

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

EVALUACIÓN DE SIMULTANEIDAD DE ACCIONES SÍSMICAS PARA  
DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON AISLACIÓN SÍSMICA EN ZONAS  
DE SUBDUCCIÓN

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Magíster en Estructuras Civiles Sismorresistentes**

Presentado por:

Rosa Cecilia Jiménez Ruíz

José Alexander Carreño Loor

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2026

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico de manera especial a mi madre, quien ha sido mi pilar fundamental, brindándome su amor incondicional, fuerza y apoyo constante en cada etapa de mi vida.

A quienes me acompañaron en el camino hacia la culminación de este sueño profesional.

**Rosa Cecilia Jiménez Ruíz**

Dedico este trabajo a mi familia, por su respaldo incondicional y confianza permanente.

A quienes creyeron en mí y estuvieron presentes en cada esfuerzo, brindándome ánimo y comprensión en los momentos más exigentes, este logro también les pertenece.

**José Alexander Carreño Loor**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y a la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra por la formación recibida.

Un agradecimiento profundo al Ph.D. Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra, profesor tutor de este trabajo, por su invaluable guía, su tiempo y por compartir su vasta experiencia en el campo de la aislación sísmica, elementos que fueron determinantes para el desarrollo de esta investigación.

**Rosa Cecilia Jiménez Ruíz**

Agradezco de manera especial a Dios por brindarme salud, fortaleza y claridad para culminar esta etapa académica.

Mi sincero agradecimiento al tutor, Ph.D. Rodrigo Retamales, por su guía técnica, criterio profesional y acompañamiento constante durante el desarrollo de esta investigación.

A la ESPOL y a los docentes de la maestría, por los conocimientos impartidos y el rigor académico que fortalecieron mi formación profesional.

**José Alexander Carreño Loor**

# DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Rosa Cecilia Jiménez Ruíz y José Alexander Carreño Loor damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Firmado electrónicamente por:  
**ROSA CECILIA  
JIMENEZ RUIZ**  
Validar únicamente con FirmaEC

.....

**Rosa Cecilia Jiménez Ruíz**



Firmado electrónicamente por:  
**JOSE ALEXANDER  
CARRENO LOOR**  
Validar únicamente con FirmaEC

.....

**José Alexander Carreño Loor**

# EVALUADORES



Samantha Elizabeth  
Hidalgo Astudillo



Validar únicamente en FirmaEC.  
Firmado electrónicamente por:  
NADIA ROSAURA  
QUIJANO ARTEAGA

---

**Hidalgo Astudillo Samantha Elizabeth, MS.c**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Nadia Rosaura Quijano Arteaga, MS.c**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra, Ph.D**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La presente investigación evalúa el impacto de la simultaneidad de las componentes sísmicas (X, Y, Z) en el diseño de estructuras con aislación sísmica en zonas de subducción. El objetivo principal es cuantificar la subestimación de demandas de diseño que producen los métodos simplificados (100/30, SRSS) frente a un análisis tridireccional realista. Se justifica ante la necesidad de garantizar la estabilidad de infraestructuras críticas contra fenómenos de levantamiento y desplazamientos excesivos. Para el desarrollo, se seleccionó una muestra de 53 registros acelerográficos de eventos de subducción de la base PEER NGA. Se ejecutaron análisis dinámicos no lineales de respuesta en el tiempo (NLTHA) utilizando un modelo constitutivo de Bouc-Wen para representar el comportamiento del aislador. Los algoritmos se integraron numéricamente mediante el método de Newmark-beta, considerando normativas como ASCE/SEI 7-22. Los resultados indicaron que la simultaneidad horizontal promedio es del 41%, valor que asciende al 50% en el percentil 84, superando el 30% prescrito por la práctica convencional. Además, se verificó que la componente vertical altera significativamente las fuerzas axiales, incrementando el riesgo de tracción alcanzando participaciones en el rango de 11% a 28%. Se concluye que los métodos simplificados subestiman sistemáticamente las demandas críticas de diseño. Por lo tanto, se recomienda el uso de análisis tridireccionales simultáneos para asegurar la resiliencia y operatividad de estructuras aisladas en escenarios de subducción.

**Palabras Clave:** Aislación Sísmica, Simultaneidad, Subducción, NLTHA.

## **ABSTRACT**

*This research evaluates the impact of the simultaneity of seismic components (X, Y, Z) on the design of structures with seismic isolation in subduction zones. The main objective is to quantify the underestimation of design demands produced by simplified methods (100/30, SRSS) compared to a realistic three-dimensional analysis. This study is justified by the need to guarantee the stability of critical infrastructure against uplift phenomena and excessive displacements. For the development, a sample of 53 acceleration records from subduction events was selected from the PEER NGA database. Nonlinear time history analyses (NLTHA) were performed using a Bouc-Wen constitutive model to represent the behavior of the isolator. The algorithms were numerically integrated using the Newmark-beta method, considering standards such as ASCE/SEI 7-22. The results indicated that the average horizontal simultaneity is 41%, a value that rises to 50% at the 84th percentile, exceeding the 30% prescribed by conventional practice. Furthermore, it was verified that the vertical component significantly alters axial forces, increasing the risk of tension and reaching participation levels in the 11% to 28% range. It is concluded that simplified methods systematically underestimate critical design demands. Therefore, the use of simultaneous three-dimensional analyses is recommended to ensure the resilience and operability of isolated structures in subduction scenarios.*

**Keywords:** *Seismic Isolation, Simultaneity, Subduction, NLTHA.*

# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
CAPÍTULO 1 .....	13
Introducción.....	13
1.1    Introducción del proyecto de graduación .....	13
1.2    Antecedentes .....	15
1.3    Problemática a resolver .....	16
1.4    Justificación.....	18
1.5    Objetivos .....	18
1.5.1    Objetivo General .....	18
1.5.2    Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO 2 .....	20
Desarrollo del proyecto.....	20
2.1    Marco conceptual .....	20
2.1.1    Fundamentos de la Aislación Sísmica y Modificación de la Demanda ..	20
2.1.2    Comportamiento No Lineal y Acoplamiento Biaxial de los Aisladores ...	21
2.1.3    Naturaleza Multidireccional y Estocástica de la Acción Sísmica .....	23
2.1.4    Métodos de Combinación de Cargas y sus Limitaciones .....	24
2.1.5    Fenómenos Críticos de Inestabilidad: Levantamiento (Uplift).....	25

2.1.6	Análisis No Lineal de Respuesta en el Tiempo (NLTHA) y Escalamiento.....	26
2.1.7	Importancia de la Componente Vertical del Sismo en Aislación Sísmica.....	27
2.1.8	Componente Vertical del Sismo en Normativas Aplicables a Sistemas Aislados.....	28
2.2	Marco metodológico .....	31
2.2.1	Diseño de la investigación.....	31
2.2.2	Tipo y nivel de investigación .....	31
2.2.3	Población y muestra.....	32
2.2.4	Instrumentos de recopilación de datos .....	32
2.2.5	Procedimiento de recolección de datos.....	32
2.2.6	Limitaciones y delimitaciones.....	34
2.2.7	Enfoque metodológico adoptado.....	34
CAPÍTULO 3 .....		35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		35
3.1	Caracterización Espectral de Registros Sísmicos mediante FFT.....	35
3.2	Evaluación de la respuesta bidireccional y determinación del factor de combinación espectral crítico. ....	44
3.2.1	Modelo Numérico Constitutivo (Bouc-Wen).....	44
3.2.2	Integración Numérica (Método de Newmark- $\beta$ ).....	44
3.3	Simultaneidad de las Componente Horizontales .....	48
3.3.1	Evaluación de la Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos.....	49
3.3.2	Evaluación de la Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones.....	60
3.4	Simultaneidad de la Componente Vertical ( $R_1$ ).....	70
3.5	Análisis de Curvas ADRS .....	93

CAPÍTULO 4 .....	98
Conclusiones Y Recomendaciones .....	98
Conclusiones.....	98
Recomendaciones.....	100
BIBLIOGRAFÍA .....	104

## ABREVIATURAS

ASCE/SEI	American Society of Civil Engineers / Structural Engineering Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CQC	Complete Quadratic Combination
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FPS	Friction Pendulum System
LRB	Lead Rubber Bearings
NIST	National Institute of Standards and Technology
PEER NGA	Pacific Earthquake Engineering Research Center Next Generation Attenuation
SRSS	Square-Root-of-Sum-of-Squares

## SIMBOLOGÍA

cm	Centímetros
Km	Kilómetros
s	Segundos
g	Gravedad

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Aisladores sísmicos y su aplicación (IAP, 2025).....	20
Figura 2.2 Aislador LRB y sus componentes (Grupo Grasa, 2020).....	22
Figura 2.3 Aislador FPS y sus componentes (TIS, 2026).....	22
Figura 2.4 a) Respuesta sísmica bidireccional, b) y c) Respuesta sísmica unidireccional (Valdés & Ordaz, 2008).....	24
Figura 2.5 Simulación de ondas sísmicas ( <i>Red Sísmica</i> , 2021).....	27
Figura 3.1 Acelerograma de la componente horizontal Este. Evento RSN 3001102.	38
Figura 3.2 Espectro de Fourier de la componente horizontal Este. Evento RSN 3001102. ....	39
Figura 3.3 Acelerograma de la componente horizontal Norte. Evento RSN 3001102. ....	39
Figura 3.4 Espectro de Fourier de la componente horizontal Norte. Evento RSN 3001102. ....	39
Figura 3.5 Acelerograma de la componente Vertical. Evento RSN 3001102. ....	40
Figura 3.6 Espectro de Fourier de la componente Vertical. Evento RSN 3001102. ..	40
Figura 3.7 Espectros de respuesta de aceleración ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Este de los registros seleccionados. ....	41
Figura 3.8 Espectros de respuesta de aceleración ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Norte de los registros seleccionados. ....	41
Figura 3.9 Espectros de respuesta de aceleración ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente Vertical de los registros seleccionados. ....	42
Figura 3.10 Espectros de respuesta de desplazamiento ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Este de los registros seleccionados. ....	42
Figura 3.11 Espectros de respuesta de desplazamiento ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Norte de los registros seleccionados. ....	43
Figura 3.12 Espectros de respuesta de desplazamiento ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente vertical de los registros seleccionados.....	43
Figura 3.13 Trayectoria de respuesta no lineal del aislador. Evento 6002693. ....	45
Figura 3.14 Historia de desplazamiento relativo del aislador. Evento 6002693.....	46
Figura 3.15 Historia de aceleraciones absolutas del aislador. Evento 6002693.....	47

Figura 3.16 Comportamiento histerético del aislador por componente sísmica Este. Evento 6002693. ....	48
Figura 3.17 Comportamiento histerético del aislador por componente sísmica Norte. Evento 6002693. ....	48
Figura 3.18 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos $\lambda_1$ .....	50
Figura 3.19 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos $\lambda_2$ .....	52
Figura 3.20 Simultaneidad Direccional Promedio de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos $\lambda_1 + \lambda_2$ .....	54
Figura 3.21 Simultaneidad Direccional Promedio (Percentil 84) de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos $\mu + \sigma$ .....	55
Figura 3.22 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones $\lambda_3$ .....	61
Figura 3.23 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones $\lambda_4$ .....	62
Figura 3.24 Simultaneidad Direccional Promedio de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones. ....	64
Figura 3.25 Simultaneidad Direccional Promedio (Percentil 84) de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones $\mu + \sigma$ .....	65
Figura 3.26 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para $T_v = 0.08s$ y $\xi_v = 1.0\%$ .....	72
Figura 3.27 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para $T_v = 0.10s$ y $\xi_v = 1.0\%$ .....	73
Figura 3.28 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para $T_v = 0.12s$ y $\xi_v = 1.0\%$ .....	74
Figura 3.29 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para $T_v = 0.08s$ y $\xi_v = 2.5\%$ .....	75
Figura 3.30 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para $T_v = 0.10s$ y $\xi_v = 2.5\%$ .....	76
Figura 3.31 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para $T_v = 0.12s$ y $\xi_v = 2.5\%$ .....	77

Figura 3.32 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R1 = V/H$ ) para $Tv = 0.08s$ y $\xi v = 5\%$ .....	78
Figura 3.33 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R1 = V/H$ ) para $Tv = 0.10s$ y $\xi v = 5\%$ .....	79
Figura 3.34 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R1 = V/H$ ) para $Tv = 0.12s$ y $\xi v = 5\%$ .....	80
Figura 3.35 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.08s$ y $\xi v = 1\%$ .....	82
Figura 3.36 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.10s$ y $\xi v = 1\%$ .....	82
Figura 3.37 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.12s$ y $\xi v = 1.00\%$ .....	83
Figura 3.38 Comparativa densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales $\xi v = 1.00\%$ .....	83
Figura 3.39 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.08s$ y $\xi v = 2.50\%$ .....	84
Figura 3.40 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.10s$ y $\xi v = 2.50\%$ .....	84
Figura 3.41 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.12s$ y $\xi v = 2.50\%$ .....	85
Figura 3.42 Comparativa densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales $\xi v = 2.50\%$ .....	85
Figura 3.43 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.08s$ y $\xi v = 5.00\%$ .....	86
Figura 3.44 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.10s$ y $\xi v = 5.00\%$ .....	86
Figura 3.45 Distribución de frecuencias para $Tv = 0.12s$ y $\xi v = 5.00\%$ .....	87
Figura 3.46 Comparativa densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales $\xi v = 5.00\%$ .....	87
Figura 3.47 Comparativa densidad de probabilidad absolutas para aceleraciones absolutas verticales .....	88
Figura 3.48 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $Tv = 0.08s$ y $\xi v = 1.00\%$ .....	89
Figura 3.49 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $Tv = 0.10s$ y $\xi v = 1.00\%$ .....	89
Figura 3.50 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $Tv = 0.12s$ y $\xi v = 1.00\%$ .....	90
Figura 3.51 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $Tv = 0.08s$ y $\xi v = 2.50\%$ .....	90

Figura 3.52 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $T_v = 0.10s$ y $\xi_v = 2.50\%$ .....	91
Figura 3.53 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $T_v = 0.12s$ y $\xi_v = 2.50\%$ .....	91
Figura 3.54 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $T_v = 0.08s$ y $\xi_v = 5.00\%$ .....	92
Figura 3.55 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $T_v = 0.10s$ y $\xi_v = 5.00\%$ .....	92
Figura 3.56 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para $T_v = 0.12s$ y $\xi_v = 5.00\%$ .....	93
Figura 3.57 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.08s$ y $\zeta = 1.00\%$ .....	94
Figura 3.58 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.10s$ y $\zeta = 1.00\%$ .....	95
Figura 3.59 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.12s$ y $\zeta = 1.00\%$ .....	95
Figura 3.60 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.08s$ y $\zeta = 2.50\%$ .....	95
Figura 3.61 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.10s$ y $\zeta = 2.50\%$ .....	96
Figura 3.62 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.12s$ y $\zeta = 2.50\%$ .....	96
Figura 3.63 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.08s$ y $\zeta = 5.00\%$ .....	96
Figura 3.64 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.10s$ y $\zeta = 5.00\%$ .....	97
Figura 3.65 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente, $T_v = 0.12s$ y $\zeta = 5.00\%$ .....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Registros sísmicos seleccionados. ....	36
Tabla 3.2 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos ( $\lambda_1$ ) para $\xi v = 1.0\%$ .....	56
Tabla 3.3 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos ( $\lambda_2$ ) para $\xi v = 1.0\%$ .....	57
Tabla 3.4 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos ( $\lambda_1$ ) para $\xi v = 2.5\%$ .....	57
Tabla 3.5 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos ( $\lambda_2$ ) para $\xi v = 2.5\%$ .....	57
Tabla 3.6 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos ( $\lambda_1$ ) para $\xi v = 5.0\%$ .....	58
Tabla 3.7 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos ( $\lambda_2$ ) para $\xi v = 5.0\%$ .....	58
Tabla 3.8 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones ( $\lambda_3$ ) para $\xi v = 1.0\%$ .....	67
Tabla 3.9 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones ( $\lambda_4$ ) para $\xi v = 1.0\%$ .....	67
Tabla 3.10 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones ( $\lambda_3$ ) para $\xi v = 2.5\%$ .....	67
Tabla 3.11 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones ( $\lambda_4$ ) para $\xi v = 2.5\%$ .....	68
Tabla 3.12 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones ( $\lambda_3$ ) para $\xi v = 5.0\%$ .....	68
Tabla 3.13 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones ( $\lambda_4$ ) para $\xi v = 5.0\%$ .....	68
Tabla 3.14 Valores Promedios de la Relación Espectral Vertical a Horizontal ( <b>R1</b> )..	80
Tabla 3.15 Valores de Percentil 84 de la Relación Espectral Vertical a Horizontal ( <b>R1</b> ) .....	81

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción del proyecto de graduación

La ingeniería sísmica moderna busca proteger no solo la vida de los ocupantes, sino también la funcionalidad de las estructuras y sus contenidos tras un evento severo. En este contexto, la aislación sísmica se ha consolidado como una de las estrategias de diseño más eficaces y avanzadas, permitiendo desacoplar la superestructura de los movimientos del terreno y reduciendo drásticamente las demandas de ductilidad y las aceleraciones internas (Al-Janabi et al., 2025).

A pesar de su efectividad, el diseño de sistemas de aislación presenta desafíos únicos en la definición de la demanda sísmica: la práctica habitual influenciada por normativas como la American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 7) suele simplificar la acción sísmica tratando las componentes horizontales combinando sus máximos mediante reglas empíricas del 100 % + 30 % o la Square Root of the Sum of the Squares (SRSS), criterios que fueron desarrollados fundamentalmente para estructuras con base fija y períodos predominantes cortos y cuya validez frente a configuraciones especiales ha sido cuestionada (Karaferis & Vamvatsikos, 2021).

La regla de combinación direccional, comúnmente conocida como el método del 100% + 30%, se fundamenta en el procedimiento aproximado desarrollado por Rosenblueth et al. (1977) para estimar la respuesta estructural ante la acción simultánea de múltiples componentes sísmicas. Basándose en la premisa estocástica de que las aceleraciones del terreno actúan como procesos Gaussianos independientes y de media cero, los autores establecieron que la respuesta exacta de una estructura lineal define un elipsoide en el espacio de estados.

Por otro lado, el método SRSS, se define como un procedimiento probabilista para estimar la respuesta dinámica máxima probable de una estructura lineal sujeta a excitaciones sísmicas, partiendo de la premisa de que las

componentes del movimiento sísmico (o las respuestas modales de la estructura) pueden modelarse como procesos aleatorios gaussianos estacionarios de media cero. Bajo esta concepción, si las variables aleatorias que contribuyen a la respuesta total son estadísticamente independientes (es decir, su coeficiente de correlación es nulo), la varianza de la respuesta combinada es igual a la suma de las varianzas individuales (Valdés González & Ordaz Schroeder, 2008).

Sin embargo, estas aproximaciones probabilistas presentan limitaciones cuando se aplican a movimientos sísmicos reales, donde la intensidad no se distribuye uniformemente. Valdés y Ordaz (2008), señalan que la presunción de independencia estadística puede enmascarar la verdadera demanda máxima que experimentaría el sistema de aislamiento si el sismo incidiera en su ángulo más desfavorable.

Por otra parte, la componente vertical del movimiento sísmico puede adquirir importancia significativa cuando la configuración estructural o las demandas funcionales lo requieren, siendo indispensable considerarla en losas de grandes luces, forjados que soportan equipos sensibles, instalaciones industriales con maquinaria pesada, voladizos extensos y otros sistemas donde la flexión combinada y las variaciones axiales alternantes se intensifican. Además, en estructuras con aislación sísmica, esta componente puede modificar las cargas axiales sobre los aisladores, alterar su comportamiento no lineal, influir en la capacidad de desplazamiento y cambiar las fuerzas transmitidas a la superestructura (ASCE/SEI 7, 2022).

En todos estos casos, omitir la componente vertical puede llevar a una subestimación de las demandas locales y globales, comprometiendo la evaluación del desempeño estructural y la confiabilidad del diseño. Sin embargo, la efectividad de un sistema de aislación depende directamente de la precisión con la que se predicen las demandas de diseño durante el análisis. Un diseño inadecuado no solo anula los beneficios de la aislación, sino que puede introducir nuevos modos de falla (Nakazawa et al., 2011).

El presente trabajo de investigación aborda un aspecto fundamental de dicha precisión analítica: la evaluación de la simultaneidad de las acciones sísmicas. Históricamente, el análisis ha simplificado la acción del terremoto en componentes ortogonales combinadas. Este trabajo investiga si esta simplificación sigue siendo válida para sistemas de aislación sísmica altamente no lineales.

El propósito de esta investigación es cuantificar la diferencia entre los métodos de diseño simplificados y un análisis más realista. El alcance se centra en determinar si las prácticas actuales subestiman demandas críticas específicamente el desplazamiento vectorial y las fuerzas de levantamiento, con el fin de proponer recomendaciones que incrementen la seguridad y fiabilidad de estas estructuras avanzadas.

## **1.2 Antecedentes**

La aislación sísmica es una técnica avanzada y eficaz para la protección de estructuras, que permite desacoplar la superestructura de los movimientos del terreno. Históricamente, la práctica de diseño ha simplificado el análisis de la demanda sísmica, combinando los efectos de las componentes horizontales (X e Y) mediante reglas simplificadas, como la regla del 100%+30% o SRSS, métodos que son reconocidos en normativas de amplio uso por la profesión (ASCE/SEI 7, 2022).

Sin embargo, la aislación sísmica es un sistema intrínsecamente no lineal. Investigaciones sobre la direccionalidad del sismo han demostrado que la respuesta máxima de un aislador rara vez se alinea con los ejes ortogonales del edificio (Reyes & Kalkan, 2012) La excitación bidireccional (X-Y) puede inducir desplazamientos vectoriales significativamente mayores que los predichos al analizar cada dirección por separado (Campbell & Bozorgnia, 2003).

Además de la complejidad horizontal, la brecha de investigación más crítica y desafiante radica en la incorporación de la componente vertical (Z) del sismo, frecuentemente ignorada en el diseño de estructuras convencionales, pero de gran relevancia para estructuras con sistemas de aislación sísmica (FEMA,

2020). Aceleraciones verticales elevadas pueden alterar las propiedades de aisladores pendulares (FPS) (Zayas et al., 1993) o, más críticamente, inducir levantamiento (fuerzas de tracción) en aisladores elastoméricos (LRB), un fenómeno que puede comprometer la estabilidad del sistema (Warn & Ryan, 2012).

Existe una falta de consenso normativo sobre cómo combinar de forma precisa y eficiente las tres componentes (X-Y-Z) en el análisis no lineal de respuesta en el tiempo (NLTHA) para fines de diseño. Por tanto, resulta imperativo estudiar metodologías de combinación de carga que capturen adecuadamente esta simultaneidad para garantizar la seguridad del sistema de aislación.

### **1.3 Problemática a resolver**

Las normas sísmicas vigentes difieren de manera significativa en los criterios empleados para considerar la simultaneidad de las componentes sísmicas en el diseño de estructuras con sistemas de aislación. De acuerdo con NIST (2011), mientras algunos reglamentos incorporan la componente vertical mediante cargas estáticas equivalentes, otros establecen combinaciones lineales de los efectos máximos obtenidos en cada dirección principal; en contraste, normativas más recientes recomiendan la aplicación simultánea de las tres componentes del movimiento del terreno mediante análisis bidireccionales o tridimensionales. Esta heterogeneidad metodológica genera variaciones importantes en los resultados de diseño, particularmente en estructuras con comportamiento no lineal o en sistemas de aislación caracterizados por su elevada flexibilidad.

La falta de uniformidad en el tratamiento de la simultaneidad puede conducir a estimaciones imprecisas de la demanda sísmica. En especial, el uso de combinaciones simplificadas basadas en análisis unidireccionales puede subestimar o sobrestimar los requerimientos reales sobre los aisladores y sobre la superestructura, afectando la confiabilidad del desempeño esperado. Diversos estudios señalan que los métodos de combinación comúnmente empleados, como 100/30 o SRSS, no representan adecuadamente la acción conjunta de las componentes horizontales y verticales del movimiento

sísmico, lo cual puede derivar en una subestimación de desplazamientos y fuerzas esenciales para el diseño (Warn & Ryan, 2012).

Las implicaciones de esta subestimación son críticas desde el punto de vista del desempeño sísmico. Por un lado, una estimación insuficiente del desplazamiento vectorial puede conducir al diseño inadecuado de la junta sísmica, incrementando el riesgo de interacción no deseada entre la estructura aislada y los elementos de borde, fenómeno que compromete la efectividad del sistema de aislación. Por otro lado, la omisión de la componente vertical simultánea dificulta la identificación de estados de tracción en los aisladores, generando condiciones propicias para inestabilidad o falla de conexiones, un aspecto especialmente relevante en escenarios de sismos de campo cercano (Warn & Ryan, 2012).

Desde una perspectiva económica, esta incertidumbre técnica amenaza directamente la rentabilidad y la propuesta de valor de la aislación sísmica. La implementación de estos sistemas conlleva un costo inicial elevado, justificado bajo la premisa de reducir costos de reparación post-sismo y garantizar la continuidad operativa.

En el ámbito social, la problemática trasciende el daño material e impacta la resiliencia comunitaria. Las estructuras con aislación sísmica suelen albergar infraestructura crítica esencial, como hospitales, centros de gestión de emergencias y puentes estratégicos. Si la omisión de la componente vertical simultánea provoca la inestabilidad o ruptura de los aisladores durante un sismo severo, la interrupción de estos servicios vitales pone en riesgo la atención a la población en el momento más crítico de la emergencia. La falla de un sistema diseñado para ser "indestructible" erosionaría la confianza pública en la ingeniería moderna y dejaría a la sociedad vulnerable a pesar de las inversiones realizadas en seguridad (Bedriñana & Saito, 2021).

En este contexto, surge la necesidad de evaluar en qué medida los métodos de combinación simplificada utilizados actualmente reflejan de manera adecuada la simultaneidad de las acciones sísmicas. De esta problemática se desprende la pregunta central del presente estudio: ¿cuál es la magnitud de

la subestimación de las demandas de diseño, tanto desplazamiento vectorial como fuerza axial, que producen los métodos simplificados de combinación (100/30, SRSS) respecto a un análisis tridireccional que considere la simultaneidad real de las componentes sísmicas?

## 1.4 Justificación

La importancia de este proyecto radica en la necesidad de cerrar la brecha entre la práctica de diseño simplificada y el comportamiento físico real de los sistemas de aislación sísmica. La adopción de métodos de combinación (como el 100/30) sin una validación rigurosa de su impacto en sistemas no lineales genera una incertidumbre que puede llevar a diseños inseguros, vulnerables a fallas por levantamiento o por impacto en la junta sísmica.

Este estudio es vital porque proporcionará cuantificación y evidencia directa sobre la precisión de los métodos normativos actuales. Al determinar el impacto de la simultaneidad (incluida la componente vertical), se podrán generar recomendaciones de diseño claras y aplicables, permitiendo a los ingenieros estructurales optimizar los diseños para que sean seguros y económicos, evitando el conservadurismo excesivo o la subestimación peligrosa del riesgo.

El proyecto contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de Naciones Unidas (ONU), específicamente al:

- **ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura):** Al fomentar la investigación aplicada para construir infraestructuras más resilientes.
- **ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles):** Al establecer criterios que garantizan la seguridad de las edificaciones críticas (hospitales, centros de emergencia) y residenciales, haciéndolas más seguras y capaces de resistir eventos sísmicos.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General

Evaluar el impacto de la simultaneidad de las componentes sísmicas (X, Y, Z) en los parámetros clave de diseño de estructuras con aislación sísmica

mediante análisis bidireccionales y tridimensionales bajo diferentes criterios normativos de diseño proponiendo recomendaciones que mejoren la precisión y seguridad del diseño estructural en zonas de subducción.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la respuesta sísmica de estructuras con aislación sísmica ejecutando análisis no lineales de respuesta en el tiempo (NLTHA) con un conjunto de registros tridireccionales (X-Y-Z), para una adecuada comprensión de la influencia de cada componente sísmica y la direccionalidad en las demandas de diseño.
- Establecer el nivel de subestimación de los métodos de combinación simplificados (100/30, SRSS) mediante la comparación estadística de los desplazamientos vectoriales máximos y fuerzas axiales obtenidos en los análisis tridireccionales (X-Y-Z) contra los resultados de los métodos simplificados, con énfasis en la cuantificación de la imprecisión de la práctica de diseño convencional.
- Determinar el impacto de la componente vertical del sismo en la estabilidad del sistema de aislación identificando la magnitud y frecuencia de las fuerzas de tracción (levantamiento) en los aisladores obtenidas únicamente en los análisis con excitación tridireccional simultánea (X-Y-Z), como base para una recomendación de diseño que prevenga la falla por inestabilidad.

# CAPÍTULO 2

## DESARROLLO DEL PROYECTO

### 2.1 Marco conceptual

#### 2.1.1 Fundamentos de la Aislación Sísmica y Modificación de la Demanda

La aislación sísmica es una estrategia de diseño basada en el desempeño que busca desacoplar la superestructura de los movimientos violentos del terreno. A diferencia del diseño convencional, que disipa energía a través del daño estructural (ductilidad), la aislación introduce una interfaz flexible en la base del edificio (Warn & Ryan, 2012).

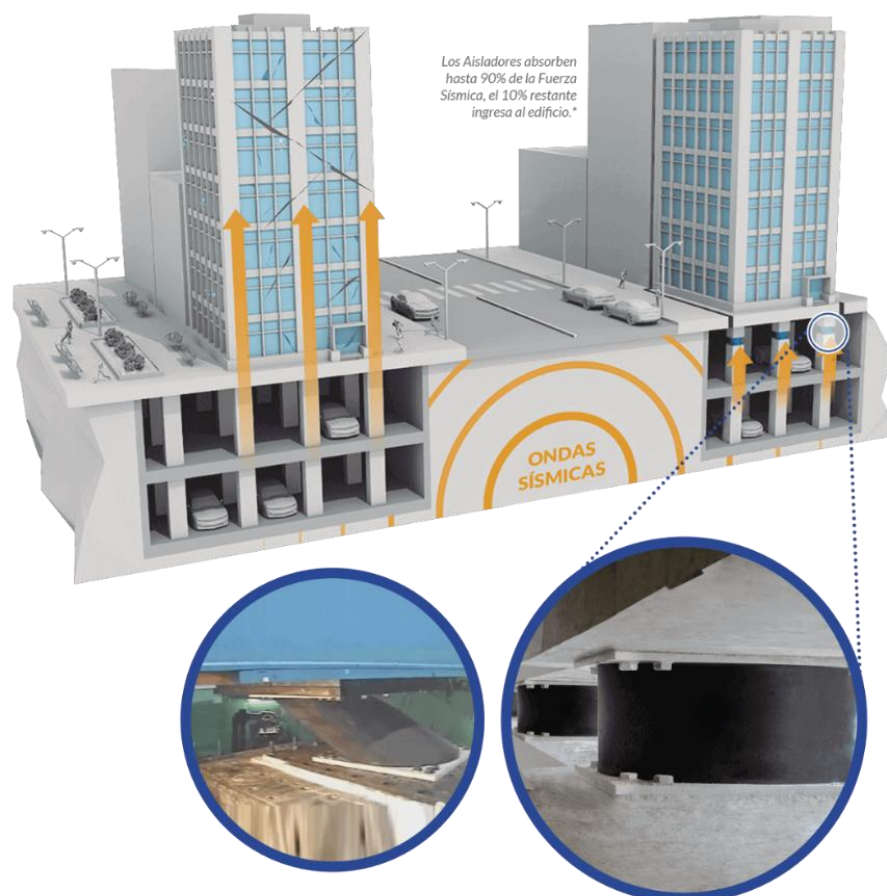


Figura 2.1 Aisladores sísmicos y su aplicación (IAP, 2025)

El funcionamiento de este sistema se rige por dos principios mecánicos:

- 1. Modificación del Periodo Fundamental ( $T_n$ ):** La inserción de una interfaz flexible en la base incrementa significativamente el periodo

natural de vibración de la estructura, desplazándolo típicamente a un rango de  $T_n > 2.5$  a  $4.5$  segundos. Al analizar un espectro de respuesta de aceleración estándar (pseudo-aceleración  $Sa$  vs. Periodo  $T$ ), se observa que este desplazamiento hacia periodos largos ubica a la estructura en un tramo del espectro donde las aceleraciones espectrales disminuyen de manera progresiva, a pesar de que los sismos de campo lejano pueden presentar contenido energético en períodos largos. Como consecuencia, las fuerzas inerciales transmitidas a la superestructura ( $F = m \cdot a$ ) se reducen de forma significativa, mientras el sistema estructural tiende a responder predominantemente dentro del rango elástico, concentrando la demanda inelástica en el sistema de aislación.

2. **Disipación de Energía:** Para controlar los grandes desplazamientos relativos que se generan en la interfaz de aislamiento debido a la flexibilización, los sistemas modernos incorporan mecanismos de amortiguamiento histerético o viscoso. Aisladores sísmicos como los elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) o péndulo de fricción (FPS) disipan energía a través de ciclos de histéresis robustos, reduciendo la demanda de desplazamiento sin transmitir fuerzas excesivas a la estructura (Whittaker et al., 2018).

### 2.1.2 Comportamiento No Lineal y Acoplamiento Biaxial de los Aisladores

Una limitación crítica de los métodos de diseño simplificados es que a menudo tratan la respuesta de los aisladores como independiente en cada dirección ortogonal (X e Y). Sin embargo, la mecánica de estos dispositivos presenta un fuerte acoplamiento biaxial e interacción con la carga vertical.

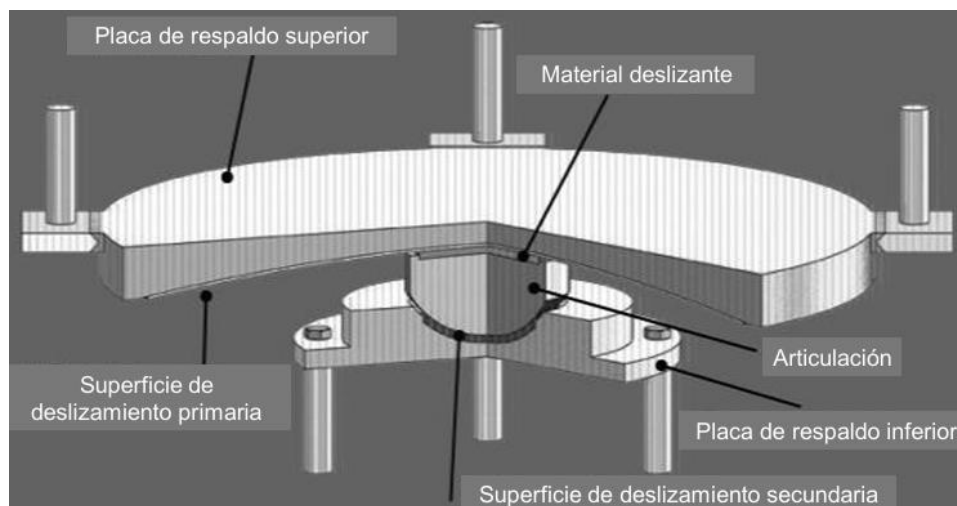
- **Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB)** Los aisladores LRB (Lead Rubber Bearings) obtienen su rigidez inicial y capacidad de disipación de la fluencia de un núcleo de plomo central. El comportamiento de este núcleo es plástico y su superficie de fluencia es circular en el plano horizontal.



**Figura 2.2 Aislador LRB y sus componentes (Grupo Grasa, 2020)**

**Interacción de Plasticidad:** La fuerza de fluencia es isotrópica. Esto significa que la resistencia del aislador en la dirección X depende instantáneamente del estado de deformación en la dirección Y. Si el aislador ya ha fluido en la dirección Y debido a un pulso sísmico, su rigidez tangente efectiva en la dirección X se reduce drásticamente. Los análisis unidireccionales ignoran esta interacción, asumiendo erróneamente que el aislador tiene toda su capacidad de resistencia disponible en cada eje independientemente. Investigaciones recientes como la Al-Janabi et al. (2025) indican que ignorar este acoplamiento subestima el desplazamiento vectorial máximo.

