



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO  
Grado en Ingeniería Mecánica

INCIDENCIA DEL TAMAÑO DE MUESTRA EN LOS  
RESULTADOS DE ANÁLISIS SÍSMICOS PROBABILISTAS  
DE EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA DE  
BARCELONA



Memoria y Anexos

**Autor:** Murilo Cossovan Marques  
**Director:** Jorge Arturo Ávila Haro  
**Departamento:** RMEE  
**Convocatoria:** Enero 2023



## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al profesor Jorge Arturo Ávila Haro por dirigir mi trabajo, por enseñarme y por hacer todo lo posible para ayudarme durante la elaboración de este. También agradezco a todos aquellos profesores que no han dudado en salir de su camino para ayudar a sus alumnos. Estoy seguro que sin ellos, no habría grandes ingenieros.

Quiero agradecer a mi familia y a mis amigos de toda la vida, que han creído en mis habilidades y capacidades desde el principio, por su apoyo incondicional y por su ayuda. Por confiar en mí las veces que yo no sabía.

Quiero agradecer a aquellos amigos especiales que he conocido en la universidad, por su apoyo y porqué sin ellos dudo que esta etapa hubiera sido tan memorable, ojalá nos hubiéramos conocido antes.

Y por último, quiero agradecer a aquel grupo de nueve personas que fueron y siempre serán mi familia en Luleå, por las aventuras y experiencias que vivimos juntos, por su amistad desde el primer día y por abrirme los ojos y cambiarme la vida.

Tack så mycket alla, jag älskar ni!



## Resumen

La mampostería no reforzada al igual que en la mayoría de ciudades europeas, es la tipología constructiva más común en la ciudad de Barcelona, donde aproximadamente tres de cada cuatro edificios han sido construidos empleando esta técnica. La edad media de estas estructuras se sitúa alrededor de los cien años y sus propiedades mecánicas y características estructurales están directamente relacionados con los procesos de fabricación preindustriales de los materiales de construcción y con las normativas de la época, que no consideraban ningún tipo de riesgo sísmico.

Actualmente existen estudios que han logrado caracterizar el comportamiento de los edificios de mampostería no reforzada mediante el modelado de dichas estructuras, junto a la definición de sus propiedades materiales y el posterior análisis mediante métodos estáticos no lineales, desde un enfoque probabilista. Sin embargo, todavía es necesario realizar un estudio sobre el impacto del tamaño de muestra en los resultados de dichas investigaciones, con el objetivo de ahorrar recursos energéticos y computacionales, diseñando modelos más eficientes.

Para analizar la influencia del tamaño de la muestra, este trabajo hace una revisión comprensiva sobre las investigaciones realizadas en este ámbito, recopilando información y entendiendo el método de análisis, el tratamiento estadístico de las variables y el enfoque probabilista del estudio, para posteriormente aplicar los criterios ya definidos a la obtención de resultados.

A partir del muestreo aleatorio simple se han determinado diferentes tamaños de muestra, que permiten tanto la comparación gráfica como la numérica de las curvas de fragilidad e índice de daño de una muestra dada. Los resultados obtenidos para las curvas de fragilidad, respaldados por distribuciones de probabilidad y por la representación bilineal del espectro de capacidad son notablemente más significativos que aquellos obtenidos para los índices de daño.

**Palabras clave:** Análisis sísmico probabilista, métodos estáticos no lineales, muestreo aleatorio simple, índice de confianza, tamaño de muestra.

## Resum

La maçoneria no reforçada igual que a la majoria de ciutats europees, és la tipologia constructiva més comuna a la ciutat de Barcelona, on aproximadament tres de cada quatre edificis han estat construïts emprant aquesta tècnica. L'edat mitjana d'aquestes estructures se situa al voltant dels cent anys i les seves propietats mecàniques i les característiques estructurals estan directament relacionats amb els processos de fabricació preindustrials dels materials de construcció i amb les normatives de l'època, que no consideraven cap mena de risc sísmic.

Actualment, hi ha estudis que han aconseguit caracteritzar el comportament dels edificis de maçoneria no reforçada mitjançant el modelatge de les esmentades estructures, juntament amb la definició de les seves propietats materials i la posterior anàlisi mitjançant mètodes estàtics no lineals, des d'un enfocament probabilista. No obstant això, encara cal fer un estudi sobre l'impacte de la mida de mostra en els resultats de les investigacions esmentades, amb l'objectiu d'estalviar recursos energètics i computacionals, dissenyant models més eficients.

Per analitzar la influència de la mida de la mostra, aquest treball fa una revisió comprensiva sobre les investigacions realitzades en aquest àmbit, recopilant informació i entenent el mètode d'anàlisi, el tractament estadístic de les variables i l'enfocament probabilista de l'estudi, per aplicar posteriorment els criteris ja definits a obtenir resultats.

A partir del mostreig aleatori simple s'han determinat diferents mides de mostra, que permeten tant la comparació gràfica com la numèrica de les corbes de fragilitat i l'índex de dany d'una mostra donada. Els resultats obtinguts per a les corbes de fragilitat, sostinguts per distribucions de probabilitat i per la representació bilineal de l'espectre de capacitat, són notablement més significatius que els obtinguts per als índexs de dany.

**Paraules clau:** Anàlisi sísmica probabilista, mètodes estàtics no lineals, mostreig aleatori simple, índex de confiança, mida de mostra.

## Abstract

Unreinforced masonry, as in most European cities, is the most common construction typology in the city of Barcelona, where approximately three out of four buildings have been built using this technique. The average age of these structures is around a hundred years and their mechanical properties and structural characteristics are directly related to the pre-industrial manufacturing processes of the construction materials and regulations of the time, which did not consider any type of seismic risk.

There are recent studies that have succeeded in characterising the behaviour of unreinforced masonry buildings by modelling these structures, defining their material properties and then analysing them using non-linear static procedures from a probabilistic approach. However, a study on the impact of sample size on the results of such investigations is still needed, aiming to save energy and computational resources by designing efficient models.

In order to analyse the influence of sample size, this study makes a comprehensive review of the research carried out in this field, gathering information and understanding the method of analysis, the statistical treatment of the variables and the probabilistic approach of the study, in order to subsequently apply the criteria already defined to obtain the results.

Based on simple random sampling, different sample sizes have been determined, which allow both graphical and numerical comparison of the fragility curves and damage index of a given sample. The results obtained for the fragility curves, supported by probability distributions and the bilinear representation of the capacity spectrum, are notably more significant than those obtained for the damage indices.

**Keywords:** Probabilistic seismic analysis, non-linear static procedures, simple random sampling, confidence interval, sample size.



# Índice

<b>1</b>	<b>Objetivos, Alcance y Consideraciones</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Introducción Histórica</b>	<b>2</b>
2.1	La Ciudad . . . . .	2
2.2	El Eixample . . . . .	3
2.2.1	Características Urbanísticas . . . . .	3
2.3	Técnicas Constructivas . . . . .	5
2.3.1	Ladrillo . . . . .	5
2.3.2	Mortero . . . . .	6
2.3.3	Muros . . . . .	6
2.3.4	Mampostería . . . . .	7
2.3.5	Tipologías Constructivas . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Edificios Estudiados</b>	<b>10</b>
3.1	Características Generales y Solicitud . . . . .	10
3.2	Cimientos . . . . .	10
3.3	Paredes y Aberturas . . . . .	11
3.4	Patios Internos y Cajón de Escaleras . . . . .	12
3.5	Forjados . . . . .	12
3.6	Materiales Cerámicos y sus Propiedades . . . . .	13
3.7	Edificio de Interés . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Historia del Arte</b>	<b>17</b>
4.1	Enfoque Probabilista de los Edificios . . . . .	17
4.1.1	Variables Aleatorias de Interés . . . . .	17
4.2	Análisis . . . . .	20
4.2.1	Análisis Modal . . . . .	20
4.2.2	Análisis Estático No Lineal . . . . .	21
4.2.2.1	Etapa 1: Curva de Capacidad y Selección del Punto Último . . . . .	22
4.2.2.2	Etapa 2: Demanda Sísmica . . . . .	23
4.2.2.3	Etapa 3: Espectros de Capacidad y de Respuesta . . . . .	26
4.2.2.4	Etapa 4: Punto de Desempeño . . . . .	27
4.2.2.5	Conclusión del Proceso . . . . .	28
4.2.3	Métodos de Análisis Estático No Lineal . . . . .	28
4.3	Estados de Daño . . . . .	30
4.4	Fragilidad y Curvas de Fragilidad . . . . .	31
4.5	Software de Análisis . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Metodología de Cálculo</b>	<b>34</b>
5.1	Muestreo . . . . .	34
5.1.1	Metodología . . . . .	35
5.1.2	Programa de Matlab . . . . .	37
5.2	Discusión Sobre los Intervalos de Confianza y el Muestreo . . . . .	37
5.3	Comparación de Curvas de Fragilidad . . . . .	41

5.3.1	Comparación Gráfica . . . . .	41
5.3.2	Comparación Numérica . . . . .	42
5.4	Comparación de Índices de Daño . . . . .	43
5.4.1	Comparación Gráfica . . . . .	43
5.4.2	Comparación Numérica . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Presentación y Discusión de Resultados</b>	<b>45</b>
6.1	Comparación de Curvas de Fragilidad . . . . .	45
6.1.1	Comparación Gráfica . . . . .	45
6.1.2	Comparación Numérica . . . . .	50
6.2	Comparación de Índices de Daño . . . . .	53
6.2.1	Comparación Gráfica . . . . .	53
6.2.2	Comparación Numérica . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Conclusiones y Líneas de Investigación Futuras</b>	<b>57</b>
	<b>Anexos</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Características de los Edificios Estudiados</b>	<b>66</b>
<b>B</b>	<b>Formulación de Evaluación Sísmica</b>	<b>70</b>
<b>C</b>	<b>Análisis Aplicado al Método N2</b>	<b>72</b>
<b>D</b>	<b>Programas de MATLAB</b>	<b>76</b>
<b>E</b>	<b>Resultados</b>	<b>100</b>

## Lista de Figuras

Parte del contenido gráfico usado en esta memoria ha sido cedido por el *Dr. Jorge Arturo Ávila Haro*.

1	División en distritos de la ciudad de Barcelona (Gonzalez-Drigo et al., 2017).	2
2	Distribución de edificios del distrito del Eixample. . . . .	3
3	Distribución de edificios de una manzana del Eixample. . . . .	4
4	Diferentes tipologías constructivas. . . . .	9
5	Fachadas típicas de los edificios estudiados (Gonzalez-Drigo et al., 2015). .	11
6	Forjados presentes en los edificios de estudio. . . . .	13
7	Fachada frontal. . . . .	15
8	Sección perpendicular a la fachada. . . . .	15
9	Planta tipo. . . . .	15
10	Planta baja. . . . .	15
11	Dirección de los forjados en plantas tipo. . . . .	16
12	Direcciones de análisis del edificio de interés. a) planta baja. b) vista general.	16
13	Curva de distribución normal. . . . .	18
14	Matriz de propiedades mecánicas. . . . .	19
15	Sistema de un grado de libertad. . . . .	20
16	Obtención de la curva de capacidad de una estructura sometida a una carga lateral. . . . .	22
17	Patrones de carga lateral aplicados a sistemas de MGD. . . . .	22
18	Tipos de terreno de Barcelona (Secanell et al., 2004). . . . .	24
19	Espectros de respuesta elástico deterministas según el terreno. . . . .	25
20	Espectros de respuesta elástico probabilistas según el terreno. . . . .	25
21	Representación bilineal del espectro de capacidad. . . . .	26
22	Espectro de demanda inelástico en formato aceleración-desplazamiento. . .	27
23	Curva ID vs. IM. . . . .	31
24	Curvas de fragilidad no nulas. . . . .	32
25	Comportamiento histerético no lineal (Gamberotta and Lagomarsino, 1997).	33
26	Relación entre $n/N$ y el tamaño de muestra. Conjunto de IC específicos. . .	38
27	Relación entre $n/N$ y el tamaño de muestra. Rango amplio de IC. . . . .	40
28	Comparación de diversas curvas DS4. . . . .	45
29	Comparación numérica normalizada derivada de la comparación gráfica de DS4. . . . .	46
30	Comparación de diversas curvas DS3. . . . .	46
31	Curvas de fragilidad para $n=213$ . . . . .	48
32	Representación bilineal del espectro de capacidad para $n=213$ . . . . .	48
33	Función de densidad de probabilidad de estados de daño para $n=213$ . . . .	49
34	Comparación numérica normalizada del estado de daño DS1 para distintas muestras. . . . .	50
35	Comparación numérica normalizada del estado de daño DS2 para distintas muestras. . . . .	51
36	Comparación numérica normalizada del estado de daño DS3 para distintas muestras. . . . .	51

