{soil}(T, \xi)$. Como se puede observar en la Figura 5, la magnitud y signo del error de usar $\eta_{all}(T, \xi)$ depende del amortiguamiento, tipo de suelo y período de vibración. Los resultados sugieren que $\eta_{soil}(T, \xi)$ debe ser usado en lugar de $\eta_{all}(T, \xi)$ —i.e., se prefiere una curva FERA específica para cada tipo de suelo.

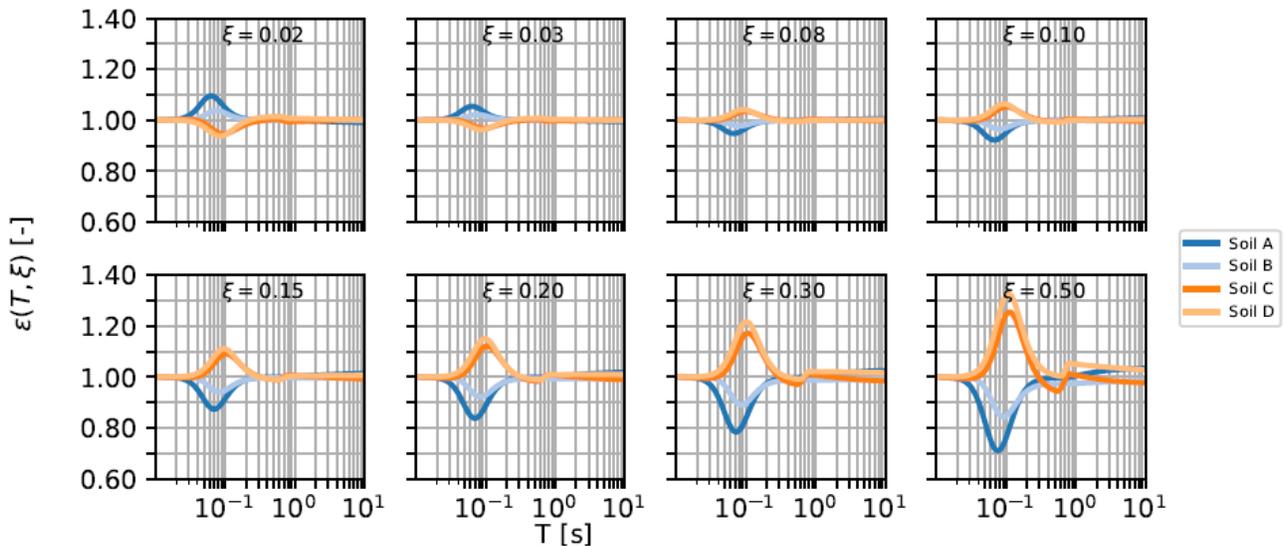


Figura 5: Comparación del modelo propuesto con y sin filtrar por tipo de suelo, usando la variable $\varepsilon(T, \xi) = \frac{\eta_{soil}(T, \xi)}{\eta_{all}(T, \xi)}$, para distintos valores de amortiguamiento

5.1. Comparación con la norma NCh2745 y otros códigos de diseño

El modelo propuesto se comparó contra el FERA definido en la norma chilena NCh2745, y con otros códigos de diseño. Como se puede observar en la Figura 6, para el caso de amortiguamientos $\xi > 0.05$, la norma NCh2745 es adecuada para períodos en el rango $0.1 \text{ s} \leq T \leq 1 \text{ s}$, mientras que para otros períodos tiende a sobreestimar la reducción de la respuesta (i.e., entrega un menor valor de η). Para el caso de amortiguamientos $\xi < 0.05$, la norma NCh2745 sobreestima la amplificación (i.e., entrega un mayor valor de η). Con esto en consideración, es clara la necesidad de actualizar la norma NCh2745. Nótese que la Figura 6 solo ilustra la situación descrita para un suelo tipo B, sin embargo, esta tendencia se observó para todos los tipos de suelo.