- **Aisladores de Péndulo de Fricción (FPS)** El sistema FPS (Friction Pendulum System) utiliza la geometría cóncava para proveer la fuerza restauradora y la fricción para disipar energía. Su periodo es función exclusiva del radio de curvatura (R) y la gravedad (g).



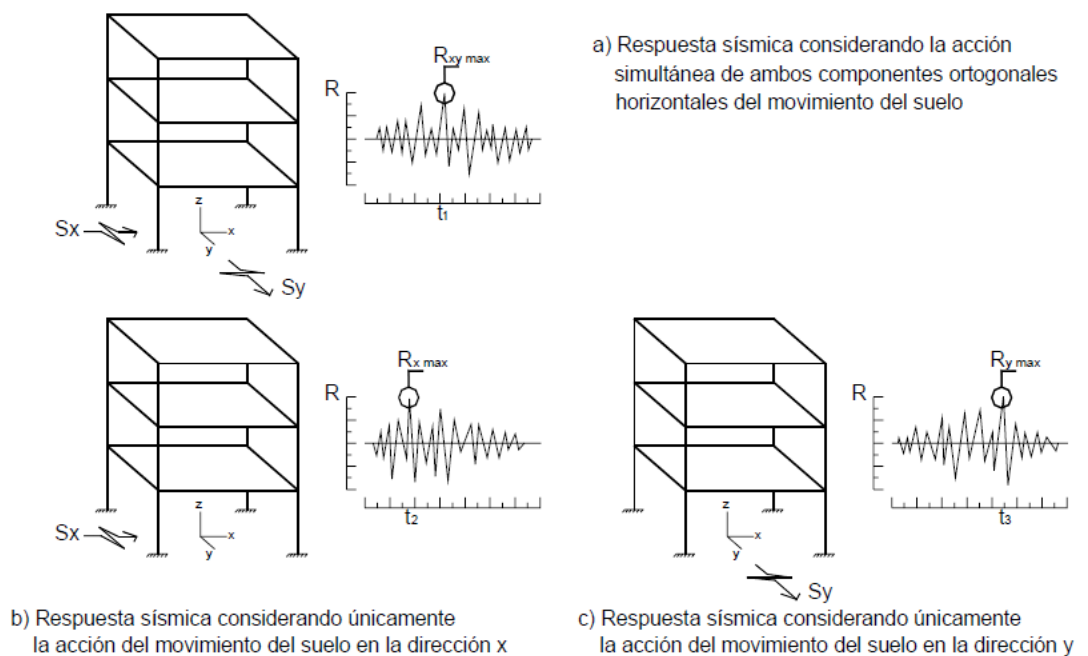
**Figura 2.3 Aislador FPS y sus componentes (TIS, 2026)**

**Acoplamiento Vertical-Horizontal:** La fuerza lateral resistente ( $F$ ) en un FPS depende directamente de la carga axial instantánea ( $N$ ) a través de la relación de fricción. Dado que la componente vertical del sismo hace fluctuar la carga  $N(t)$  constantemente, la capacidad de disipación de energía y la rigidez del sistema varían milisegundo a milisegundo. Si una fuerte aceleración vertical reduce la carga  $N$  (efecto de descarga), la fuerza de fricción disminuye, permitiendo desplazamientos horizontales mayores a los previstos por modelos de carga estática constante (Zayas et al., 1993).

### 2.1.3 Naturaleza Multidireccional y Estocástica de la Acción Sísmica

El movimiento del terreno durante un evento sísmico es un proceso vectorial tridimensional. Las tres componentes traslacionales (dos horizontales y una vertical) actúan simultáneamente, presentando correlaciones complejas que dependen de la distancia a la falla y el mecanismo de ruptura.

- **Simultaneidad y Direccionalidad:** La respuesta máxima de una estructura aislada (que posee rigidez similar en todas direcciones) rara vez coincide con los ejes geométricos principales ( $X$ ,  $Y$ ) del edificio. El desplazamiento máximo es un vector que rota en el plano horizontal. Estudios sobre la direccionalidad como el realizado por Reyes & Kalkan (2012) indican que la orientación crítica del sismo puede ocurrir en cualquier ángulo, y la excitación bidireccional simultánea genera trayectorias orbitales que maximizan la deformación del aislador más allá de los máximos unidireccionales.



**Figura 2.4 a) Respuesta sísmica bidireccional, b) y c) Respuesta sísmica unidireccional (Valdés & Ordaz, 2008)**

- La Componente Vertical en Campo Cercano:** Históricamente, se ha asumido que la intensidad de la componente vertical era aproximadamente  $2/3$  de la horizontal. Sin embargo, en zonas de campo cercano (Near-Fault), los registros muestran que la relación  $V/H$  puede exceder la unidad, especialmente en el rango de periodos cortos ( $T < 0.2s$ ). Aunque el sistema de aislación filtra eficazmente las aceleraciones horizontales, es altamente rígido en la dirección vertical (para soportar el peso del edificio), por lo que transmite estas altas aceleraciones verticales directamente a las columnas y aisladores, generando variaciones extremas de carga axial (compresión dinámica y tensión) (FEMA, 2020).

#### 2.1.4 Métodos de Combinación de Cargas y sus Limitaciones

La práctica de diseño actual, guiada por normativas como ASCE/SEI 7-22 o NEC-15, permite el uso de procedimientos simplificados para estimar la demanda combinada. Este proyecto evalúa críticamente su validez.

- A. Regla del 100% + 30% (Método de Newmark/Rosenblueth)** Este criterio prescribe diseñar los elementos para el 100% de las fuerzas

sísmicas en una dirección principal más el 30% de las fuerzas en la dirección perpendicular.

Esta regla se derivó originalmente para edificios convencionales con comportamiento elástico, bajo la asunción probabilística de que los picos de respuesta en X e Y no ocurren simultáneamente. Sin embargo, investigaciones fundamentales (Der Kiureghian, 1980); (Karaferis & Vamvatsikos, 2021) han demostrado que esta regla carece de base teórica sólida para estructuras con comportamiento no lineal o simetría radial (como los aisladores). Su aplicación en sistemas aislados puede subestimar sistemáticamente el desplazamiento vectorial resultante, poniendo en riesgo la suficiencia de la junta sísmica (moat wall).

**B. Método SRSS (Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados)** El método SRSS estima la respuesta combinada como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los máximos unidireccionales. Aunque mejora la estimación del vector máximo escalar, pierde totalmente la información de la correlación temporal (fase). Es incapaz de predecir si el momento de máximo desplazamiento lateral coincide con el instante de mínima carga axial, ocultando potenciales fallas por inestabilidad o vuelco.

**C. Método CQC (Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados)** El método fue propuesto por Armen Der Kiureghian en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de California, Berkeley, en junio de 1980. A diferencia de métodos anteriores (como el SRSS) que asumen independencia estadística entre modos, este método incorpora explícitamente la correlación entre respuestas modales a través de coeficientes de correlación.

### **2.1.5 Fenómenos Críticos de Inestabilidad: Levantamiento (Uplift)**

El "levantamiento" o "uplift" se identifica como un modo de falla crítico en estructuras aisladas sujetas a movimientos fuertes, y es el foco principal de la evaluación de la componente vertical en este estudio.

El levantamiento ocurre cuando la carga axial neta en un aislador se vuelve negativa (tensión), superando la carga de gravedad. Esto sucede por la superposición de dos efectos simultáneos:

1. **Momento de Vuelco:** Las fuerzas inerciales laterales generan un par de fuerzas en las columnas exteriores (compresión en un extremo, tensión en el otro).
2. **Aceleración Vertical:** Si la aceleración vertical del terreno es alta (cercana a 1.0g), reduce la fuerza de gravedad efectiva que mantiene al edificio asentado.

#### **Consecuencias del Levantamiento:**

- **En Aisladores Elastómericos (LRB):** El caucho tiene una resistencia a la tensión muy limitada (determinada por la presión de cavitación, ~2 MPa). La tensión induce cavitación interna (formación de vacíos), degradando la rigidez del aislador y pudiendo llevar a la ruptura completa bajo ciclos repetidos (Warn & Ryan, 2012).
- **En Aisladores de Fricción (FPS):** El levantamiento provoca la separación física de las superficies articulares. El impacto subsecuente al cerrar la brecha (*impact landing*) genera fuerzas impulsivas masivas que pueden fracturar el deslizador o dañar los elementos de soporte.

La detección de este fenómeno es imposible con métodos estáticos o combinaciones SRSS; requiere obligatoriamente un análisis dinámico paso a paso con las tres componentes del sismo actuando en fase.

#### **2.1.6 Análisis No Lineal de Respuesta en el Tiempo (NLTHA) y Escalamiento**

Dado el acoplamiento no lineal y la sensibilidad a la simultaneidad descritos, el Análisis No Lineal de Respuesta en el Tiempo (NLTHA) se establece como la herramienta metodológica indispensable para este proyecto. El NLTHA integra numéricamente la ecuación de movimiento tridimensional considerando las propiedades histeréticas reales de los materiales.

Para garantizar la validez de los resultados, es crítico el proceso de selección de los registros sísmicos. Un desafío particular, abordado en este estudio, es

el escalamiento de la componente vertical, la cual posee un contenido de frecuencias distinto a las horizontales. Aplicar factores de escala derivados de la componente horizontal a la vertical puede resultar en aceleraciones verticales irreales, por lo que se requiere un enfoque cuidadoso que respete la física de la fuente sísmica y las recomendaciones normativas más avanzadas (FEMA, 2020).

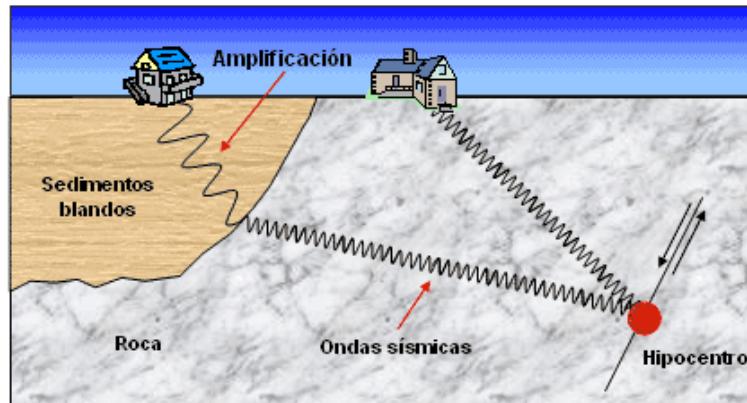


Figura 2.5 Simulación de ondas sísmicas (Red Sísmica, 2021)

### 2.1.7 Importancia de la Componente Vertical del Sismo en Aislación Sísmica

Las estructuras sísmicamente aisladas presentan un comportamiento dinámico sustancialmente diferente al de las estructuras convencionales de base fija, debido a la introducción de un plano de baja rigidez lateral que desacopla la superestructura del movimiento del suelo (Krawinkler & Seneviratna, 1998).

En estos sistemas, la demanda sísmica horizontal se concentra predominantemente en el sistema de aislación, mientras que la superestructura permanece esencialmente elástica. Sin embargo, esta condición genera una mayor sensibilidad del sistema de aislación a variaciones en la carga axial, lo que hace que la componente vertical del sismo cobre una relevancia crítica en la evaluación del desempeño estructural (Krawinkler & Seneviratna, 1998).

Diversos estudios como los de Hoang et al. (2021) y Ryan et al. (2005) han demostrado que, en aisladores sísmicos, particularmente aquellos cuyo comportamiento depende directamente de la fuerza normal como los aisladores de fricción tipo FPS y los aisladores elastoméricos con núcleo de

plomo (LRB), las variaciones dinámicas de la carga axial inducidas por la componente vertical del movimiento del suelo pueden modificar significativamente la rigidez efectiva, la fuerza de fricción y la capacidad de disipación de energía del sistema.

En estructuras aisladas, esta sensibilidad axial es mayor debido a que dispositivos FPS o LRB dependen del peso vertical para su mecanismo de disipación. Por tanto, cuando la aceleración vertical del terreno  $a_g^v(t)$  varía en el tiempo, la carga axial instantánea  $N(t)$  cambia y modifica la ley de comportamiento no lineal del aislador:

$$N(t) = W + ma_g^v(t) \quad (2.1)$$

donde:

$W$ : es el peso gravitacional de la estructura,

$m$ : es la masa efectiva,

$a_g^v(t)$ : es la aceleración vertical del suelo.

Este efecto es especialmente notorio en zonas de subducción, donde los sismos generan pulsos verticales de alta frecuencia y amplitud (Chopra, 2014). En consecuencia, la respuesta del aislador no puede considerarse independiente de la acción sísmica vertical, especialmente bajo excitación tridireccional simultánea.

## **2.1.8 Componente Vertical del Sismo en Normativas Aplicables a Sistemas Aislados**

### **2.1.8.1 Enfoque del Estándar ASCE/SEI 7 y el Término $0.12S_{MS}$**

El estándar ASCE/SEI 7-22 reconoce explícitamente la necesidad de considerar la componente vertical del sismo en el diseño sísmico, incluyendo estructuras con sistemas especiales de disipación de energía y aislación sísmica. En particular, el Capítulo 16, aplicable a análisis no lineales avanzados, introduce una acción sísmica vertical equivalente definida como una fracción del espectro de diseño del sismo máximo considerado ( $MCE_R$ ), expresada mediante:

$$a_{v,min} = 0.12S_{MS} \quad (2.2)$$

donde:

$a_{v,min}$  corresponde a la fracción de la aceleración espectral del sismo máximo considerado utilizada por la ASCE/SEI 7-22 para representar los efectos de la componente vertical del movimiento sísmico,

$S_{MS} = F_a S_s$  es la aceleración espectral máxima de diseño en periodo corto,

$F_a$  es el factor de sitio para la componente horizontal,

$S_s$  es la aceleración del sitio para periodo corto.

Este valor no se deriva de una formulación teórica específica dentro del texto principal, sino que se basa en calibraciones empíricas de registros sísmicos y consenso técnico del comité normativo, como se explica en el comentario de ASCE/SEI 7-22 (C12).

En el contexto de estructuras aisladas, este valor se emplea como una demanda vertical mínima equivalente, que busca capturar los efectos globales de la aceleración vertical del terreno sobre los elementos estructurales y, de manera indirecta, sobre el sistema de aislación. No obstante, el estándar no establece que este valor represente la historia temporal real de la componente vertical, sino que lo adopta como una simplificación normativa, adecuada para procedimientos de diseño y verificación cuando no se dispone de análisis dinámicos tridireccionales explícitos (ASCE/SEI 7, 2022).

La norma exige que la acción vertical sea considerada junto con la acción horizontal en análisis no lineales, pero no prescribe directamente una historia de tiempo real de aceleraciones verticales. Esta simplificación se adopta para mantener procedimientos normativos manejables, aunque puede subestimar los efectos de variaciones axiales cuando las componentes horizontal y vertical tienen picos simultáneos, situación que se presenta con frecuencia en sismos de subducción (Bozorgnia & Campbell, 2016).

#### **2.1.8.2 ASCE/SEI 41 y Subcomponentes Verticales**

El estándar ASCE/SEI 41 (2023) provee un marco para evaluación de desempeño en estructuras existentes bajo cargas sísmicas, enfatizando

procedimientos de análisis no lineales de respuesta dinámica. Para sistemas con aislación, ASCE/SEI 41 permite la aplicación de registros tridireccionales reales (H-V) y reconoce que la componente vertical puede influir en estados límite asociados con:

- levantamiento (uplift) de aisladores,
- cambios cíclicos del esfuerzo axial,
- condiciones de pérdida de contacto,
- alteración de la rigidez efectiva.

Esto se expresa mediante combinaciones de carga tridireccionales y, en análisis de respuesta en el tiempo, la inclusión sincrónica de  $a_g^v(t)$  junto con las componentes horizontales. ASCE/SEI 41 no define un valor fijo equivalente para la componente vertical porque su propósito es evaluar desempeño y ductilidad, lo que requiere capturar las trayectorias temporales completas de las aceleraciones. Para estructuras aisladas con dispositivos dependientes de la axial, esto se traduce en modelos de elementos que actualizan rigidez y fricción en función de  $N(t)$  en cada paso temporal.

### **2.1.8.3 Lineamientos FEMA y NEHRP sobre Componente Vertical**

Los documentos técnicos de FEMA P-750 (2009), particularmente los asociados con las NEHRP Recommended Seismic Provisions, enfatizan que la respuesta estructural bajo excitación sísmica debe ser evaluada en las tres direcciones principales.

FEMA P-750 (2009) y FEMA P695 (2009) presentan comparaciones de registros y análisis de codificación que demuestran que las relaciones de amplitud V/H varían sustancialmente entre eventos y sitios, y que la componente vertical no siempre es despreciable. Esto es evidente en registros de sismos de subducción (por ejemplo, Chile 2010 y Japón 2011), donde los picos verticales pueden alcanzar valores comparables a los horizontales en ciertas bandas de frecuencia (Gregor et al., 2012).

## 2.2 Marco metodológico

### 2.2.1 Diseño de la investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, comparativo y analítico, ya que busca evaluar y cuantificar las diferencias entre distintos métodos de simultaneidad y combinación de componentes sísmicas en estructuras con aislación sísmica.

Se adopta una metodología en cascada (secuencial) complementada con un enfoque basado en PMBOK, organizado en cinco etapas: inicio, planificación, ejecución, monitoreo y cierre. El estudio es de naturaleza numérico-computacional, soportado por análisis dinámicos no lineales de respuesta en el tiempo.

### 2.2.2 Tipo y nivel de investigación

**Tipo: Aplicada.** El estudio no busca generar conocimiento teórico puro, sino resolver un problema práctico de la ingeniería estructural: la incertidumbre en las reglas de diseño normativas. Los resultados tienen una aplicación inmediata para mejorar los procedimientos de diseño de estructuras aisladas en zonas de subducción.

**Nivel: Explicativo y comparativo.** Es explicativo porque busca determinar las relaciones causa-efecto entre la direccionalidad del sismo (variable independiente) y la respuesta no lineal de los aisladores (variable dependiente). Es comparativo porque contrasta sistemáticamente los resultados de métodos simplificados (100/30, SRSS) frente a un método riguroso (análisis de respuesta en el tiempo tridimensional).

**Alcance: Determinista y paramétrico.** Se define como determinista porque, para cada registro sísmico de entrada, se obtiene una respuesta estructural única y repetible mediante la integración numérica de la ecuación de movimiento. Es paramétrico porque se evalúan distintos escenarios variando la intensidad y la combinación de componentes.

## **2.2.3 Población y muestra**

### **2.2.3.1 Población**

Conformada por edificaciones estructurales con sistemas de aislación sísmica en zonas de subducción.

### **2.2.3.2 Muestra**

Constituida por:

- Un modelo estructural representativo con aisladores sísmicos.
- Un conjunto de registros sísmicos reales (subducción y near-fault), con componentes horizontales y verticales.

Los criterios de selección consideran:

- Compatibilidad con la amenaza sísmica del Ecuador.
- Diferente contenido de frecuencia.
- Relación H/V relevantes para el análisis de simultaneidad.

## **2.2.4 Instrumentos de recopilación de datos**

Se emplean herramientas especializadas:

- **Software estructural**
- **Bases de datos sísmicas:** PEER NGA, registros sísmicos de Ecuador 2016 y otros eventos históricos.
- **Herramientas de procesamiento:** OpenSees y Microsoft Excel.

Variables principales registradas:

- Desplazamientos máximos.
- Cortantes basales.
- Fuerza axial en aisladores.
- Aceleraciones máximas.

## **2.2.5 Procedimiento de recolección de datos**

El procedimiento para la obtención de los datos necesarios se estructura en cuatro fases consecutivas: selección de la amenaza sísmica, parametrización del sistema, simulación numérica y extracción de resultados.

### **Fase 1: Selección y Preprocesamiento de la Amenaza Sísmica**

Se seleccionan registros de aceleración correspondientes a eventos de subducción de bases de datos internacionales, aplicando criterios de inclusión que priorizan magnitudes de momento significativas ( $M_w \geq 7$ ) y condiciones de sitio con suelos intermedios a blandos (Tipos C y D). Las señales crudas se someten a un post-procesamiento que incluye la conversión de unidades, corrección de línea base y filtrado de frecuencias (pasa-alto) para eliminar el ruido instrumental y garantizar que los desplazamientos obtenidos por integración numérica sean físicamente consistentes.

### **Fase 2: Definición de la Matriz de Análisis Paramétrico**

Se establece una matriz de modelos de un grado de libertad (1GDL) que representa el sistema aislado. Las variables independientes del estudio se definen variando el periodo postfluencia ( $T_d$ ) y la relación de resistencia característica normalizada para el peso sísmico ( $Q_d/W$ ) dentro de rangos de interés ingenieril. Asimismo, se asigna un periodo vertical en el rango 0.08 – 0.12 *segundos* para simular adecuadamente la alta rigidez axial característica de los dispositivos de aislamiento.

### **Fase 3: Simulación Dinámica No Lineal**

Se ejecuta un análisis de respuesta en el tiempo bidireccional acoplado utilizando un algoritmo computacional propio. La integración de las ecuaciones de movimiento se realiza mediante métodos numéricos de paso a paso incondicionalmente estables. Para representar el comportamiento del material, se emplea un modelo constitutivo histerético con acoplamiento bidireccional considerando el Modelo de Bouc-Wen, el cual permite capturar la interacción plástica y la reducción de resistencia en una dirección debido a la deformación simultánea en la dirección ortogonal.

### **Fase 4: Recolección y Reducción de Variables**

A partir de las series de tiempo generadas, se identifican los valores máximos vectoriales de respuesta. Se calculan los factores adimensionales de simultaneidad vertical y horizontal, relacionando las aceleraciones absolutas y desplazamientos relativos en los instantes críticos. Finalmente, se obtienen los

pares ordenados de cortante basal y desplazamiento máximo para la construcción de los espectros de desempeño (curvas ADRS), basándose en el equilibrio dinámico del sistema y se tabulan los resultados obtenidos del análisis.

#### **Consideraciones éticas**

- No se involucra intervención humana ni experimental directa.
- Se utilizan registros públicos y bases de acceso libre.
- Se respetan las fuentes originales de datos.

#### **2.2.6 Limitaciones y delimitaciones**

##### **Limitaciones:**

- Disponibilidad y calidad de registros verticales.
- Representatividad del modelo estructural seleccionado.

##### **Delimitaciones:**

- No se consideran efectos de interacción suelo-estructura.
- No se desarrolla el diseño constructivo detallado de aisladores.

#### **2.2.7 Enfoque metodológico adoptado**

Se adopta una Metodología en Cascada con estructura PMBOK, adaptada a investigación en ingeniería estructural:

- **Inicio:** definición del problema y objetivos.
- **Planificación:** diseño metodológico y selección de parámetros.
- **Ejecución:** modelación y análisis dinámico.
- **Monitoreo:** verificación y validación de resultados.
- **Cierre:** interpretación y conclusiones.

# CAPÍTULO 3

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Caracterización Espectral de Registros Sísmicos mediante FFT

Para el análisis de la simultaneidad de las componentes sísmicas, se seleccionó un conjunto de registros acelerográficos provenientes de la base de datos NGA-Subduction del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). La selección de los movimientos sísmicos se realizó aplicando criterios específicos para garantizar la representatividad de eventos de subducción capaces de generar demandas inelásticas significativas.

Como resultado del proceso de selección, se obtuvieron 53 registros sísmicos correspondientes a 18 eventos sísmicos ocurridos en zonas de subducción. La selección de estos registros se realizó a partir de un conjunto de criterios de filtrado, los cuales se detallan a continuación:

1. **Mecanismo tectónico:** Se consideraron eventos clasificados exclusivamente como de subducción, abarcando tanto sismos de interfaz (interface) como de intraplaca (intraslab).
2. **Magnitud:** Se seleccionaron eventos con una Magnitud de Momento ( $M_w$ ) mayor a 6.9, asegurando niveles de energía relevantes para el daño estructural.
3. **Distancia:** Se limitó la búsqueda a registros con una distancia de ruptura ( $R_{rup}$ ) menor a 205, rango en el cual la influencia de la componente vertical y su interacción con las horizontales es más crítica.

Se priorizó la selección de registros que exhibieran un contenido energético significativo en períodos largos, asegurando que la excitación de entrada sea de banda ancha ("wide-band"), una condición necesaria para garantizar la estacionariedad de la respuesta en las fases fuertes del movimiento y la aplicabilidad de métodos estocásticos avanzados. La Tabla 3.1 detalla varios de los registros sísmicos seleccionados:

**Tabla 3.1 Registros sísmicos seleccionados.**

<b>Registro Sísmico RSN</b>	<b>Magnitud (Mw)</b>	<b>Rrup (km)</b>	<b>Año</b>	<b>Distancia Epicentral (km)</b>	<b>Nombre del sismo</b>
3000201	7.65	33	1991	62	Valle de la Estrella
3000205	7.65	67	1991	96	Valle de la Estrella
3000346	7.65	50	1991	77	Valle de la Estrella
3000394	7.66	14	2012	29	Sámara
3000396	7.66	23	2012	37	Sámara
3001092	7.74	41	2001	88	San Salvador
3001100	7.74	51	2001	52	San Salvador
3001102	7.74	34	2001	93	San Salvador
4000015	9.12	97	2011	198	Tohoku
4000017	9.12	57	2011	138	Tohoku
4000093	9.12	73	2011	155	Tohoku
4000094	9.12	71	2011	153	Tohoku
4000095	9.12	91	2011	178	Tohoku
4000107	9.12	78	2011	212	Tohoku
4000108	9.12	45	2011	307	Tohoku
4000109	9.12	64	2011	276	Tohoku
4000110	9.12	51	2011	299	Tohoku
4000160	9.12	59	2011	134	Tohoku
4000224	9.12	80	2011	169	Tohoku
4000227	9.12	93	2011	254	Tohoku
4000231	9.12	101	2011	314	Tohoku
4000239	9.12	57	2011	284	Tohoku
4000262	9.12	60	2011	339	Tohoku
4000987	9.12	52	2011	300	Tohoku
4001063	9.12	74	2011	159	Tohoku
4003182	7.92	44	2011	56	IbarakiOff
4032662	7.76	82	1994	192	Sanriku-ho

<b>Registro Sísmico RSN</b>	<b>Magnitud (Mw)</b>	<b>Rrup (km)</b>	<b>Año</b>	<b>Distancia Epicentral (km)</b>	<b>Nombre del sismo</b>
4040700	7.92	72	2011	87	IbarakiOff
4040701	7.92	60	2011	68	IbarakiOff
4040706	7.92	51	2011	57	IbarakiOff
6001018	8.41	90	2001	307	South.Peru
6001021	8.41	205	2001	433	South.Peru
6001022	8.41	204	2001	432	South.Peru
6001153	7.78	108	2005	52	Tarapaca
6001252	8.00	40	2007	120	Pisco
6001385	8.15	63	2014	122	Iquique
6001757	7.98	37	1985	55	Central.Chile
6001771	7.98	47	1985	35	Central.Chile
6001812	8.81	49	2010	178	Maule
6002200	8.15	53	2014	128	Iquique
6002203	8.15	55	2014	117	Iquique
6002211	7.76	51	2014	77	Iquique.afs
6002241	8.31	65	2015	122	Coastal.Chile
6002693	7.82	34	2016	111	Coastal.Ecuador
6002695	7.82	51	2016	149	Coastal.Ecuador
6002697	7.82	170	2016	278	Coastal.Ecuador
6002707	7.82	76	2016	160	Coastal.Ecuador
6002709	7.82	20	2016	26	Coastal.Ecuador
6002710	7.82	73	2016	157	Coastal.Ecuador
6002719	7.82	21	2016	21	Coastal.Ecuador
6004634	6.90	52	2016	68	Ecuador.af2
6005800	7.76	37	2014	47	Iquique.afs
6005360	8.31	54	2015	117	Coastal.Chile

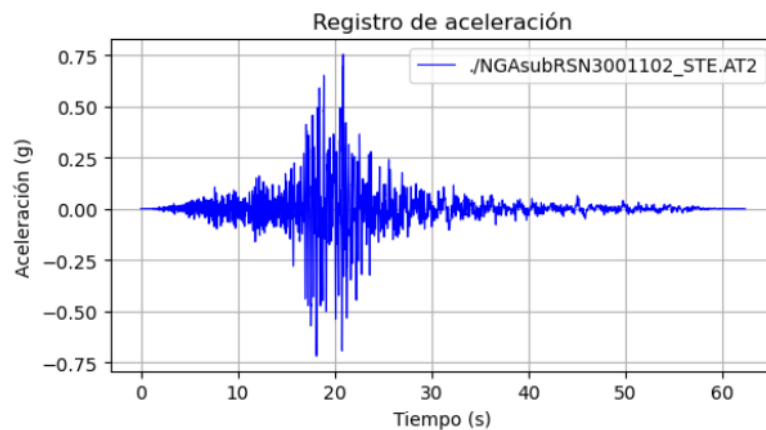
Como fase inicial del procesamiento de datos, se realizó una verificación del contenido frecuencial de los registros sísmicos seleccionados mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este análisis permitió

transformar los registros al dominio de la frecuencia para evaluar la distribución de la energía sísmica.

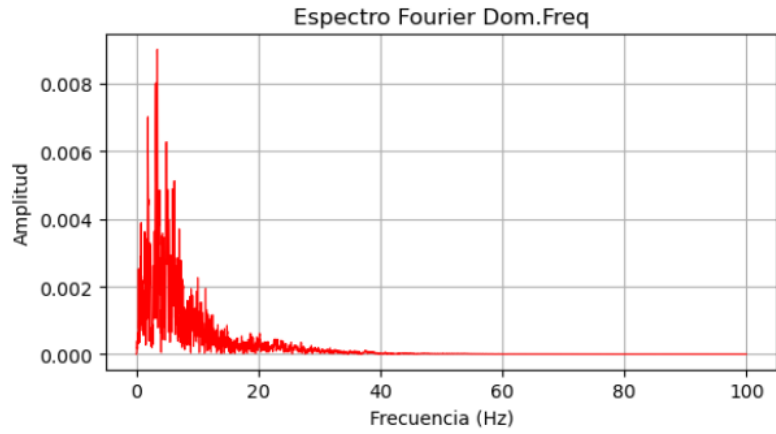
El análisis FFT permitió seleccionar aquellos acelerogramas que, además de poseer altas aceleraciones pico (PGA), conservan una densidad de energía significativa en el rango de **períodos largos** ( $3.0s \leq T_d \leq 6.0s$ ). Esto es crucial para el análisis de estructuras flexibles o de gran altura, típicas en la práctica moderna. Por otra parte, el análisis espectral mediante FFT asegura la calidad de los registros de entrada en el rango de períodos de interés.

A modo de ejemplo representativo del procesamiento realizado, se presentan los datos correspondientes al evento sísmico RSN 3001102. Las Figuras 3.1, 3.3 y 3.5 ilustran los registros de aceleración para las tres componentes ortogonales (Horizontal-Este, Horizontal-Norte y Vertical, respectivamente).

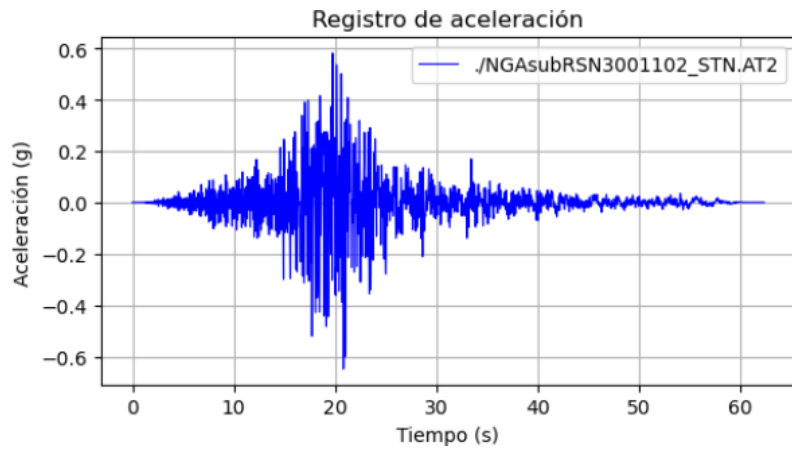
Complementariamente, para analizar el contenido frecuencial de dicho evento, las Figuras 3.2, 3.4 y 3.6 muestran los espectros de amplitud obtenidos mediante la Transformada de Fourier para cada una de las componentes mencionadas.



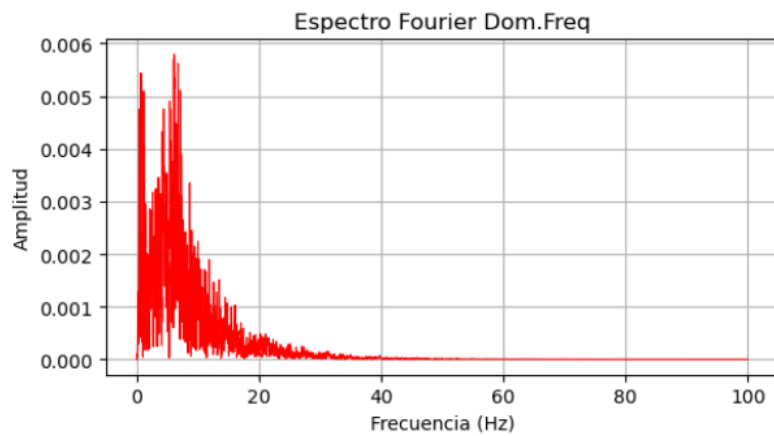
**Figura 3.1 Acelerograma de la componente horizontal Este. Evento RSN 3001102.**



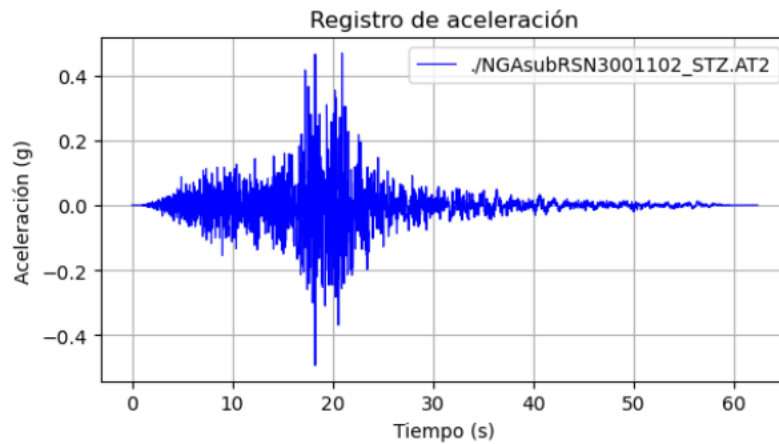
**Figura 3.2 Espectro de Fourier de la componente horizontal Este. Evento RSN 3001102.**



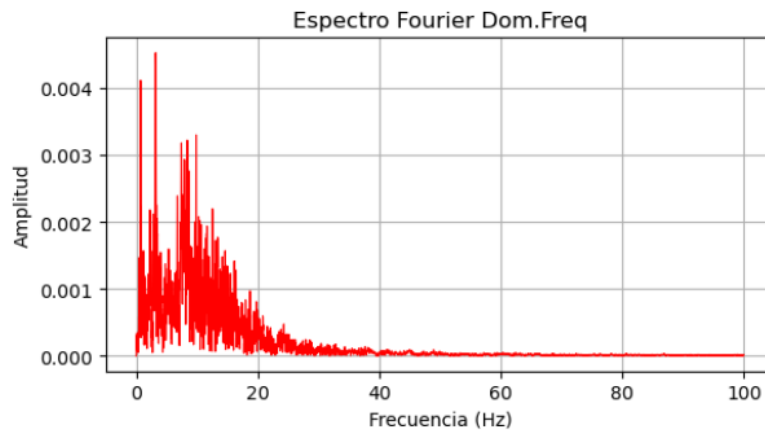
**Figura 3.3 Acelerograma de la componente horizontal Norte. Evento RSN 3001102.**



**Figura 3.4 Espectro de Fourier de la componente horizontal Norte. Evento RSN 3001102.**



**Figura 3.5 Acelerograma de la componente Vertical. Evento RSN 3001102.**



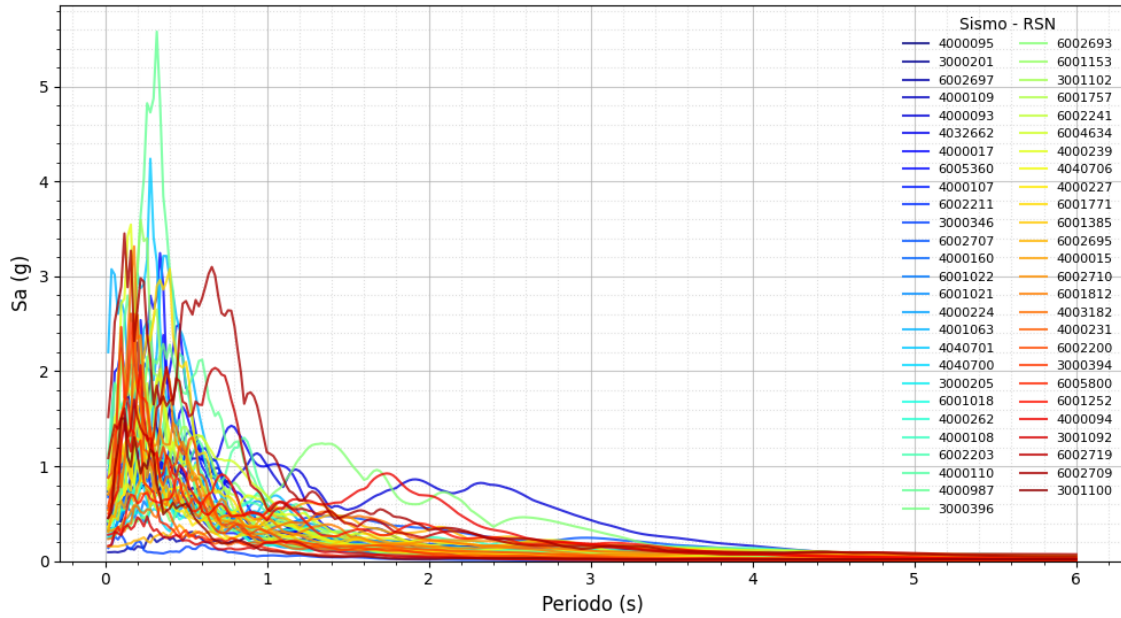
**Figura 3.6 Espectro de Fourier de la componente Vertical. Evento RSN 3001102.**

A continuación, se presentan los espectros de respuesta elástica de pseudo-aceleración ( $S_a$ ) y de desplazamiento relativo ( $S_d$ ) calculados para la totalidad de los registros sísmicos seleccionados. Todas las gráficas se han generado considerando una razón de amortiguamiento crítico del 5% ( $\xi = 5.0\%$ ).