37	Comparación numérica normalizada del estado de daño DS4 para distintas muestras. . . . .	52
38	Comparación gráfica del índice de daño para 5 muestras. . . . .	53
39	Probabilidad de ocurrencia de DS. n=213. . . . .	54
40	Comparación numérica normalizada del índice de daño para distintas muestras. . . . .	55
41	Comparación gráfica del índice de daño para 25 muestras. . . . .	56
42	Comparación gráfica del índice de daño 25 muestras. Ampliación. . . . .	56
43	Comparaciones para DS4. . . . .	57
44	Comparaciones de DI. . . . .	58
45	Distribuciones para n=213. . . . .	59
46	Representación bilineal de la curva de capacidad para n=213. . . . .	59
A.1	Vista isométrica de la planta baja. . . . .	67
A.2	Distribución en planta de niveles superiores. . . . .	67
A.3	Vista isométrica del edificio. . . . .	68
A.4	Distribución en planta de la planta baja. . . . .	68
A.5	Distribución planta baja. . . . .	69
A.6	Distribución planta tipo. . . . .	69
C.1	Transformación de la curva de capacidad a un sistema equivalente fuerza-deformación. . . . .	72
C.2	Obtención del espectro de capacidad. . . . .	73
C.3	Ajuste bilineal de la curva de capacidad. . . . .	73
C.4	Determinación del desplazamiento espectral del sistema de 1GDL para periodos medianos y largos. . . . .	74
C.5	Determinación del desplazamiento espectral del sistema de 1GDL para periodos cortos. . . . .	75
E.1	Curvas de fragilidad. n=52. . . . .	100
E.2	PDF lognormal de los estados de daño. n=52. . . . .	100
E.3	Curvas de fragilidad. n=90. . . . .	101
E.4	PDF lognormal de los estados de daño. n=90. . . . .	101
E.5	Curvas de fragilidad. n=213. . . . .	102
E.6	PDF lognormal de los estados de daño. n=213. . . . .	102
E.7	Curvas de fragilidad. n=278. . . . .	103
E.8	PDF lognormal de los estados de daño. n=278. . . . .	103
E.9	Curvas de fragilidad. n=399. . . . .	104
E.10	PDF lognormal de los estados de daño. n=399. . . . .	104
E.11	Curvas de fragilidad. N=1000. . . . .	105
E.12	PDF lognormal de los estados de daño. N=1000. . . . .	105
E.13	Comparación gráfica para DS1. Gráfico completo. . . . .	106
E.14	Comparación gráfica para DS2. Gráfico completo. . . . .	106
E.15	Comparación gráfica para DS3. Gráfico completo. . . . .	107
E.16	Comparación gráfica para DS4. Gráfico completo. . . . .	107
E.17	Comparación gráfica para DS3. Detalle en p=10 %. . . . .	108
E.18	Comparación gráfica para DS4. Detalle en p=10 %. . . . .	108
E.19	Comparación gráfica para DS3. Detalle en p=50 %. . . . .	109
E.20	Comparación gráfica para DS4. Detalle en p=50 %. . . . .	109

E.21 Comparación gráfica para DS3. Detalle en $p=90\%$ . . . . .	110
E.22 Comparación gráfica para DS4. Detalle en $p=90\%$ . . . . .	110
E.23 Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS1. . . . .	111
E.24 Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS2. . . . .	111
E.25 Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS3. . . . .	112
E.26 Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS4. . . . .	112
E.27 Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. $n=52$ . . . . .	113
E.28 Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. $n=90$ . . . . .	113
E.29 Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. $n=213$ . . . . .	114
E.30 Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. $n=278$ . . . . .	114
E.31 Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. $n=399$ . . . . .	115
E.32 Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. $N=1000$ . . . . .	115
E.33 Índice de daño. $n=52$ . . . . .	116
E.34 Índice de daño. $n=90$ . . . . .	116
E.35 Índice de daño. $n=213$ . . . . .	117
E.36 Índice de daño. $n=278$ . . . . .	117
E.37 Índice de daño. $n=399$ . . . . .	118
E.38 Índice de daño. $N=1000$ . . . . .	118
E.39 Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DI. . . . .	119
E.40 Representación bilineal del espectro de capacidad. $n=52$ . . . . .	120
E.41 Representación bilineal del espectro de capacidad. $n=90$ . . . . .	120
E.42 Representación bilineal del espectro de capacidad. $n=213$ . . . . .	121
E.43 Representación bilineal del espectro de capacidad. $n=278$ . . . . .	121
E.44 Representación bilineal del espectro de capacidad. $n=399$ . . . . .	122
E.45 Representación bilineal del espectro de capacidad. $N=1000$ . . . . .	122

## Lista de Tablas

1	Propiedades mecánicas de los ladrillos, adaptado de <a href="#">Ávila Haro (2021)</a> . . .	13
2	Datos generales ED01 ( <a href="#">Ávila Haro, 2021</a> ). . . . .	14
3	Media y desviación estándar de las variables de interés, en MPa ( <a href="#">Avila-Haro et al., 2021</a> ). . . . .	18
4	Tipos de terreno presentes en Barcelona ( <a href="#">Cid Ramos, 1998</a> ). . . . .	24
5	Tabla de intervalos de confianza específicos. . . . .	38
6	Parámetros de cálculo para el rango de IC. . . . .	39
7	Intervalos de confianza y tamaños de muestra derivados. . . . .	39
8	Valores para los límites aceptados de cada punto de control. . . . .	41
A.1	Datos generales ED02 ( <a href="#">Ávila Haro, 2021</a> ). . . . .	67
A.2	Datos generales ED03 ( <a href="#">Ávila Haro, 2021</a> ). . . . .	68
A.3	Datos generales ED04 ( <a href="#">Ávila Haro, 2021</a> ). . . . .	69
B.1	Parámetros que definen los espectros de respuesta según el escenario y tipo de terreno ( <a href="#">Irizarry Padilla, 2003</a> ). . . . .	70
B.2	Aceleración pico del terreno según terreno y escenario( <a href="#">Irizarry Padilla, 2003</a> ). . . . .	71



# 1. Objetivos, Alcance y Consideraciones

El objetivo principal de este trabajo es determinar el tamaño óptimo de muestreo que asegure que los resultados obtenidos a partir del análisis probabilista de efectos sísmicos en edificios de mampostería no reforzada del distrito del Eixample de Barcelona cumplan con los valores de precisión y nivel de confianza elegidos.

De forma complementaria, se han determinado una serie de objetivos generales que sirven como base de este trabajo, como por ejemplo aprender sobre la historia urbanística de la ciudad de Barcelona, especialmente la del distrito del Eixample y tanto las características de sus edificios como las técnicas constructivas y materiales que se utilizaron durante el período de estudio (1890-1940). Otro objetivo es averiguar los diferentes métodos y técnicas de cálculo empleados en estudios probabilísticos de este tipo de estructuras. También será importante conocer el funcionamiento del programa de cálculo (TreMuri), utilizado para obtener los resultados de de daño y fragilidad que se utilizarán para validar los tamaños de muestra empleados y sus intervalos de confianza. Por último, uno de los objetivos de este trabajo es aprender a utilizar *LaTeX* como editor de texto (mediante la plataforma *Overleaf*) ya que es ampliamente utilizado en el ámbito científico-tecnológica para la publicación de documentos, trabajos y artículos.

Es importante mencionar que, en los temas relacionados con la estructura estudiada en este trabajo, el alcance del mismo se limita a entender aspectos relacionados con su construcción, modelado en 3D y su posterior análisis, teniendo como principales tareas tanto la optimización de muestras a partir de la variación de distintos parámetros que inciden en su tamaño y en la calidad de sus resultados, como el análisis de los mismos.

## 2. Introducción Histórica

Este apartado describe de forma resumida la historia de la ciudad de Barcelona, con énfasis en los planes urbanísticos y los edificios del distrito del Eixample, donde se ubica el edificio de interés para este trabajo, así como una breve introducción a la mampostería no reforzada (y los elementos utilizados en este tipo de construcciones) y a las técnicas constructivas empleadas en la época.

### 2.1. La Ciudad

La ciudad de Barcelona disfruta de una amplia historia, que se remonta al año 10 a.C, cuando el emperador romano Augusto funda la colonia amurallada “Iulia Augusta Faventia Paterna Barcino”. En el siglo V d.C, la ciudad cae en manos de los visigodos a causa de la decadencia del imperio romano. Tres siglos más tarde, los musulmanes tomaron la ciudad y, en el año 801 d.C, la dinastía carolingia conquistó el territorio, fundando el Condado de Barcelona (Calpena, 2015).

Como consecuencia del constante esfuerzo musulmán por recuperar el territorio, los reyes francos abandonaron la ciudad, causando su independencia. En el siglo XII, el Condado tiene una expansión significativa, tras unificarse con otros territorios cercanos. Durante el año 1137 d.C se conforma la Corona de Aragón, fruto del matrimonio entre Ramón Berenguer IV y Petronila de Aragón. Debido a la formación de nuevos núcleos poblacionales, las murallas tuvieron que ser ampliadas (Venteo, 2012). Tres siglos más tarde, como resultado del matrimonio entre Fernando II de Aragón e Isabel de Castilla se forma la Monarquía española, que reinará hasta el siglo XVIII. En 1701, comienza la Guerra de Sucesión y tras la victoria de Felipe V (1714), se refuerzan las murallas y se habilitan los fuertes militares de Montjuïc y de la Ciutadella, con el objetivo de controlar la población (Agustí, 2014).

La industrialización de ciertos barrios de Barcelona atrajeron nueva mano de obra, incrementando la población de 116.917 a 516.238 habitantes entre 1832 y 1897 (Busquets, 2004). Teniendo en cuenta que se trataba de una ciudad militar, las Ordenanzas municipales prohibían construir cerca de las murallas. Sumando las malas condiciones higiénicas y sanitarias, las condiciones de vida de Barcelona eran desfavorables (Grupo 2C, 2009). A causa de estos factores, poco a poco se incrementó la presión social para derrumbar las murallas, puesto que no ya no cumplían con el objetivo por el que fueron construidas antaño.

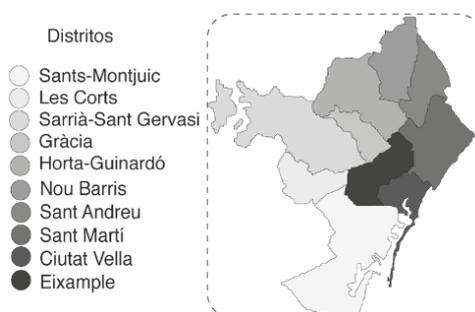


Fig. 1: División en distritos de la ciudad de Barcelona (Gonzalez-Drigo et al., 2017).

## 2.2. El Eixample

En 1854 el Ministerio de Guerra autoriza el derribo de las murallas (Busquets, 2004). Y en 1858 dicta que Barcelona deja de ser considerada como punto estratégico, cediendo la competencia urbanística al Ministerio de Fomento (Gimeno, 1994). El 15 de febrero del siguiente año, el Ministerio encarga a Idelfons Cerdà los estudios y reforma del ensanche (Permanyer, 2008). El 31 de Mayo de 1860 se aprueba oficialmente el “plan Cerdà”, dando comienzo al inicio de urbanización del Eixample (Figueiras and Guardia, 2010).

De acuerdo con el último censo del Institut d’Estadística de Catalunya (2021), el distrito del Eixample está habitado por 264.353 habitantes, correspondiente al 16,15 % de la población de la ciudad de Barcelona. Además, cuenta con más de 7.700 edificios dedicados principalmente a la vivienda (Institut d’Estadística de Catalunya, 2011).

### 2.2.1. Características Urbanísticas

Las características del trazado urbanístico del Eixample son las siguientes (ver Fig. 2):

- Manzanas cuadradas de 113 metros de largo, edificadas por todas las caras.
- Separación entre manzanas de 20 metros.
- Superficie edificada de hasta  $9.200 m^2$  en cada manzana.
- Altura promedio edificada de 27,45 metros.
- Ancho de fachada entre 12 y 16 metros.
- Profundidad de planta entre 11 y 25 metros.