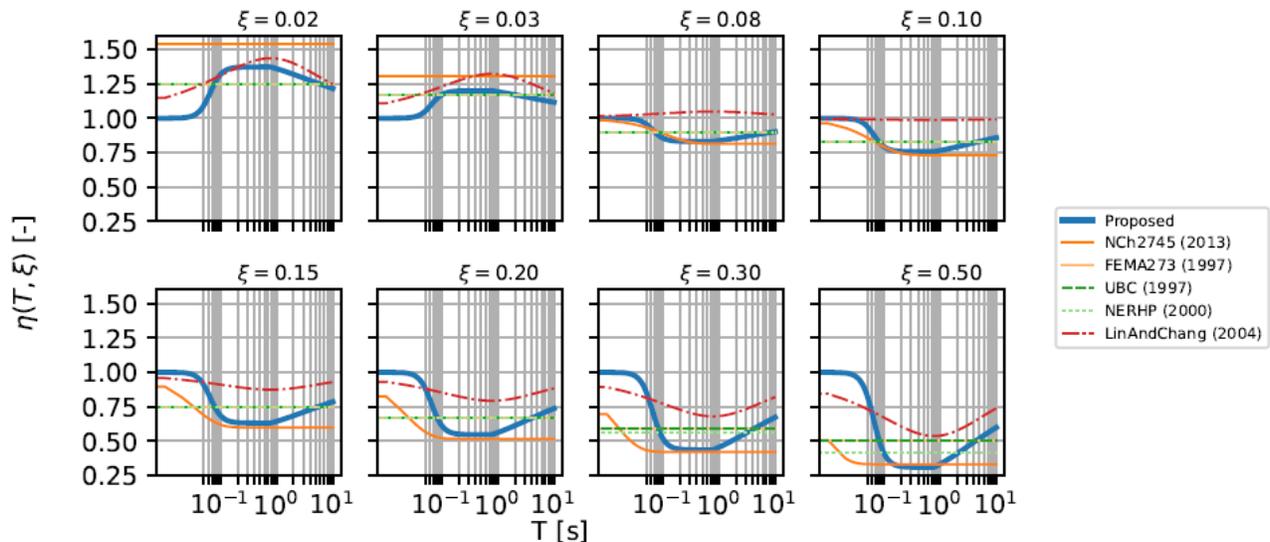


Figura 6: Comparación del modelo propuesto (azul) con la norma NCh2745 (naranja), y otros códigos de diseño, para suelo tipo B y distintos valores de amortiguamiento

6. Conclusiones

Se ha propuesto un nuevo factor de escalamiento de respuesta por amortiguamiento para la norma chilena NCh2745, basado en registros de aceleraciones compilados en la base de datos sísmica SIBER-RISK. Un total de 146 acelerogramas fueron considerados, después de filtrar los registros disponibles por magnitud del evento ($M_w \geq 7.0$), aceleración máxima del suelo ($PGA \geq 0.05g$), y distancia al epicentro ($R_e \leq 400 \text{ km}$). Se calculó el espectro de respuesta RotD50 de cada registro, y se obtuvo el espectro mediano para los cálculos. Posteriormente, se ajustó un modelo con dos ramas a los datos anteriores, con y sin clasificar los registros por tipo de suelo, obteniéndose un buen ajuste en todos los casos, con un coeficiente de determinación $R^2 > 0.99$. Tras analizar los resultados, se concluye que debe emplearse un modelo específico por cada tipo de suelo, dado que un modelo general presenta errores importantes para ciertas combinaciones de tipo de suelo, período y amortiguamiento. Por último, el modelo propuesto se comparó con la norma chilena NCh2745 y se concluyó que es necesario actualizarla, puesto que el factor de escalamiento actual solo es adecuado para el rango de períodos $0.1 \text{ s} \leq T \leq 1 \text{ s}$, mientras que fuera de ese rango, la norma NCh2745 tiende a sobreestimar la reducción ($\xi > 0.05$), o subestimar la amplificación ($\xi < 0.05$), dependiendo del amortiguamiento.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), que financió los proyectos FONDECYT 1170836 “SIBER-RISK: Simulation Based Earthquake Risk and Resilience of Interdependent Systems and Networks”, y FONDECYT 1220292 “Multiscale earthquake risk mitigation of healthcare networks using seismic isolation”. Del mismo modo, agradecemos a las instituciones que participaron y contribuyeron a este proyecto, especialmente al Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) ANID/FONDAP/1522A0005.

8. Referencias

- [1] American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. 7th ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2017. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>.
- [2] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings. 2004.
- [3] Instituto Nacional de Normalización. Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. 2013.
- [4] Miranda S, Miranda E, Carlos de la Llera J. The effect of spectral shape on damping modification factors. *Earthquake Spectra* 2020;36:2086–111. <https://doi.org/10.1177/8755293020936691>.
- [5] Surana M, Singh Y, Lang DH. Damping Modification Factors Observed from the Indian Strong-motion Database. *Journal of Earthquake Engineering* 2021;25:2758–73. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1643809>.
- [6] American Association of Civil Engineers. PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS. 2000.
- [7] Lin Y-Y, Chang K-C. Effects of Site Classes on Damping Reduction Factors. *J Struct Eng* 2004;130:1667–75. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:11\(1667\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1667)).
- [8] Castro S, Benavente R, Crempien JGF, Candia G, de la Llera JC. A Consistently Processed Strong-Motion Database for Chilean Earthquakes. *Seismological Research Letters* 2022. <https://doi.org/10.1785/0220200336>.
- [9] RENADIC. Registros de Terremotos Convenio Universidad de Chile - ONEMI 2012. <http://terremotos.ing.uchile.cl/>.
- [10] Barrientos S, National Seismological Center (CSN) Team. The Seismic Network of Chile. *Seismological Research Letters* 2018;89:467–74. <https://doi.org/10.1785/0220160195>.
- [11] Archuleta RJ, Steidl J, Squibb M. The COSMOS Virtual Data Center: A Web Portal for Strong Motion Data Dissemination. *Seismological Research Letters* 2006;77:651–8. <https://doi.org/10.1785/gssrl.77.6.651>.