Las Figuras 3.7 a 3.9 ilustran los espectros de aceleración. En ellas se observa la variabilidad de las demandas sísmicas.

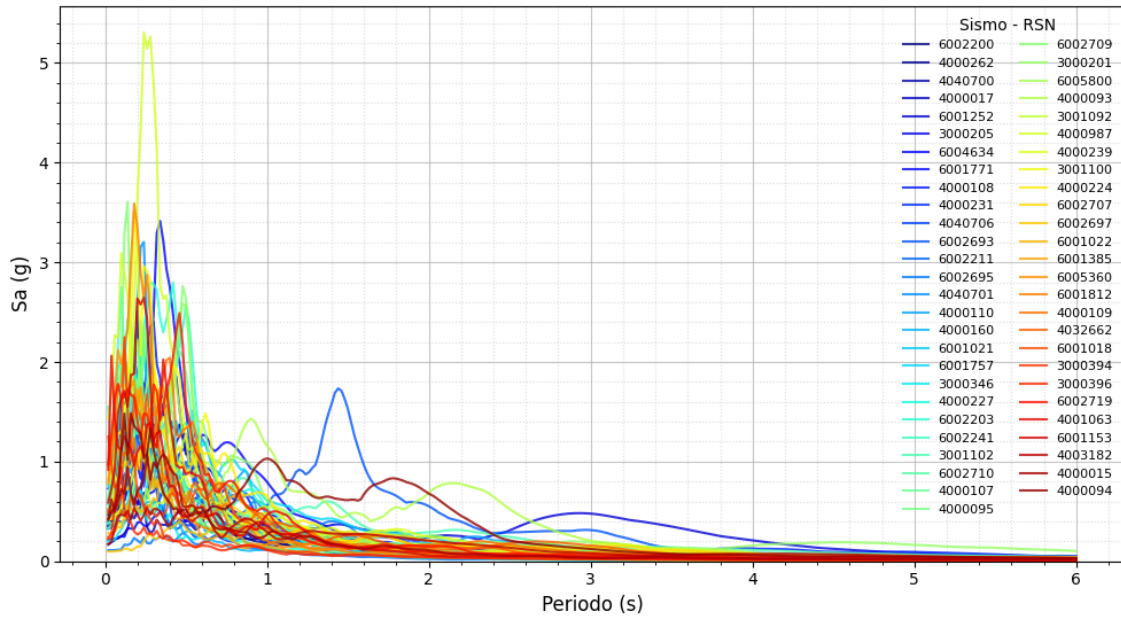
Complementariamente, las Figuras 3.10 a 3.12 muestran los espectros de desplazamiento para las mismas componentes. Estos gráficos son fundamentales para evaluar la demanda de deformación en estructuras flexibles y sistemas de aislamiento sísmico.

**Espectro de Aceleración  $\xi=5\%$  - Este**



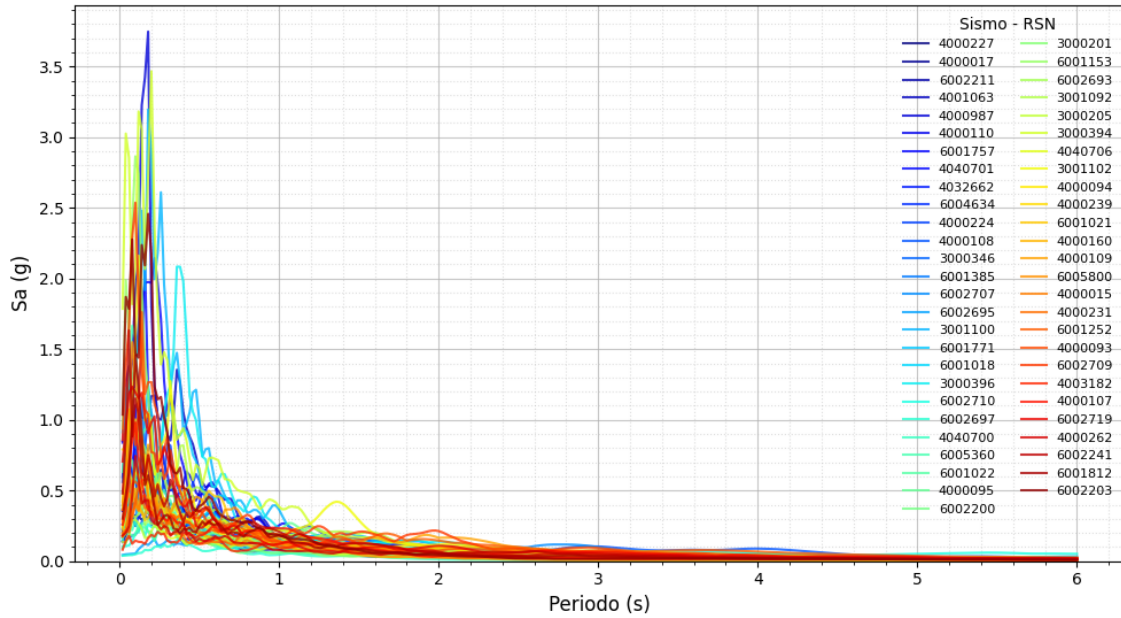
**Figura 3.7 Espectros de respuesta de aceleración ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Este de los registros seleccionados.**

**Espectro de Aceleración  $\xi=5\%$  - Norte**



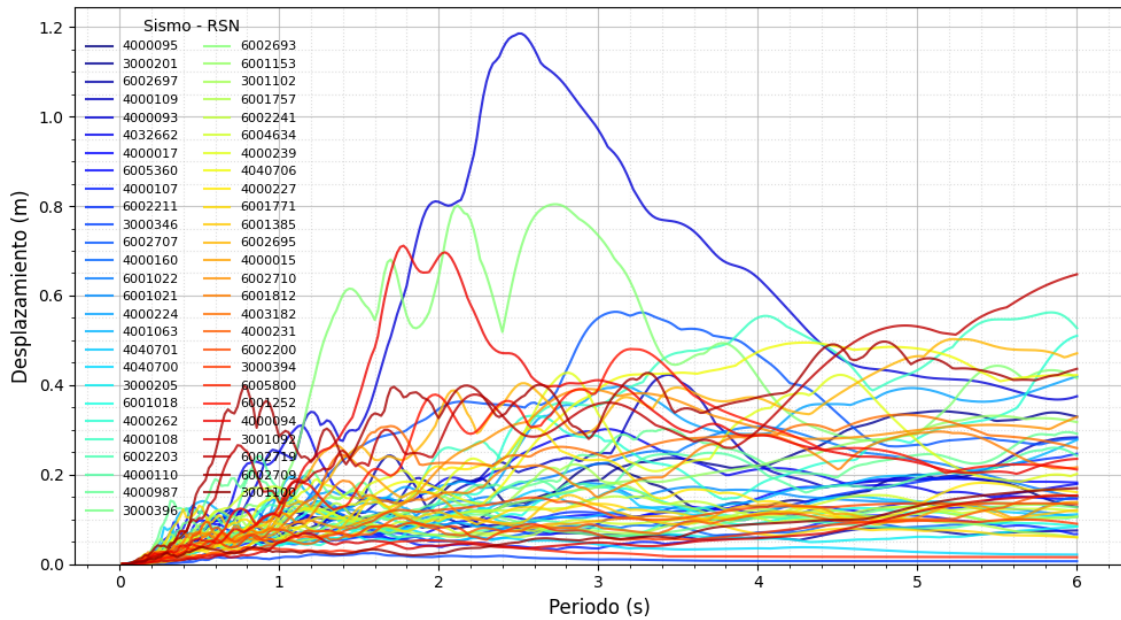
**Figura 3.8 Espectros de respuesta de aceleración ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Norte de los registros seleccionados.**

**Espectro de Aceleración  $\xi=5\%$  - Vertical**



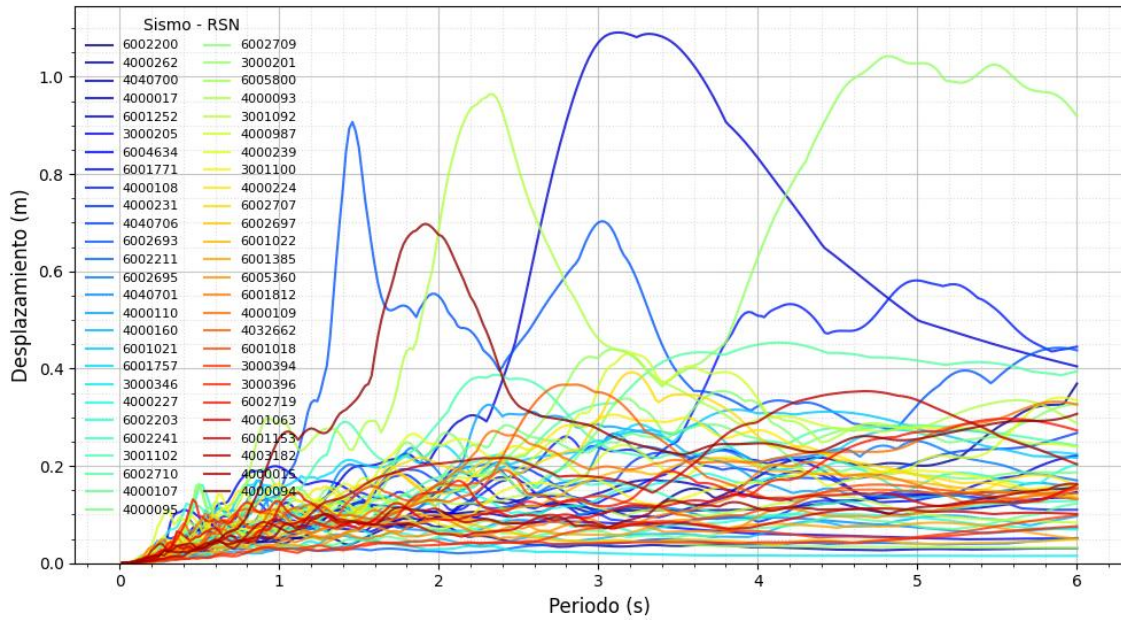
**Figura 3.9 Espectros de respuesta de aceleración ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente Vertical de los registros seleccionados.**

**Espectro de Desplazamiento  $\xi=5\%$  - Este**



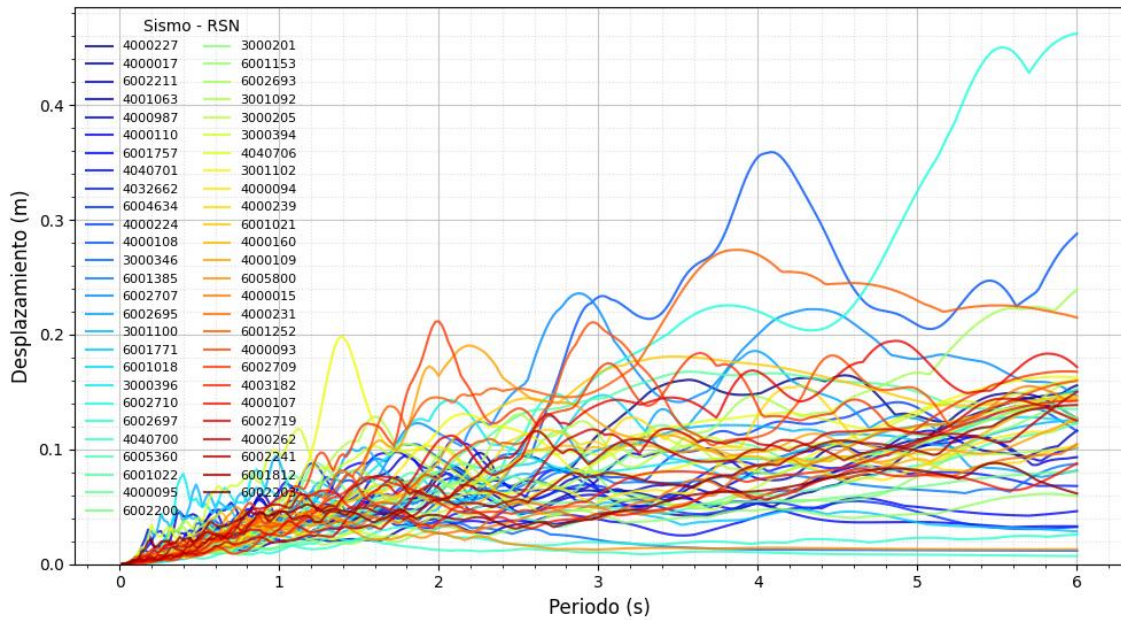
**Figura 3.10 Espectros de respuesta de desplazamiento ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Este de los registros seleccionados.**

**Espectro de Desplazamiento  $\xi=5\%$  - Norte**



**Figura 3.11 Espectros de respuesta de desplazamiento ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente horizontal Norte de los registros seleccionados.**

**Espectro de Desplazamiento  $\xi=5\%$  - Vertical**



**Figura 3.12 Espectros de respuesta de desplazamiento ( $\xi = 5.0\%$ ) para la componente vertical de los registros seleccionados.**

### 3.2 Evaluación de la respuesta bidireccional y determinación del factor de combinación espectral crítico.

Para determinar la correlación de la respuesta sísmica entre componentes ortogonales y validar la regla de combinación direccional, se desarrolló un procedimiento de análisis dinámico no lineal paso a paso en el tiempo (*Non-linear Time History Analysis*).

#### 3.2.1 Modelo Numérico Constitutivo (Bouc-Wen)

El comportamiento del sistema de aislamiento se modeló utilizando la formulación histerética diferencial de **Bouc-Wen**. Este modelo permite representar la fuerza restauradora no lineal  $F(t)$  del aislador, capturando la degradación de rigidez y la disipación de energía por histéresis mediante la ecuación:

$$F(t) = k_0[\alpha u(t) + (1 - \alpha)z(t)] \quad (3.1)$$

$$\dot{z} = A\dot{u} - \beta|\dot{u}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{u}|z|^n \quad (3.2)$$

donde:

$k_0$  es el parámetro de rigidez inicial.

$u(t)$  es el desplazamiento relativo del aislador.

$\alpha$  es la relación de rigidez post-fluencia a pre-fluencia.

$z(t)$  es la variable histerética auxiliar adimensional que controla la evolución del ciclo plástico, gobernada por la ecuación diferencial:

$A$  pendiente inicial normalizada.

$\beta, \gamma$  forma del lazo histerético.

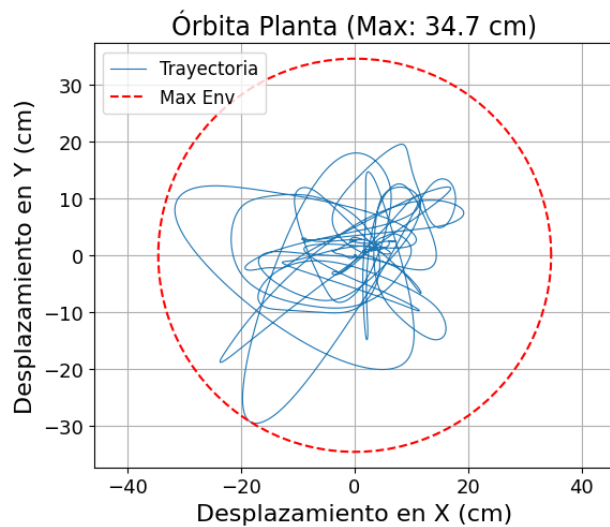
$n$  suavidad de transición.

#### 3.2.2 Integración Numérica (Método de Newmark- $\beta$ )

La solución de la ecuación de movimiento para el sistema de un grado de libertad (1GDL) sometido a excitación en la base se realizó mediante el algoritmo de integración directa de **Newmark- $\beta$** . Se utilizó la formulación de aceleración promedio constante (asumiendo  $\gamma = 0.5$  y  $\beta = 0.25$ ), lo que garantiza estabilidad incondicional del método numérico.

Para cada registro sísmico con componentes ortogonales  $a_{gx}(t)$  y  $a_{gy}(t)$ , se resolvió el sistema de ecuaciones acopladas en el dominio del tiempo, obteniendo las historias de respuesta de desplazamiento  $u_x(t)$  y  $u_y(t)$ .

La respuesta dinámica fue calculada mediante el método de integración paso a paso de Newmark -  $\beta$ , incorporando el modelo constitutivo de Bouc-Wen para representar el comportamiento histerético y la disipación de energía del dispositivo ante las componentes horizontales (Este y Norte). Los resultados obtenidos de la simulación numérica del sistema de un grado de libertad (1GDL) con aislamiento sísmico base se detallan en la Figura 3.13 que muestra la trayectoria orbital del aislador para un registro específico y las Figuras 3.14 y 3.15 que muestran los desplazamientos relativos del aislador y aceleraciones absolutas respectivamente.



**Figura 3.13 Trayectoria de respuesta no lineal del aislador. Evento 6002693.**

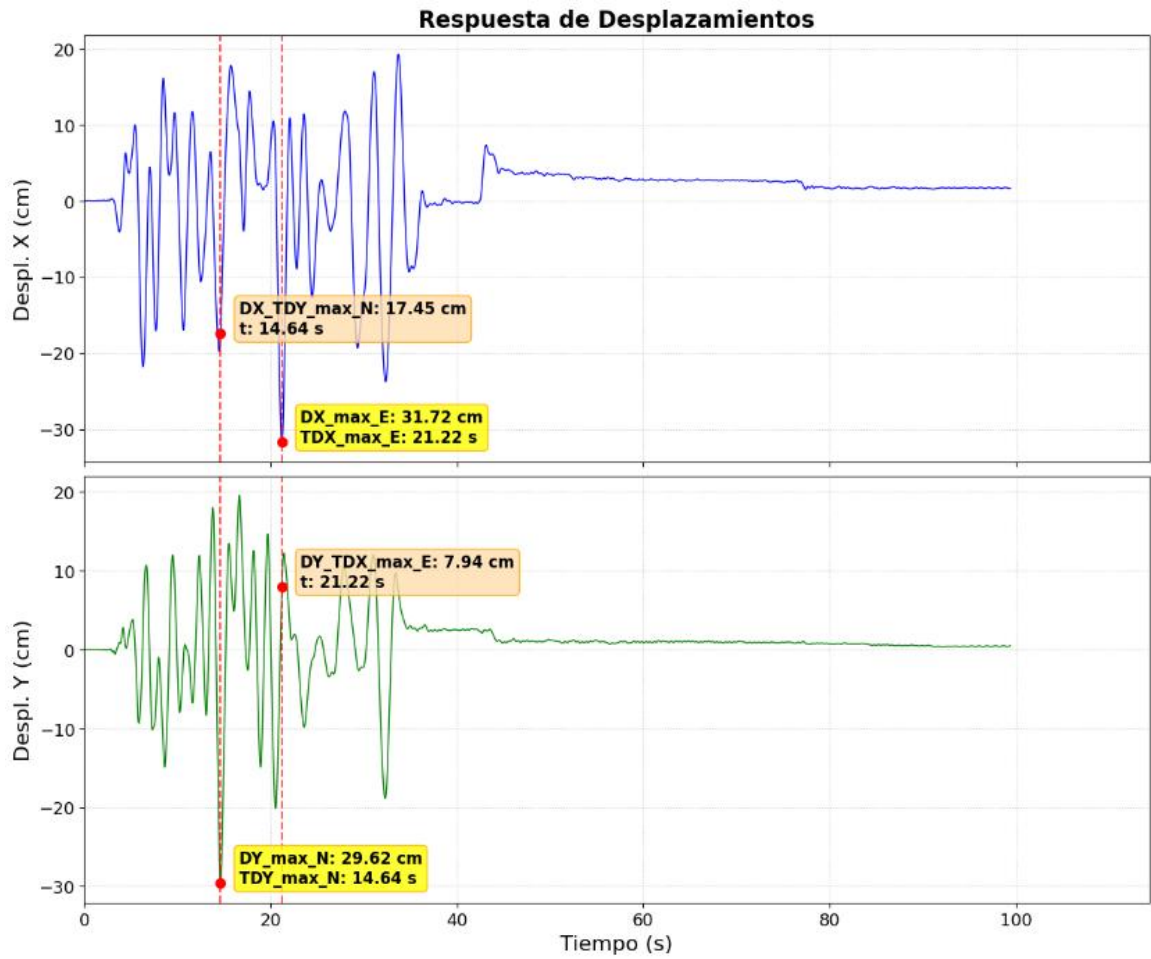
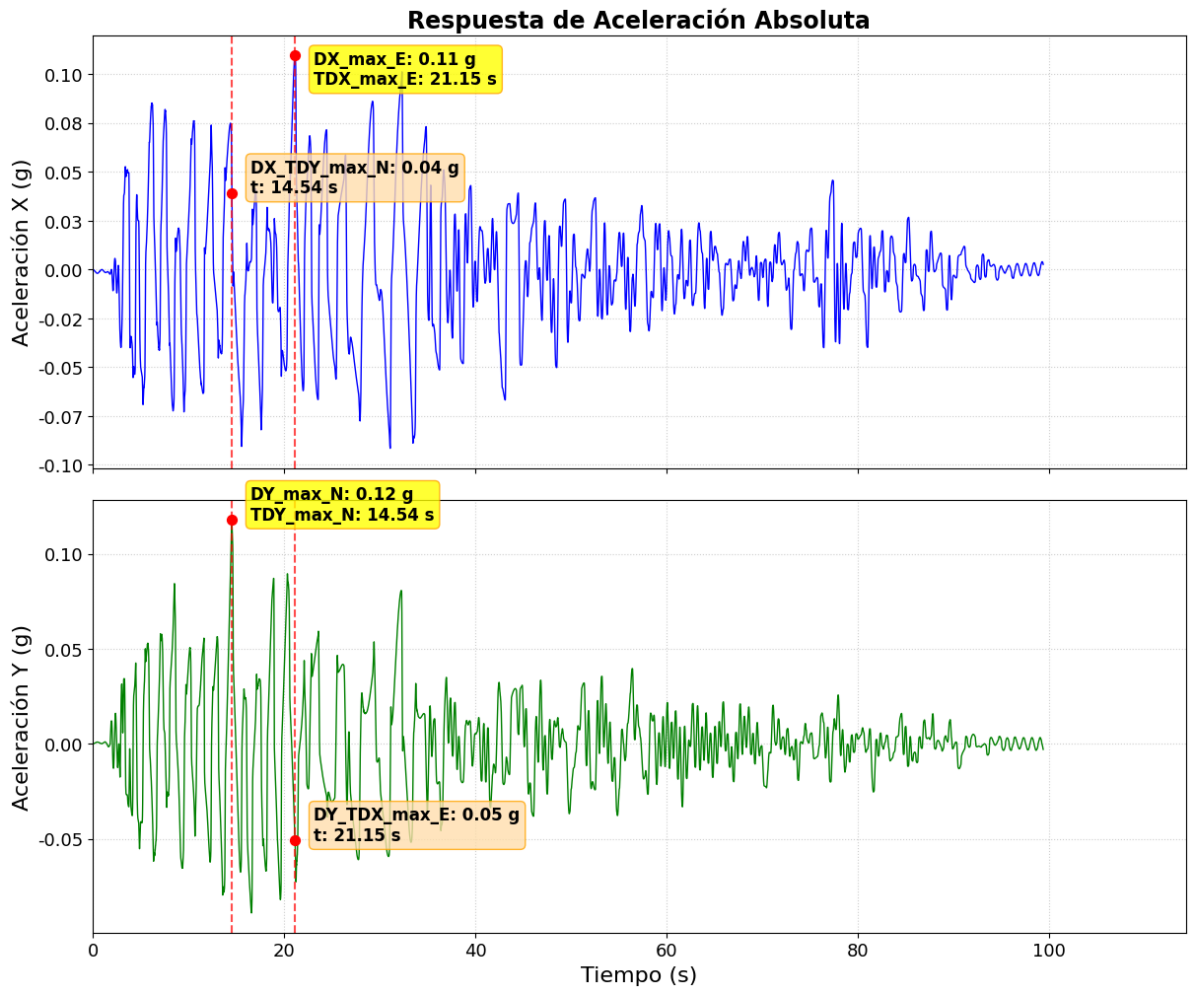


Figura 3.14 Historia de desplazamiento relativo del aislador. Evento 6002693.

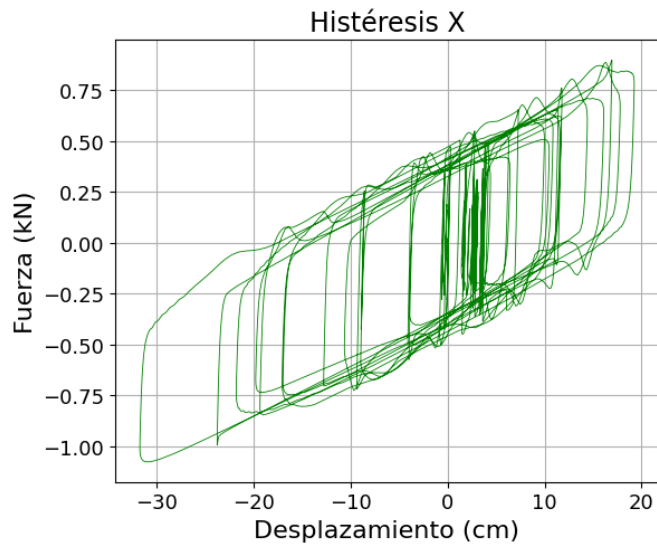


**Figura 3.15** Historia de aceleraciones absolutas del aislador. Evento 6002693.

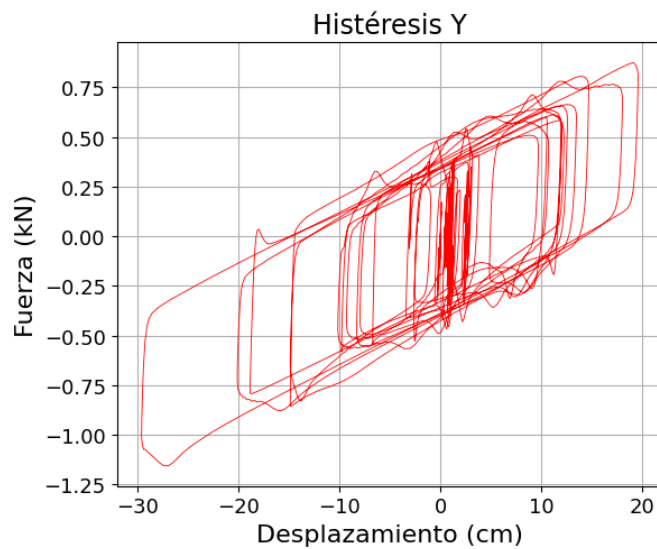
El análisis de las respuestas de desplazamiento relativo del aislador permite evaluar la demanda de deformación impuesta por las componentes horizontales:

- **Desplazamientos Máximos:** Los registros analizados generaron demandas de desplazamiento significativas en el nivel de aislamiento.

**Comportamiento Histerético (Fuerza vs. Desplazamiento)** Las curvas de histéresis obtenidas (Fuerza Restauradora vs. Desplazamiento) evidencian el comportamiento inelástico del aislador bajo las excitaciones sísmicas severas de subducción tal como se muestra en las Figuras 3.16 y 3.17.



**Figura 3.16 Comportamiento histérico del aislador por componente sísmica Este. Evento 6002693.**



**Figura 3.17 Comportamiento histérico del aislador por componente sísmica Norte. Evento 6002693.**

### 3.3 Simultaneidad de las Componente Horizontales

En esta sección se analiza la simultaneidad de las componentes horizontales del sismo, considerando explícitamente la interacción dinámica entre las direcciones ortogonales principales del movimiento (X–Y). Para ello, se definieron cuatro relaciones adimensionales, denominadas  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  y  $\lambda_4$  con el objetivo de cuantificar el aporte cruzado de cada componente horizontal cuando la respuesta máxima ocurre en la dirección ortogonal, permitiendo una

evaluación directa del grado de subestimación asociado a los métodos de combinación simplificados comúnmente empleados en la práctica de diseño.

Las relaciones  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  se orientan al análisis de desplazamientos máximos, evaluando cómo una componente horizontal del sismo contribuye a la respuesta en la dirección ortogonal cuando se produce el máximo en una dirección principal. De forma complementaria, las relaciones  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  se enfocan en el análisis de aceleraciones máximas, con el fin de identificar la influencia cruzada de las componentes horizontales sobre las demandas inerciales del sistema. Este enfoque permite capturar de manera explícita los efectos de simultaneidad direccional bajo excitación sísmica bidireccional real, aspecto especialmente relevante en estructuras con aislación sísmica ubicadas en zonas de subducción.

### 3.3.1 Evaluación de la Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos

Para el análisis en desplazamientos se definen las relaciones  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  como:

$$\lambda_1 = \frac{\Delta_{Y(T_{\Delta X, \max(E)})}}{\Delta_{Y, \max(N)}} \quad (3.3)$$

$$\lambda_2 = \frac{\Delta_{X(T_{\Delta Y, \max(N)})}}{\Delta_{X, \max(E)}} \quad (3.4)$$

donde:

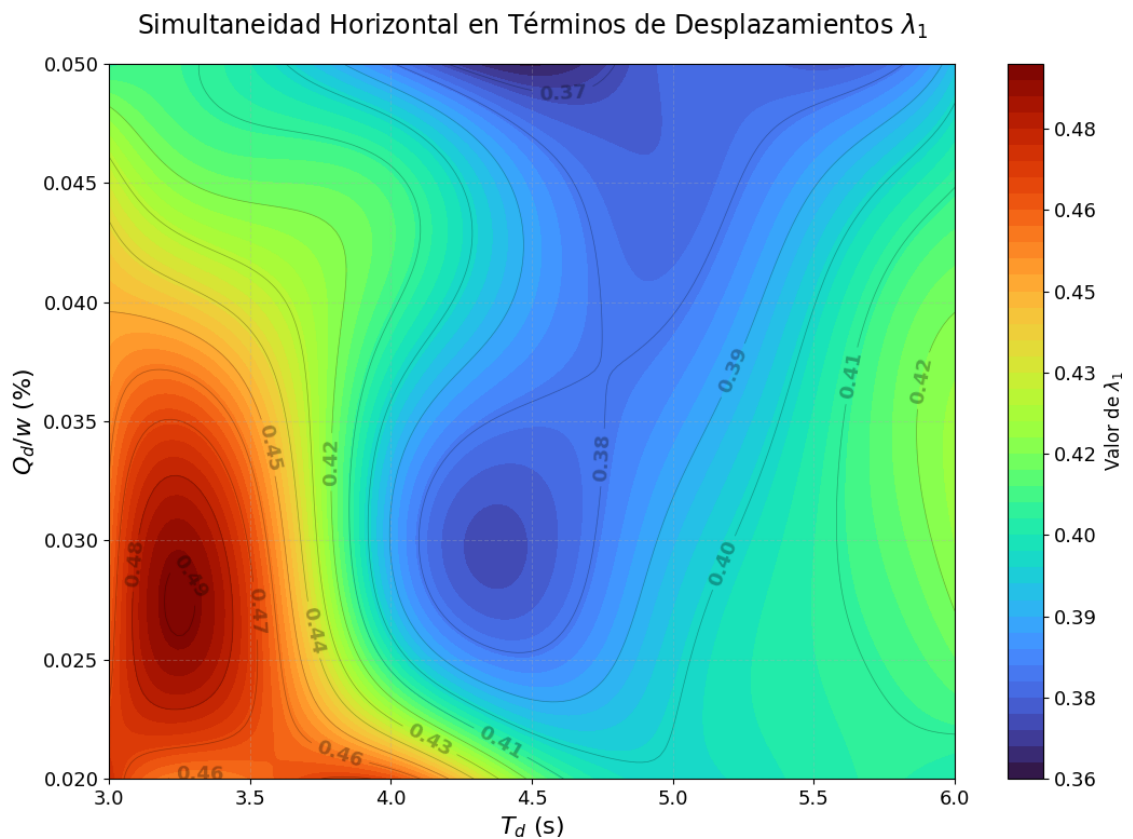
$\Delta_{X, \max(E)}$  y  $\Delta_{Y, \max(N)}$  representan los desplazamientos máximos en las direcciones X e Y, respectivamente.

$T_{\Delta X, \max(E)}$  y  $T_{\Delta Y, \max(N)}$  corresponden al instante de ocurrencia del desplazamiento máximo en cada dirección.

Estas relaciones permiten cuantificar de forma directa la demanda residual en la dirección ortogonal cuando se alcanza el máximo desplazamiento en una dirección principal. En sistemas con aislación sísmica, este aspecto resulta fundamental, ya que la respuesta horizontal está dominada por grandes desplazamientos, y la suposición de no simultaneidad implícita en los métodos

de combinación convencionales puede conducir a una subestimación de los desplazamientos vectoriales máximos.

La Figura 3.18 correspondiente a  $\lambda_1$  representa el cociente entre el desplazamiento en dirección X evaluado en el instante del máximo desplazamiento en Y, y el desplazamiento máximo absoluto en X. En este sentido,  $\lambda_1$  cuantifica el grado de participación simultánea de la respuesta transversal cuando la estructura alcanza su máxima demanda en la dirección principal, siendo un indicador directo de la interacción bidireccional de desplazamientos bajo excitación sísmica tridireccional.