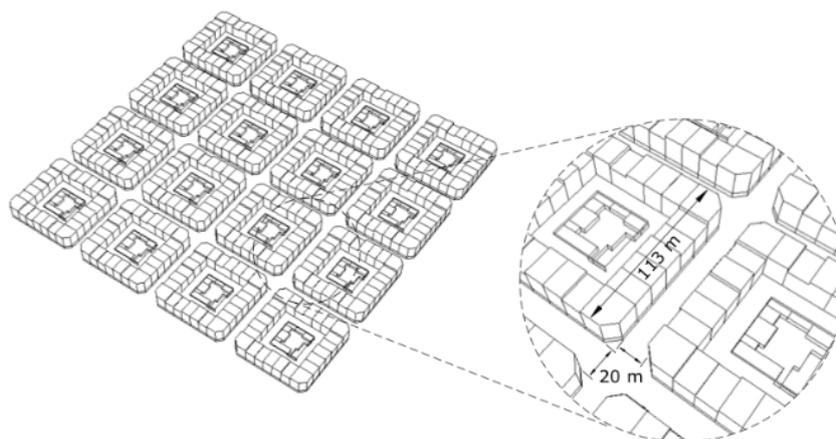


Fig. 2: Distribución de edificios del distrito del Eixample.

Es importante destacar que algunos puntos no se corresponden con el plan inicial de Cerdà: únicamente dos lados edificadas, con una altura promedio de 24,4 metros y superficie edificada de  $5.000 m^2$  en cada manzana (Gonzalez-Drigo et al., 2015).

A vista de estas características, el distrito del Eixample tiene un patrón regular, con una distribución de calles ortogonales (ver Fig. 2). Además, es posible distinguir entre dos tipos de edificios; aquellos que se encuentran en el centro de cualquiera de las cuatro caras de la manzana, y los que están construidos en cada esquina de ésta (también conocido como edificio de chaflán, por su forma). En la siguiente figura se puede observar las diferencias entre estos edificios.

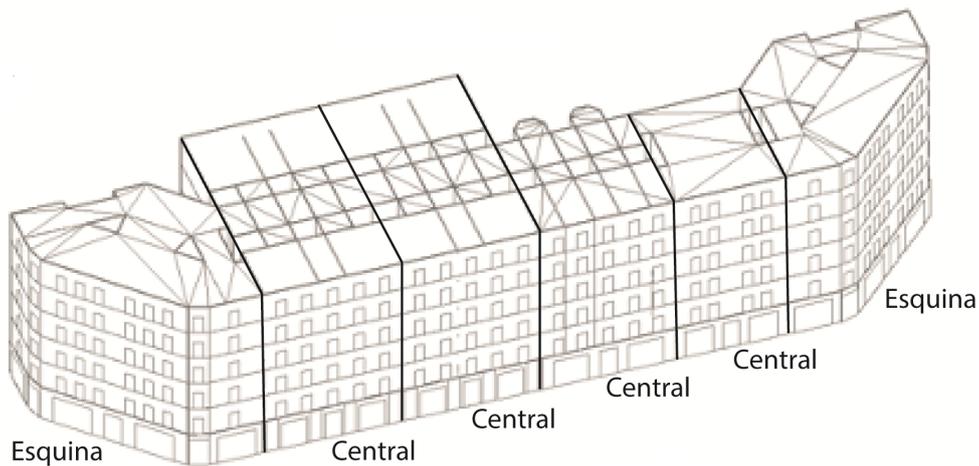


Fig. 3: Distribución de edificios de una manzana del Eixample.

## 2.3. Técnicas Constructivas

Los edificios de mampostería no reforzada pertenecen a una de las tipologías estructurales más comunes en muchas ciudades Europeas. De acuerdo a varias fuentes, estos comprenden alrededor de uno de cada cuatro edificios destinados a la vivienda en la ciudad de Barcelona ([Moreno González and Bairán García, 2012](#); [Milutinovic, 2003](#)).

La mampostería ha sido un sistema de construcción relevante a lo largo de la historia. Su uso se remonta a la necesidad del hombre a tener un sitio seguro donde resguardarse, y empezando a colocar rocas unas encima de otras. A medida que han pasado los siglos, el material que ha sido utilizado en construcciones de mampostería ha ido evolucionando hasta que hace al rededor de 9.000 años, se empezó a utilizar lo que hoy en día conocemos como ladrillo ([Ávila Haro, 2021](#)).

### 2.3.1. Ladrillo

Podemos definir este elemento cómo una pieza paralelepípedica, comúnmente de forma ortoédrica, la cual ha de ser manejable con una sola mano y que se obtiene mediante el moldeo, secado y la cocción de una pasta arcillosa. Tiene una forma regular, un manejo sencillo y varios ámbitos de aplicación([Caro, 2008](#)).

El ladrillo es una de las invenciones que más ha contribuido al desarrollo de las civilizaciones. Principalmente por la facilidad y el bajo coste de fabricación, la rapidez de colocación en la obra y sus propiedades mecánicas. Este componente ha sufrido 4 importantes innovaciones históricas:

- Cocción del ladrillo durante la segunda mitad del IV milenio a.C.
- Uso de moldes durante el antiguo Egipto (1450 a.C.).
- Industrialización del proceso de fabricación durante la segunda mitad del siglo XIX.
- La introducción del ladrillo hueco en las construcciones.

Gracias a la revolución industrial, el ladrillo se empezó a producir mediante procesos mecánicos (a partir de 1830) sustituyendo métodos artesanales. A causa del aumento de la productividad en la fabricación, también hubo un aumento y difusión del uso de este material en todos los ámbitos de la construcción.

Durante la segunda mitad del siglo XIX, y como consecuencia de la introducción del sistema métrico, aparecen los primeros estudios sobre la normalización de las dimensiones de los ladrillos. En 1880 estas nuevas medidas normalizadas deberán usarse de forma obligatoria, según el Real Decreto del 14 de febrero de 1879 ([Rodriguez Sanchez, 2006](#)).

Posteriormente, con la introducción de maquinaria industrial para la fabricación de ladrillos, se publica en el Boletín Oficial del Estado de mayo del 1942 las dimensiones normalizadas para ladrillos macizos; 25 cm de soga, 12 cm de tizón y 5 cm de grueso. Sin embargo, Cataluña siguió fabricando ladrillos de 29 cm de largo ([Valentín-Gamazo, 1948](#)).

Los ladrillos tienen 3 componentes principales (Kornmann, 2007):

- **Arcillas:** son el componente más común en la composición del ladrillo. Se pueden encontrar varias sustancias en ellas como por ejemplo, silicato de alúmina hidratado (arcilla), carbonato de cal, arena y óxido de hierro.
- **Desgrasantes:** su función es disminuir la plasticidad del material antes de su cocción. Se agregan a arcillas de alta plasticidad para contrarrestar deformaciones y roturas durante el proceso de secado y durante la manipulación de las piezas. Los desgrasantes más comunes son el ladrillo molido, la ceniza y la arena.
- **Agua:** El agua es un material imprescindible para la producción de ladrillos. Es muy importante que no presente sales solubles para evitar que éstas aparezcan en la superficie del producto final.

La fabricación de los ladrillos tiene cuatro pasos principales; seleccionar la materia prima y preparar la mezcla, moldearla en la forma que se desea para posteriormente pasar por un período de secado y finalmente por un proceso de cocción (Kornmann, 2007). Según el método de fabricación, la ejecución de cada paso se hace de una forma u otra, por lo tanto se puede definir tres métodos de fabricación de ladrillos: **Artesanal**, **semi-industrial** e **Industrial**.

Éste último se caracteriza por el uso de maquinaria industrial en todos los pasos del proceso de fabricación, específicamente en el moldeado y en el uso de hornos más complejos. Con la producción industrial de ladrillos se puede obtener calidades superiores a los otros dos métodos. Amén, se obtienen unas propiedades mecánicas conocidas y que se pueden controlar.

### 2.3.2. Mortero

El mortero es un compuesto con base acuosa, que presenta conglomerantes inorgánicos, agregados finos y, aditivos que permiten la unión de los ladrillos. Se puede decir que el barro fue uno de los primeros materiales en usarse para unir las piezas. Las propiedades de las materias primas utilizadas para la elaboración del mortero permite identificar el período histórico de construcciones antiguas (Galindo Álvarez et al., 1995).

### 2.3.3. Muros

Se conocen como fábricas las construcciones de piedras, tanto naturales como artificiales, que se agrupan mediante un aglomerante. En caso de que éstas cierren edificios, se les llama muros (Ávila Haro, 2021). Éstos pueden ser continuos o estar delimitados por columnas entre vanos. Se pueden encontrar tres tipos de muros según su situación y función, muros de carga, de arriostramiento y autoportantes; tienen dos componentes principales; ladrillos y mortero.

La función principal de los muros de un edificio es de soportar tensiones de compresión, tracción y esfuerzos cortantes originados por sollicitaciones en las tres dimensiones. La resistencia de éstos es función del espesor de las juntas, tipo de aparejo y calidad tanto de los materiales como de la mano de obra, entre otros factores.

#### 2.3.4. Mampostería

Es un sistema que consiste en colocar manualmente los elementos (mampuestos) que lo componen. Las piedras y los ladrillos son claros ejemplos de estos elementos, y su disposición se conoce como aparejo. Las uniones de estos mampuestos están conformadas por mortero (Ávila Haro, 2021).

El uso de la mampostería se ha extendido gracias a la posibilidad de variar las formas, texturas, tamaños, acabados y colores de sus elementos. Su uso no es estrictamente estructural, sino que también está relacionado con la estética arquitectónica, eficiencia energética y durabilidad de las estructuras.

#### 2.3.5. Tipologías Constructivas

En el año 1999 se propuso una clasificación de los edificios del Eixample según el período de construcción de éstos (Paricio et al., 1999). Esta clasificación se complementa por Gonzalez-Drigo et al. (2015), aportando características estructurales adicionales:

##### 1. Premodernismo (1860-1900):

- Los edificios construidos durante este período representan aproximadamente el 26 % de los edificios actuales del Eixample. Tienen una fachada simétrica de seis plantas, divididas en tres partes:
  - **Planta baja:** terminada con mampostería de piedra.
  - **Niveles intermedios:** terminados con estuco, imitando piedra.
  - **Nivel superior:** compuesto por un friso, una cornisa y una balaustrada.
- Los elementos principales de estas construcciones son las paredes de carga de piedra (planta baja), ladrillos cerámicos macizos de arcilla (plantas superiores) y forjados unidireccionales con vigas de madera, cerrados con bovedillas de ladrillo de arcilla y piso de madera.

##### 2. Modernismo (1888-1915):

- Los edificios construidos durante este período representan aproximadamente el 7 % de los edificios actuales del Eixample. Igual que en el período anterior, tienen una fachada simétrica de seis plantas con una distribución regular de aberturas pero, con una discontinuidad en la planta baja.
- Los elementos ornamentales están hechos con piedras artificiales, también hay una tribuna característica en la segunda planta y se empiezan a usar elementos de hierro y hierro fundido. Estas características dan lugar a este período constructivo.

- Se introduce el hierro fundido para solucionar las columnas de la planta baja, con el objetivo de crear espacios abiertos orientados al comercio. En los forjados unidireccionales, las vigas de madera son sustituidas por vigas de hierro y la construcción se basa en paredes de carga de mampostería de piedra (planta baja) y de ladrillo cerámico macizo (plantas superiores).

### 3. Posmodernismo (1910-1936):

- Los edificios construidos durante este período representan aproximadamente el 29 % de los edificios actuales del Eixample. Son edificios de siete plantas, con una fachada dividida en tres partes:
  - **Planta baja:** grandes aberturas y paredes de carga construidas con mampostería de piedra.
  - **Niveles intermedios:** patrón regular de aberturas consistentes en ventanas altas y balcones soportados por elementos de hierro y paredes de mampostería de ladrillo de arcilla.
  - **Nivel superior:** planta superior característica del período consistente en una buhardilla con elementos decorativos hechos de piedra artificial con cubierta de pizarra.

### 4. Período Contemporáneo (1939-1988):

- Los edificios construidos durante este período representan aproximadamente el 38 % de los edificios actuales del Eixample. Una de las características de este período son los cambios en las tecnologías de la construcción y los materiales usados por éstas. La fachada está dividida en dos partes:
  - **Planta baja:** grandes aberturas que duplican la altura de las plantas superiores.
  - **Plantas superiores:** dentro de un cuerpo grande a modo de viga en voladizo que concentra el resto de las aberturas (de patrón regular).
- Los arcos y elementos decorativos desaparecen y el hormigón reforzado sustituye al barro en los forjados y las columnas de la planta baja.
- Otra característica de este período son las ordenanzas constructivas, que permitían añadir niveles por encima de los siete originales. Estas plantas nuevas están ligeramente retraídas respecto a la fachada original.