**Figura 3.18 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos  $\lambda_1$**

Los resultados muestran que  $\lambda_1$  adopta valores comprendidos aproximadamente entre **0.36 y 0.48 (36% y 48%)**, evidenciando que, en sistemas con aislación sísmica, la respuesta horizontal no puede considerarse desacoplada. En particular, se identifican niveles elevados de simultaneidad ( $\lambda_1 \approx 0.45 - 0.48$ ) para períodos postfluencia bajos, ( $T_d \approx 3.0 - 3.5s$ ,

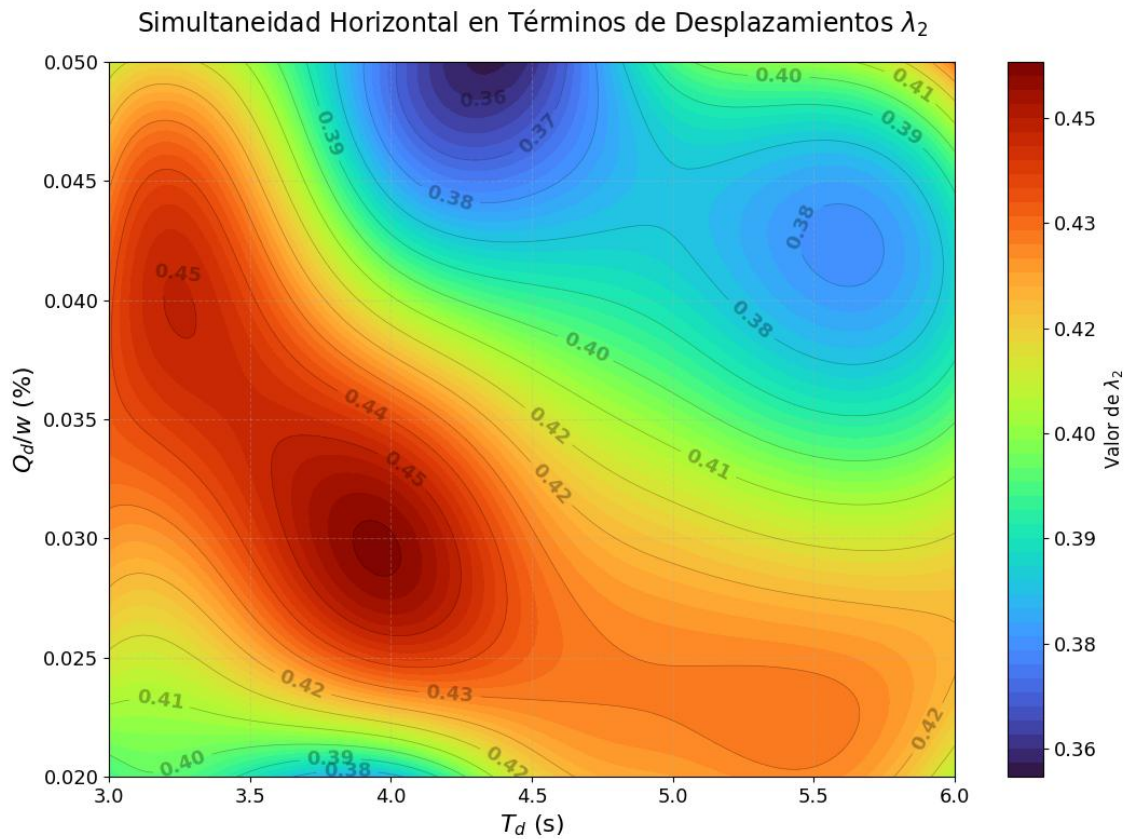
combinados con valores intermedios de resistencia característica  $Q_d/W \approx 0.025 - 0.035$ . Este comportamiento sugiere que, en aisladores relativamente rígidos, la cercanía entre los períodos dominantes del sistema y el contenido espectral de los registros de subducción favorece la ocurrencia casi simultánea de demandas máximas en ambas direcciones horizontales.

A medida que el período postfluencia aumenta hacia valores  $T_d \approx 4.2 - 4.8s$ , se observa una reducción consistente de  $\lambda_1$ , alcanzando valores mínimos del orden de  $0.37 - 0.39$ , particularmente para  $Q_d/W \approx 0.028 - 0.032$ . Este valle de simultaneidad puede interpretarse como un rango dinámico donde la mayor flexibilidad del sistema aislado induce una desincronización temporal entre las respuestas en X e Y, reduciendo la coincidencia de desplazamientos máximos.

Para períodos  $T_d > 5.0 s$ ,  $\lambda_1$  tiende a estabilizarse en valores intermedios, del orden de  $0.40 - 0.42$ , con menor sensibilidad a la variación de  $Q_d/W$ . Este comportamiento indica que, aun en sistemas altamente flexibles, persiste un nivel no despreciable de simultaneidad, incompatible con las hipótesis implícitas de los métodos de combinación simplificados del tipo 100/30.

En términos de diseño, estos resultados indican que, para  $T_d$  entre  $3.0$  y  $6.0s$  y  $Q_d/W$  entre  $0.02$  y  $0.05$ , la participación simultánea de desplazamientos en la dirección ortogonal puede razonablemente considerarse en el rango de **36% a 48%**, con valores cercanos o superiores al **40%** en gran parte del dominio analizado.

La Figura 3.19 correspondiente a  $\lambda_2$  evalúa la relación inversa, es decir, el desplazamiento en Y evaluado en el instante del máximo desplazamiento en X, normalizado por el desplazamiento máximo absoluto en Y. Este parámetro permite verificar la consistencia y simetría del fenómeno de simultaneidad bidireccional, así como identificar posibles efectos direccionales asociados a la respuesta dinámica no lineal del sistema de aislación.



**Figura 3.19 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos  $\lambda_2$**

Los valores de  $\lambda_2$  oscilan aproximadamente entre **0.36 y 0.46 (36% y 46%)**, mostrando una distribución espacial distinta pero coherente con la observada para  $\lambda_1$ . Se identifican máximos de simultaneidad ( $\lambda_2 \approx 0.44 - 0.46$ ) concentrados en el rango de  $T_d \approx 3.6 - 4.2s$ , con  $Q_d/W \approx 0.028 - 0.035$ , lo que indica que, en este intervalo de propiedades dinámicas, la respuesta en ambas direcciones horizontales tiende a desarrollarse de forma altamente sincronizada.

Para períodos ( $T_d \approx 3.0 - 3.4s$ ),  $\lambda_2$  mantiene valores elevados del orden de **0.42 - 0.45**, especialmente para  $Q_d/W \geq 0.035$ , confirmando que los sistemas más rígidos presentan una interacción bidireccional significativa, independientemente de la dirección considerada como principal.

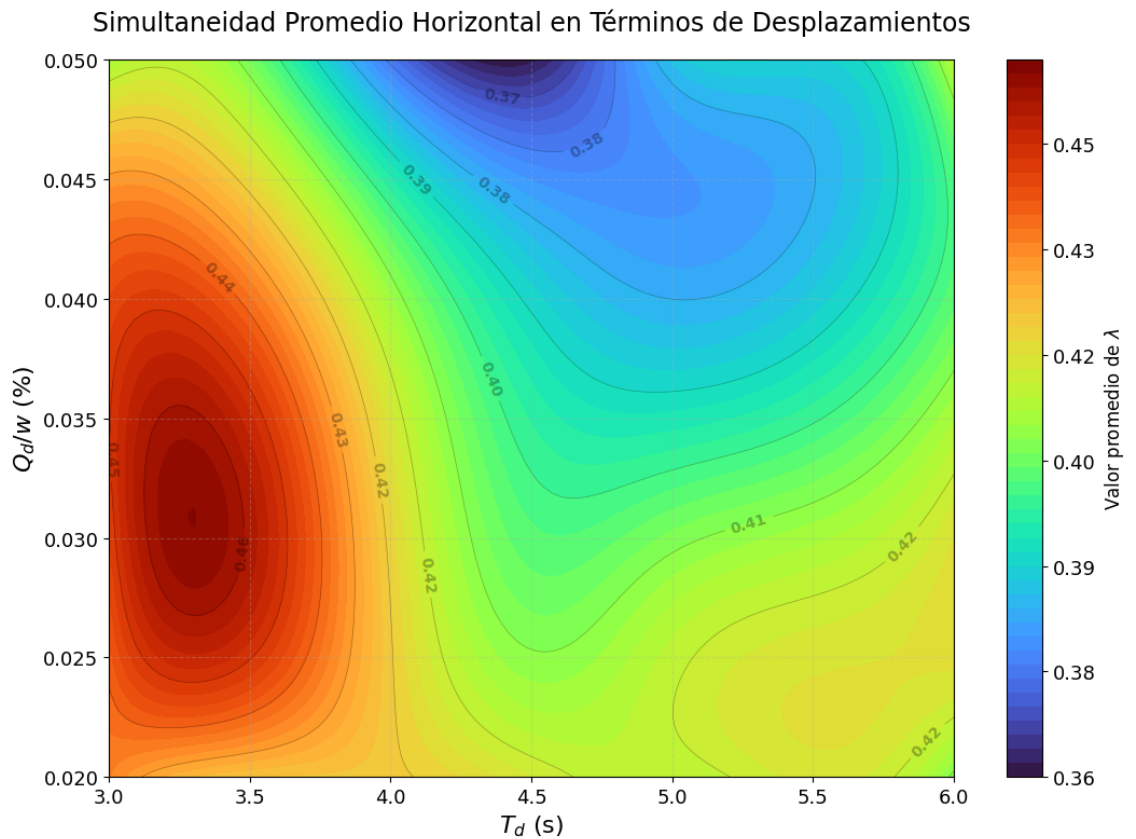
En contraste, para  $T_d$  entre **4.8 y 5.6s**, se observa una región de menor simultaneidad ( $\lambda_2 \approx 0.37 - 0.39$ ), particularmente para  $Q_d/W \approx 0.040 - 0.045$ , lo que sugiere una mayor dispersión temporal entre los picos de

desplazamiento en X e Y. Sin embargo, incluso en este rango, los valores obtenidos superan ampliamente el **30%** usualmente implícito en la práctica de diseño convencional.

En términos globales, la Figura 19 relacionada a  $\lambda_2$  confirma que, para el dominio analizado, la simultaneidad horizontal efectiva puede considerarse del orden de **36% a 45%**, con una clara dependencia tanto del período postfluencia como de la resistencia normalizada del sistema de aislación.

El uso de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  pone de manifiesto que los máximos en las direcciones X e Y no ocurren de manera independiente, sino que presentan una interacción temporal significativa bajo registros sísmicos bidireccionales reales. Este fenómeno es especialmente relevante en sismos de subducción, donde la duración prolongada y el contenido energético en ambas direcciones incrementan la probabilidad de demandas simultáneas elevadas, afectando directamente el diseño de los dispositivos de aislación.

La Figura 3.20 presenta la simultaneidad horizontal promedio definida como el valor medio entre  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , lo que permite evaluar el **nivel global de participación simultánea entre ambas direcciones horizontales**, eliminando posibles efectos direccionales locales y proporcionando una medida representativa del comportamiento bidireccional del sistema de aislación bajo excitación sísmica tridireccional.



**Figura 3.20 Simultaneidad Direccional Promedio de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos  $\left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}\right)$**

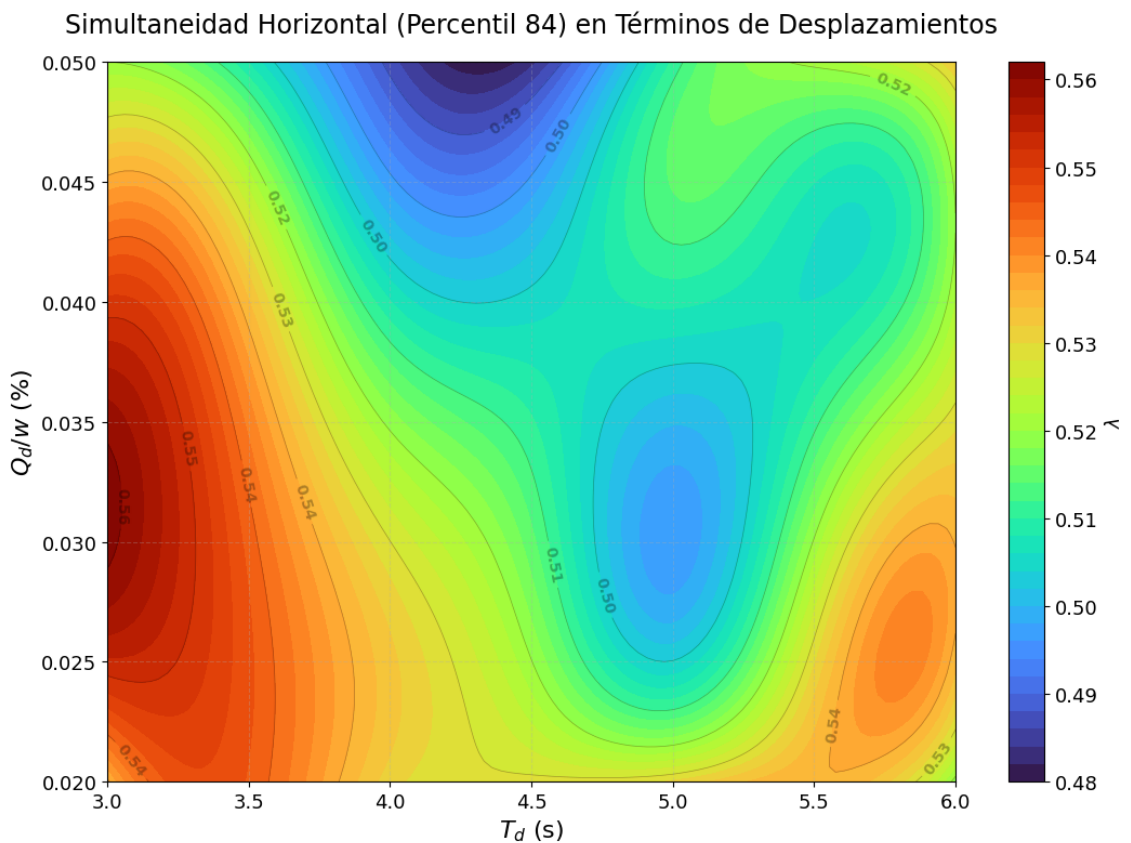
Los resultados indican que la simultaneidad promedio adopta valores comprendidos aproximadamente entre **0.36 y 0.45 (36% y 45%)**, evidenciando que, en términos medios, la respuesta máxima en una dirección ocurre acompañada por demandas significativas en la dirección ortogonal. Se identifican valores elevados de simultaneidad promedio (**0.43 – 0.45**) concentrados en el rango de períodos postfluencia bajos,  $T_d \approx 3.0 – 3.6s$ , y resistencias normalizadas intermedias  $Q_d/W \approx 0.025 – 0.035$ . Este comportamiento refleja una alta correlación temporal entre las componentes horizontales, típica de registros sísmicos de subducción caracterizados por contenido energético prolongado en bajas frecuencias.

En el rango de períodos ( $T_d > 5.0s$ ), la simultaneidad promedio tiende a estabilizarse en valores intermedios, típicamente entre **0.40 y 0.42**, con menor sensibilidad a la variación de  $Q_d/W$ . Este resultado es particularmente relevante desde el punto de vista del diseño, ya que demuestra que el

aumento del período efectivo del sistema no elimina la simultaneidad bidireccional, incluso en configuraciones altamente flexibles.

En conjunto, la Figura 3.20 permite afirmar que, para el dominio de diseño analizado ( $T_d = 3.0 - 6.0s$ ,  $Q_d/3.0 - 6.0s$ ,  $Q_d/W = 0.02 - 0.05$ ), un valor promedio de simultaneidad horizontal del orden del **40%** resulta representativo del comportamiento real de estructuras con aislación sísmica en zonas de subducción.

La Figura 3.21 muestra la simultaneidad horizontal correspondiente al percentil 84, definida como la suma del valor medio de simultaneidad y una desviación estándar ( $\mu + \sigma$ ). Esta métrica representa un escenario conservador, consistente con los criterios estadísticos empleados en normativas modernas para la evaluación de demandas sísmicas, y es particularmente relevante para aplicaciones de diseño y verificación del desempeño.



**Figura 3.21 Simultaneidad Direccional Promedio (Percentil 84) de las Componentes Horizontales en Términos de Desplazamientos ( $\mu + \sigma$ )**

Los resultados indican que el **percentil 84** de simultaneidad adopta valores comprendidos aproximadamente entre **0.48 y 0.56**, lo que implica que, en condiciones desfavorables pero plausibles, la componente horizontal ortogonal puede alcanzar entre el **50% y el 55%** del desplazamiento máximo en la dirección principal. Se observan máximos de simultaneidad (**0.54 – 0.56**) en el rango de  $T_d \approx 3.0 – 3.6s$ , asociados principalmente a  $Q_d/W \approx 0.028 – 0.035$ , lo que confirma que los sistemas con aisladores más rígidos presentan no solo una alta simultaneidad promedio, sino también una elevada dispersión estadística, incrementando el riesgo de subestimación de demandas cuando se emplean métodos de combinación simplificados.

Para períodos ( $T_d \approx 4.8 – 5.4 s$ ), los valores del percentil 84 se reducen ligeramente, situándose en el rango de **0.49 – 0.52**, aunque permanecen significativamente por encima del **30%** usualmente considerado en la práctica de diseño convencional. Incluso para  $T_d$  cercanos a **6.0s**, la simultaneidad del percentil 84 se mantiene del orden de **0.50**, lo que evidencia la persistencia de una interacción bidireccional relevante aun en sistemas altamente flexibles.

Las Tablas 3.2-3.7 detalladas a continuación, muestran los resultados en términos de desplazamientos para  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  considerando períodos postfluencia en el rango de  $T_d = 3.0 – 6.0s$ , resistencia característica en el rango de  $Q_d/W = 0.02 – 0.05$  y niveles de amortiguamiento vertical en el rango de  $\xi_v = 1.0 – 5.0\%$ :

**Tabla 3.2 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Desplazamientos ( $\lambda_1$ ) para  $\xi_v = 1.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_1$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	47.2	45.9	46.2	42.4	39.6	40.7	40.3
	3	45.7	46.2	38.5	36.5	38.9	41.1	42.5
	4	45.5	43.7	40.6	38.4	37.6	40.1	42.0
	5	41.2	40.5	38.1	36.2	37.7	38.4	40.2

**Tabla 3.3 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Desplazamientos ( $\lambda_2$ ) para  $\xi_v = 1.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_2$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	39.5	38.8	38.1	42.1	42.6	43.0	40.6
	3	42.4	43.8	45.2	43.2	42.0	41.8	42.1
	4	44.5	44.1	40.4	39.1	38.9	38.1	39.1
	5	41.0	40.9	36.9	36.2	40.1	41.5	44.3

**Tabla 3.4 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Desplazamientos ( $\lambda_1$ ) para  $\xi_v = 2.5\%$**

Valores Promedios de $\lambda_1$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	47.6	46.2	46.7	41.8	40.1	40.6	40.5
	3	46.3	46.9	39.0	37.2	39.2	40.8	42.3
	4	44.9	43.5	41.1	38.7	37.9	40.0	41.9
	5	41.0	40.5	38.1	36.2	37.6	37.4	39.4

**Tabla 3.5 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Desplazamientos ( $\lambda_2$ ) para  $\xi_v = 2.5\%$**

Valores Promedios de $\lambda_2$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	39.6	39.0	38.2	41.8	42.8	43.1	40.9
	3	42.9	44.2	45.6	43.3	42.1	41.5	41.7
	4	43.9	44.1	40.9	39.5	38.9	37.8	38.7
	5	41.3	40.7	36.9	36.1	39.7	40.6	43.4

**Tabla 3.6 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Desplazamientos ( $\lambda_1$ ) para  $\xi_v = 5.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_1$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	47,8	46,2	47,1	42,3	40,4	41,5	40,9
	3	46,2	47,3	39,5	37,5	39,4	40,8	42,3
	4	45,3	43,7	40,4	39,2	38,1	39,9	42,5
	5	40,6	40,5	37,7	36,2	37,3	37,5	39,7

**Tabla 3.7 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Desplazamientos ( $\lambda_2$ ) para  $\xi_v = 5.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_2$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	40,2	39,3	38,5	42,4	43,4	43,7	41,2
	3	42,5	44,7	46,6	43,8	42,3	41,6	41,8
	4	44,2	44,4	40,7	40,0	39,0	38,1	39,4
	5	40,7	40,5	36,6	36,8	39,5	41,0	43,9

La evaluación cuantitativa de la simultaneidad direccional de las componentes horizontales del sismo, expresada mediante los índices  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , revela un patrón fundamental para el diseño de estructuras aisladas. Estos índices, que relacionan el desplazamiento en una dirección en el instante en que se produce el máximo en la dirección ortogonal, muestran valores promedio que se encuentran predominantemente en el rango del **36% al 48%**, con una **media general alrededor del 41%**. Este resultado es de crítica importancia, ya que indica que, en el instante de máxima demanda en una dirección, la demanda en la dirección perpendicular es, en promedio, menos de la mitad de su valor máximo individual.

Este hallazgo invalida directamente la premisa conservadora pero imprecisa del método 100/30, el cual asume una simultaneidad del 30%, y demuestra que la regla del 30% puede ser, para muchos casos, insuficiente o no óptimamente calibrada, dependiendo de los parámetros del sistema. La regla SRSS, al asumir una combinación cuadrática que no captura la correlación temporal, también presenta limitaciones ante esta evidencia de correlación inter-direccional moderada pero no despreciable.

### **3.3.1.1 Influencia de los Parámetros del Sistema de Aislamiento en la Simultaneidad**

El análisis de las tablas para los distintos niveles de amortiguamiento vertical ( $\xi_v = 1.0\%$ ,  $2.5\%$  y  $5.0\%$ ) y para las combinaciones de período postfluencia  $T_d$  y resistencia característica  $Q_d/W$ , permite identificar tendencias clave:

- **Influencia del Amortiguamiento Vertical ( $\xi_v$ ):** La variación del amortiguamiento vertical tiene un impacto mínimo en los valores de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ . Las diferencias entre los resultados para  $\xi_v = 1.0\%$  y  $\xi_v = 5.0\%$  son generalmente inferiores al 2%, lo que sugiere que este parámetro no es determinante en el grado de simultaneidad direccional de los desplazamientos horizontales. Su influencia principal se mantendría en la respuesta vertical y en las fuerzas axiales de los aisladores.
- **Influencia del Período de Aislamiento ( $T_d$ ):** Se observa una tendencia no monótona en función de  $T_d$ . Para valores bajos de  $Q_d/W = 2 - 3\%$ , los índices  $\lambda$  tienden a ser más bajos en períodos intermedios (4.0s - 4.5s) y aumentan ligeramente hacia períodos más largos (5.5s - 6.0s). Para  $Q_d/W$  altos (5%), los valores mínimos de simultaneidad suelen concentrarse en el rango de  $T_d = 4.0s - 4.5s$ . Esto indica que existe una combinación de rigidez y resistencia del aislador que minimiza la correlación inter-direccional de las demandas máximas.
- **Influencia de la Resistencia Característica ( $Q_d/W$ ):** Un aumento en  $Q_d/W$  generalmente conlleva una ligera reducción en los valores de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , especialmente notable al pasar de  $Q_d/W = 2\%$  a  $Q_d/W = 5\%$ . Sistemas con mayor fuerza de fluencia (mayor  $Q_d/W$ ) tienden a exhibir

una menor proporción de desplazamiento simultáneo en la dirección ortogonal en el instante de máximo desplazamiento.

- La comparación entre la simultaneidad promedio y su correspondiente percentil 84 pone en evidencia que la práctica de diseño basada en combinaciones simplificadas del tipo 100/30 resulta claramente no conservadora para estructuras con aislación sísmica sometidas a registros de subducción. Mientras que el valor promedio sugiere una simultaneidad del orden de **40%**, el enfoque estadístico conservador indica que valores cercanos o superiores al **50%** son plenamente alcanzables y deben ser considerados en evaluaciones de desempeño.

### 3.3.2 Evaluación de la Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones

De manera análoga, para el análisis de aceleraciones se definen las relaciones  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  como:

$$\lambda_3 = \frac{A_{Y(T_{AX,\max(E)})}}{A_{Y,\max(N)}} \quad (3.5)$$

$$\lambda_4 = \frac{A_{X(T_{AY,\max(N)})}}{A_{X,\max(E)}} \quad (3.6)$$

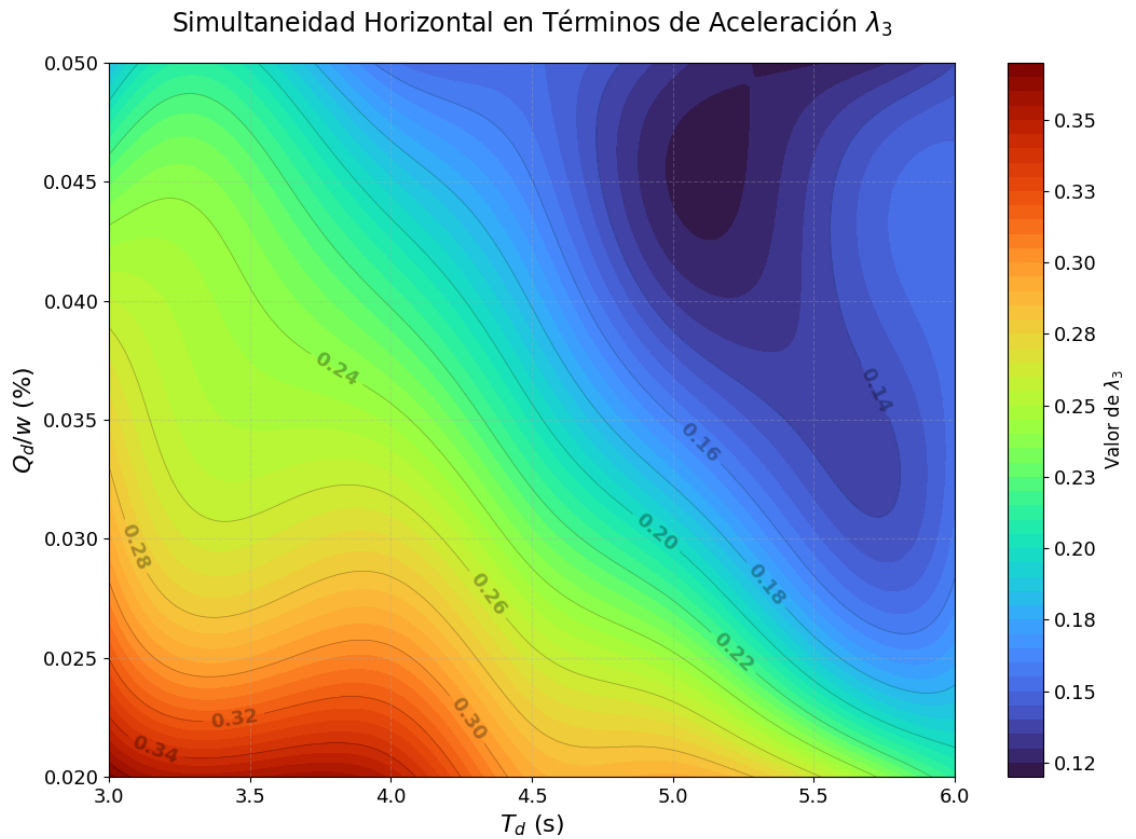
donde:

$A_{X,\max(E)}$  y  $A_{Y,\max(N)}$  corresponden a las aceleraciones máximas en las direcciones X e Y, respectivamente, y

$T_{AX,\max(E)}$  y  $T_{AY,\max(N)}$  corresponden al instante de ocurrencia de la aceleración máxima en cada dirección.

Las relaciones  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  permiten evaluar la simultaneidad de las demandas inerciales inducidas por las componentes horizontales del sismo, aspecto crítico para la estimación de fuerzas internas y esfuerzos transmitidos a la superestructura. A diferencia de los desplazamientos, las aceleraciones están directamente vinculadas a las fuerzas sísmicas, por lo que su correcta evaluación resulta esencial para una estimación realista de las demandas de diseño.

La Figura 3.22 correspondiente a  $\lambda_3$  describe la relación entre la aceleración en dirección Y evaluada en el instante de la máxima aceleración absoluta en X, normalizada por la aceleración máxima en Y. Este coeficiente permite evaluar la transmisión simultánea de fuerzas inerciales a la superestructura y contenidos, un aspecto fundamental para el diseño de componentes no estructurales y la validación de métodos simplificados.

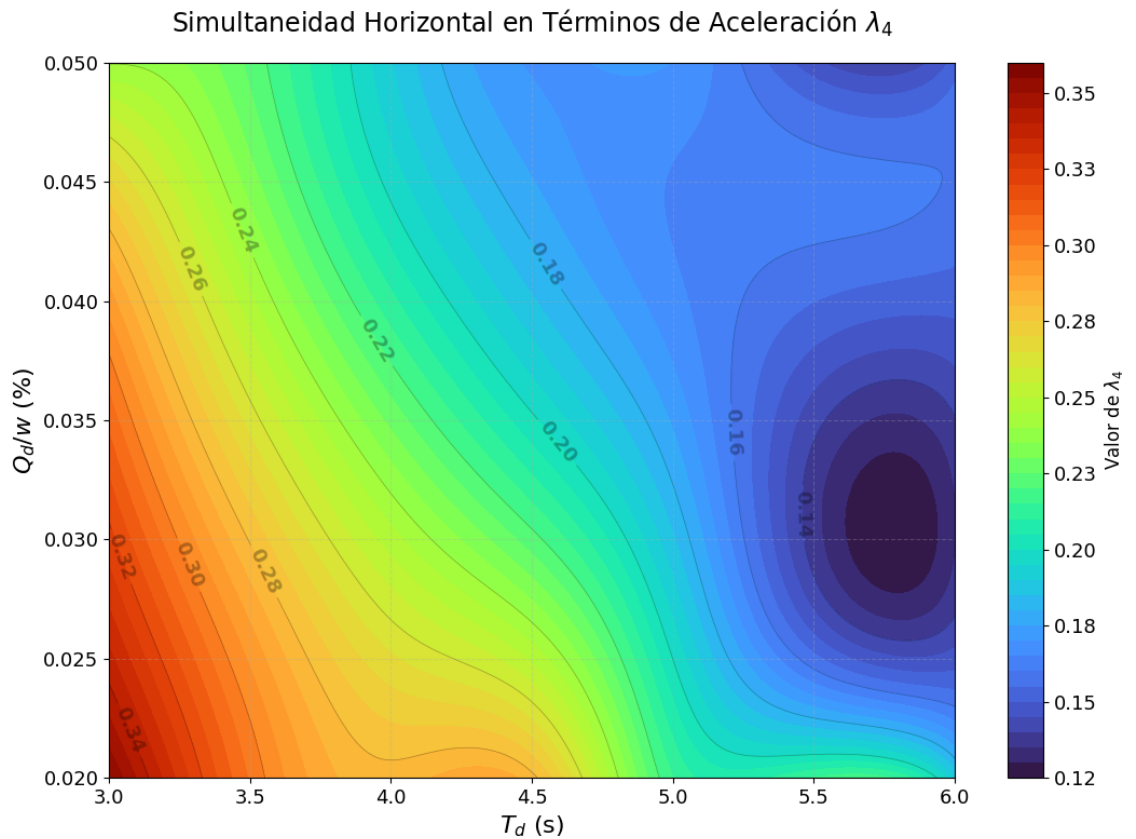


**Figura 3.22 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones  $\lambda_3$**

El análisis de los resultados revela un rango de variación amplio, con valores de  $\lambda_3$  oscilando entre **0.12 y 0.36**. Se observa una concentración de alta simultaneidad ( $\lambda_3 > 0.30$ ) en la zona de períodos cortos ( $T_d \approx 3.0 - 3.8$ s) combinada con baja resistencia característica ( $Q_d/W < 0.025$ ). En esta región, la simultaneidad inercial supera el umbral del 30% propuesto por la regla de combinación direccional 100/30, lo que implica que dicha metodología podría subestimar las fuerzas de diseño en sistemas aislados con menor flexibilidad y capacidad de disipación.

A medida que aumenta el período postfluencia ( $T_d > 4.5s$ ) y la resistencia característica ( $Q_d/W > 0.035$ ), se evidencia una reducción drástica de la simultaneidad, alcanzando mínimos absolutos del orden de **0.14 – 0.18**. Este fenómeno sugiere que, en sistemas muy flexibles y con mayor capacidad de amortiguamiento histerético, las aceleraciones máximas en direcciones ortogonales tienden a desacoplarse temporalmente. Esto contrasta con el comportamiento de los desplazamientos, indicando que las demandas inerciales son más sensibles al filtrado de altas frecuencias que proporciona el sistema de aislamiento.

De manera análoga, el coeficiente  $\lambda_4$  cuantifica la participación de la aceleración en la dirección X en el instante de ocurrencia de la máxima aceleración en Y. Los contornos obtenidos confirman la tendencia general observada en la dirección opuesta, pero con matices en la distribución de los mínimos.



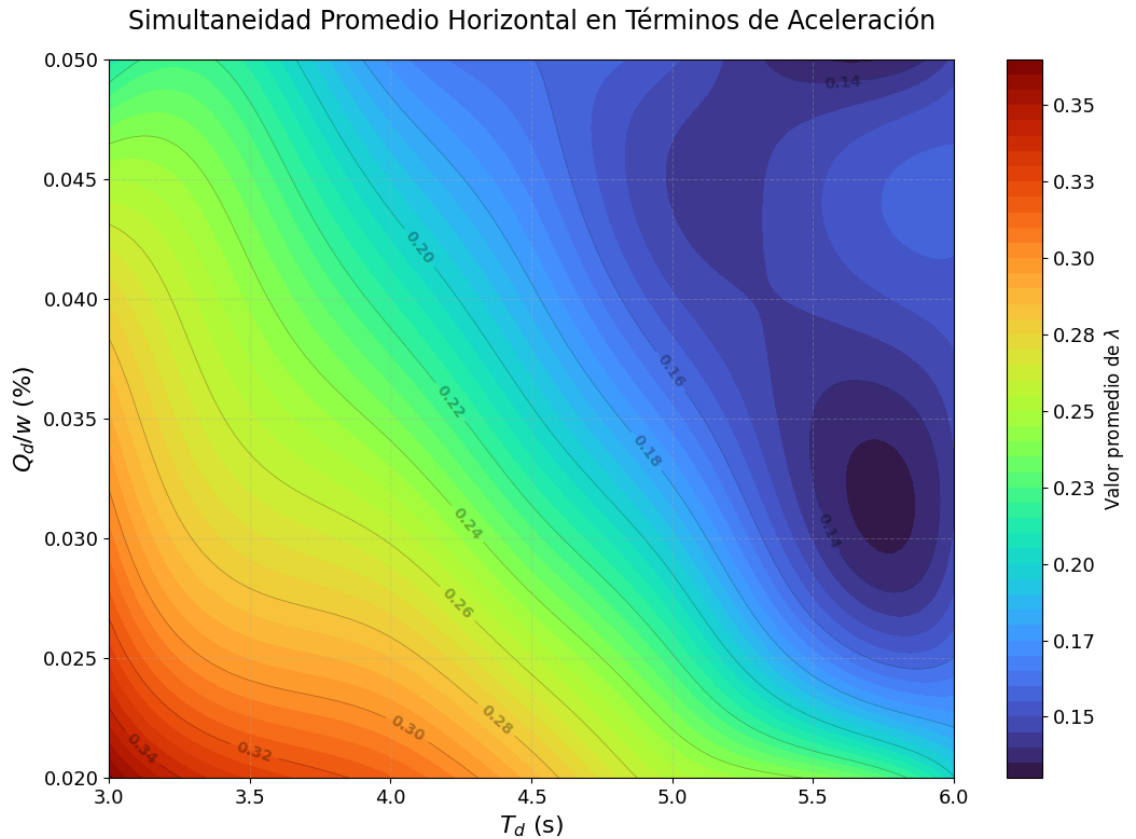
**Figura 3.23 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones  $\lambda_4$**

Los valores máximos de simultaneidad,  $\lambda_4 \approx 0.32 - 0.35$ , se agrupan consistentemente en el rango de períodos bajos ( $T_d < 3.5s$ ) y bajas relaciones de fluencia ( $Q_d/W < 0.030$ ). Esto refuerza la conclusión de que, para estructuras aisladas en el rango inferior de períodos (cercanos a 3 segundos), existe una coincidencia temporal significativa de los picos de aceleración bidireccionales, lo cual debe ser considerado para evitar la subestimación de cortantes basales y fuerzas en diafragmas.

Sin embargo, para períodos largos ( $T_d > 5.0s$ ), el comportamiento cambia radicalmente. Se observa una zona de "valle" profundo con valores de  $\lambda_4 < 0.15$ , particularmente notable alrededor de  $T_d \approx 5.5 - 6.0s$  y  $Q_d/W \approx 0.030$ . En este rango dinámico, la respuesta de aceleración ortogonal es menos del 15% en el momento del pico principal.

Los resultados obtenidos mediante estas relaciones evidencian que, incluso cuando la aceleración máxima ocurre en una dirección principal, la componente ortogonal puede presentar valores significativos de forma simultánea. Este comportamiento confirma que los enfoques de combinación simplificados, como el método 100/30 o SRSS, no capturan adecuadamente la interacción direccional real, particularmente en estructuras con aislación sísmica sometidas a excitación sísmica bidireccional característica de zonas de subducción.

La Figura 3.24 ilustra el comportamiento promedio de la interacción entre las componentes horizontales de aceleración. Este gráfico representa la tendencia central de la simultaneidad inercial esperada en el sistema aislado.



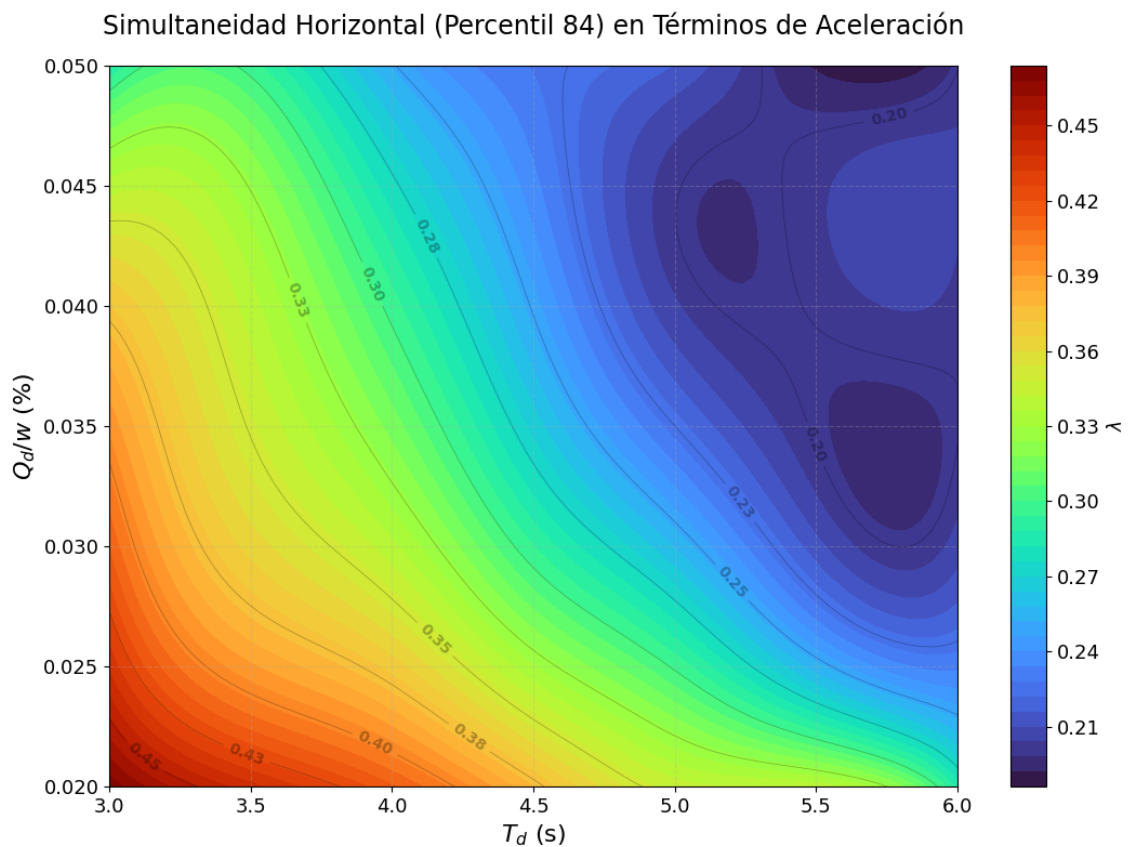
**Figura 3.24 Simultaneidad Direccional Promedio de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones.**

El análisis de los contornos revela que, en términos promedio, la aceleración ortogonal mantiene un nivel de acoplamiento significativo en casi todo el espectro de diseño, con valores que oscilan entre **0.15 y 0.35**. Se distinguen los siguientes comportamientos por rangos:

- Rango Crítico Promedio ( $T_d < 3.5s$ ):** Para sistemas con períodos postfluencia relativamente bajos, se observa una zona crítica de alta simultaneidad. Específicamente, para  $T_d$  entre 3.0s y 3.5s y resistencias bajas a moderadas ( $Q_d/W < 0.030$ ), el factor promedio alcanza valores de **0.30 a 0.35**. Esto indica que, sistemáticamente, las demandas de aceleración en ambas direcciones ocurren con una coincidencia temporal ligeramente superior al **30%** que proponen los métodos simplificados. Esto sugiere que, para este rango de períodos, la regla es apenas suficiente para cubrir la demanda media, dejando poco margen para la incertidumbre.

- **Rango de Desacoplamiento Promedio ( $T_d > 4.5s$ ):** A medida que aumenta la flexibilidad del sistema, la simultaneidad promedio disminuye levemente, pero se mantiene en niveles altos. Para  $T_d > 5.5s$ , los valores se estabilizan alrededor de 0.15 – 0.20. Esto indica que, en promedio, las aceleraciones en sistemas de período largo tienden a ocurrir de manera asincrónica. En este régimen, la respuesta ortogonal simultánea es baja (menos del 20% del máximo), lo que confirma la eficiencia del aislamiento para filtrar la transmisión simultánea de fuerzas inerciales en estructuras flexibles.

La Figura 3.25 presenta la envolvente de diseño correspondiente al percentil 84 ( $\mu + \sigma$ ). Este gráfico es fundamental, ya que define el límite superior de seguridad para evaluar la idoneidad de la regla del 100/30 bajo una perspectiva probabilista conservadora.



**Figura 3.25 Simultaneidad Direccional Promedio (Percentil 84) de las Componentes Horizontales en Términos de Aceleraciones ( $\mu + \sigma$ )**

La distribución del percentil 84 muestra una transición marcada y dependiente de la flexibilidad del sistema, Los resultados muestran un rango de variación más amplio, entre 0.21 y 0.45, lo cual permite establecer conclusiones contundentes sobre la seguridad de los métodos simplificados:

- **Zona de Vulnerabilidad ante Métodos Simplificados ( $T_d < 3.8s$ ):**  
En la región de períodos ( $T_d \approx 3.0 - 3.8s$ ) y baja resistencia característica ( $Q_d/W < 0.035$ ), el percentil 84 alcanza valores máximos de **0.40 a 0.45**. Este resultado es crítico. Demuestra que existe una probabilidad significativa de que la aceleración ortogonal alcance el 45% del valor principal. Al comparar esto con el factor de 0.30 de la regla estándar, se evidencia una subestimación del orden del 50% en las fuerzas inerciales de diseño. Por lo tanto, aplicar la regla 100/30 en esta zona resulta no conservador e inseguro.
- **Zona de Conservadurismo de la Regla 100/30 ( $T_d > 5.0s$ ):** Para sistemas muy flexibles ( $T_d > 5.0s$ ), especialmente con resistencias mayores a  $Q_d/W > 0.03$ , se observa un descenso drástico en la simultaneidad, llegando a valores mínimos de **0.21 a 0.25**. Incluso bajo una consideración estadística conservadora (P84), la simultaneidad se mantiene holgadamente por debajo de **0.30**. Esto valida que, únicamente para estructuras aisladas de período largo, la regla del 100/30 actúan como una envolvente segura y conservadora para el diseño de componentes sensibles a la aceleración.

Las Tablas 3.8-3.13 detalladas a continuación, muestran los resultados en términos de aceleraciones  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  considerando períodos postfluencia en el rango de  $T_d = 3.0 - 6.0s$ , resistencia característica en el rango de  $Q_d/W = 0.02 - 0.05$  y niveles de amortiguamiento vertical en el rango de  $\xi_v = 1.0 - 5.0\%$ .

**Tabla 3.8 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Aceleraciones ( $\lambda_3$ ) para  $\xi_v = 1.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_3$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	36.9	35.6	34.9	29.8	29.0	25.9	21.3
	3	29.3	26.3	26.9	23.4	19.7	15.0	15.6
	4	25.7	23.9	21.5	18.0	13.6	13.5	15.3
	5	18.5	20.4	15.6	15.0	13.1	12.9	14.1

**Tabla 3.9 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Aceleraciones ( $\lambda_4$ ) para  $\xi_v = 1.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_4$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	35.7	30.7	28.3	28.2	21.3	21.5	18.9
	3	32.4	27.9	24.8	22.2	18.5	13.8	13.6
	4	29.5	24.7	21.3	18.7	16.7	15.6	15.3
	5	24.3	22.4	19.1	17.1	17.1	14.8	15.3

**Tabla 3.10 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Aceleraciones ( $\lambda_3$ ) para  $\xi_v = 2.5\%$**

Valores Promedios de $\lambda_3$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	36.7	35.4	34.9	29.3	29.1	26.2	21.2
	3	29.2	26.4	27.0	23.3	19.8	15.2	15.6
	4	25.6	24.1	21.9	17.9	13.5	13.7	15.4
	5	18.3	20.2	15.6	15.1	13.2	12.4	14.0

**Tabla 3.11 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Aceleraciones ( $\lambda_4$ ) para  $\xi_v = 2.5\%$**

Valores Promedios de $\lambda_4$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	35.5	30.4	28.2	28.2	21.5	21.5	18.9
	3	32.2	27.9	24.7	22.2	18.6	13.7	13.4
	4	29.2	24.7	21.1	18.6	16.7	15.5	15.2
	5	24.0	22.4	19.1	17.0	17.0	14.6	15.2

**Tabla 3.12 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Aceleraciones ( $\lambda_3$ ) para  $\xi_v = 5.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_3$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	37,0	35,7	35,3	29,7	29,2	26,5	21,3
	3	29,0	26,6	27,3	23,6	20,1	15,2	15,7
	4	26,2	24,3	21,8	18,3	13,7	13,4	15,1
	5	18,6	20,4	15,6	15,1	13,1	12,5	14,0

**Tabla 3.13 Simultaneidad Direccional de las Componentes Horizontales en  
Términos de Aceleraciones ( $\lambda_4$ ) para  $\xi_v = 5.0\%$**

Valores Promedios de $\lambda_4$ (%)								
Período Postfluencia $T_d$ (s)		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$Q_d/W$ (%)	2	35,9	30,9	28,4	28,4	21,7	21,7	19,1
	3	32,4	28,1	25,0	22,2	18,8	13,8	13,5
	4	29,8	24,8	21,1	18,8	16,8	15,9	15,4
	5	24,0	22,5	19,1	17,1	17,1	14,7	15,2

El análisis detallado de las tablas para  $\xi_v = 1.0\%$ ,  $2.5\%$  y  $5.0\%$  permite establecer conclusiones clave:

- **Efecto Dominante de  $T_d$  y  $Q_d/W$ :** Existe una relación inversa y pronunciada entre la simultaneidad en aceleraciones y ambos parámetros del aislador. Para configuraciones con baja resistencia ( $Q_d/W = 2\%$ ) y período de aislación  $T_d = 3.0s$ , los valores de  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  son máximos (alrededor del 35-37%). A medida que  $T_d$  aumenta hasta 6.0s o  $Q_d/W$  se incrementa al 5%, estos valores caen drásticamente, llegando a rangos de 12% a 21%. Esto indica que sistemas de aislamiento más blandos y con mayor capacidad de disipación (mayor  $Q_d/W$ ) son más efectivos para aislar a la superestructura de la excitación sísmica multidimensional simultánea.
- **Influencia Mínima del Amortiguamiento Vertical ( $\xi_v$ ):** Al igual que en el análisis de desplazamientos, la variación del amortiguamiento vertical no produce cambios significativos en los índices  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$ . Las diferencias entre los tres niveles de  $\xi_v$  analizados son marginales, siempre por debajo del 2% para cualquier combinación de  $T_d$  y  $Q_d/W$ . Esto reafirma que el amortiguamiento vertical es un parámetro que influye primariamente en la respuesta axial de los aisladores, pero no altera sustancialmente la relación de simultaneidad de las aceleraciones horizontales transmitidas a la superestructura.
- **Comparación entre  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$ :** Ambos índices muestran tendencias similares, aunque con ligeras diferencias en magnitud para ciertas combinaciones de parámetros, lo que refleja la asimetría direccional inherente a los registros sísmicos reales y a la posible configuración estructural.
- La comparación entre el comportamiento promedio (Figura 3.24) y el percentil 84 (Figura 3.25) evidencia que la respuesta de aceleración en estructuras aisladas en zonas de subducción es altamente sensible al período de aislamiento. Mientras que para  $T_d < 3.5s$  la regla del 100/30 es consistentemente excedida (haciendo recomendable un factor más cercano a 100/45), para  $T_d > 5.0s$  el sistema de aislamiento logra filtrar eficazmente la transmisión simultánea de aceleraciones, validando el uso

de los métodos simplificados actuales únicamente en el rango de períodos largos.

### 3.4 Simultaneidad de la Componente Vertical ( $R_1$ )

Para evaluar la influencia de la aceleración vertical en el instante de máximo desplazamiento horizontal del sistema de aislamiento, se analizó el parámetro adimensional  $R_1$ . Este parámetro se define como la relación entre la aceleración absoluta vertical ( $A_{ab,z}$ ) registrada en el instante donde ocurre el desplazamiento horizontal máximo ( $\Delta_{max}$ ), normalizada por la aceleración espectral de diseño horizontal promedio ( $S_{DS,AV}$ ).

$$R_1 = \frac{A_{ab,z}}{\frac{S_{DS,X} + S_{DS,Y}}{2}} \quad (3.7)$$

donde:

$A_{ab,z}$  es la aceleración absoluta vertical,

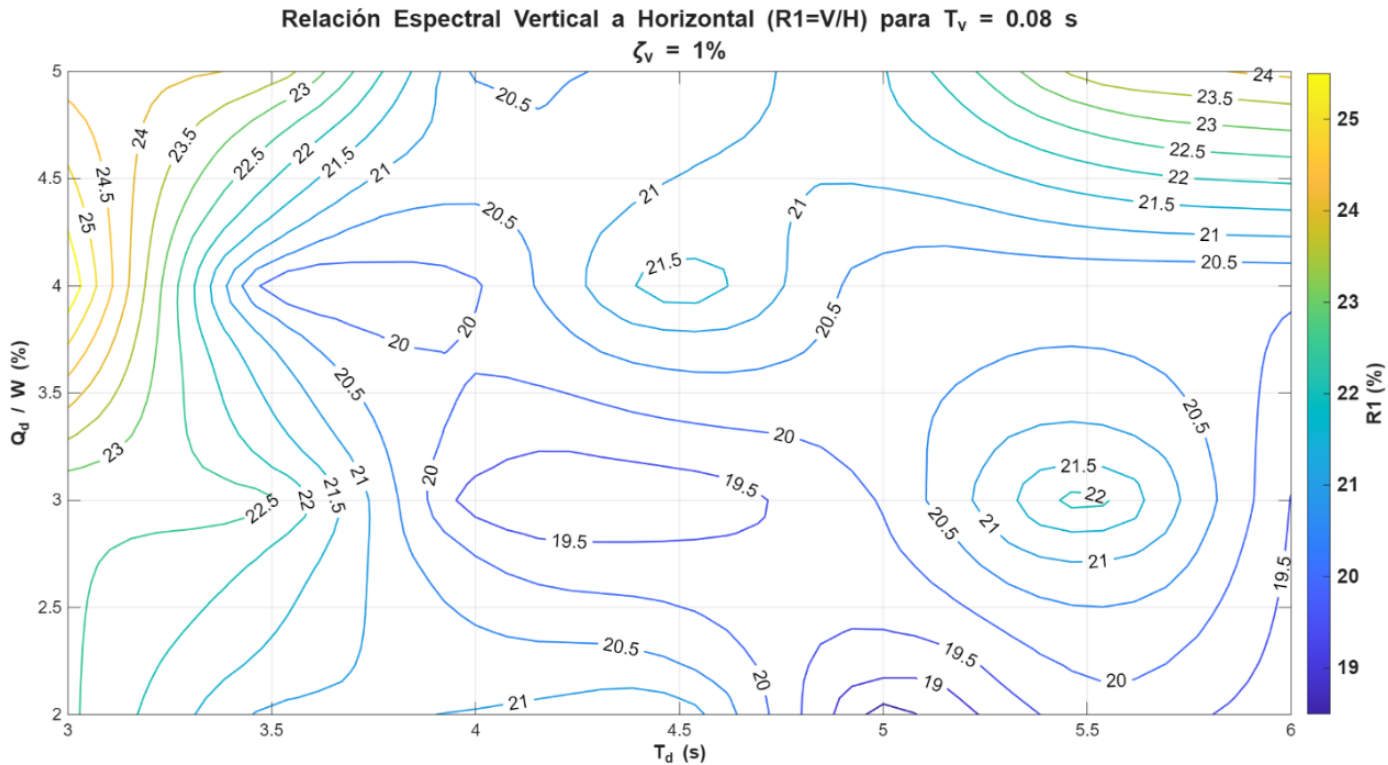
$S_{DS} = 2.5 * PGA$  es la aceleración espectral de diseño para períodos cortos.

La consideración de  $S_{DS} = 2.5 * PGA$  se fundamenta en que la forma espectral adoptada en las normativas modernas de diseño sismorresistente tiene su origen en el análisis estadístico de espectros de respuesta elásticos obtenidos a partir de registros sísmicos reales. ASCE/SEI 7 (2022) muestra que, para un amortiguamiento del 5%, la aceleración espectral en el rango de períodos cortos (alrededor de  $T \approx 0.2s$ ) alcanza valores significativamente superiores a la aceleración máxima del suelo (PGA), debido a los efectos de amplificación dinámica y resonancia estructural. En particular, se ha observado de manera consistente que la aceleración espectral máxima en este rango puede aproximarse a valores del orden de 2 a 3 veces la PGA, siendo un valor representativo ampliamente aceptado  $S_a(T \approx 0.2s) \approx 2.5 \cdot PGA$ .

Por otra parte, el análisis se realizó sobre una base de datos de sismos de subducción (NGA-Subduction), variando las propiedades del sistema de aislamiento: períodos de post-fluencia ( $T_d$ ) y relaciones de resistencia característica ( $Q_d/W$  entre 0.02 y 0.05).

La Figura 3.26 correspondiente al período vertical  $T_v = 0.08s$  y amortiguamiento vertical y  $\xi_v = 1.0\%$  evidencia una relación espectral vertical a horizontal ( $R_1 = V/H$ ) predominantemente moderada, con valores que oscilan aproximadamente entre 19% y 25% dentro del dominio analizado de período postfluencia  $T_d$  y razón de resistencia característica  $Q_d/W$ . Se observa que los mayores valores de  $R_1$  se concentran en regiones asociadas a valores elevados de  $Q_d/W$  y períodos postfluencia reducidos, lo que sugiere que sistemas de aislación con mayor rigidez efectiva y menor capacidad de disipación horizontal tienden a amplificar la influencia relativa de la componente vertical.

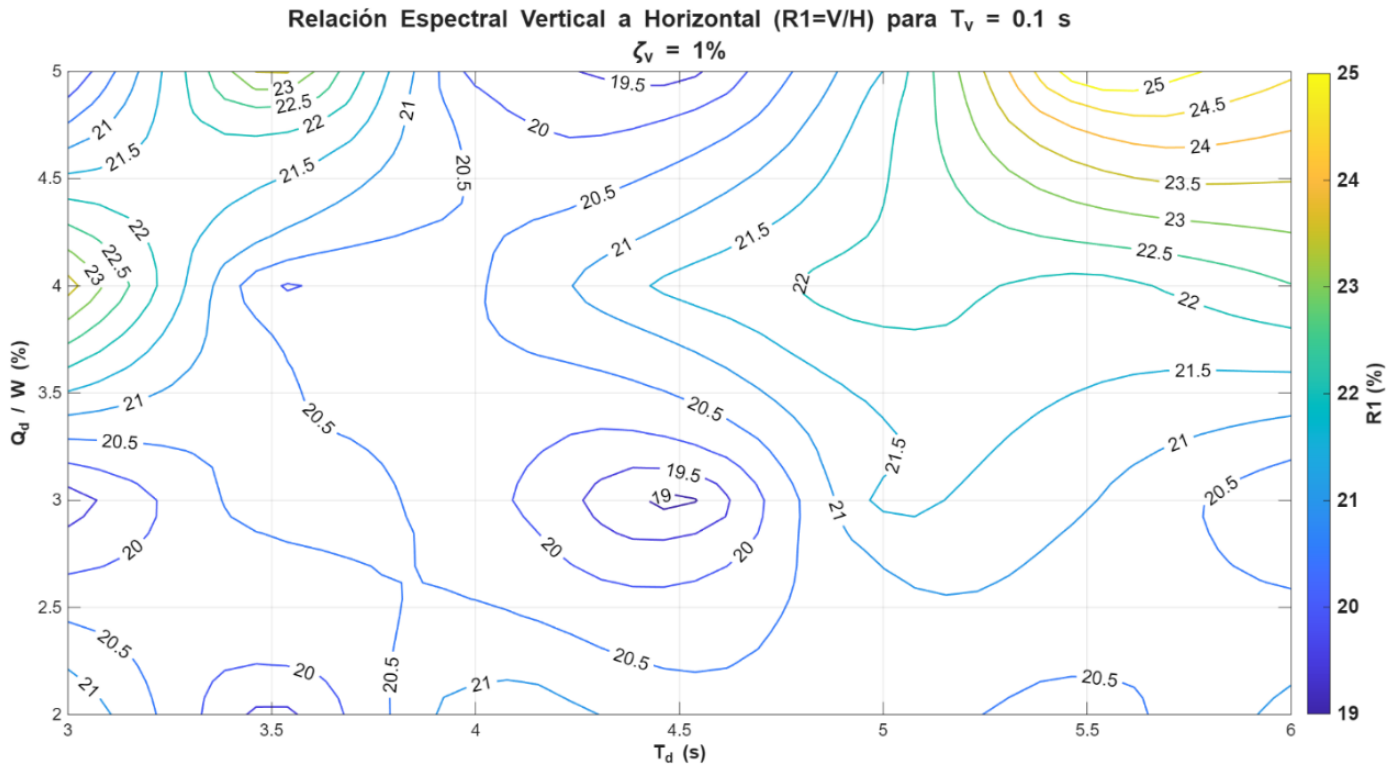
Desde el punto de vista físico, este comportamiento es consistente con sistemas de aislación más rígidos verticalmente, donde la interacción suelo–estructura–aislador permite una transmisión más directa de la aceleración vertical hacia la superestructura. En este escenario, aunque la componente vertical no domina la respuesta global, su contribución no es despreciable, particularmente en la evaluación de fuerzas axiales y condiciones de contacto en los aisladores. Este resultado respalda la necesidad de considerar explícitamente la excitación tridireccional (X-Y-Z), ya que los métodos de combinación simplificados tienden a subestimar estas demandas cuando el período vertical es corto.



**Figura 3.26 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.08$  s y  $\xi_v = 1.0\%$**

Para el caso de  $T_v = 0.10$  s y amortiguamiento vertical y  $\xi_v = 1.0\%$  (ver Figura 3.27), la distribución de la relación  $R_1$  muestra una mayor heterogeneidad espacial, con valores comprendidos aproximadamente entre 19% y 25%. A diferencia del caso anterior, se identifican zonas donde el incremento del período postfluencia  $T_d$  no conduce necesariamente a una reducción monótona de la relación  $V/H$ , lo que evidencia una interacción más compleja entre los parámetros dinámicos del sistema de aislación.

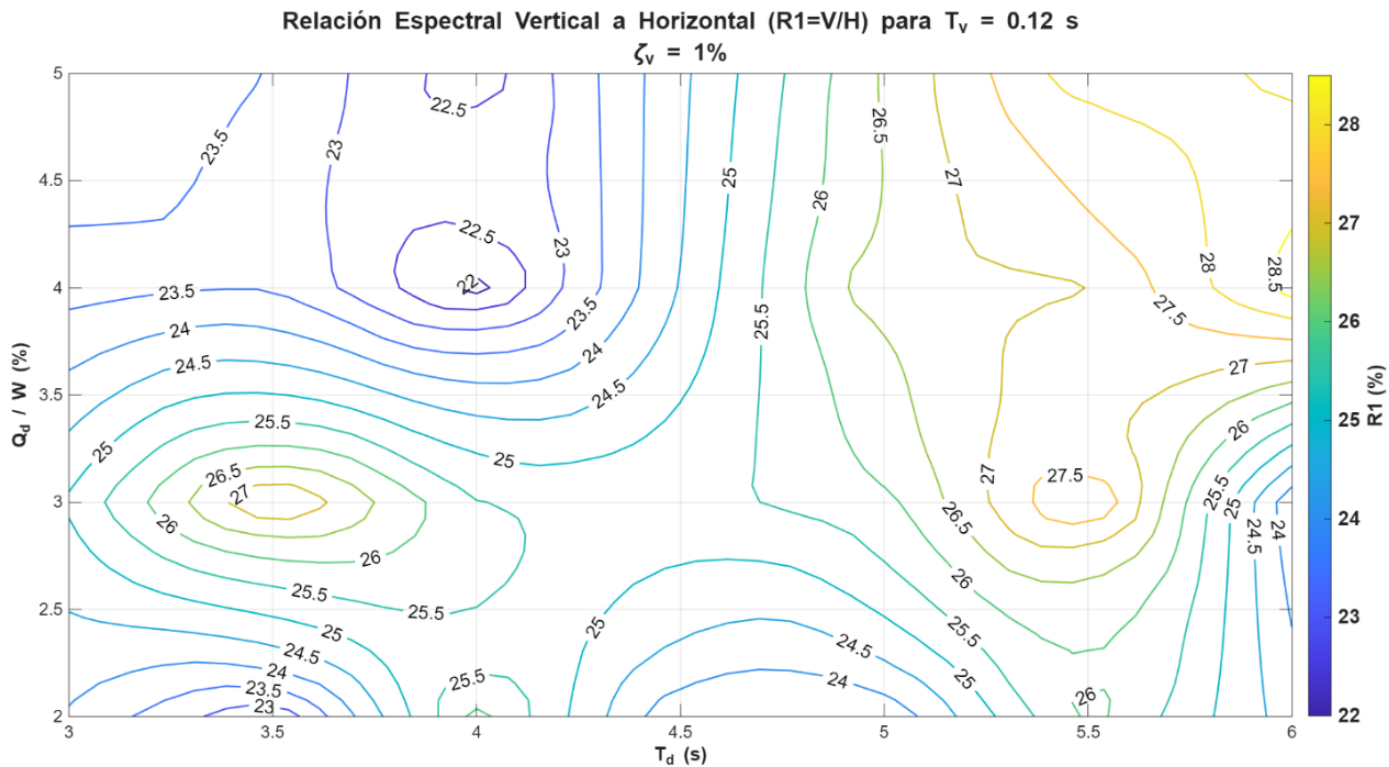
Este comportamiento indica que, a medida que el período vertical se aproxima a rangos donde existe mayor contenido energético de la componente vertical de los sismos de subducción, la simultaneidad de acciones sísmicas adquiere mayor relevancia. En estas condiciones, la respuesta vertical no puede ser representada adecuadamente mediante factores constantes o combinaciones empíricas, ya que la demanda vertical resulta altamente dependiente de la configuración específica del sistema de aislación. En términos de diseño, estos resultados refuerzan que los métodos simplificados (100/30, SRSS) presentan una imprecisión significativa, especialmente en la estimación de fuerzas axiales máximas en los aisladores.



**Figura 3.27 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.10$ s y  $\xi_v = 1.0\%$**

La Figura 3.28 correspondiente a  $T_v = 0.12$ s y  $\xi_v = 1.0\%$  muestra un incremento sustancial de la relación  $R_1$ , alcanzando valores cercanos e incluso superiores al 28% en amplias regiones del espacio de parámetros. Este aumento generalizado pone en evidencia que, para períodos verticales más largos, la componente vertical del sismo se vuelve claramente dominante en términos relativos, particularmente en sistemas con valores intermedios y altos de  $Q_d/W$ .

Este resultado es especialmente relevante para estructuras con aislación sísmica ubicadas en zonas de subducción, donde los registros sísmicos presentan una alta correlación temporal entre las componentes horizontal y vertical. La amplificación observada sugiere una mayor probabilidad de aparición de fuerzas de tracción y fenómenos de levantamiento en los aisladores, efectos que solo pueden ser capturados mediante análisis no lineales con excitación tridireccional simultánea.



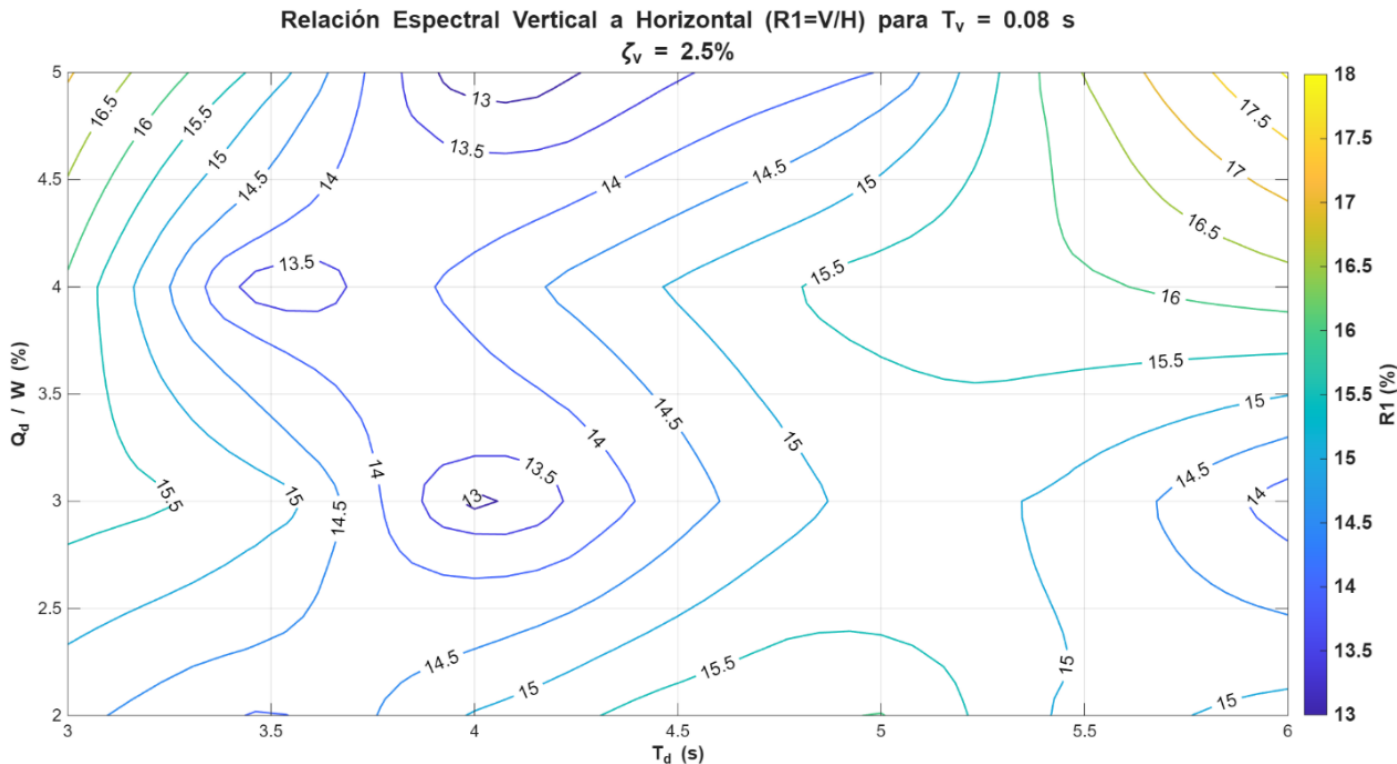
**Figura 3.28 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.12$  s y  $\xi_v = 1.0\%$**

En conjunto, los resultados para  $\xi_v = 1.0\%$  muestran una clara tendencia de incremento de la relación  $V/H$  con el aumento del período vertical, confirmando que la componente vertical del sismo desempeña un rol fundamental en la respuesta de sistemas de aislación sísmica. Estos hallazgos justifican plenamente el uso de análisis NLTHA tridireccionales y constituyen una base técnica sólida para cuestionar la validez de los métodos de combinación simplificados en contextos sísmicos complejos, como los característicos de las zonas de subducción.

La Figura 3.29 correspondiente a  $T_v = 0.08$  s y  $\xi_v = 2.5\%$  muestra una relación espectral vertical a horizontal ( $R_1 = V/H$ ) moderada, con valores que se distribuyen de forma relativamente uniforme en el dominio de análisis. Los mayores valores de  $R_1$  se concentran en zonas asociadas a relaciones de resistencia característica  $Q_d/W$  elevadas, mientras que para valores menores de este parámetro la contribución vertical resulta menos significativa.

Este comportamiento indica que, para sistemas con período vertical corto, el incremento del amortiguamiento vertical logra atenuar eficazmente la

amplificación de la componente vertical, reduciendo su influencia relativa frente a la respuesta horizontal. No obstante, la persistencia de valores no despreciables de  $R_1$  confirma que, incluso en sistemas rígidos verticalmente, la componente vertical del sismo puede generar demandas axiales relevantes en los aisladores, las cuales no son capturadas adecuadamente mediante métodos de combinación simplificados.