En la Fig. 4 se puede observar las diferentes tipologías constructivas, de izquierda a derecha estas son: premodernismo, modernismo, posmodernismo y período contemporáneo.



Fig. 4: Diferentes tipologías constructivas.

### 3. Edificios Estudiados

Este trabajo se centra en el estudio de uno de los cuatro edificios representativos de la tipología constructiva del distrito de Eixample, analizados en el trabajo “Análisis Estructural Probabilista Orientado a Evaluación del Daño Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada: Aplicación a Edificios Aislados y Agregados del Distrito del Ensanche de Barcelona”, realizado por los Dres. *Jorge Arturo Ávila Haro*, *José Ramón González-Drigo* *Lluís Gonzaga Pujades Beneit* y *Horia Alejandro Barbat Barbat*.

Estos edificios han sido modelados en 3D y analizados mediante el programa de cálculo TreMuri (Lagomarsino et al., 2013) por el *Dr. José Ramón González-Drigo* y el *Dr. Jorge Arturo Ávila Haro* y su estudio fue llevado a cabo por ambos autores gracias a la recopilación de información proveniente del Archivo Histórico del Colegio de Arquitectos de Cataluña, visitas insitu y normativas de la época.

#### 3.1. Características Generales y Solicitación

El sistema estructural resistente de los edificios estudiados (edificados entre 1890 y 1940) consiste en mampostería no reforzada con forjados unidireccionales construidos con vigas metálicas. Este sistema no es homogéneo, y difiere de las diferentes plantas del edificio (Gonzalez-Drigo et al., 2015):

- **Planta baja:** espacio diáfano logrado mediante muros de carga con espesores entre 45 cm y 60 cm, vigas de acero y columnas de mampostería o hierro, según la época constructiva (ver sección 2.3.5).
- **Niveles superiores:** las cargas están soportadas por muros de carga de espesores menores a 30 cm.

Considerando el período de interés (1890-1940), se estima tanto cargas permanentes como variables (Gonzalez-Drigo et al., 2015). La carga permanente está compuesta por el peso del sistema de suelo ( $200 \text{ kg/m}^2$ ), el peso de las paredes de partición ( $100 \text{ kg/m}^2$ ) y el peso del pavimento ( $50 \text{ kg/m}^2$ ), sumando un total de  $350 \text{ kg/m}^2$  por cada planta. En cuanto a las cargas variables, se ha determinado  $100 \text{ kg/m}^2$  para el último nivel y  $200 \text{ kg/m}^2$  para los niveles inferiores.

Cabe destacar que además de los elementos mencionados a continuación, y dadas las características constructivas de los edificios en cuestión, se utilizaban otros elementos estructurales para salvar grandes distancias, como por ejemplo: perfiles laminados, pilares de fundición, jácenas y celosías.

#### 3.2. Cimientos

Al principio los cimientos eran fabricados únicamente de ladrillos. Mas adelante, se empezó a incorporar mortero de cal y hormigón. Hay diferentes tipos de cimientos, y dependen de tres factores (tipo de elemento, ubicación y función). Para pilares de fundición, se fabricaban cimentaciones aisladas (en forma cúbica) que servían de apoyo para el

elemento estructural. Sin embargo, para muros, podemos encontrar principalmente tres tipos (Paricio Casademunt, 2008):

- Para **paredes medianeras**: se realizaba de forma conjunta con las paredes, teniendo espesores de 30 cm en planta baja y de hasta 60 cm en sótanos.
- Para **fachadas**: si no era posible extender muros rectos hasta el terreno firme, se construía una pequeña cimentación o escalonado exterior.
- Para **paredes internas**: la cimentación era continua con espesores que variaban entre los 40 cm y 60 cm.

Además de las tipologías mencionadas en la lista anterior, también se construían cimientos para la contención del terreno, mediante muros escalonados.

### 3.3. Paredes y Aberturas

Según la ubicación e importancia estructural, se puede encontrar diversos valores para el espesor de las paredes, que son característicos de cada tipo de muro (Paricio, 2001). Hay tres tipos principales:

- **Fachadas**: pueden ser frontales o traseras y su espesor es superior al resto de muros de la construcción, entre 45 cm y 60 cm para la planta baja y 30 cm para los niveles superiores. Además, presentan aberturas mayores que cualquier otro tipo de muro.
- **Paredes internas**: pueden ser de dos tipos; de carga, con espesores entre 10 cm y 15 cm, y paredes divisorias, con espesores inferiores a 10 cm. Las aberturas de estas paredes son posibles gracias al uso de dinteles.
- **Paredes medianeras**: éstas paredes están normalmente compartidas entre edificios adyacentes. Su función estructural es importante (con grosores de 30 cm en planta baja y 15 cm en niveles superiores), y suelen ser más largos que los demás muros, con columnas a cada cinco o seis metros. Esto permitía a los edificios construidos posteriormente ensanchar el muro común y conseguir el efecto de agregado estructural.



Fig. 5: Fachadas típicas de los edificios estudiados (Gonzalez-Drigo et al., 2015).

Es importante destacar que la calidad del ladrillo y del mortero empleado depende de la ubicación y carga a soportar del muro en cuestión (Benavent, 1981).

En cuanto a las aberturas (ventanas y puertas), se pueden encontrar diversos tipos, y sus dimensiones dependen de la ubicación de estas en el edificio. Las mas grandes están ubicadas en la fachada principal, en la planta baja (para promover el comercio y la restauración) y en los patios de luz internos.

El uso de dinteles es bastante común para redistribuir las cargas. En las aberturas grandes, mencionadas anteriormente, se solían utilizar perfiles IPN. Dependiendo de la luz a cubrir y el espesor del muro, se podía encontrar más de un elemento de soporte, normalmente uno cada 15 cm de espesor.

### 3.4. Patios Internos y Cajón de Escaleras

Los patios internos permiten luminosidad y ventilación en las zonas centrales del edificio. Su distribución en planta depende de las diferentes configuraciones estructurales que se pueden encontrar en los edificios del distrito del Eixample (Gonzalez-Drigo et al., 2015).

En cuanto al cajón de escaleras, éstas están apoyadas sobre una caja perimetral (núcleo central) de ladrillo, y están construidas con bóvedas tabicadas de ladrillos cerámicos planos, también conocida como bóveda catalana. El grosor de los muros del núcleo central es de 30 cm en planta baja y entre 15 cm y 30 cm en las plantas superiores.

Estas piezas cerámicas planas se unen con yeso (primera capa), y las siguientes se refuerzan con mortero, aportando la resistencia necesaria.

Dependiendo del edificio, el cajón de escaleras se amplía anexando un patio de luz, y en algunos casos, este hueco contiene la estructura del ascensor. El grosor de los muros del núcleo central es de 30 cm en planta baja y entre 15 cm y 30 cm en las plantas superiores.

### 3.5. Forjados

Se puede encontrar dos tipos de forjados en los edificios estudiados:

- Forjados de **bóvedas de sótano y planta baja.**
- Forjados de **plantas superiores.**

Durante el período de construcción de estos edificios (1890-1940), los forjados unidireccionales con vigas metálicas y bóvedas cerámicas solucionaban la mayoría de sistemas de suelo. Estos elementos se apoyan sobre las vigas principales de la estructura o sobre los muros de carga de la misma, dependiendo de su ubicación.

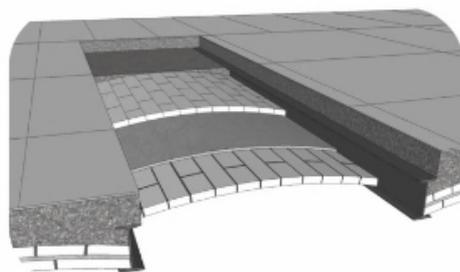


Fig. 6: Forjados presentes en los edificios de estudio.

Para el caso de estudio en concreto, los perfiles IPN están separados entre 70 cm y 80 cm y las bovedillas tienen un espesor entre 15 cm y 20 cm (Gonzalez-Drigo et al., 2015). Estas bóvedas se rellenan con una mezcla de materiales como el yeso, y sobre esa capa (nivelada), se coloca el pavimento cerámico.

### 3.6. Materiales Cerámicos y sus Propiedades

Los ladrillos utilizados en los edificios de interés fueron producidos en la época pre-industrial (ver sección 2.3.5), por lo que sus propiedades son heterogéneas, y éstas (igual que la calidad del ladrillo), van ligadas directamente al proceso de cocción y color final de la pieza (Benavent, 1981). Los colores rojizos presentan una resistencia baja (alrededor de 7 MPa) y los ladrillos con tonalidades marrones prestan una resistencia más elevada (alrededor de 15 MPa).

Debido al carácter probabilista del estudio original ((Avila-Haro et al., 2021)), una lista más completa de las propiedades mecánicas de los ladrillos que se han utilizado se puede encontrar en la Tabla 1.

El uso de cada tipo de ladrillo depende de la función del elemento a construir:

- **Muros de carga:** ladrillos ordinarios ( $29 \times 14 \times 5,5$  cm).
- **Paredes divisorias:** ladrillos de  $29 \times 14 \times 4,5$  cm.
- **Bovedillas:** ladrillos de  $29 \times 14 \times 3$  cm y/o ladrillos de  $29 \times 14 \times 2$  cm.

No obstante, una característica que comparten todos estos tipos de ladrillos, es que son macizos y con buena adherencia, indicador la época de fabricación.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los ladrillos, adaptado de [Ávila Haro \(2021\)](#).

Parámetro	Límite Inferior	Valor Medio	Límite Superior	Unidades
Peso específico, $\gamma$	n/a	18	n/a	$\text{kN}/\text{m}^3$
Esfuerzo a compresión, $f_m$	215	300	385	$\text{N}/\text{cm}^2$
Modulo Elástico, $E$	107.500	150.000	192.500	$\text{N}/\text{cm}^2$
Modulo Cortante, $G$	35.833	50.000	64.167	$\text{N}/\text{cm}^2$
Esfuerzo Cortante, $\tau$	6,45	9,00	11,55	$\text{N}/\text{cm}^2$

En cuanto al mortero empleado, también depende del elemento estructural a construir. En estos edificios es común encontrar tres tipos; morteros bastardos, mortero romano (natural) o mortero de cemento Portland.

### 3.7. Edificio de Interés

El edificio de interés para este trabajo es uno de los estudiados por los autores mencionados al principio de este capítulo, se trata de un edificio de tipo central ubicado en una zona céntrica del distrito del Eixample de Barcelona (ED01). Una lista completa de los edificios estudiados, junto con las propiedades generales y vistas varias de los edificios aislados (a excepción del ED01, que será detallado más adelante) se puede encontrar en el Anexo A.

A continuación, se presentarán datos generales sobre el edificio de interés, así como una recopilación detallada de vistas en tres dimensiones.

Tabla 2: Datos generales ED01 (Ávila Haro, 2021).

Parámetro	Valor	Unidades
Número de Plantas	7	n/a
Altura Total	24,50	m
Altura Planta Baja	4,00	m
Altura Plantas Intermedias	3,20	m
Altura Última Planta	3,10	m
Espesor de Forjados	0,20	m
Ancho en Planta	16	m
Profundidad en Planta	27,85	m
Espesor Fachada Frontal (P.B)	0,45	m
Espesor Fachada Frontal (niveles superiores)	0,30	m

En las siguientes figuras se puede ver de forma detallada varias características del edificio de interés para este trabajo. Como por ejemplo, las aberturas y diferentes detalles de la fachada principal (Fig. 7), el cajón de escaleras y el sótano (Fig. 8), las distribuciones en planta de la planta baja y de los niveles superiores (Fig. 10 y Fig. 9, respectivamente) y la dirección de los forjados en los niveles superiores (Fig. 11). Adicionalmente, se incluye una vista (Fig. 12) que permite la identificación de las dos direcciones (X+, Y+) que se utilizaron para analizar la estructura. Se destaca que este trabajo solo analiza los resultados obtenidos en la dirección paralela a la fachada frontal,  $X+$ .

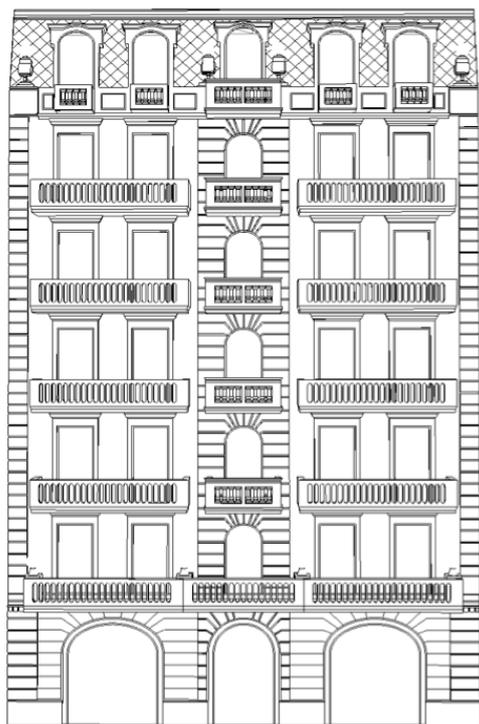


Fig. 7: Fachada frontal.



Fig. 8: Sección perpendicular a la fachada.

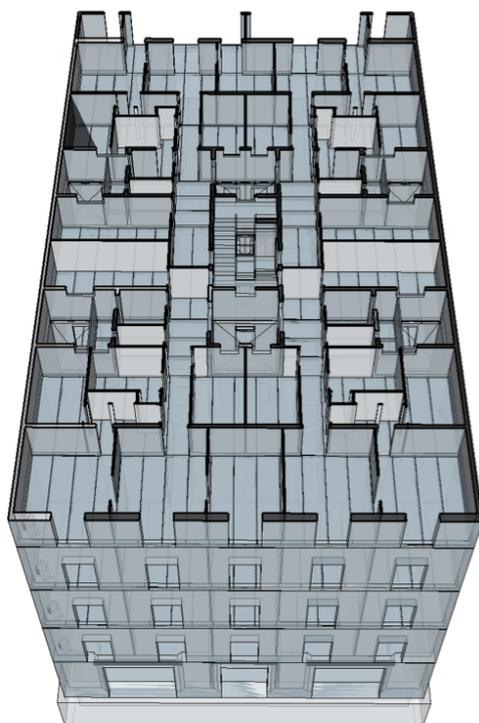


Fig. 9: Planta tipo.

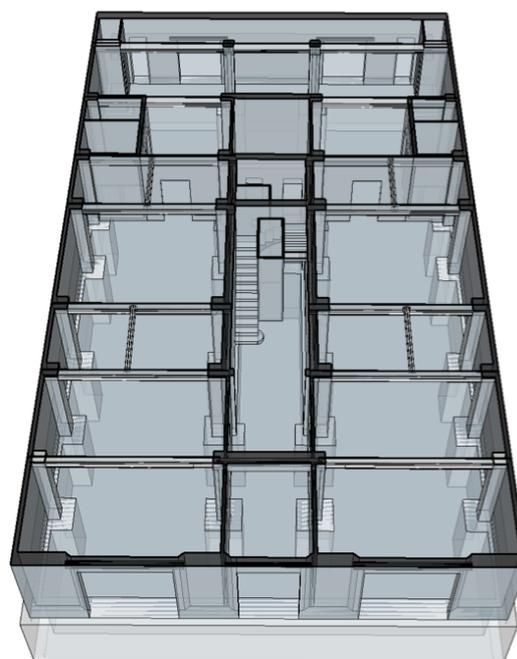


Fig. 10: Planta baja.



Fig. 11: Dirección de los forjados en plantas tipo.

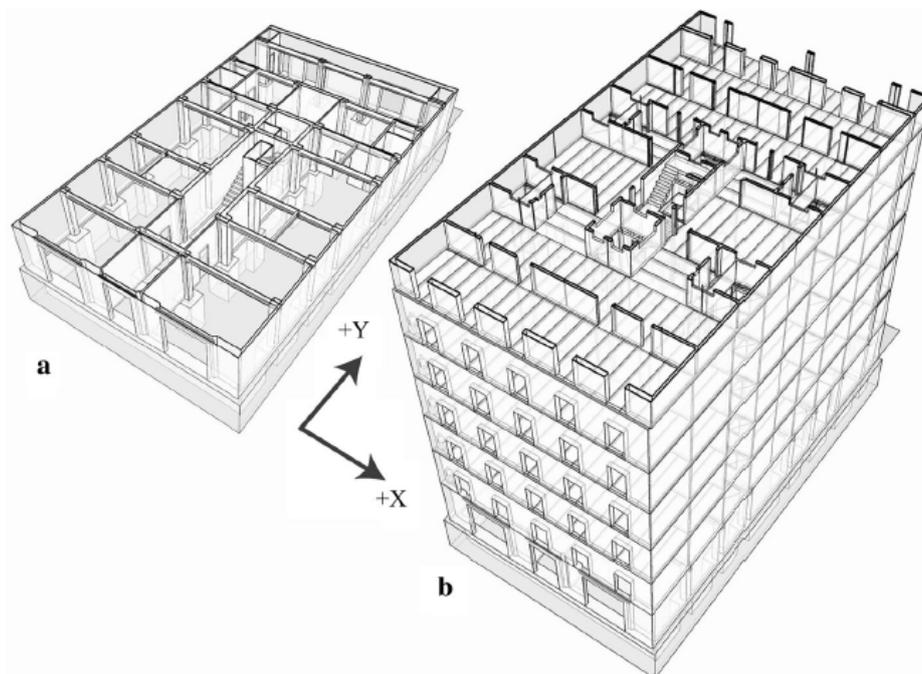


Fig. 12: Direcciones de análisis del edificio de interés. a) planta baja. b) vista general.

## 4. Historia del Arte

### 4.1. Enfoque Probabilista de los Edificios

Para la evaluación sísmica de cualquier estructura, se deben tener en cuenta los efectos de las fuentes (epistémicas) de incertidumbre. Durante el período de construcción de los edificios en estudio (1890-1940), la manufactura de los materiales de construcción era pre industrial. Estos elementos y las herramientas básicas que se utilizaban para colocarlos (de forma manual) afectan directamente a la variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales, y por lo tanto a su calidad (Paricio, 2001). Es por ello que es necesario realizar un tratamiento estadístico de las propiedades mecánicas de interés.

#### 4.1.1. Variables Aleatorias de Interés

Las variables aleatorias de interés (V.A.I) elegidas para el estudio de la mampostería no reforzada de este trabajo son la resistencia a la compresión ( $f_m$ ), el módulo de Young (E), módulo cortante (G) y la resistencia al esfuerzo cortante ( $\tau_0$ ). En el artículo elaborado por Avila-Haro et al. (2021) se ha determinado (según criterios y opiniones de expertos, entre otros) una serie de valores adecuados para estas propiedades mecánicas. Tanto el módulo de Young, como el módulo cortante y la resistencia al esfuerzo cortante se han determinado a partir del valor de la resistencia a la compresión (para el rango de valores ver Tabla 3).

$$E = 500 \cdot f_m \quad (1)$$

$$G = \frac{500}{3} \cdot f_m = \frac{E}{3} \quad (2)$$

$$\tau_0 = 0,03 \cdot f_m \quad (3)$$

Es importante destacar que además de determinar el valor medio de  $f_m$ , se ha seleccionado un intervalo de confianza de 90 % (nivel significativo  $\alpha$  del 10 %) que representa a los valores superiores e inferiores ( $\text{Lim}_{sup}$  y  $\text{Lim}_{inf}$ ) establecidos para este parámetro. A partir de este nivel de confianza, su probabilidad y Z-score correspondiente, se construye la curva de distribución normal (Fig. 13) usando la ecuación 4 (Avila-Haro et al., 2021). Para una discusión más detallada sobre los intervalos de confianza, ver sección 5.2.

$$\frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \mu_0 = \frac{(\mu - \text{Lim}_{inf})}{Z_{\alpha/2}} = \frac{(\text{Lim}_{sup} - \mu)}{Z_{\alpha/2}} \quad (4)$$

Donde  $\sigma$  y  $\mu_0$  son la desviación estándar y la media de la población, respectivamente. Para más detalles sobre el intervalo de confianza y el cálculo de sus parámetros, consultar el capítulo 5.

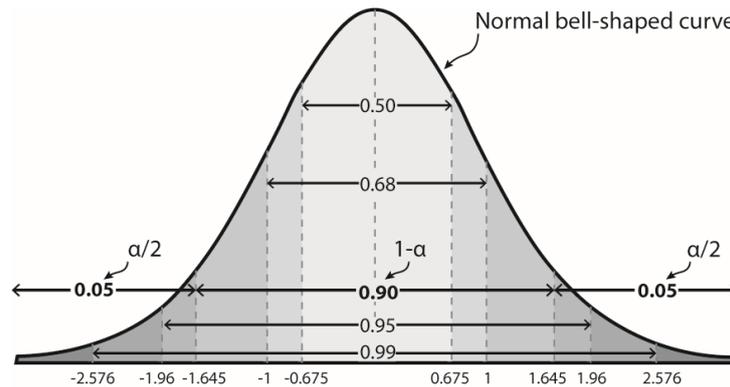


Fig. 13: Curva de distribución normal.

En cuanto al tratamiento estadístico de estas variables de interés, se asume una hipótesis de correlación lineal positiva entre la resistencia a la compresión y los otros tres parámetros:  $E = E(f_m, \varepsilon)$ ,  $G = G(f_m, \varepsilon)$ ,  $\tau_0 = \tau_0(f_m, \varepsilon)$ . Donde  $\varepsilon$  es una variable, normalmente distribuida con una media de cero y una varianza igual a uno (normalizada), que se introduce para tener en cuenta la incertidumbre en las ecuaciones 1, 2 y 3. Además, se añade un parámetro, con intención de ajustar las correlaciones entre variables. Variando dicho parámetro, se puede generar varias muestras del módulo de Young, módulo cortante y la resistencia al cortante en función de la resistencia a la compresión (Avila-Haro et al., 2021). Estas expresiones ajustadas son las siguientes:

$$E = 500 \cdot f_m + a \cdot \varepsilon \tag{5}$$

$$G = \frac{E}{3} + b \cdot \varepsilon \tag{6}$$

$$\tau_0 = 0,03 \cdot f_m + c \cdot \varepsilon \tag{7}$$

Donde a, b y c son parámetros utilizados para ajustar las correlaciones entre E y  $f_m$ ; G y E;  $\tau$  y  $f_m$ , respectivamente.

El objetivo de hacer un tratamiento estadístico es generar una población de 1.000 muestras generadas de forma aleatoria con una distribución normal para cada variable de interés, creando 1.000 conjuntos aleatorios de propiedades mecánicas. En la siguiente tabla se puede observar las medias y desviaciones estándar de los valores iniciales y los obtenidos tras el tratamiento estadístico.

Tabla 3: Media y desviación estándar de las variables de interés, en MPa (Avila-Haro et al., 2021).

Variables de interés	Valores objetivo		Valores generados	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
$f_m$	3,00	0,515	2,982	0,492
E	1.500	257,58	1.484,71	267,81
G	500	85,86	500,18	101,44
$\tau_0$	0,09	0,016	0,0897	0,016

A continuación se presenta una matriz de las propiedades mecánicas, donde se puede observar el histograma, función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulada para cada una de las variables de interés. Además, también se incluye la regresión lineal y su coeficiente de correlación para cada combinatoria de variables (Avila-Haro et al., 2021).