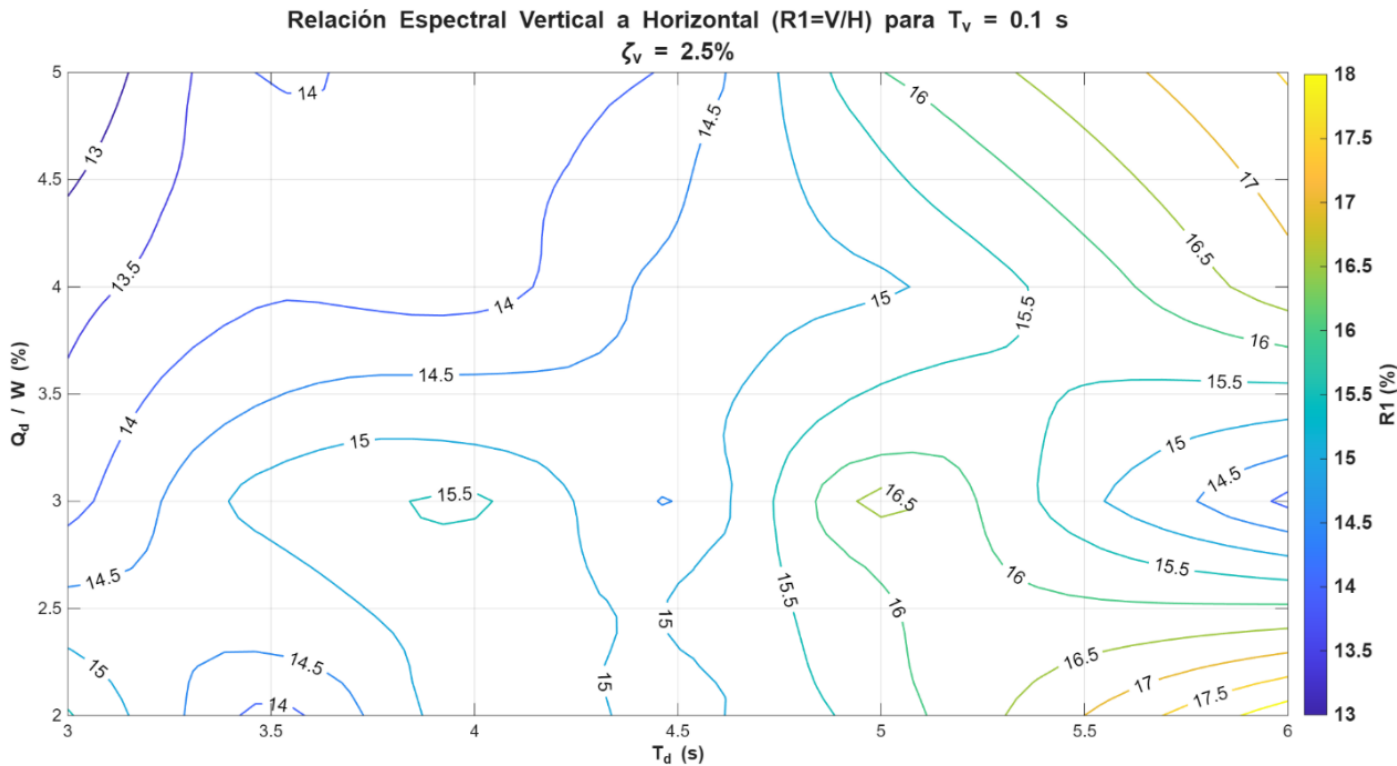


**Figura 3.29 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.08$  s y  $\xi_v = 2.5\%$**

Para el caso de  $T_v = 0.10$  s y  $\xi_v = 2.5\%$  (Figura 3.30), la gráfica evidencia una mayor variabilidad espacial de la relación  $R_1$ , reflejando una interacción más compleja entre el período postfluencia  $T_d$  y la resistencia característica del sistema de aislación. Se observan zonas donde la relación  $V/H$  aumenta incluso para valores intermedios de  $Q_d/W$ , lo que sugiere una mayor sensibilidad del sistema a la excitación vertical.

Desde el punto de vista dinámico, este comportamiento puede asociarse a una mayor cercanía del período vertical con rangos de contenido energético significativo de la componente vertical de los sismos de subducción. Aunque el amortiguamiento del 2.5% contribuye a limitar los picos de respuesta, los

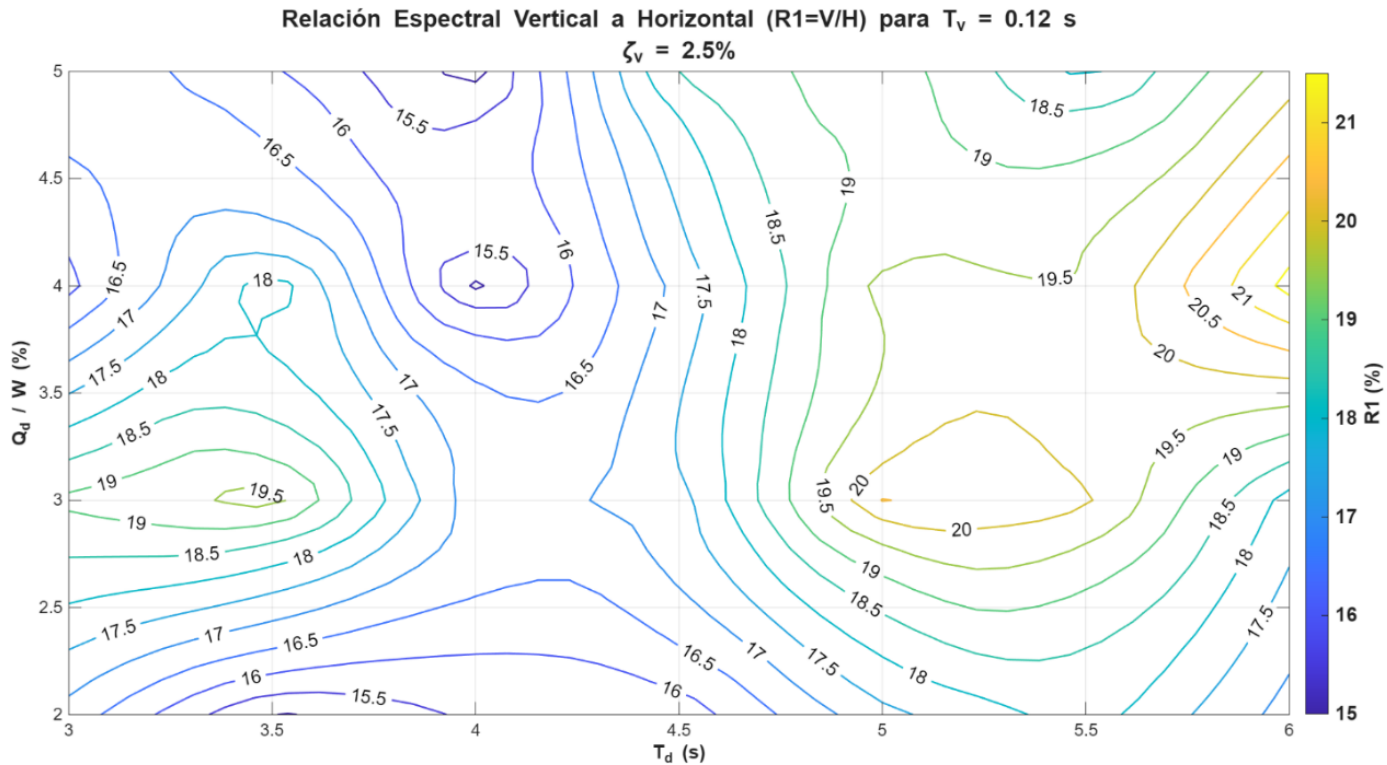
resultados muestran que la simultaneidad de acciones sísmicas sigue generando demandas verticales relevantes, reforzando la necesidad de análisis tridireccionales simultáneos para una evaluación realista del desempeño del sistema de aislación.



**Figura 3.30 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.10$ s y  $\xi_v = 2.5\%$**

La Figura 3.31 correspondiente a  $T_v = 0.12$ s y  $\xi_v = 2.5\%$ , presenta un incremento claro de la relación espectral  $V/H$ , tanto en magnitud como en extensión dentro del dominio analizado. Las regiones con valores elevados de  $R_1$  se amplían, especialmente para ciertos rangos de  $T_d$  y  $Q_d/W$ , evidenciando una mayor participación de la componente vertical del sismo en la respuesta global del sistema.

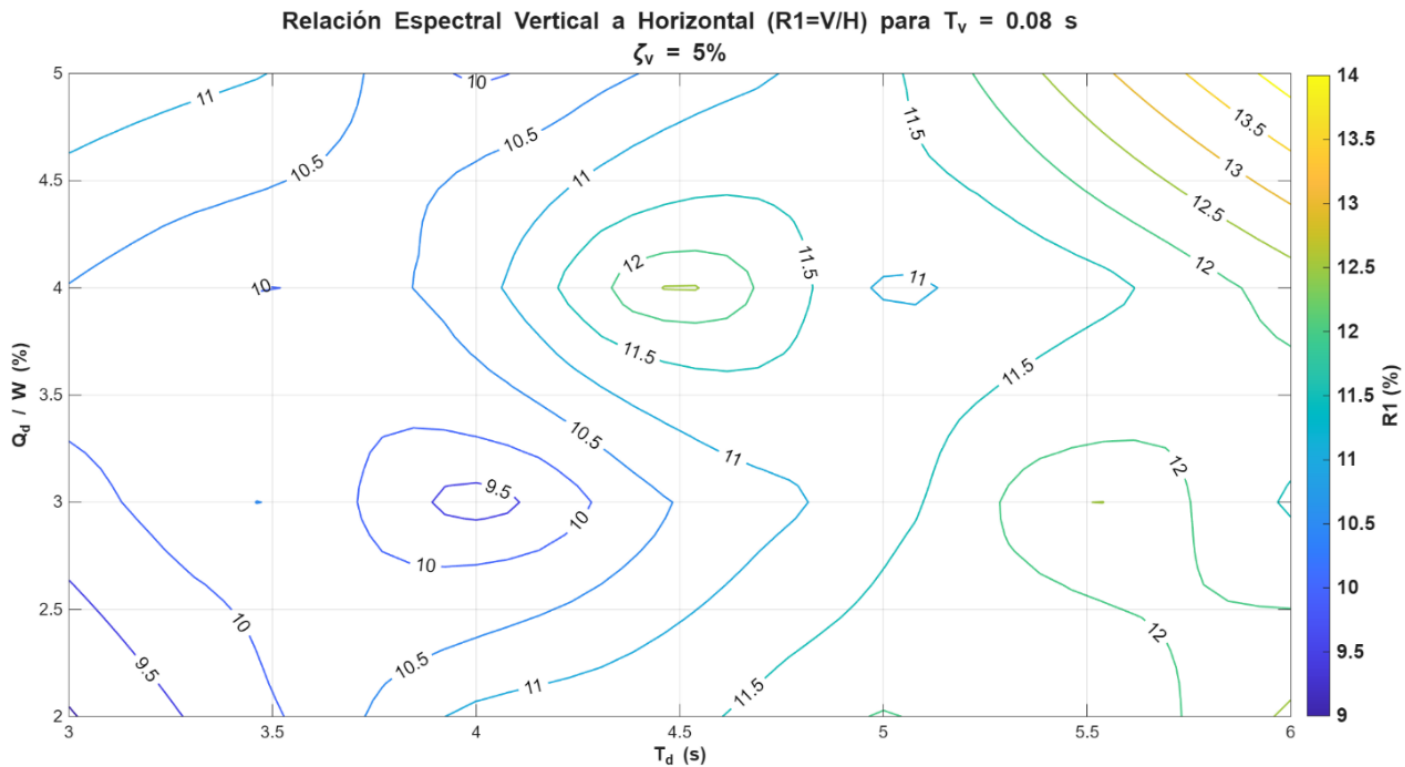
Este resultado es particularmente relevante para estructuras con aislación sísmica en zonas de subducción, ya que indica una mayor probabilidad de amplificación de fuerzas axiales y aparición de tracciones en los aisladores cuando el período vertical se incrementa. Aun con un amortiguamiento del 2.5%, la componente vertical mantiene una influencia significativa.



**Figura 3.31 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.12$  s y  $\xi_v = 2.5\%$**

La Figura 3.32 correspondiente a  $T_v = 0.08$  s y  $\xi_v = 5.0\%$  muestra una reducción notable de la relación  $R_1$  en todo el dominio analizado, con una distribución más homogénea de las isolíneas. Este comportamiento evidencia que un mayor amortiguamiento vertical actúa como un mecanismo altamente eficiente de control de la respuesta vertical, incluso bajo excitación sísmica tridireccional simultánea.

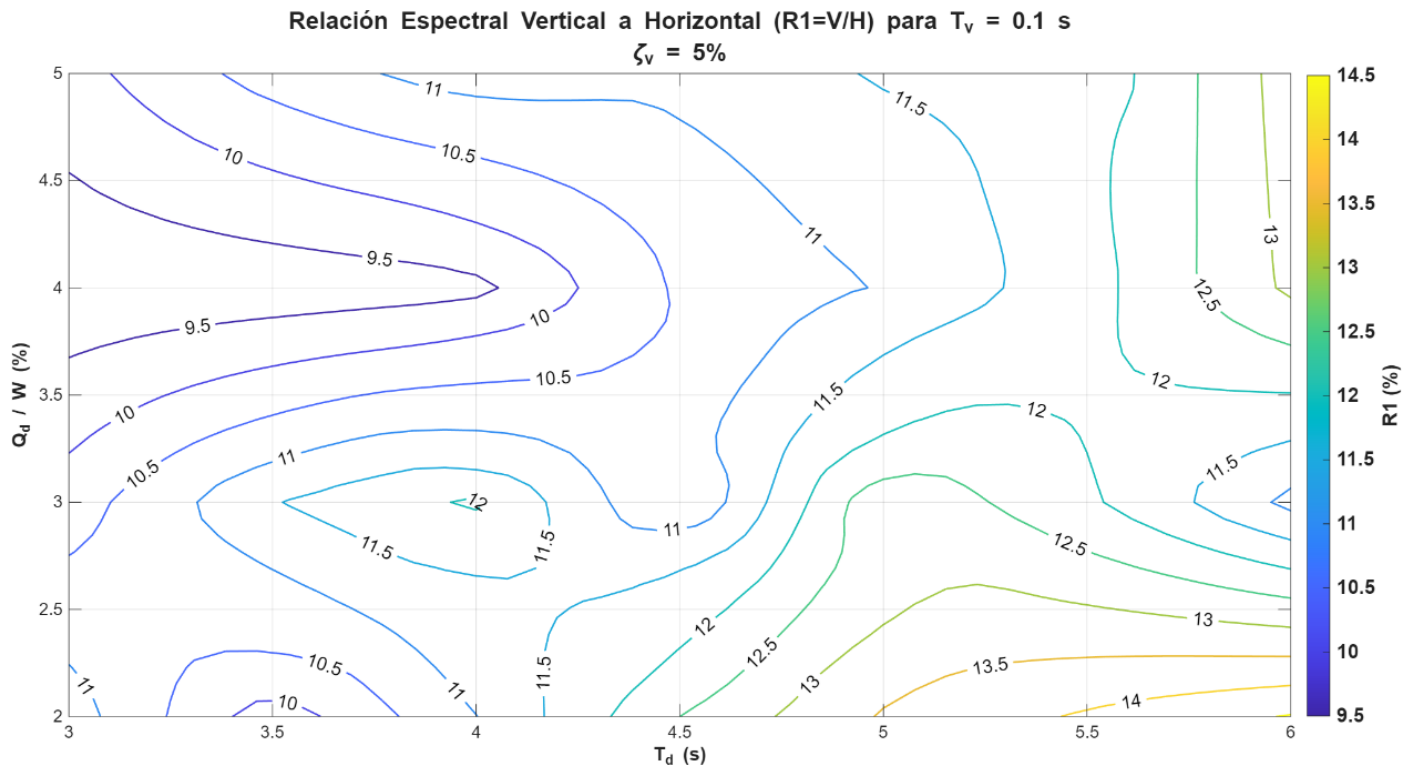
Desde una perspectiva de diseño, estos resultados indican que niveles elevados de amortiguamiento vertical contribuyen significativamente a mitigar las demandas axiales máximas en los aisladores, reduciendo la probabilidad de inestabilidad local. Sin embargo, la relación  $V/H$  no se anula completamente, lo que confirma que la componente vertical sigue estando presente y debe ser considerada explícitamente en análisis avanzados de desempeño sísmico.



**Figura 3.32 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.08$  s y  $\xi_v = 5\%$**

Para  $T_v = 0.10$  s y  $\xi_v = 5.0\%$  (ver Figura 3.33), la relación espectral V/H se mantiene en rangos bajos a moderados, mostrando una clara disminución de los picos observados para menores niveles de amortiguamiento. La respuesta es más estable y menos sensible a variaciones en  $T_d$  y  $Q_d/W$ , lo que sugiere una respuesta dinámica vertical mejor controlada.

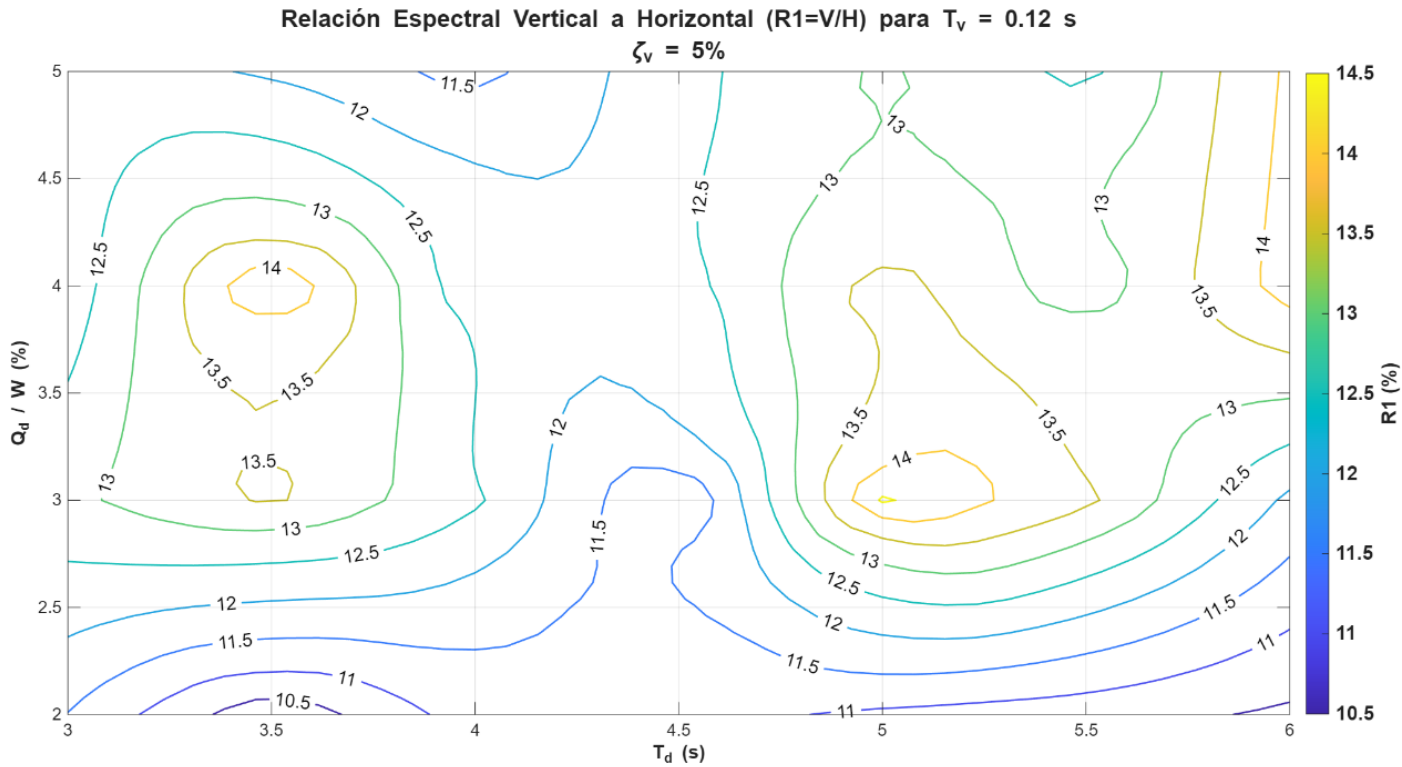
Este comportamiento confirma que el incremento del amortiguamiento vertical reduce de manera efectiva la amplificación asociada a la componente vertical del sismo. No obstante, la presencia de valores de  $R_1$  aún relevantes en ciertas zonas indica que, aun bajo condiciones favorables de disipación, los métodos de combinación simplificados continúan subestimando la demanda real, especialmente cuando se evalúan fuerzas axiales bajo excitación simultánea X–Y–Z.



**Figura 3.33 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.10\text{ s}$  y  $\xi_v = 5\%$**

Por último, la Figura 3.34 correspondiente a  $T_v = 0.12\text{ s}$  y  $\xi_v = 5.0\%$  evidencia que, si bien el amortiguamiento elevado reduce significativamente la relación  $\frac{V}{H}$  respecto a casos de menor disipación, la componente vertical del sismo sigue teniendo una participación apreciable en la respuesta del sistema de aislación. Se identifican regiones donde  $R_1$  alcanza valores relevantes, particularmente para configuraciones específicas del sistema.

Este resultado demuestra que, cuando el período vertical del sistema se incrementa, la influencia de la componente vertical no puede ser eliminada únicamente mediante el aumento del amortiguamiento. En consecuencia, el análisis confirma que la estabilidad del sistema de aislación frente a sismos de subducción requiere necesariamente la consideración de excitación tridireccional simultánea, como base para prevenir fenómenos de levantamiento y evaluar adecuadamente las fuerzas axiales en los aisladores.



**Figura 3.34 Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1 = V/H$ ) para  $T_v = 0.12$  s y  $\xi_v = 5\%$**

A continuación, la Tabla 3.14 resume los valores promedio obtenidos para el factor de simultaneidad  $R_1$ , agrupados en función del período vertical y amortiguamiento vertical. Por otro lado, la Tabla 3.15 presenta los valores de la relación espectral vertical a horizontal  $R_1$ , correspondientes al Percentil 84. Este valor se define estadísticamente como la suma del valor promedio y una desviación estándar ( $\mu + \sigma$ ), proporcionando una estimación más conservadora de la demanda sísmica vertical.

**Tabla 3.14 Valores Promedios de la Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1$ )**

		Valores Promedios de $R_1$ (%)		
		Amortiguamiento Vertical $\xi_v$ (%)		
		1.0	2.5	5.0
$T_v$ (s)	0.08	21.2	15	11.2
	0.10	21.2	15.1	11.4
	0.12	25.2	17.8	12.3

**Tabla 3.15 Valores de Percentil 84 de la Relación Espectral Vertical a Horizontal ( $R_1$ )**

		Valores de Percentil 84 de $R_1$ (%)		
		Amortiguamiento Vertical		
		$\xi_v$ (%)		
		1.0	2.5	5.0
$T_v$ (s)	0.08	42.7	31.2	23.2
	0.10	42.0	31.7	24.5
	0.12	49.1	36.3	25.5

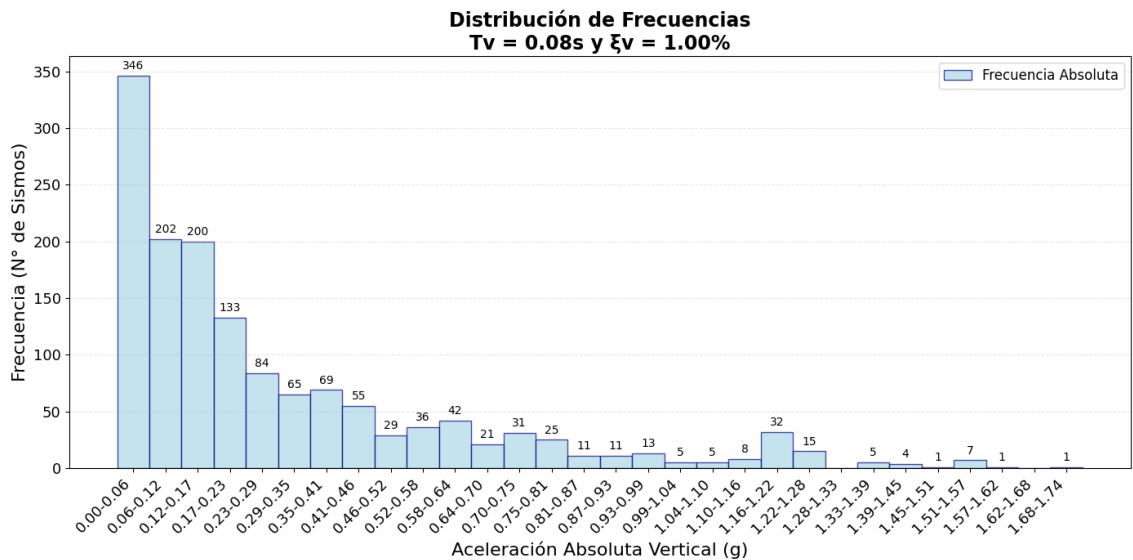
El análisis conjunto de los resultados para  $\xi_v = 1\%$ ,  $2.5\%$  y  $5\%$  permite identificar una relación inversa clara entre el amortiguamiento vertical y la magnitud de la relación espectral  $V/H$ , confirmando que el amortiguamiento es un parámetro clave en el control de las demandas inducidas por la componente vertical del sismo en sistemas de aislación sísmica. A medida que el amortiguamiento aumenta, no solo disminuyen los valores máximos de  $R_1$ , sino también la extensión de las regiones críticas dentro del espacio de diseño.

Sin embargo, los resultados también evidencian que el incremento del amortiguamiento vertical no elimina completamente la influencia de la componente vertical, especialmente para períodos verticales más largos. Esto pone de manifiesto las limitaciones de los métodos de combinación simplificados y refuerza la necesidad de emplear análisis no lineales de respuesta en el tiempo con excitación tridireccional simultánea (X-Y-Z) para capturar adecuadamente las demandas reales de diseño, en particular las fuerzas axiales y los posibles fenómenos de levantamiento en los aisladores.

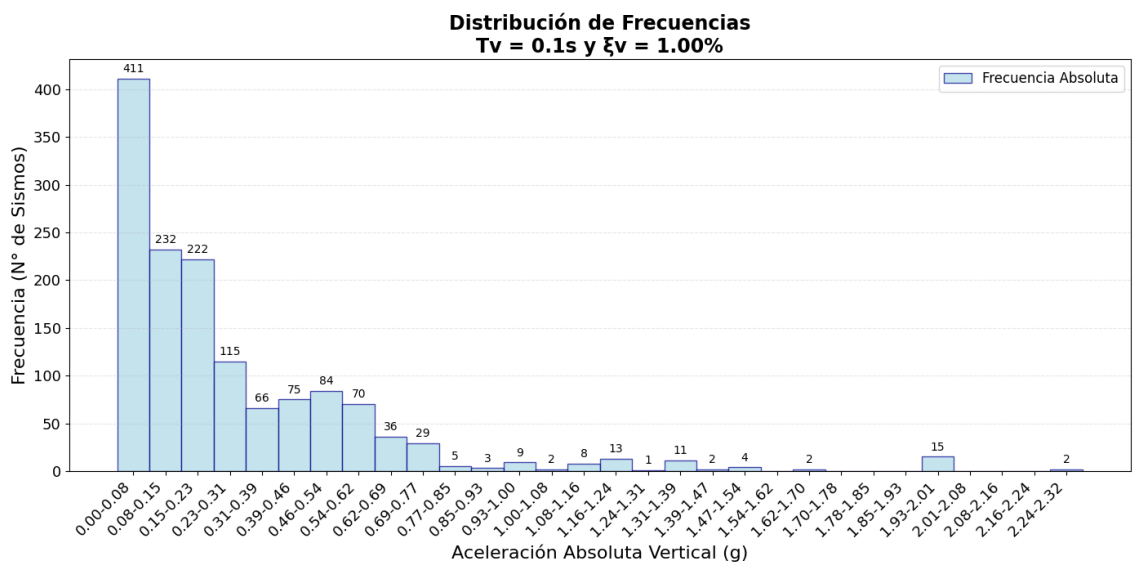
La dispersión observada en los resultados es atribuible a la inherente variabilidad espectral y genética de los registros de subducción utilizados. La base de datos incorpora eventos tanto de interfase como de intraplaca, cuyos contenidos frecuenciales difieren significativamente en el rango de períodos largos ( $T > 3.0s$ ) donde opera el sistema de aislamiento. Adicionalmente, la aleatoriedad en la direccionalidad del vector de desplazamiento máximo

respecto a los ejes estructurales y la respuesta altamente no lineal de los dispositivos de aislamiento contribuyen a esta variabilidad. Lejos de ser un error numérico, esta dispersión ratifica la necesidad de utilizar estimadores estadísticos robustos, como el Percentil 84, por encima de los valores medios, para garantizar la confiabilidad del diseño ante la incertidumbre sísmica real.

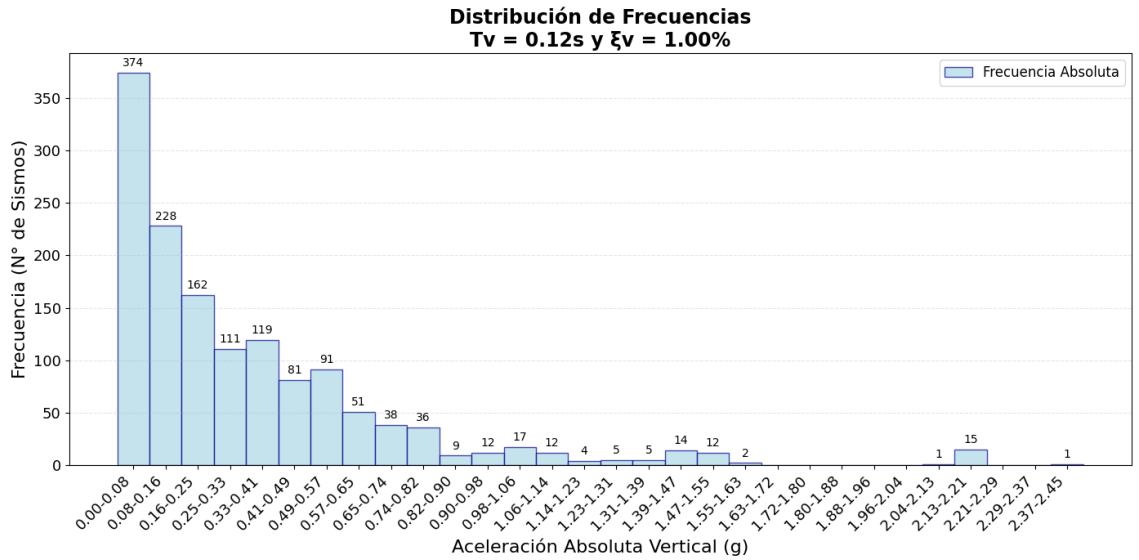
Las Figuras 3.35-3.37 muestran la distribución de frecuencias para  $T_v = 0.08, 0.10$  y  $0.12s$  respectivamente y  $\xi_v = 1.00\%$ , y la Figura 3.38 ilustra la comparativa de densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales para  $\xi_v = 1.00\%$ :



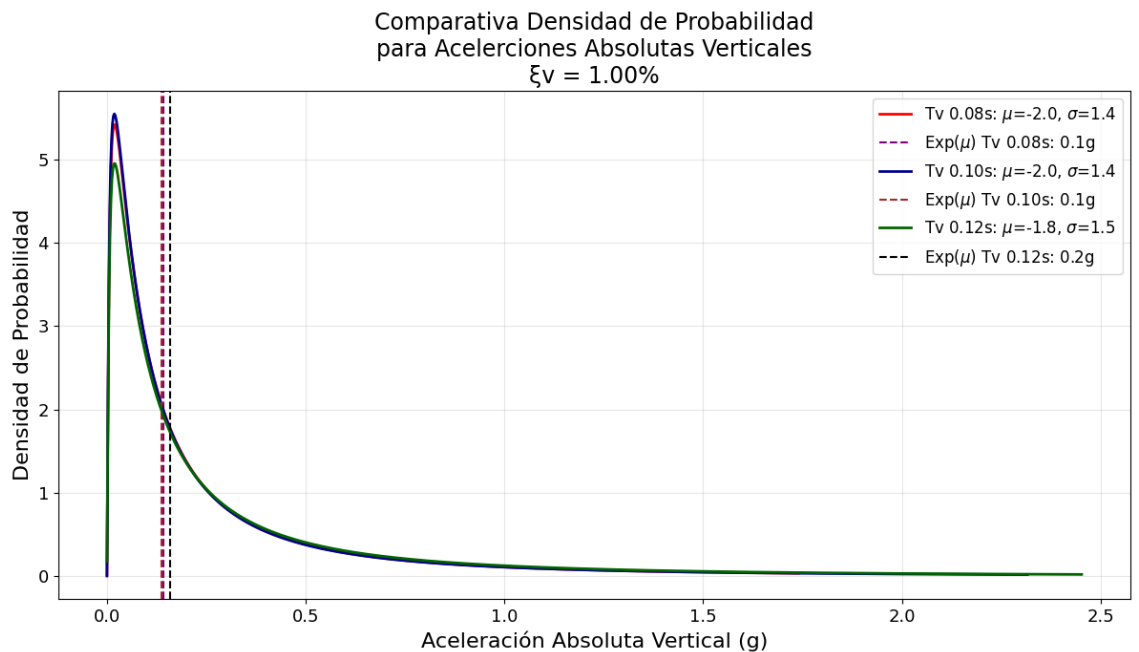
**Figura 3.35** Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.08s$  y  $\xi_v = 1\%$



**Figura 3.36** Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.10s$  y  $\xi_v = 1\%$

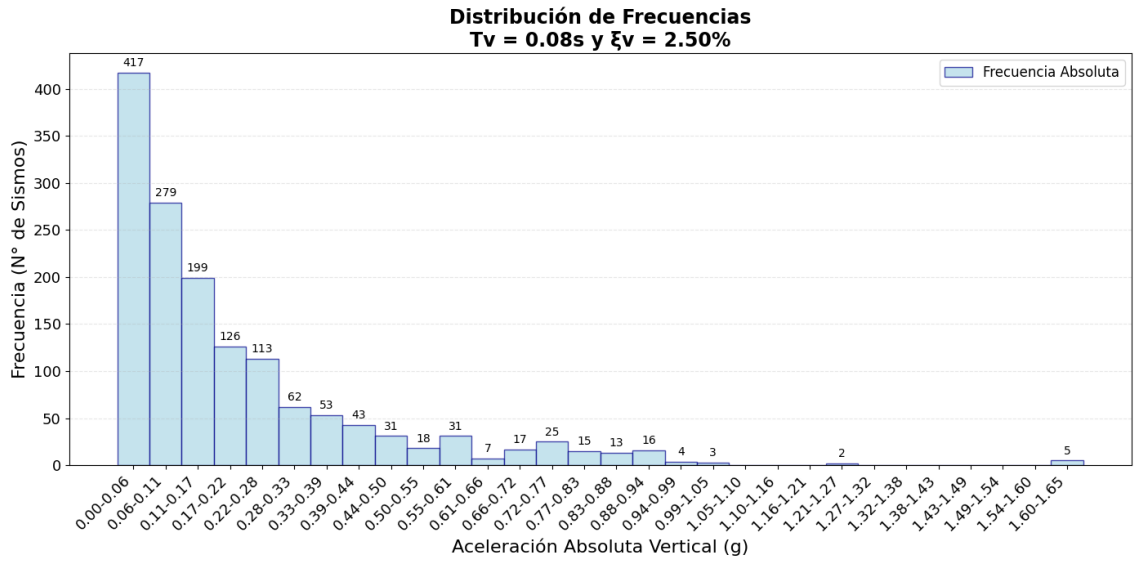


**Figura 3.37 Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.12s$  y  $\xi_v = 1.00\%$**

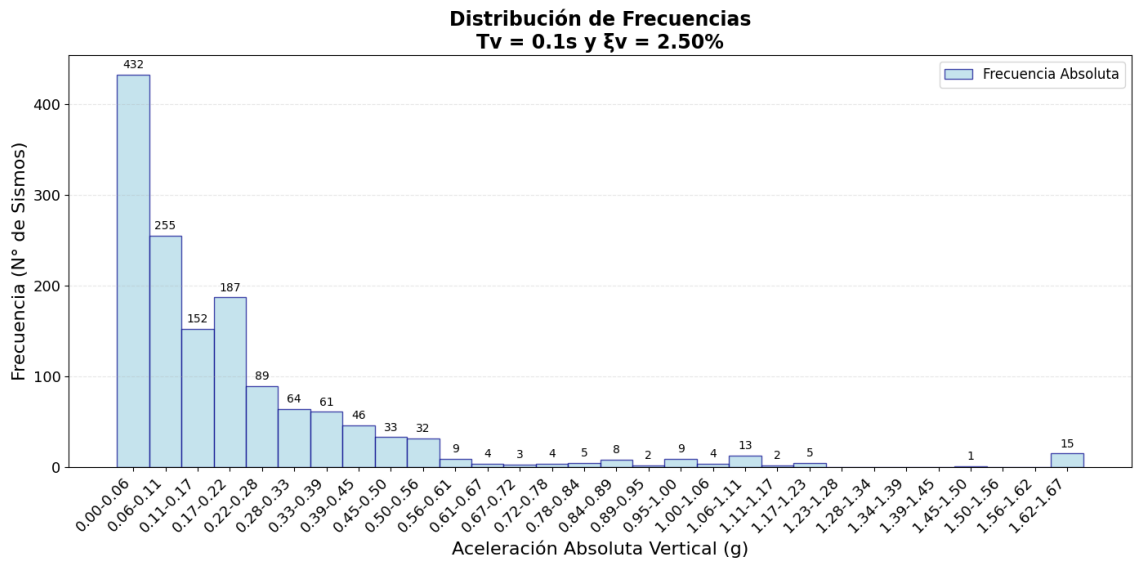


**Figura 3.38 Comparativa densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales  $\xi_v = 1.00\%$**

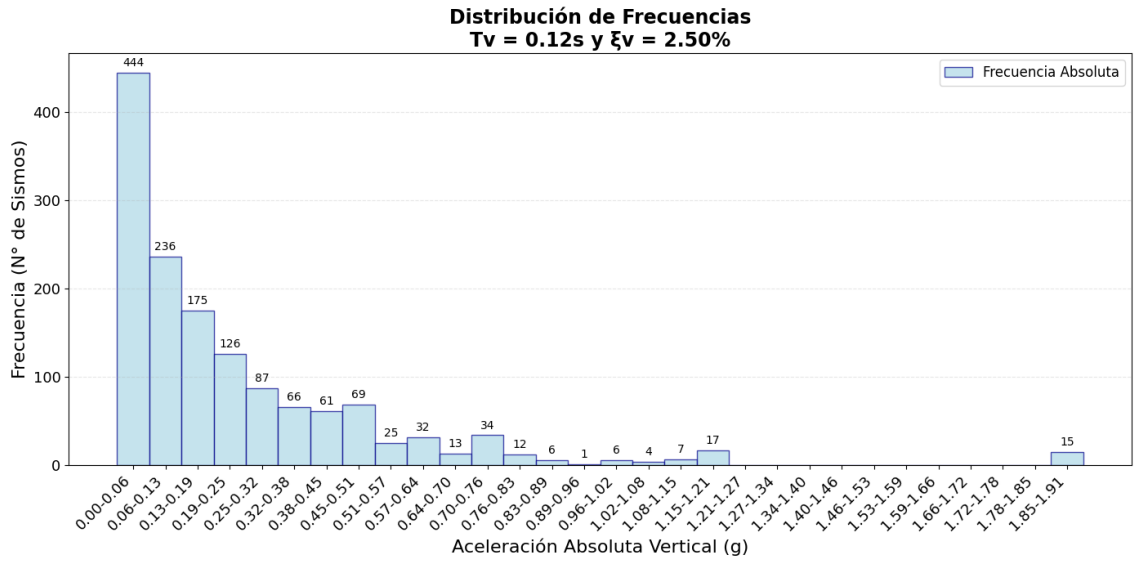
Las Figuras 3.39-3.41 muestran la distribución de frecuencias para  $T_v = 0.08, 0.10$  y  $0.12s$  respectivamente y  $\xi_v = 2.50\%$ , y la Figura 3.42 ilustra la comparativa de densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales para  $\xi_v = 2.50\%$ :