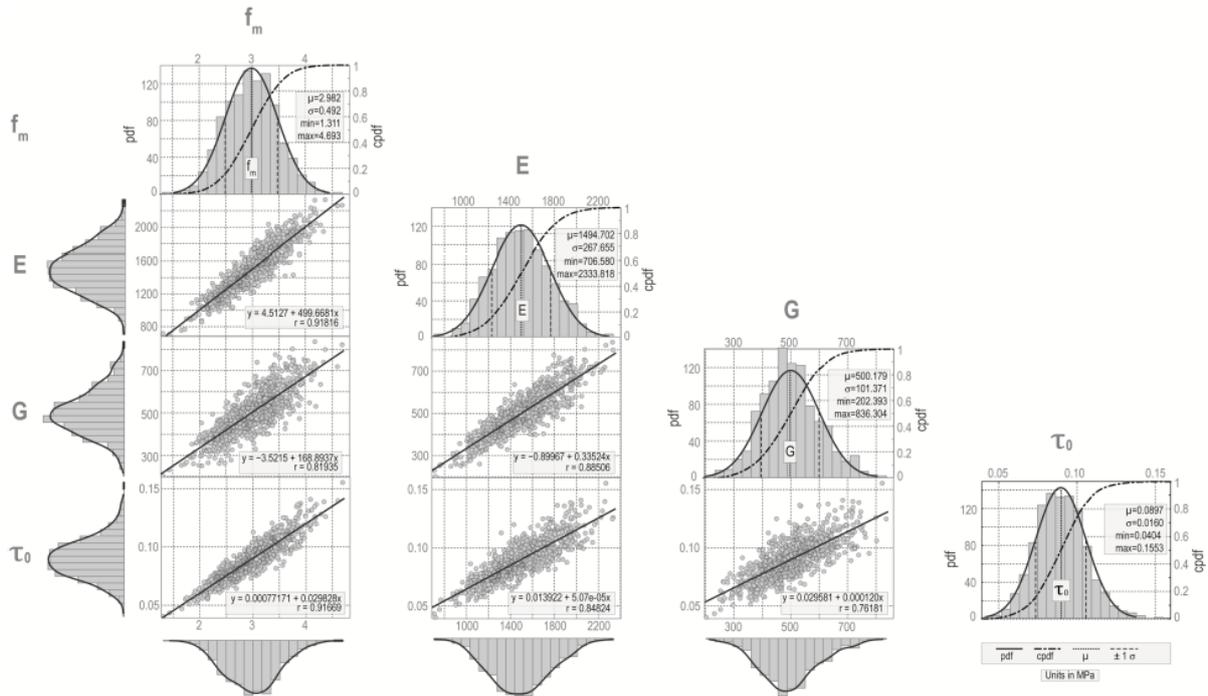


Fig. 14: Matriz de propiedades mecánicas.

## 4.2. Análisis

Esta sección revisa de forma resumida los como se ha realizado el análisis del edificio de interés (sobre la dirección  $X+$ , ver Fig.12), desde una breve explicación sobre el análisis modal, hasta los pasos de un análisis estático no lineal (incluyendo la evaluación sísmica de la zona de interés). Finalmente, expone las diferentes metodologías de análisis estático no lineal que se pueden encontrar en la literatura.

### 4.2.1. Análisis Modal

Las estructuras se encuentran solicitadas bajo distintas fuerzas dinámicas que producen vibraciones, dichas vibraciones se asocian al fenómeno de la resonancia que ocurre cuando las fuerzas dinámicas de un determinado proceso excitan las frecuencias naturales (modos de vibración). Resulta sencillo explicar el comportamiento de un edificio cuando se separa su respuesta en la resultante de un conjunto de sistemas de un grado de libertad (1GDL), cuyas resonancias pueden ser identificadas y evaluadas individualmente mediante el análisis modal. Entonces, las propiedades dinámicas de la estructura quedan descritas por los parámetros modales: frecuencia, forma y amortiguamiento modal.

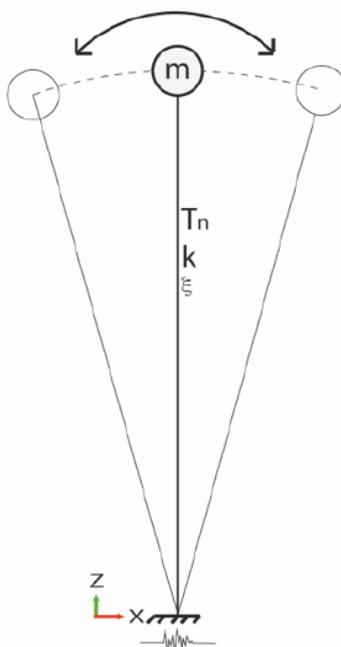


Fig. 15: Sistema de un grado de libertad.

De acuerdo con varios estudios (como Barbat (1982) o Barbat et al. (1994), entre otros) los grados de libertad de una estructura se puede agrupar en tres modos por nivel; dos desplazamientos horizontales y una rotación alrededor de la componente vertical, formando un total de 21 modos fundamentales de vibración (para un edificio de siete plantas). Para comprobar que el número de modos calculados es el adecuado, se tiene que verificar que la suma de masas correspondientes a los modos fundamentales (aquellos que activan entre el 1 % y 3 % de la masa) desplazan entre el 80 % y 90 % de la masa total del edificio en las direcciones de análisis (Fig. 12).

Los análisis modales se han llevado a cabo con el programa TreMuri (Lagomarsino et al., 2006) y los resultados obtenidos son:

- Período natural,  $T$ .
- Frecuencia natural,  $f$ .
- Frecuencia circular,  $\omega$ .
- Masa activada en cada dirección,  $M$ .
- Factor de importancia en cada dirección,  $IF$ .
- Cocientes relativo ( $RAM$ ) y absoluto ( $AAM$ ) de masas activadas en cada dirección.

#### 4.2.2. Análisis Estático No Lineal

Para diseñar y evaluar estructuras resistentes a efectos sísmicos, es imprescindible estimar adecuadamente la demanda estructural (resistencia, rigidez y ductilidad, entre otros) tomando en cuenta la incertidumbre de los datos de entrada. También es importante que los procedimientos utilizados sean suficientemente sencillos y simples. Hace unas décadas, los métodos utilizados para estos análisis suponían comportamientos estructurales elásticos lineales, que eran incapaces de caracterizar la demanda de las propiedades mecánicas de la estructura. Por otro lado, también existen los análisis dinámicos incrementales, los cuales requieren datos adicionales y son poco prácticos para el diseño y análisis cotidiano, no siendo sus resultados los más confiables debido a la incertidumbre asociada a los datos de entrada (Ávila Haro, 2021).

A raíz de las limitaciones de utilizar estos métodos, se han desarrollado varios procedimientos estáticos no lineales (Nonlinear Static Procedures, NSP). Éstos comparten las mismas bases y objetivos, sin embargo la metodología empleada por cada uno es característica. Existen cuatro etapas principales que son comunes para la mayoría de NSP:

- **Etapla 1:** realizar el análisis de capacidad (también conocido como *pushover*).
- **Etapla 2:** evaluar la demanda sísmica.
- **Etapla 3:** conversión de los resultados de la demanda y capacidad.
- **Etapla 4:** comparación de la demanda y la capacidad para obtener el punto de desempeño.

A continuación se explicará de forma general en que consiste cada etapa de forma general para mas adelante aplicar estos pasos al método desarrollado por el profesor P. Fajfar, conocido como N2 (ver sección 4.2.3).

### 4.2.2.1 Etapa 1: Curva de Capacidad y Selección del Punto Último

#### Curva de Capacidad

Las curvas de capacidad son el resultado del análisis estático no lineal y cuantifican la fluencia secuencial a la que están sometidos los diferentes componentes de la estructura, bajo un patrón de carga creciente de forma regular que está predefinido.

La respuesta de cada incremento de carga se calcula y se grafica en función del cortante basal ( $V_{base}$ ) y un parámetro de deformación, en este caso el desplazamiento del techo ( $\Delta_{techo}$ ), esto se puede observar en la siguiente figura (Ávila Haro, 2021).

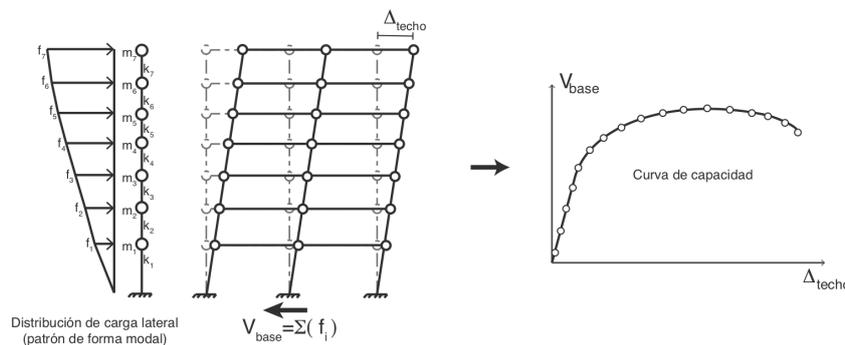


Fig. 16: Obtención de la curva de capacidad de una estructura sometida a una carga lateral.

Existen diferentes patrones de carga, como se puede observar a continuación:

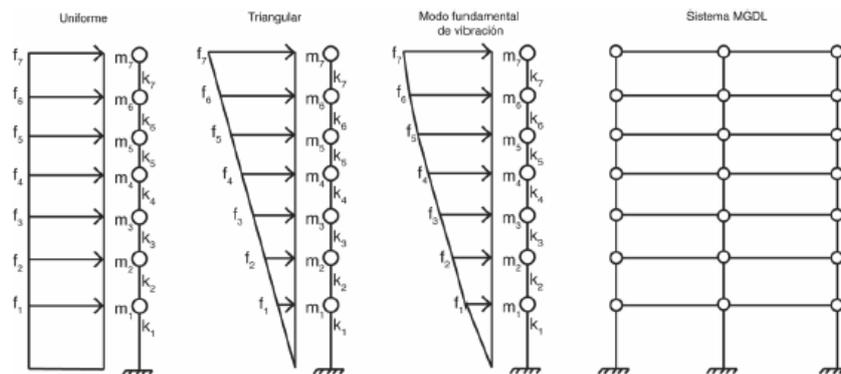


Fig. 17: Patrones de carga lateral aplicados a sistemas de MGD.

Cabe destacar que para el análisis (en ambas direcciones de las componentes principales X e Y) del edificio de interés se ha utilizado un patrón de carga lateral invariante cuya forma modal se relaciona con el primer modo de vibración fundamental del edificio, ya que es el que activa la mayor cantidad de masa en ambas direcciones.

#### Criterio de Selección del Punto Último

Esta decisión se trata de una de las mayores dificultades del análisis estructural. Se considera punto último aquel que a partir de éste, el sistema estructural ha agotado su

capacidad resistente. A partir del punto último se asume la posibilidad de deformaciones posteriores sin disminuir la estabilidad, pero el sistema no puede soportar esfuerzos laterales.

Para la elección del punto último en el edificio de interés (ED01, ver sección 3.7) se han considerado dos criterios, inicialmente:

1. Decaimiento del 20 % del cortante basal ( $V_{base}$ ) máximo, según diversos códigos de construcción como por ejemplo C.S.LL.PP (2008), entre otros; y autores, como Cattari and Lagomarsino (2013). Éste es un criterio con un objetivo general, pero calibrado para la mampostería no reforzada.
2. Procedimiento del modelo paramétrico desarrollado por Pujades Beneit et al. (2015) que también ha sido calibrado para la tipología estructural en estudio.

El criterio adoptado para este trabajo consiste en la combinatoria de los dos criterios mencionados anteriormente, buscando con ello el mínimo valor (primero en ocurrir). Cabe destacar que estos criterios tienen en cuenta el comportamiento global del edificio, y no de cada elemento individual.

#### 4.2.2.2 Etapa 2: Demanda Sísmica

##### Evaluación de la Demanda Sísmica

Barcelona se encuentra ubicada en una zona sísmica de riesgo leve-moderado, con una intensidad entre VI y VII según la escala macrosísmica Europea, EMS-98 (Grünthal, 1998). Además, se considera que la vulnerabilidad de la ciudad es elevada, puesto que la mayoría de las estructuras fueron diseñadas sin considerar efectos de las acciones sísmicas.

En el marco del proyecto RISK-EU, se han llevado a cabo estudios para caracterizar los diferentes tipos de terrenos de la ciudad de Barcelona (Irizarry Padilla, 2004; Secanell et al., 2004), dando como resultado cuatro tipos de terreno (Fig. 18) y dos escenarios:

- **Determinista:** se asume que la actividad sísmica histórica provee suficiente información para evaluar el riesgo sísmico de una zona determinada. Este historial está compuesto por dos eventos: el terremoto del Pirineo Este en 1428 (profundidad focal de 10 km, distancia epicentral de 90 km e intensidad de IX en la escala MSK (Grünthal, 1998)) y el terremoto de Cardedeu en 1448 (profundidad focal de 7 km, distancia epicentral de 25 km e intensidad de VIII en la escala MSK (Secanell et al., 2004)).
- **Probabilista:** se basa en la ley de atenuación de Ambraseys (Ambraseys et al., 1996) y algunos parámetros regionales extraídos de Secanell et al. (2004), compatibles registros sísmicos con un 10 % de probabilidad de ocurrencia en 50 años.