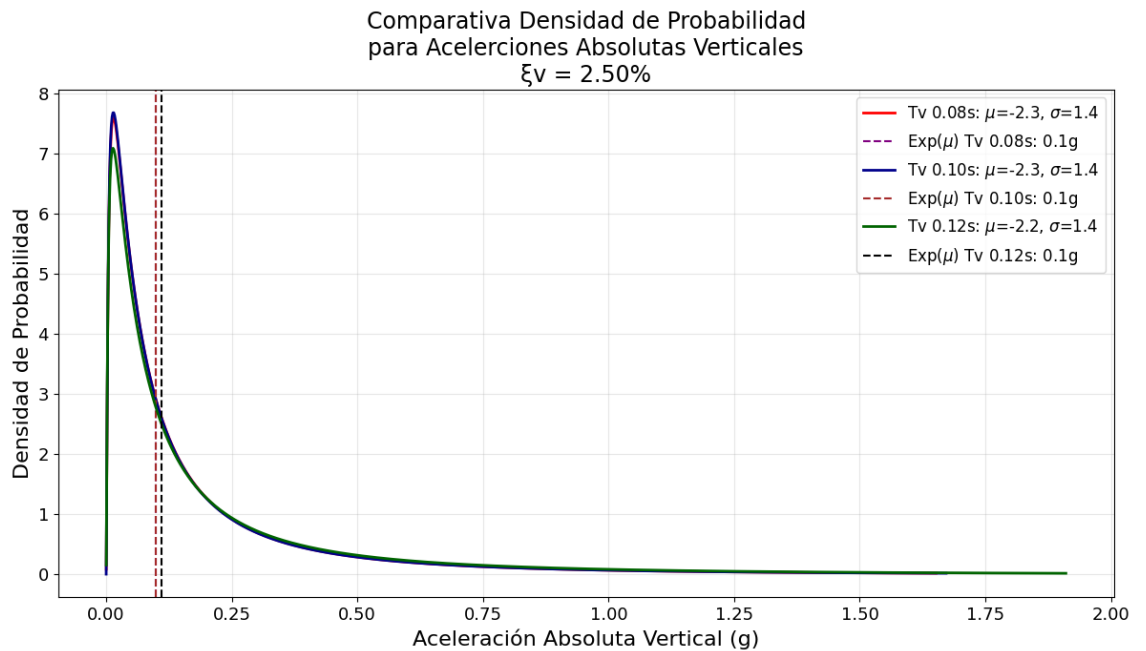
**Figura 3.39** Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.08s$  y  $\xi_v = 2.50\%$



**Figura 3.40** Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.10s$  y  $\xi_v = 2.50\%$

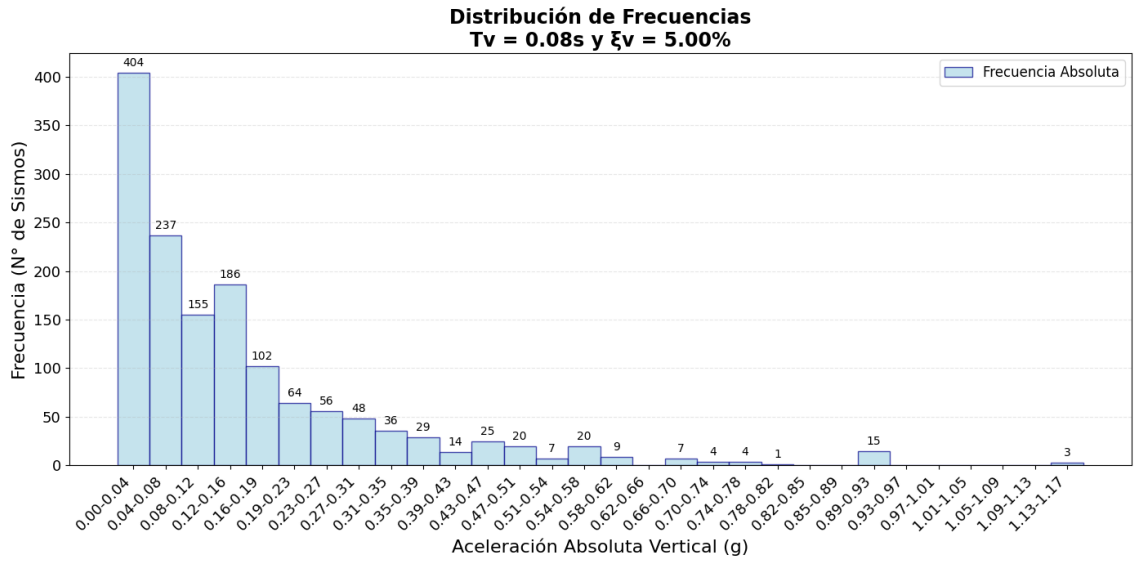


**Figura 3.41** Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.12s$  y  $\xi_v = 2.50\%$

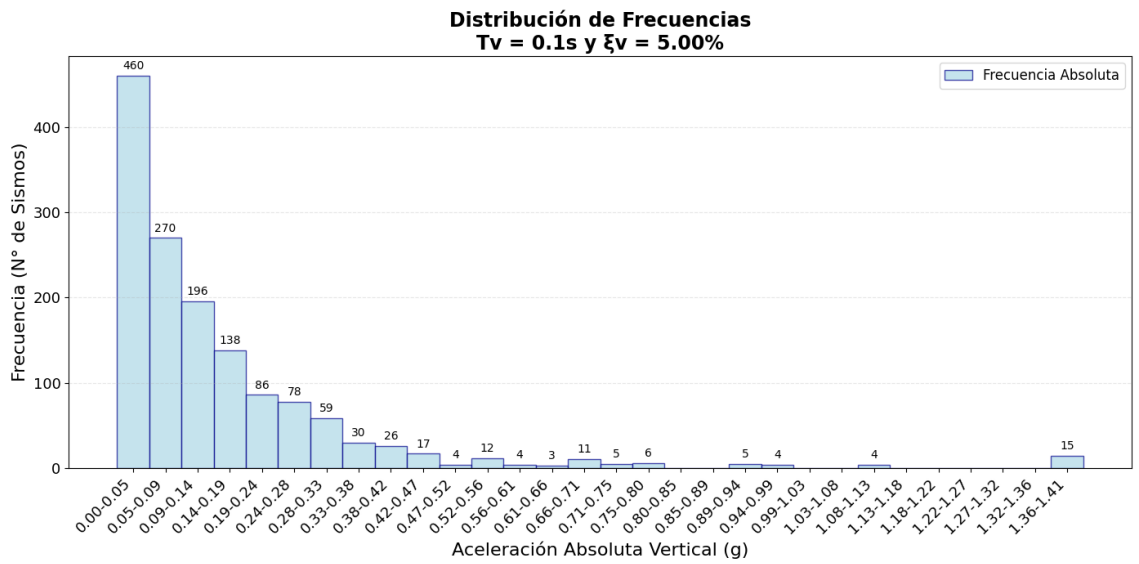


**Figura 3.42** Comparativa densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales  $\xi_v = 2.50\%$

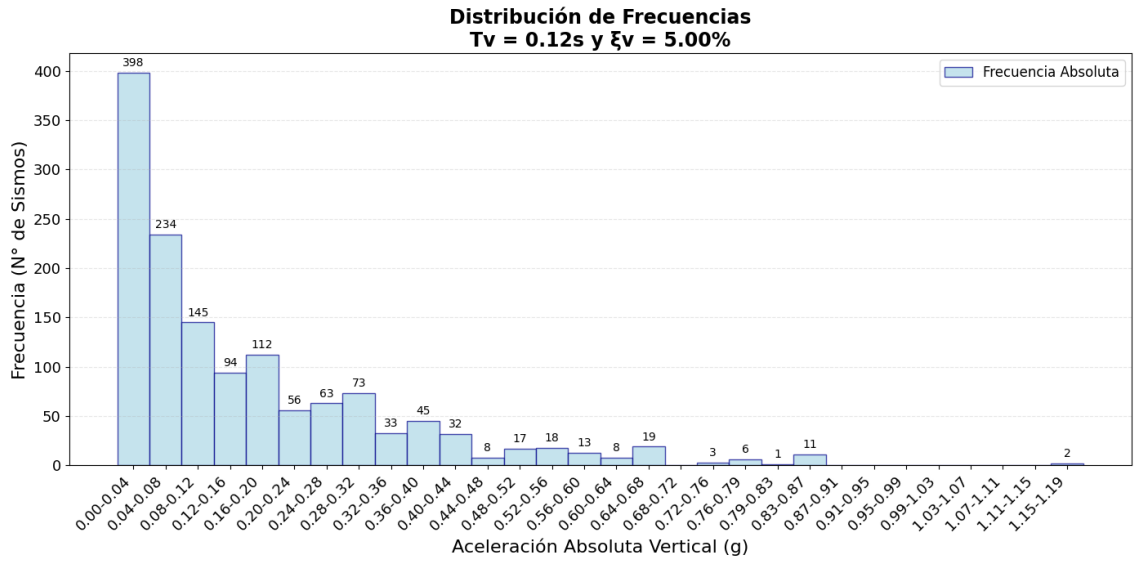
Las Figuras 3.43-3.45 muestran la distribución de frecuencias para  $T_v = 0.08, 0.10$  y  $0.12s$  respectivamente y  $\xi_v = 5.00\%$ , y la Figura 3.46 ilustra la comparativa de densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales para  $\xi_v = 5.00\%$ :



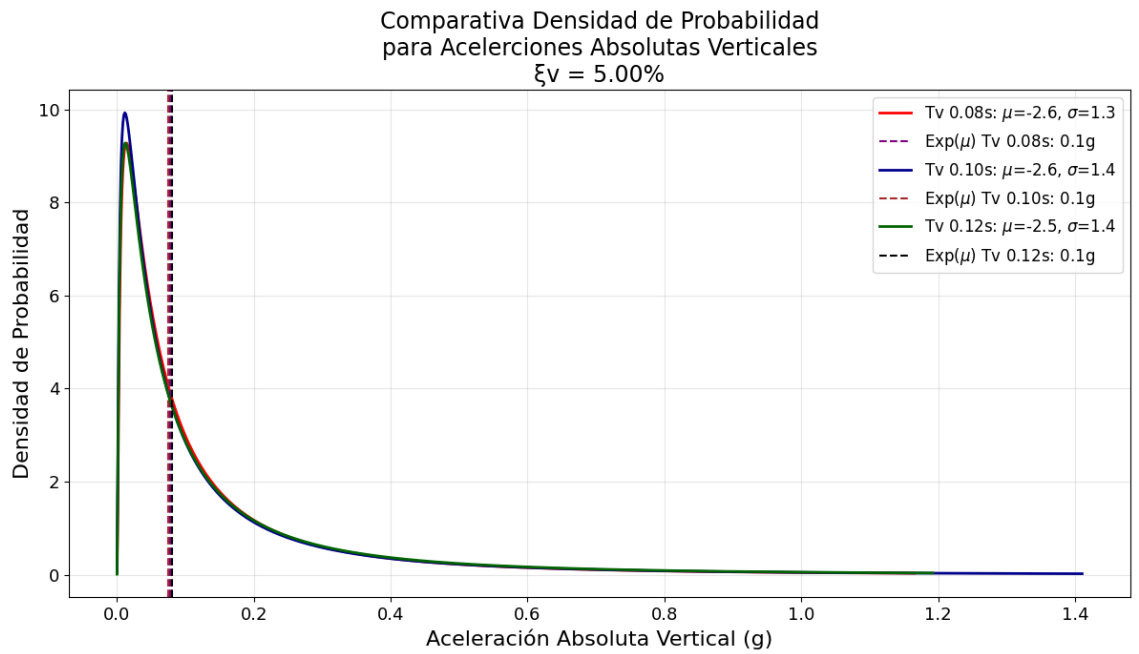
**Figura 3.43** Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.08s$  y  $\xi_v = 5.00\%$



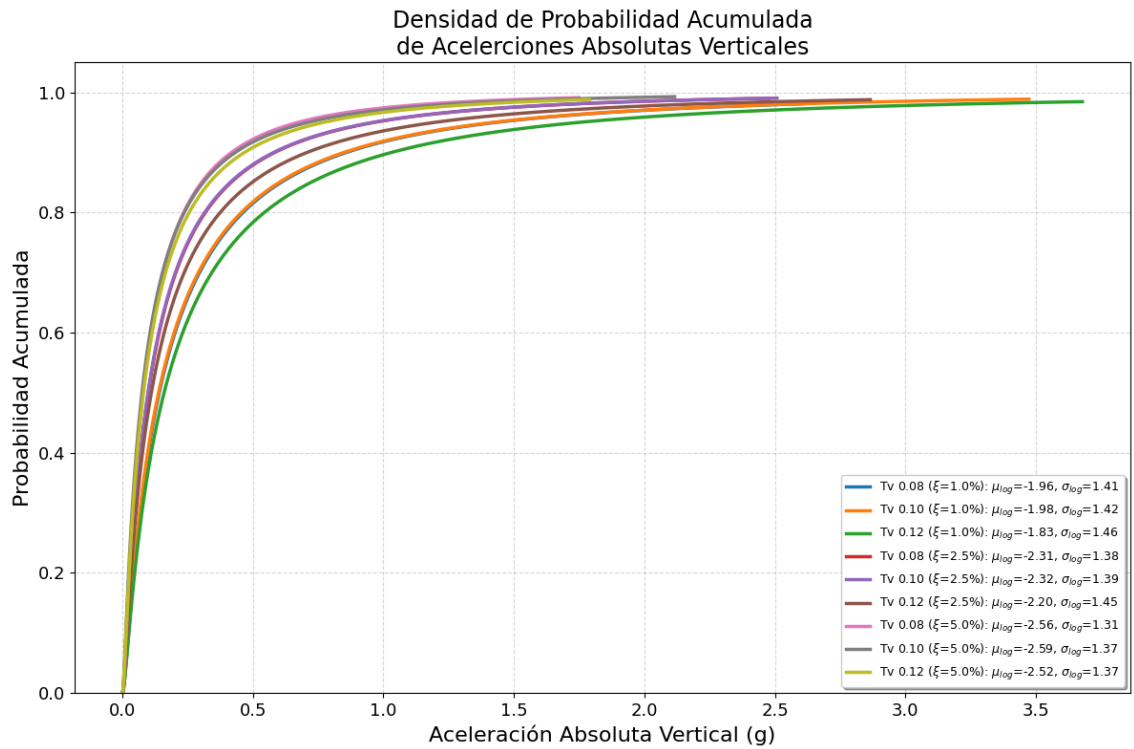
**Figura 3.44** Distribución de frecuencias para  $T_v = 0.10s$  y  $\xi_v = 5.00\%$



**Figura 3.45** Distribución de frecuencias para T<sub>v</sub> = 0.12s y ξ<sub>v</sub> = 5.00%



**Figura 3.46** Comparativa densidad de probabilidad para aceleraciones absolutas verticales ξ<sub>v</sub> = 5.00%



**Figura 3.47 Comparativa densidad de probabilidad absolutas para aceleraciones absolutas verticales**

Las Figuras 3.48 a 3.56 presentan la variación de la respuesta sísmica vertical en función de la distancia epicentral para distintos rangos de magnitud. Se evidencia que la aceleración vertical exhibe una atenuación marcada conforme la distancia al epicentro aumenta; no obstante, la tasa de decaimiento se ve influenciada por la energía liberada ( $M_w$ ).

Un hallazgo relevante es la alta dispersión de los datos en distancias de campo cercano, lo cual se traduce en una desviación estándar logarítmica considerable. Esta variabilidad es consistente con la naturaleza de las ondas de compresión (ondas P), las cuales dominan la componente vertical y presentan una alta sensibilidad a las condiciones locales del sitio y al mecanismo de ruptura en zonas de subducción.

Para efectos de diseño en estructuras con aislación sísmica, estas ilustraciones confirman que la simultaneidad de la acción vertical no puede ser subestimada, especialmente en eventos de gran magnitud donde los

niveles de aceleración permanecen significativos a distancias donde la componente horizontal podría haber atenuado en mayor proporción.

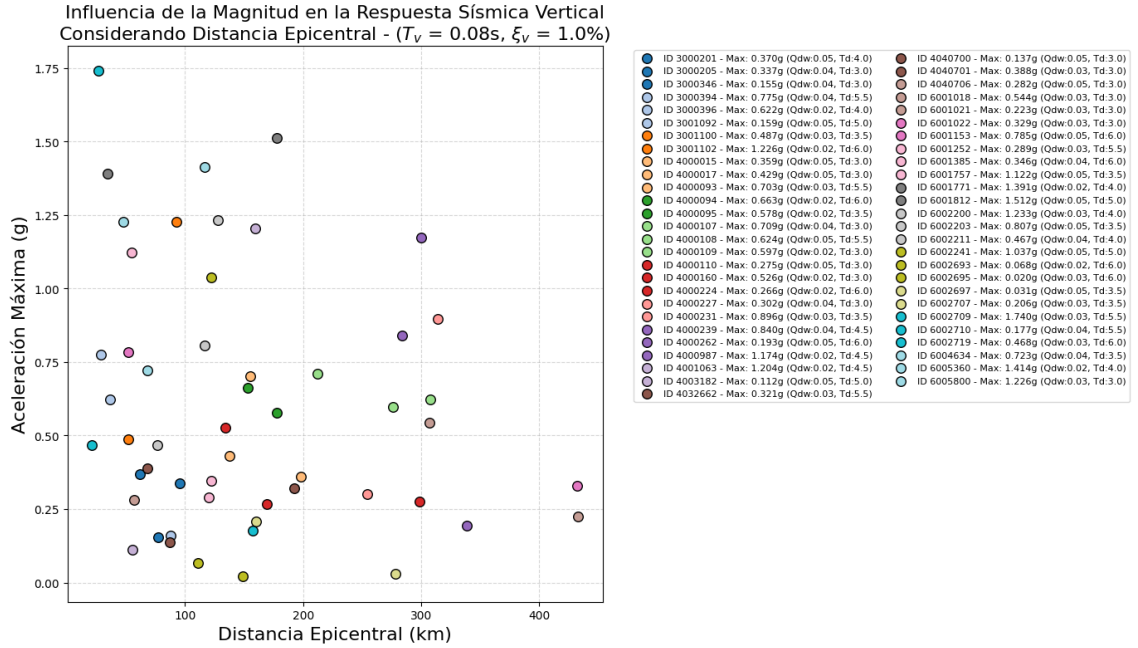


Figura 3.48 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.08s$  y  $\xi_v = 1.00\%$

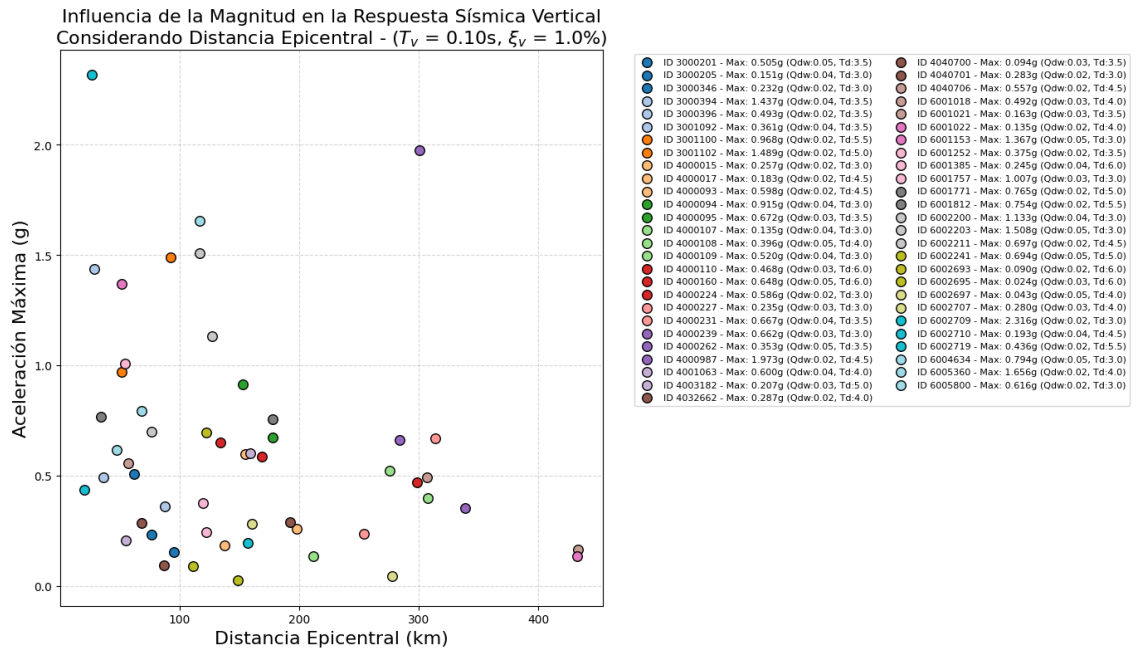
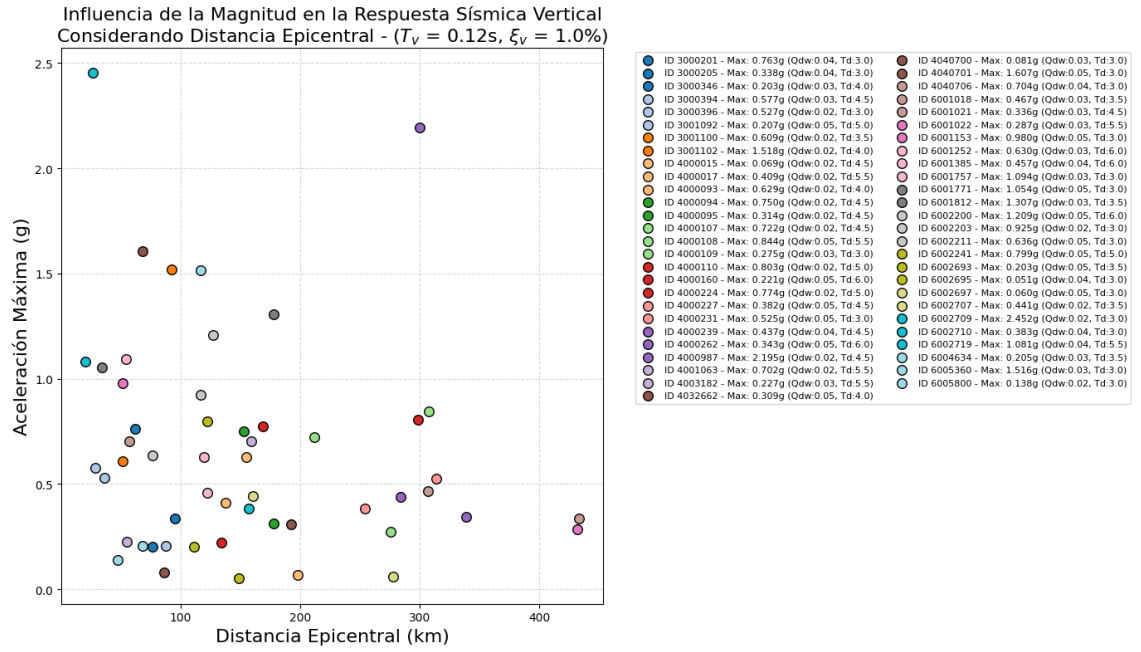
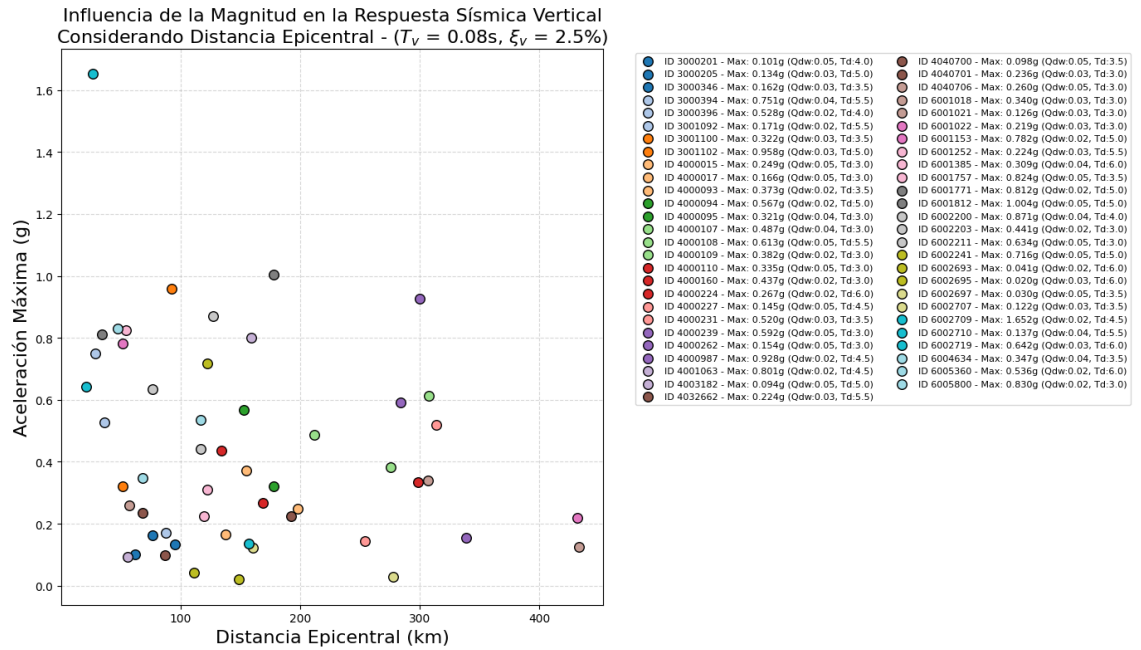


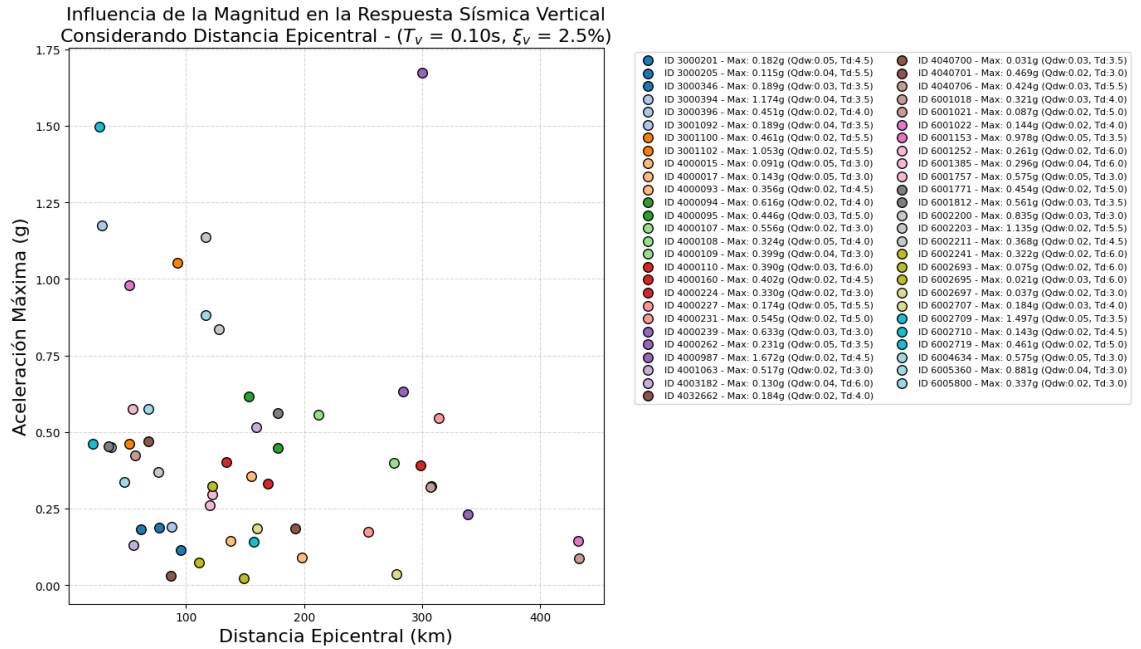
Figura 3.49 Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.10s$  y  $\xi_v = 1.00\%$



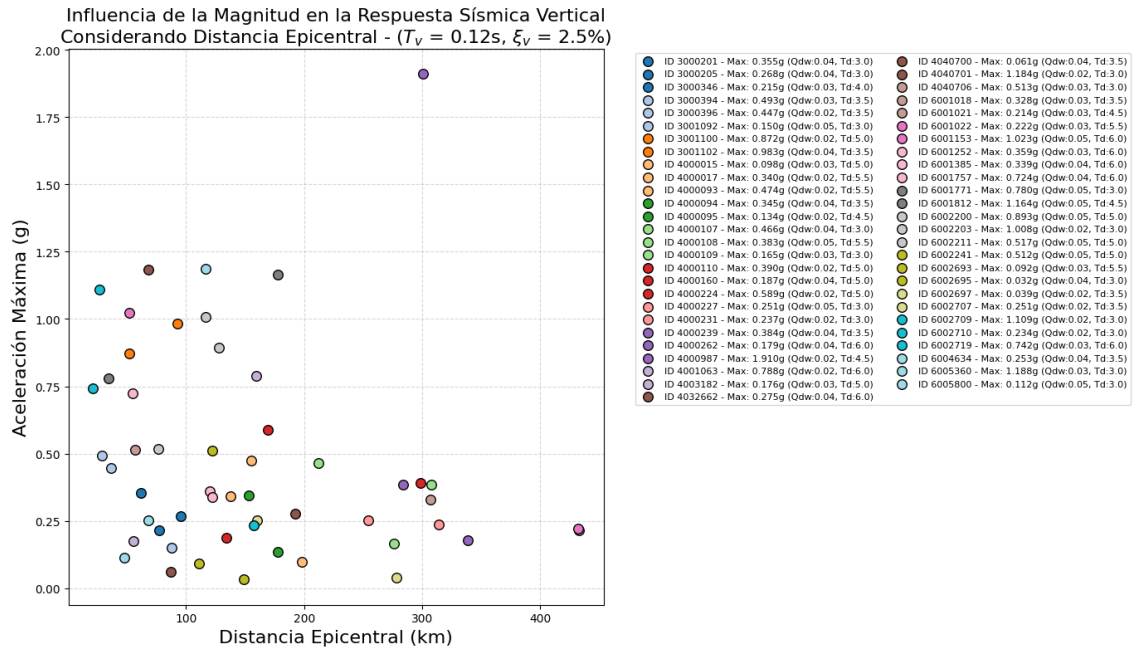
**Figura 3.50** Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.12s$  y  $\xi_v = 1.00\%$



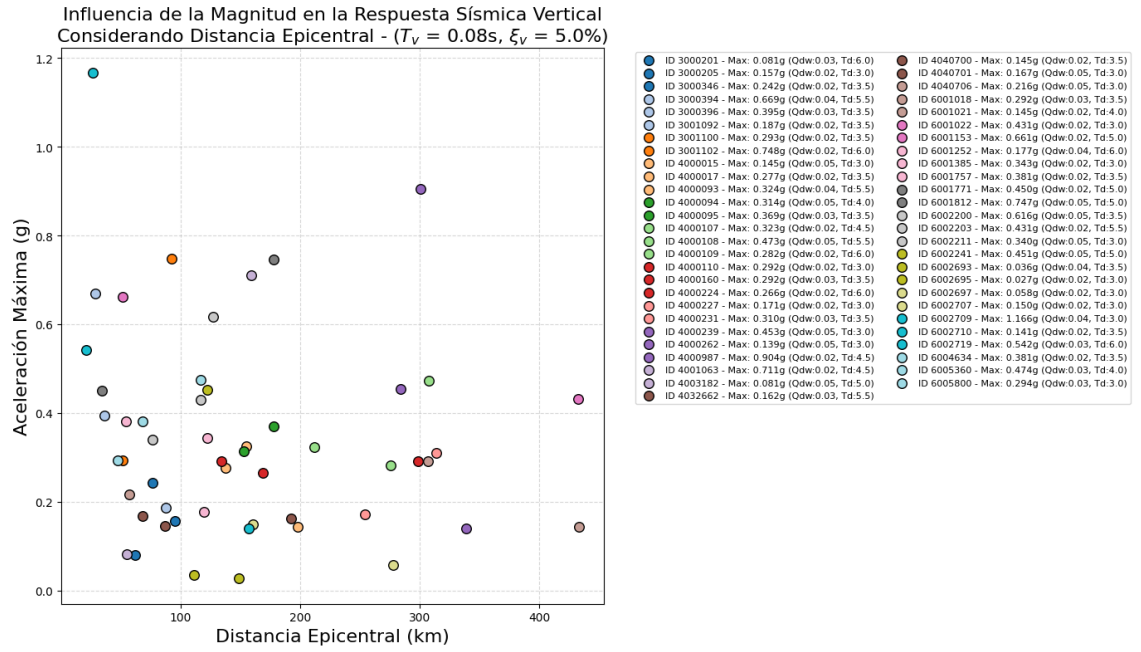
**Figura 3.51** Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.08s$  y  $\xi_v = 2.50\%$