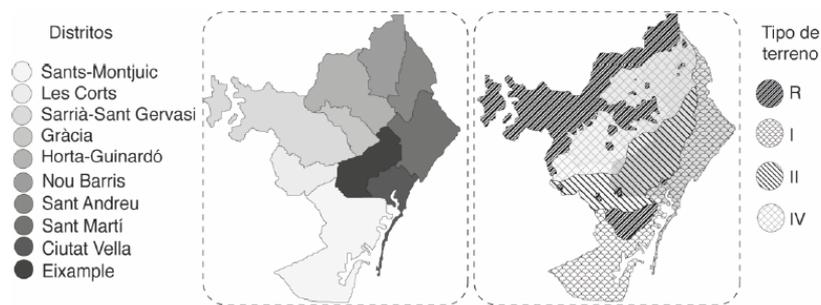


Fig. 18: Tipos de terreno de Barcelona (Secanell et al., 2004).

Adicionalmente, se realizaron estudios de microzonación de la ciudad con el objetivo de obtener los espectros de respuesta de cada escenario (Cid Ramos (1998), entre otros).

El estudio realizado por Avila-Haro et al. (2021), se centra en los espectros de respuesta obtenido de la formulación analítica desarrollada por el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) (Irizarry Padilla, 2003). Sin embargo, es necesario mencionar que para los casos donde no haya estudios específicos sobre la región de interés será necesario seguir el procedimiento descrito en el Eurocódigo 8 (Eurocode 8-3, 2005) y en la normativa del país donde se realiza el estudio; en el caso de España sería la Norma de Construcción Sismoresistente, NCSE-02.

La formulación de Irizarry Padilla (2003) se aplica a diversos espectros de respuesta amortiguados al 5% en función del tipo de terreno (según Tabla 4), representando de forma fiable la demanda sísmica para el escenario probabilista y el determinista.

Tabla 4: Tipos de terreno presentes en Barcelona (Cid Ramos, 1998).

Zona	R	I	II	III
Descripción	Afloramientos paleozoicos y terciarios	Afloramientos holocenos con presencia de materiales cuaternarios y terciarios a profundidades mayores	Afloramientos del pleistoceno sobre un sustrato terciario y basamento con materiales del Paleozoico	Composición similar a la zona II con una capa de materiales del Cuaternario por encima del basamento Paleozoico

A continuación se puede observar los espectros obtenidos para el escenario determinista y el probabilista (Fig. 19 y Fig. 20). La formulación empleada para la obtención de estos resultados se puede encontrar de forma detallada en el Anexo B.

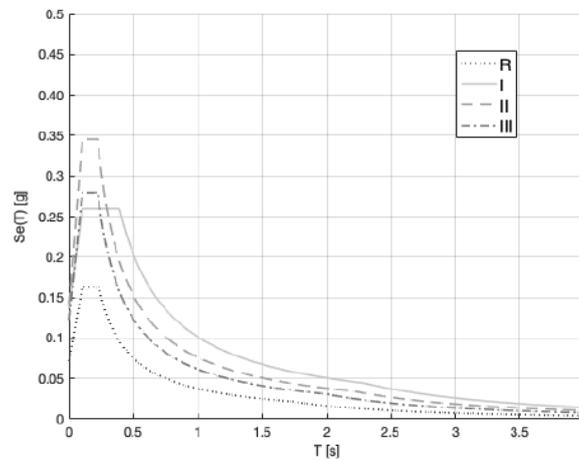


Fig. 19: Espectros de respuesta elástica deterministas según el terreno.

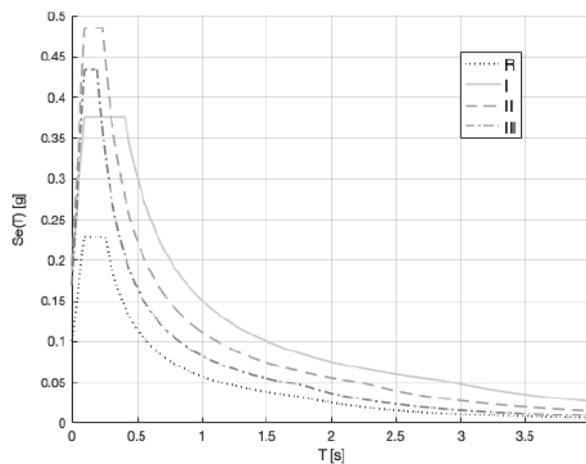


Fig. 20: Espectros de respuesta elástica probabilistas según el terreno.

La zona seleccionada por [Gonzalez-Drigo et al. \(2015, 2017\)](#); [Avila-Haro et al. \(2021\)](#), y por lo tanto de interés para este trabajo, es la zona II, donde se encuentra el distrito del Eixample de Barcelona.

### 4.2.2.3 Etapa 3: Espectros de Capacidad y de Respuesta

#### Espectro de Capacidad y Representación Bilineal

Para comparar la capacidad y demanda de un sistema estructural hay que transformar la curva de capacidad a su espectro de capacidad correspondiente. El objetivo es obtener un sistema de 1GDL equivalente a partir del análisis estático no lineal realizado sobre el sistema original de MGD. Esta conversión se hace mediante coeficientes y factores relacionados con las propiedades modales y de masa de la estructura.

La representación bilineal consiste en el ajuste de la curva de capacidad original a una aproximación lineal por partes, que facilita comparar la capacidad con la demanda. A continuación se puede observar de forma gráfica el resultado de ésta.



Fig. 21: Representación bilineal del espectro de capacidad.

#### Conversión del Espectro de Respuesta

Dependiendo del método de cálculo (ver sección 4.2.3), se utilizan espectros de respuesta elásticos o inelásticos. El método N2 utiliza espectros inelásticos para obtener el punto de desempeño (ver sección 4.2.3). La metodología para obtener dichos espectros a partir de los resultados obtenidos de la evaluación sísmica es la siguiente (Fajfar, 1999).

En primer lugar, se convierte el espectro de interés (probabilista), al formato espectral aceleración-desplazamiento (ADRS) según la siguiente expresión:

$$S_a = \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot S_d \tag{8}$$

A continuación se transforma el espectro elástico de respuesta a un espectro inelástico de formato espectral aceleración-desplazamiento (ecuaciones 9 y 10):

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \tag{9}$$

$$R_\mu = \begin{cases} (\mu - 1) \cdot \frac{T^*}{T_C} + 1 & T^* < T_C \\ \mu & T^* \geq T_C \end{cases} \tag{10}$$

Donde  $S_a$  y  $S_{ae}$  son la aceleración espectral y aceleración espectral elástica ( $g$ ),  $S_d$  es el desplazamiento espectral (cm),  $\mu$  es la ductilidad,  $R_\mu$  es el factor de reducción,  $T$  el período de vibración de la estructura,  $T^*$  el período de vibración de la estructura simplificada de 1GDL y  $T_C$  es el período que marca el fin del tramo de aceleración constante del espectro elástico. El resultado de las transformaciones descritas anteriormente se puede observar en la figura siguiente.

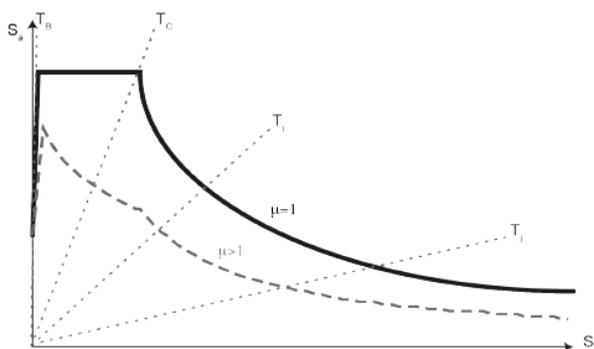


Fig. 22: Espectro de demanda inelástico en formato aceleración-desplazamiento.

#### 4.2.2.4 Etapa 4: Punto de Desempeño

##### Determinación del Punto de Desempeño

El punto de desempeño es el resultado de comparar la representación bilineal del análisis de capacidad con el espectro de demanda, ambos con formato aceleración-desplazamiento. Dependiendo del método de análisis estático no lineal usado, hay dos formas de obtener dicho punto; metodologías iterativas y metodologías que se basan en formulaciones (ver apartado).

Hay que destacar que el punto de desempeño obtenido para un sistema de 1GDL hay que convertirlo a su equivalente para el sistema de MGD, usando de forma inversa los factores de conversión empleados en el análisis modal.

La importancia de este punto viene dada por su utilidad como parámetro de intensidad en las curvas de fragilidad, para determinar la probabilidad de ocurrencia de los daños que puede sufrir una estructura debido a un evento sísmico.

#### 4.2.2.5 Conclusión del Proceso

Una vez se ha caracterizado la resistencia de la estructura y la acción sísmica del terreno, además de las conversiones a un sistema común de parámetros, se determina el punto de desempeño del sistema, que permitirá derivar el índice y las curvas de estados de daño. Estos resultados son importantes ya que conociendo el comportamiento de la estructura, se puede emplear una demanda sísmica mayor o menor, para así determinar si los daños causados al edificio serían mayores o menores.

Estos estudios además de ser de vital importancia para los cuerpos de protección civil también lo son para el sector privado (empresas aseguradoras, por ejemplo) ya que crean un marco analítico que permite la definición de varios escenarios sísmicos ergo, pueden definir protocolos de intervención y los costes asociados a ellos.

#### 4.2.3. Métodos de Análisis Estático No Lineal

A continuación se presentan algunos de los métodos estáticos no lineales más relevantes e útiles para la línea de investigación que este trabajo toma como referencia. Es importante destacar que existen otros métodos, como por ejemplo el *Método del Desplazamiento de Coeficiente* (DCM) (Najam, 2018).

#### Método del Espectro de Capacidad (MEC)

El método contenido dentro de la normativa americana “Evaluación Sísmica y Restauración de Edificios de Concreto” (ATC-40, 1996) fue desarrollado en los años sesenta por el profesor John A. Blume. Consiste en el uso de la técnica de la energía de reserva (comparación entre la energía elástica con la inelástica en la estimación del desplazamiento inelástico). Durante la década siguiente, se propone una aproximación más intuitiva de la mano del profesor Sigmund A. Freeman. Esta propuesta consiste en comparar gráficamente la demanda y la capacidad (espectro elástico), permitiendo una evaluación visual. Para poder llevar a cabo esta modificación, se convierte la curva obtenida tras el análisis estático no lineal (fuerza/desplazamiento) en una curva de aceleración/desplazamiento espectral (ATC-40, 1996).

Este método sigue siendo ampliamente usado en la evaluación de varias estructuras y sirve como base para otros métodos. Sin embargo, varios expertos se posicionan en contra de este procedimiento ya que argumentan que es muy conservador, destacando que los espectros elásticos usados son altamente amortiguados para la demanda sísmica. Es por ello que el método usado por el ATC-40 ha servido como base fundamental para modificaciones de mejora e incluso otros métodos.

## N2

Método desarrollado por Fajfar and Fischinger (1988), que se ha ido actualizando a lo largo de los años (Kreslin and Fajfar, 2012) y fue el método adoptado por el Eurocódigo 8, en su versión original. Consiste en combinar el análisis estático no lineal de un sistema de múltiples grados de libertad (MGDL) con el análisis del espectro de respuesta equivalente

de un grado de libertad (1GDL).

La mayor diferencia que presenta respecto al ATC-40, es el uso de un espectro de respuesta de demanda inelástico determinado indirectamente con un espectro de respuesta de demanda elástico por medio de factores de reducción. La representación bilineal del espectro de capacidad del sistema equivalente de un grado de libertad tiene en cuenta el desplazamiento/aceleración espectrales correspondientes al cortante basal máximo como el punto último de capacidad de la estructura. Este método no considera la posibilidad de endurecimiento/ablandamiento en el tramo inelástico, y como se trata de una variante del MEC, comparte algunas características.

La aplicación de este método se puede encontrar en el Anexo C.

### **Eurocódigo 8 (EC8)**

Consiste en una modificación del método N2. Ésta está relacionada con la representación elasto-plástico bilineal de la capacidad. La obtención del punto último y el ablandamiento/endurecimiento en el tramo inelástico son similares al método N2. En cuanto a la obtención de la demanda, se emplea un espectro de respuesta inelástico ([Eurocode 8-3, 2005](#)).