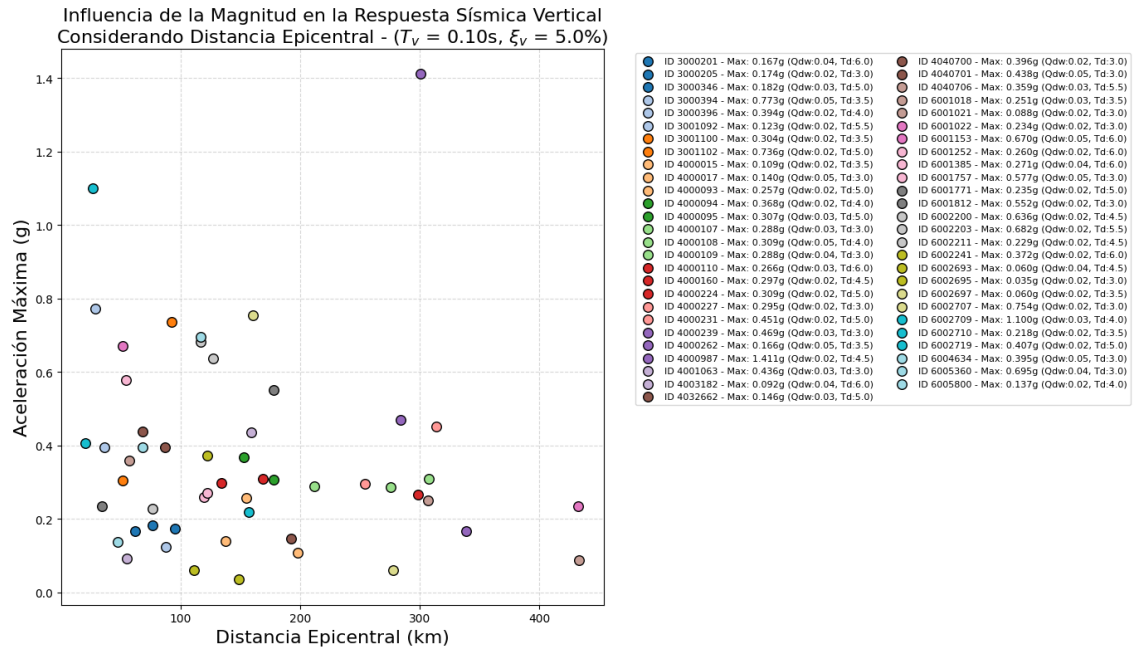
**Figura 3.52** Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.10s$  y  $\xi_v = 2.50\%$



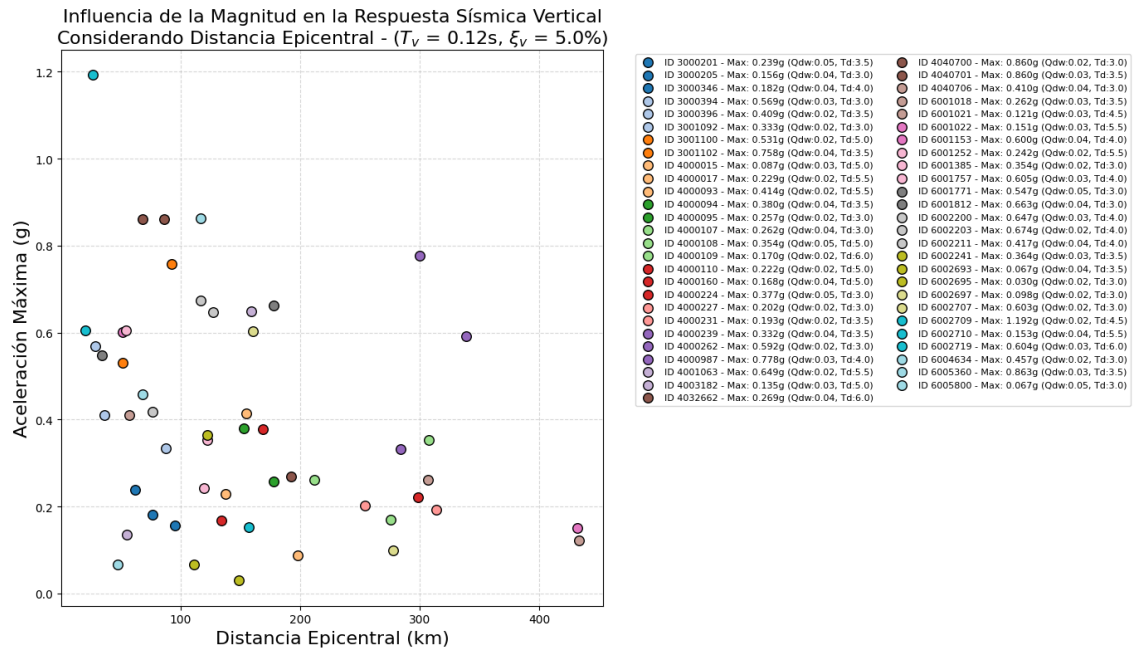
**Figura 3.53** Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.12s$  y  $\xi_v = 2.50\%$



**Figura 3.54** Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.08s$  y  $\xi_v = 5.00\%$



**Figura 3.55** Influencia de la magnitud en la respuesta sísmica vertical considerando distancia epicentral para  $T_v = 0.10s$  y  $\xi_v = 5.00\%$



### 3.5 Análisis de Curvas ADRS

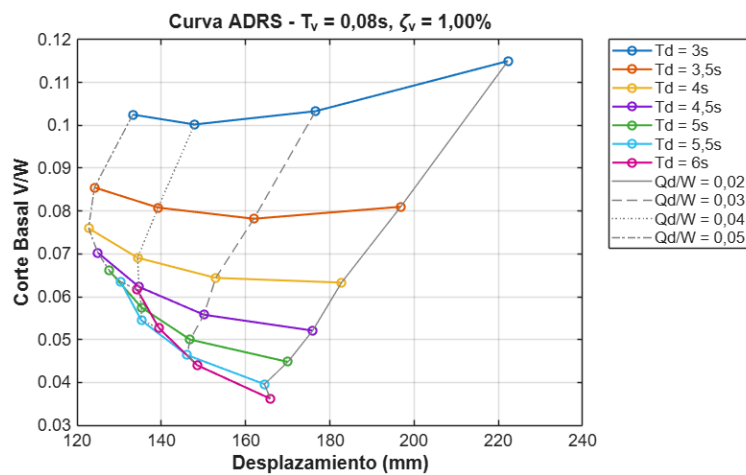
Los espectros de capacidad ADRS obtenidos para los distintos periodos objetivo de diseño ( $T_d$ ) del sistema de aislamiento, desde 3.0s hasta 6.0s, revelan una relación fundamental entre la rigidez del sistema, las demandas de desplazamiento y el esfuerzo cortante transmitido a la superestructura. Como se observa en las curvas (Figuras 3.57 hasta 3.65), para un desplazamiento objetivo fijo, el cortante basal normalizado ( $V/W$ ) disminuye de manera sistemática a medida que se incrementa el periodo de diseño ( $T_d$ ).

Este comportamiento es consistente con la teoría de dinámica de estructuras aisladas, donde sistemas más flexibles (mayor  $T_d$ ) filtran una mayor cantidad de la energía sísmica, reduciendo así las fuerzas inerciales transmitidas. Por ejemplo, para un desplazamiento objetivo de 200 mm, el valor de ( $V/W$ ) desciende desde 0.110 para  $T_d = 3.0s$  hasta 0.031 para  $T_d = 6.0s$ . Esta reducción, sin embargo, no es lineal y presenta una tasa de decrecimiento más pronunciada entre  $T_d = 3.0s$  y  $T_d = 4.5s$ , estabilizándose posteriormente. Estos resultados validan el proceso de diseño basado en desempeño, permitiendo al diseñador realizar un balance explícito entre la demanda de

desplazamiento en los aisladores (y sus consecuencias en el tamaño de la junta sísmica y la estabilidad) y el nivel de fuerza para el que debe diseñarse la superestructura.

Las Figuras 3.57 al 3.65 muestran espectros ADRS, en las cuales las abscisas corresponden al desplazamiento que tendrá el sistema de aislación sísmica y las ordenadas al corte basal de la estructura normalizado con respecto al peso sísmico ( $W$ ). A partir del gráfico el diseñador puede seleccionar los parámetros más adecuados para el sistema de aislación sísmica, ya que, en la mayoría de los casos, a medida que aumenta el periodo postfluencia los valores de corte basal van disminuyendo y mientras aumenta la resistencia característica los valores del desplazamiento del sistema de aislación también disminuyen.

De las Figuras 3.57 hasta 3.65 se puede observar que los desplazamientos más altos corresponden a una fuerza de activación  $Q_d$  de  $2.00\%W$  y a medida que se aumenta la fuerza de activación los desplazamientos se van reduciendo. Los cortes basales se van reduciendo a medida que el período postfluencia ( $T_d$ ) se va incrementando.



**Figura 3.57 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.08s$  y  $\zeta = 1.00\%$**

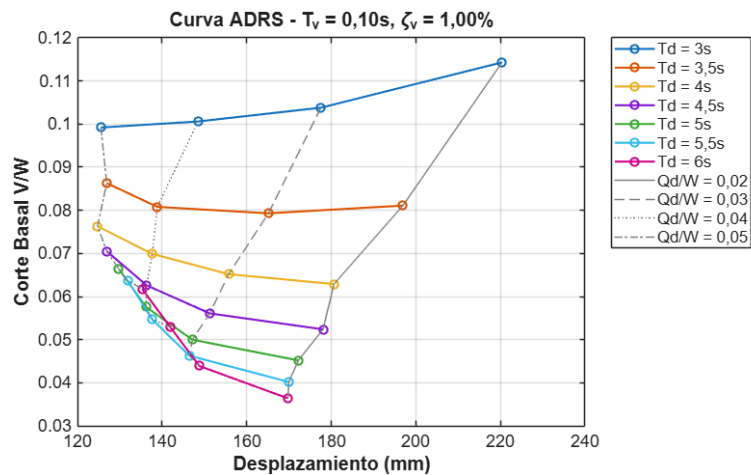


Figura 3.58 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.10s$  y  $\zeta = 1.00\%$

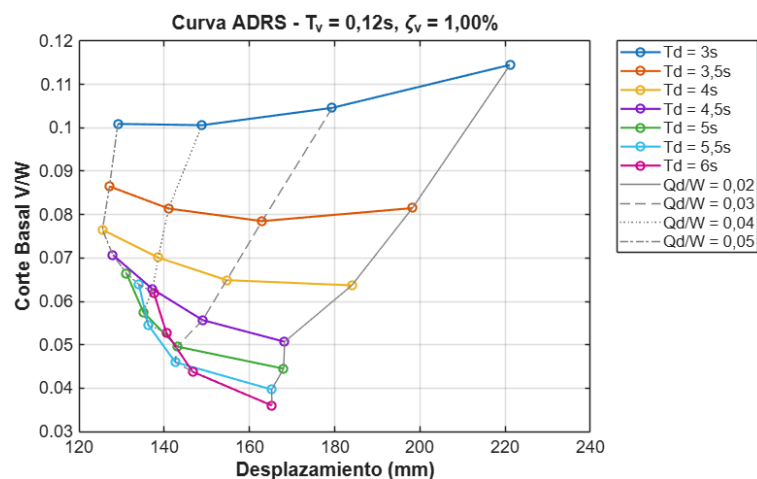


Figura 3.59 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.12s$  y  $\zeta = 1.00\%$

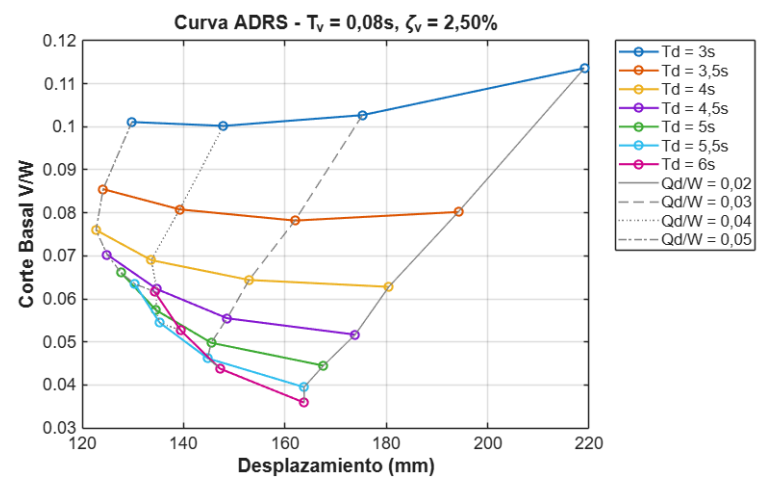


Figura 3.60 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.08s$  y  $\zeta = 2.50\%$

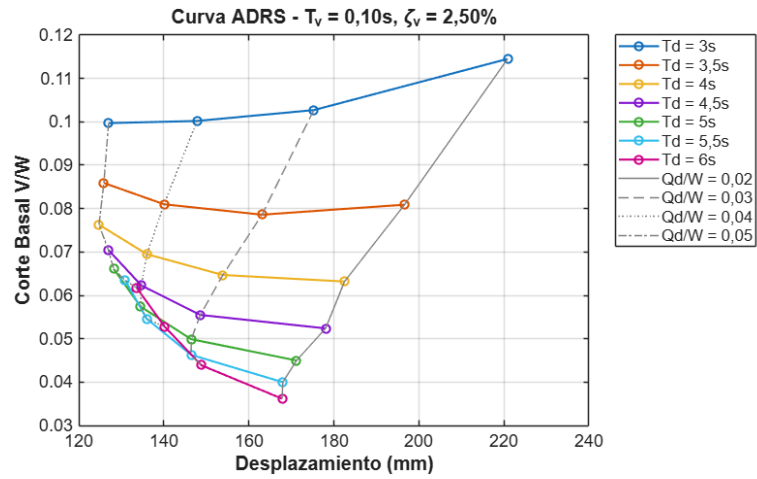


Figura 3.61 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.10s$  y  $\zeta = 2.50\%$

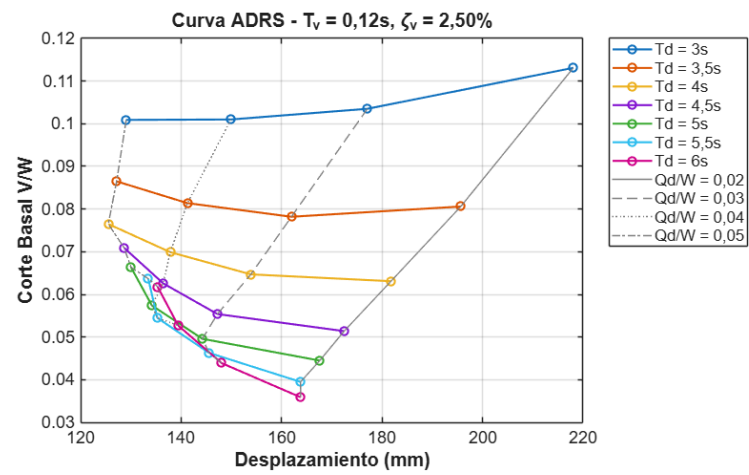


Figura 3.62 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.12s$  y  $\zeta = 2.50\%$

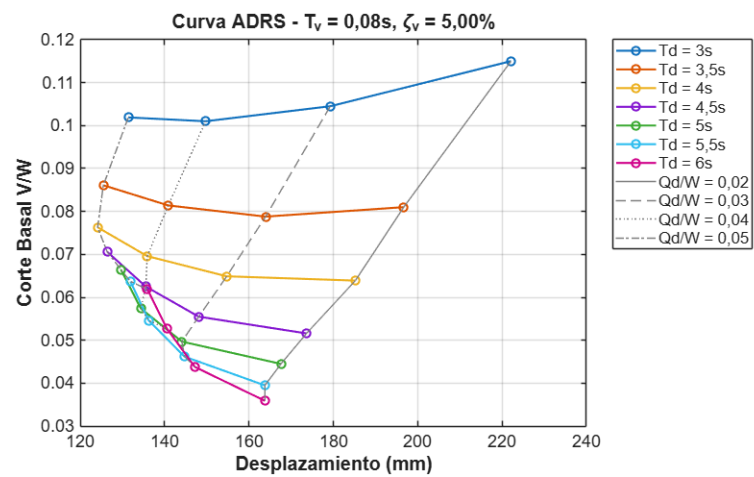
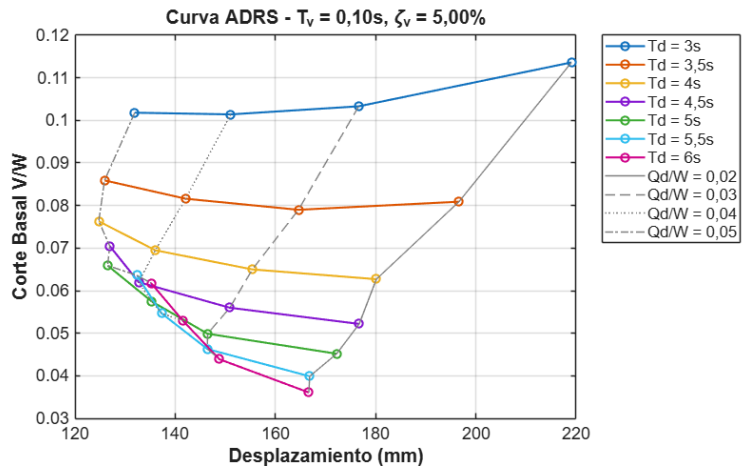
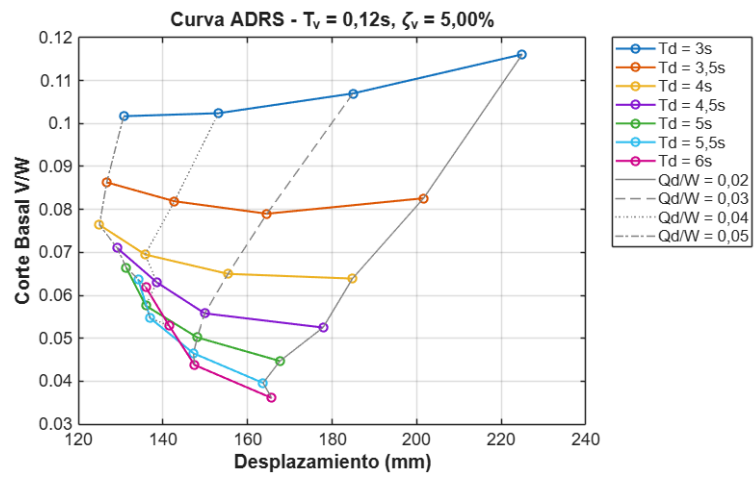


Figura 3.63 Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.08s$  y  $\zeta = 5.00\%$



**Figura 3.64** Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.10s$  y  $\zeta = 5.00\%$



**Figura 3.65** Curva ADRS para los registros sísmicos seleccionados aleatoriamente,  $T_v = 0.12s$  y  $\zeta = 5.00\%$

# CAPÍTULO 4

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

El análisis no lineal de respuesta en el tiempo (NLTHA) con registros tridireccionales (X-Y-Z) evidenció que la respuesta sísmica de estructuras con aislación depende de manera significativa tanto de la direccionalidad del movimiento como de la interacción simultánea de las componentes horizontal y vertical. Los escenarios de excitación unidireccional y bidireccional subestiman de forma sistemática las demandas máximas, especialmente en desplazamientos vectoriales del sistema de aislación y fuerzas internas asociadas, en comparación con los resultados obtenidos bajo excitación tridireccional simultánea.

La comparación entre los resultados obtenidos mediante análisis tridireccionales simultáneos y aquellos derivados de métodos de combinación simplificados (100/30 y SRSS) evidencia una subestimación sistemática de las demandas reales, tanto en desplazamientos como en aceleraciones. Esta subestimación es más pronunciada en configuraciones con períodos verticales mayores y amortiguamientos bajos, lo que pone en evidencia las limitaciones de la práctica convencional de diseño frente a la complejidad real del movimiento sísmico en zonas de subducción.

Simultaneidad de las componentes horizontales en desplazamientos ( $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ ): El análisis de las relaciones  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  demuestra que los máximos desplazamientos en las direcciones horizontales ortogonales no ocurren de manera independiente. En múltiples casos, al alcanzarse el máximo desplazamiento en una dirección, la respuesta en la dirección ortogonal presenta valores significativos de forma simultánea (41% en promedio). Este comportamiento confirma que la suposición implícita de no simultaneidad direccional conduce a una subestimación de los desplazamientos vectoriales máximos, especialmente relevante en sistemas de aislación sísmica donde los desplazamientos controlan el diseño.

Simultaneidad de las componentes horizontales en aceleraciones ( $\lambda_3$  y  $\lambda_4$ ): De manera análoga, las relaciones  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  evidencian que las aceleraciones máximas inducidas por las componentes horizontales del sismo presentan una interacción

direccional significativa. Aun cuando la aceleración máxima ocurre en una dirección principal, la componente ortogonal puede alcanzar valores elevados de forma simultánea, incrementando las demandas inerciales transmitidas a la superestructura. Este efecto no es adecuadamente capturado por los métodos de combinación simplificados, lo que refuerza la necesidad de enfoques más rigurosos.

Los resultados confirman que las características propias de los sismos de subducción, como la alta duración, el contenido energético significativo en la componente vertical y la correlación temporal entre componentes, incrementan la probabilidad de demandas simultáneas elevadas. En este contexto, el uso de análisis tridireccionales simultáneos resulta fundamental para una evaluación realista del desempeño sísmico de estructuras con aislación.

Los resultados obtenidos a partir de los análisis no lineales de respuesta en el tiempo con excitación tridireccional simultánea (X–Y–Z) evidencian que la componente vertical del sismo ejerce una influencia significativa en la respuesta dinámica de estructuras con aislación sísmica, particularmente en términos de fuerzas axiales y condiciones de tracción en los aisladores.

El análisis de la relación espectral vertical a horizontal  $R_1$  revela que, bajo condiciones promedio, la demanda vertical representa una fracción moderada de la componente horizontal, situándose entre el 11.2% y el 25.2% dependiendo del nivel de amortiguamiento y el periodo vertical. Estos valores medios sugieren una tendencia clara: el incremento del amortiguamiento vertical del 1.0% al 5.0% logra reducir la magnitud de la relación  $R_1$  a la mitad, consolidándose como el mecanismo de control más efectivo para mitigar la transmisión de energía en el eje vertical.

Al integrar la variabilidad inherente de los registros de subducción mediante la desviación estándar, los valores del Percentil 84 en el análisis de simultaneidad de la componente vertical demuestran que las demandas de diseño pueden ser significativamente superiores a las previstas por la media. En este escenario conservador, la relación  $R_1$  alcanza valores críticos de hasta el 49.1%, lo que implica que la componente vertical puede llegar a representar casi la mitad de la intensidad horizontal. Esta brecha entre el promedio y el percentil 84 confirma que la dispersión estadística no es despreciable y que el diseño de sistemas de aislación debe

fundamentarse en este estimador superior para garantizar la estabilidad frente a fenómenos de levantamiento y fluctuaciones severas de carga axial.

El incremento del amortiguamiento vertical de 1% a 2.5% y 5% produce una reducción sistemática de la relación  $V/H$  y de la extensión de las regiones críticas dentro del espacio de diseño. Sin embargo, incluso para valores elevados de amortiguamiento vertical, se identifican configuraciones en las que la contribución vertical sigue siendo relevante, especialmente para períodos verticales cercanos a rangos de mayor contenido espectral de los sismos de subducción. Esto demuestra que el amortiguamiento vertical atenúa, pero no elimina, los efectos de la componente vertical.

La componente vertical del sismo tiene impacto crítico en estructuras aisladas, especialmente en zonas de subducción donde las aceleraciones verticales pueden ser significativas y correlacionarse con picos horizontales reales.

Los desarrollos normativos actuales no contradicen la necesidad de evaluación avanzada, sino que proveen marcos y valores de referencia (como  $0.12S_{MS}$ ) que pueden complementarse con análisis más detallados según el objetivo de diseño o evaluación de desempeño.

### **Recomendaciones**

Se recomienda que el diseño y evaluación de estructuras con aislación sísmica ubicadas en zonas de subducción se realice mediante análisis no lineales de respuesta en el tiempo con excitación tridireccional simultánea (X–Y–Z), especialmente cuando se evalúan desplazamientos máximos, fuerzas axiales y condiciones de estabilidad de los aisladores.

Los métodos de combinación simplificados, tales como 100/30 y SRSS, no deberían ser utilizados como única herramienta de evaluación en estructuras con aislación sísmica, dado que tienden a subestimar las demandas reales. En su lugar, estos métodos podrían emplearse únicamente como aproximaciones preliminares, complementadas con análisis avanzados.

Se recomienda que la componente vertical del sismo sea considerada explícitamente en la evaluación de fuerzas axiales, tracciones y posibles fenómenos de

levantamiento en los aisladores, particularmente para sistemas con períodos verticales mayores y amortiguamientos bajos.

El amortiguamiento vertical debe ser considerado como un parámetro de diseño relevante para mitigar las demandas inducidas por la componente vertical del sismo. No obstante, su incremento no debe asumirse como una solución suficiente por sí sola, sino como parte de una estrategia integral que incluya análisis tridireccionales simultáneos.

Se recomienda que el diseño de sistemas de aislación sísmica incorpore criterios basados en desplazamientos vectoriales máximos y en la simultaneidad real de las componentes horizontales, evitando evaluaciones independientes por dirección que no reflejan el comportamiento dinámico real del sistema.

A partir del análisis conjunto de los resultados obtenidos para simultaneidad direccional promedio y percentil 84 de las componentes horizontales en términos de desplazamientos y aceleraciones, es posible establecer rangos de simultaneidad horizontal técnicamente defendibles para estructuras con aislación sísmica ubicadas en zonas de subducción, en función del período postfluencia y la resistencia característica normalizada del sistema.

### **Simultaneidad horizontal representativa en términos de desplazamientos (valor medio):**

Para fines de evaluación del comportamiento estructural y comparación con métodos de combinación simplificados, los resultados indican que:

- Para  $T_d = 3.0 - 3.6s$  y  $Q_d/W = 0.025 - 0.035$ ; simultaneidad promedio  $\lambda \approx 0.43 - 0.45$ .
- Para  $T_d = 4.0 - 4.8s$  y  $Q_d/W = 0.030 - 0.040$ ; simultaneidad promedio  $\lambda \approx 0.38 - 0.40$ .
- Para  $T_d \geq 5.0s$ , en todo el rango  $Q_d/W$  analizado; simultaneidad promedio  $\lambda \approx 0.40 - 0.42$ .

Estos resultados permiten afirmar que, independientemente del grado de flexibilidad del sistema aislado, la simultaneidad horizontal promedio raramente desciende por

debajo del 38%, y se mantiene cercana o superior al 40% en la mayor parte del dominio de diseño.

### **Simultaneidad horizontal representativa en términos de desplazamientos (percentil 84):**

Desde un enfoque de diseño basado en desempeño y en coherencia con criterios estadísticos utilizados en normativas modernas ( $\mu + \sigma$ ), la Figura 3.21 sugiere que:

- Para  $T_d = 3.0 - 3.6s$  y  $Q_d/W = 0.03$ ; simultaneidad de diseño  $\lambda \approx 0.54 - 0.56$ .
- Para  $T_d = 4.5 - 5.5s$ ; simultaneidad de diseño  $\lambda \approx 0.49 - 0.52$ .
- Para  $T_d \approx 6.0s$ ; simultaneidad de diseño  $\lambda \approx 0.50$ .

En consecuencia, los análisis indican que un valor de simultaneidad horizontal del orden del 50 % representa de manera razonable y conservadora la demanda bidireccional de desplazamientos para estructuras aisladas sometidas a sismos de subducción.

### **Recomendaciones Específicas para la Verificación de Desplazamientos y Diseño de Aisladores**

- **Criterios de Simultaneidad para la Revisión de Desplazamientos:** Para el dimensionamiento de la junta sísmica y la verificación de la capacidad de desplazamiento (carrera máxima) de los aisladores, se propone un enfoque escalonado basado en los resultados de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ :

**Revisión Estándar:** Utilizar los factores de simultaneidad promedio obtenidos en la investigación ( $\lambda_{avg} \approx 0.38 - 0.40$ ) para estimar la demanda de desplazamiento vectorial más probable durante el evento sísmico.

**Revisión Conservadora (Estructuras Esenciales):** Para edificaciones críticas o para garantizar un margen de seguridad robusto ante la incertidumbre, se recomienda considerar los factores correspondientes al percentil 84 ( $\lambda_{84\%} \approx 0.45 - 0.49$ ). Este criterio es especialmente mandatorio en sistemas con períodos  $T_d > 3.5s$ , donde la subestimación

de la regla 100/30 es más severa, asegurando así que el aislador no sufra impacto ni exceda su límite de estabilidad.

- **Aplicación de Factores de Aceleración para el Diseño de Aisladores y Conexiones:** Se debe extender el uso de los factores de simultaneidad de aceleraciones  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  más allá del diseño de elementos no estructurales, aplicándolos directamente a la revisión estructural del sistema de aislamiento:
  - **Verificación de Cortante y Conexiones:** Dado que la fuerza inercial (cortante) es proporcional a la aceleración, se recomienda utilizar los factores del percentil 84 de aceleraciones (que alcanzan valores de 0.45 en el rango de períodos  $T_d < 3.5s$ ) para calcular la fuerza cortante resultante combinada en la interfaz de aislamiento.

Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de revisar y actualizar los enfoques normativos actuales para el diseño de estructuras con aislación sísmica en zonas de subducción, promoviendo la incorporación de análisis tridireccionales simultáneos y una mejor representación de la componente vertical del sismo. Asimismo, se recomienda ampliar futuras investigaciones hacia otros tipos de sistemas de aislación y diferentes condiciones de sitio para generalizar los hallazgos obtenidos.

# BIBLIOGRAFÍA

- Al-Janabi, M. A. Q., Al-Jeznawi, D., Yang, T. Y., Bernardo, L. F. A., & Andrade, J. M. de A. (2025). Enhancing Structural Resilience for Sustainable Infrastructure: A Global Review of Seismic Isolation and Energy Dissipation Practices. *Sustainability* 2025, Vol. 17, Page 7314, 17(16), 7314. <https://doi.org/10.3390/SU17167314>
- ASCE/SEI 7. (2022). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>
- ASCE/SEI 41. (2023). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings : ASCE/SEI 41-23*. American Society of Civil Engineers.
- Bedriñana, L. A., & Saito, T. (2021). *SEISMIC RISK AND COST-EFFECTIVENESS OF BASE ISOLATED BUILDINGS IN PERU*.
- Bozorgnia, Y., & Campbell, K. W. (2016). Ground motion model for the vertical-to-horizontal (V/H) ratios of PGA, PGV, and response spectra. *Earthquake Spectra*, 32(2), 951–978. <https://doi.org/10.1193/100614EQS151M;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2003). Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), 314–331. <https://doi.org/10.1785/0120020029>
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (IV). Pearson Education, Inc.
- Der Kiureghian, A. (1980). *A RESPONSE SPECTRUM METHOD FOR RANDOM VIBRATIONS*.
- FEMA. (2020). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures: Volume II: Part 3*.
- FEMA P695. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. [www.ATCCouncil.org](http://www.ATCCouncil.org)
- FEMA P-750. (2009). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*. [www.bssconline.org](http://www.bssconline.org)
- Gregor, N. J., Abrahamson, N. A., Addo, K. O., & Rodriguez-Marek, A. (2012). *Vertical to Horizontal (V/H) Ratios for Large Megathrust Subduction Zone Earthquakes*.

- Grupo Grasa. (2020). *¿Cómo funcionan los aisladores sísmicos de los edificios? - GrupoGrasa*. <https://grupograsa.es/como-funcionan-los-aisladores-sismicos-de-los-edificios/>
- Hoang, P. H., Phan, H. N., & Nguyen, V. N. (2021). On the Influence of the Vertical Earthquake Component on Structural Responses of High-Rise Buildings Isolated with Double Friction Pendulum Bearings. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 3809, 11(9), 3809. <https://doi.org/10.3390/APP11093809>
- INGENIERÍA ANTISISMICA PERÚ. (2025). *Cómo Funcionan los Aisladores Sísmicos y Sus Aplicaciones en Perú*. <https://www.cdvperu.com/como-funcionan-los-aisladores-sismicos-y-sus-aplicaciones-en-peru/>
- Karaferis, N., & Vamvatsikos, D. (2021). *SEISMIC ACTION COMBINATION RULES FOR THE DESIGN OF AZIMUTH-INDEPENDENT STRUCTURES*. 27–30.
- Krawinkler, H., & Seneviratna, G. D. P. K. (1998). Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 20(4–6), 452–464. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8)
- Nakazawa, T., Kishiki, S., Qu, Z., Miyoshi, A., & Wada, A. (2011). Fundamental study on probabilistic evaluation of the ultimate state of base isolated structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 76(662), 745–754. <https://doi.org/10.3130/AIJS.76.745>
- NIST. (2011). *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses NEHRP Consultants Joint Venture A partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering*.
- Red Sísmica. (2021). <http://www.prsn.uprm.edu/Spanish/educacion/terremotos/efectos.php>
- Reyes, J., & Kalkan, E. (2012). *Should Ground-Motion Records be Rotated to Fault-Normal/Parallel or Maximum Direction for Response History Analysis of Buildings?* <https://pubs.usgs.gov/of/2012/1261/>
- Rosenblueth, E., Asce, F., & Contreras, H. (1977). *JOURNAL OF THE ENGINEERING MECHANICS DIVISION APPROXIMATE DESIGN FOR MULTICOMPONENT EARTHQUAKES*.
- Ryan, K. L., Kelly, J. M., & Chopra, A. K. (2005). Nonlinear Model for Lead–Rubber Bearings Including Axial-Load Effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 131(12), 1270–1278. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:12\(1270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:12(1270))

- TIS. (2026). *TIS Deprem Teknolojileri*. <https://tis.com.tr/producto>
- Valdés González, J., & Ordaz Schroeder, M. (2008). Análisis de efectos sísmicos ortogonales horizontales en terreno blando. *Ingeniería Sísmica*, (79), 91–111. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-092X2008000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2008000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A review of seismic isolation for buildings: Historical development and research needs. *Buildings*, 2(3), 300–325. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS2030300>
- Whittaker, A. S., Sollogoub, P., & Kim, M. K. (2018). Seismic isolation of nuclear power plants: Past, present and future. *Nuclear Engineering and Design*, 338, 290–299. <https://doi.org/10.1016/J.NUCENGDES.2018.07.025>
- Zayas, V., Piepenbrock, & Al-Hussaini, T. (1993, March). *Summary of Testing of the Friction Pendulum Isolation System: 1986-1993*. [https://www.researchgate.net/publication/341679052\\_Summary\\_of\\_Testing\\_of\\_the\\_Friction\\_Pendulum\\_Isolation\\_System\\_1986-1993](https://www.researchgate.net/publication/341679052_Summary_of_Testing_of_the_Friction_Pendulum_Isolation_System_1986-1993)

# CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Santiago, 1 de febrero de 2026

Ph. D.

**Natividad Leonor García Troncoso**

Coordinador(a) del Programa

**Maestría en Estructuras Civiles Sismorresistentes**

En su Despacho

## De mi consideración:

Yo, **Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra**, de nacionalidad chilena, portador del pasaporte No. **F57267093**, en mi calidad de Tutor del Proyecto de Titulación correspondiente a la Maestría en **Estructuras Civiles Sismorresistentes**, II Cohorte, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), certifico lo siguiente:

Con fecha 22 de julio del 2025, acepté la tutoría de los estudiantes Rosa Cecilia Jiménez Ruíz con CI: 1250032644, y José Alexander Carreño Loor con CI: 0958181455, para el desarrollo del proyecto de titulación denominado: *“Evaluación de Simultaneidad de Acciones Sísmicas para Diseño de Estructuras con Aislación Sísmica en Zonas de Subducción”*.

Certifico que este trabajo de titulación fue supervisado de manera continua durante todo su desarrollo, revisado en cada una de sus etapas y, finalmente, aprobado por mi persona en su versión final, entregada el día 28 de enero del 2026.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines pertinentes.

Atentamente,

Powered by  Firma electrónica avanzada  
RODRIGO ALFONSO  
RETAMALES SAAVEDRA  
2026.02.02 10:05:21 -0300

**Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra, Ph. D.**

Tutor del Proyecto

Correo electrónico: roretama@espol.edu.ec; rodrigo.retamales@gmail.com