### **NTC-08**

La demanda se calcula mediante un espectro de respuesta inelástico y la representación bilineal considera el desplazamiento espectral relacionado a desplazamiento máximo del techo como el punto último. A diferencia del N2 y del EC8, este método considera el endurecimiento/ablandamiento del tramo inelástico ([C.S.LL.PP, 2008](#)).

### **Ajuste al 10 %**

El cálculo de la pendiente del tramo elástico para la representación bilineal difiere a los otros métodos: consiste en ajustar linealmente por tramos la curva de capacidad, con el objetivo de reducir el error inducido en los análisis estáticos no lineales.

La intersección entre la curva de capacidad original y el segmento elástico ajustado ocurre en un punto donde se alcanza el 10 % del cortante basal máximo, con el fin de capturar la rigidez inicial de una forma mejor. Seguidamente, el método determina un segmento plástico en función del esfuerzo máximo, ignorando el equilibrio de energías. Tanto este procedimiento como el ablandamiento/endurecimiento del tramo inelástico son las mismas que usan el N2 y EC8. En cuanto a la demanda, se utiliza un espectro de respuesta inelástico ([De Luca et al., 2013](#)).

### 4.3. Estados de Daño

Los estados de daño (Damage State, DS) clasifican el grado de degradación que un edificio presenta ante una acción sísmica. Éstos están directamente ligados con la respuesta de los elementos estructurales. Usando e interpretando de forma adecuada estos indicadores, es posible determinar el nivel de desempeño de una estructura, ayudando y facilitando la toma de decisiones respecto a aspectos de seguridad.

La definición de los DS varía según diversos estudios y el criterio de varios autores. Estas definiciones se pueden agrupar principalmente en dos grupos (Avila-Haro et al., 2021):

1. Criterios basados en cuantificar la deformación, que determina los DS en el punto de fluencia y en el punto último, obtenidos de la representación bilineal de la curva de capacidad.
2. Criterios que se basan en los límites de torsión de entrepiso. Este criterio está bien estudiado para varias tipologías constructivas, sin embargo, todavía hace falta más estudios respecto la mampostería no reforzada.

El estado de daño de un edificio es un fenómeno continuo (infinitos estados). Con el objetivo de clasificar y simplificar dichos estados de daño, se discretizan usando rangos de valores. Para la base de este trabajo, se utilizó el criterio establecido por el RISK-UE definido por Milutinovic (2003). Los estados de daño se definen a partir del desplazamiento espectral del punto último y del punto de fluencia.

- $DS_0$ , estado de daño nulo:

$$DS_0 = 0 \quad (11)$$

- $DS_1$ , estado de daño ligero:

$$DS_1 = 0,7 \cdot Sd_y \quad (12)$$

- $DS_2$ , estado de daño moderado:

$$DS_2 = Sd_y \quad (13)$$

- $DS_3$ , estado de daño extenso:

$$DS_3 = Sd_y + 0,25 \cdot (Sd_u - Sd_y) \quad (14)$$

- $DS_4$ , colapso total:

$$DS_4 = Sd_u \quad (15)$$

Donde  $Sd_y$  y  $Sd_u$  son los desplazamientos espectrales (en centímetros) asociados al punto de fluencia y punto último, respectivamente.

Además, se define el índice de daño (Damage Index, ID), o daño medio normalizado. Éste se utiliza como indicador del daño global esperado en la estructura para el parámetro de medida de intensidad seleccionado (IM). Su principal función es permitir la evaluación

del comportamiento estructural de forma sencilla, y queda definido a partir de las probabilidades, tras el cálculo de las curvas de fragilidad:

$$ID = \frac{1}{n} D_m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^4 i \cdot P(DS_i) \quad (16)$$

donde:

- ID es el Índice de Daño.
- $D_m$  es el daño medio sin normalizar.
- $P(DS_i)$  es la probabilidad de que la estructura experimente un daño  $i$ .

El Índice de Daño es un valor que varía del 0 al 1, donde el 100 % es el daño no reparable y el 0 %, ausencia de daño.

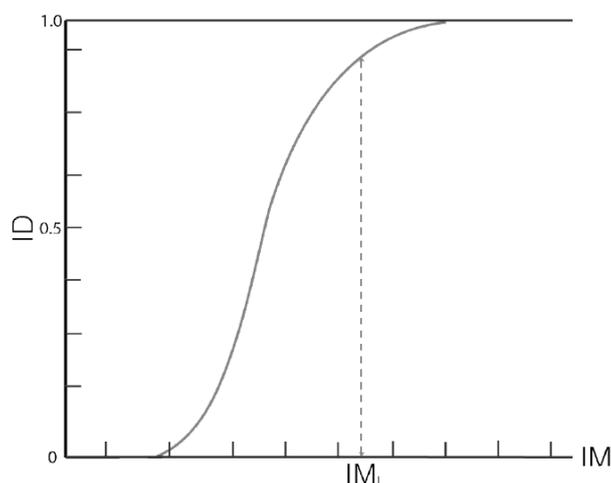


Fig. 23: Curva ID vs. IM.

#### 4.4. Fragilidad y Curvas de Fragilidad

Para considerar la complejidad de la representación del terremoto, errores, simplificaciones e incertidumbres del modelo, se usan las funciones de fragilidad. Éstas se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Curvas que se construyen de forma estadística a partir de la información disponible y específica para una tipología constructiva en concreto.
- Curvas que se construyen de forma teórica por falta de información.

Una curva de fragilidad representa la probabilidad de alcanzar (o exceder) un estado de daño, determinado en función del IM seleccionado previamente y, dependiendo del caso, el usado para calcular la respuesta del sistema. Estas curvas, además de variar según la tipología estructural, también depende de varios factores como por ejemplo la respuesta estructural, la ubicación del edificio, sus materiales y la normativa vigente en determinado

momento, entre otros.

Para estados de daño nulos, la curva es igual a uno. Para el resto de DS, siguen una distribución lognormal acumulativa, condicionadas al proceso de degradación asociado (Kennedy et al., 1980):

$$P(DS_i|IM) = \Phi \left( \frac{1}{\beta_{DS_i}} \cdot \ln \left[ \frac{IM}{\overline{IM}_{DS_i}} \right] \right) \quad (17)$$

donde:

- $P(DS_i|IM)$  es la probabilidad de que IM provoque que la estructura alcance el estado  $DS_i$ .
- $\overline{IM}_{DS_i}$  es el valor medio de la función de fragilidad.
- $\beta_{DS_i}$  es la desviación estándar de  $\ln(IM)$ .

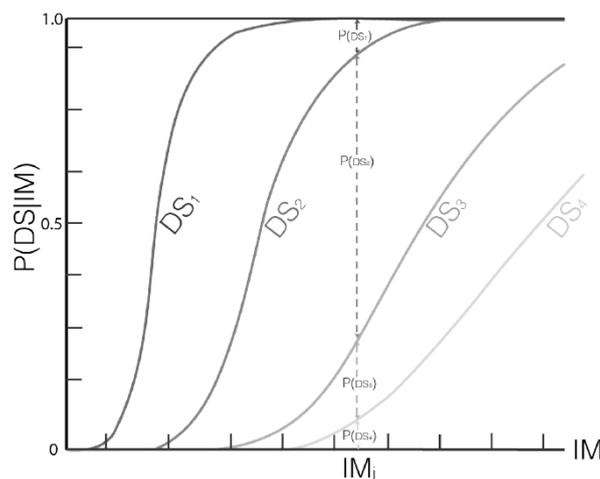


Fig. 24: Curvas de fragilidad no nulas.

#### 4.5. Software de Análisis

Como ya se ha mencionado durante este trabajo, el programa de cálculo que se ha utilizado para hacer el análisis modal y estático es el TreMuri, desarrollado por S.T.A DATA, conjuntamente con equipos de investigación de las universidades italianas de Pavía y Génova, dirigido por el profesor Lagomarsino (Lagomarsino et al., 2006, 2013).

El software realiza el modelado a través del método de macroelementos, que parte del comportamiento real de los edificios dañados por terremotos, teniendo en cuenta los principales mecanismos de fallo de la mampostería y las leyes constitutivas derivadas de experimentos. Este modelo solo contempla el comportamiento para las paredes en el plano mediante la aplicación de una ley histerética (Fig. 25) que considera una degradación de rigidez con un nivel bajo de disipación asociada a una fuerza plástica interna,  $f_y = 0,2$  y un parámetro de ablandamiento nulo,  $\beta = 0$  (Avila-Haro et al., 2021).

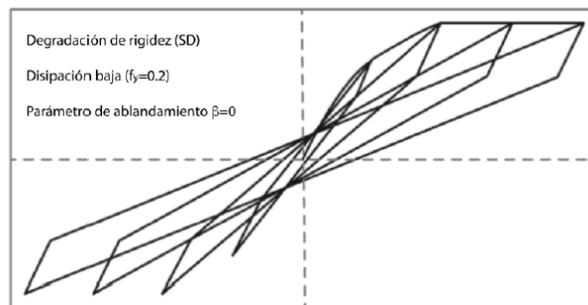


Fig. 25: Comportamiento histerético no lineal (Gambarotta and Lagomarsino, 1997).

El modelado empieza definiendo la geometría de las diferentes plantas del edificio y sus elementos (como muros, columnas y vigas, entre otros), haciendo uso de nodos y líneas que conectan éstos. A continuación se asigna el tipo de material y sus propiedades mecánicas. A continuación, se definen las aberturas (puertas y ventanas) respetando su geometría. Si estas aberturas tienen dinteles, hay que definir su longitud y su posición.

El siguiente paso del proceso sigue con la definición de los forjados, con sus propiedades materiales, geométricas y la dirección de los elementos de soporte del sistema de piso. A continuación, se definen tanto las cargas vivas como las muertas que actúan sobre la estructura.

Este proceso se repite tantas veces como niveles tenga la estructura a calcular. Una vez el modelo esté completo, es posible realizar tanto el análisis modal como el análisis estático no lineal. El programa devuelve un archivo de texto con todos los resultados correspondientes a dichos análisis.

Se puede decir a rasgos generales que el programa tiene principalmente dos entradas; por un lado el modelo del edificio y sus elementos, y por el otro las propiedades materiales de dichos elementos. Esta segunda entrada está directamente ligada con el tratamiento estadístico de las propiedades materiales que se ha descrito en el apartado 4.1.1.

Es decir, TreMuri realizará tantos análisis como unidades dentro de las distintas muestras, cumpliendo con los valores de precisión y niveles de confianza que se han elegido para ellas en este trabajo. Estos análisis se realizarán de forma automática gracias al uso de la versión de investigación del programa, que permite flujos automatizados de trabajo.

## 5. Metodología de Cálculo

El objeto del cálculo de este trabajo es comparar las curvas de fragilidad e índices de daño para diversos tamaños de muestra, partiendo de los datos correspondientes a la población inicial ( $N=1.000$ ). Algunos de los programas desarrolladas dentro del departamento de RMEE por el *Dr. Jorge Arturo Ávila Haro* han sido adaptados a fin de llevar a cabo algunos de los cálculos de este apartado, además se han elaborado una serie de programas de cálculo que permiten la estimación de distintos resultados y comparativas. Estas comparativas se realizan a fin de determinar la calidad de los resultados obtenidos al utilizar muestras aleatorias que varían en tamaño y siempre se obtienen según los resultados del análisis estático no lineal sobre la dirección  $X+$  (ver sección 3.7).

Adicionalmente, se han obtenido una serie de figuras como por ejemplo la representación bilineal o las distribuciones de estados de daño, entre otras, para reforzar la discusión de los resultados de este trabajo.

A continuación se detalla de manera breve el funcionamiento y utilidad de los distintos programas empleados en este trabajo. El contenido de dichos archivos, así como algunos detalles adicionales de su funcionamiento se encuentran en el Anexo D.

### 5.1. Muestreo

Debido al carácter probabilista de los estudios relacionados con este trabajo, las poblaciones suelen ser grandes, por lo que no es práctico estudiar todos los casos individualmente. Principalmente por el tiempo de cálculo que supondría el estudio de la muestra completa, que puede afectar a la urgencia del proyecto y a un consumo energético muy alto.

Por lo tanto, se recurre al muestreo de la población, y se utiliza esta muestra para generar conclusiones respecto a la población original con una precisión conocida. Es por ello que la muestra debe ser adecuada y suficientemente representativa puesto que los resultados del estudio están directamente ligados su diseño y calidad. Dentro del muestreo interviene el tamaño de la población, el nivel e intervalo de confianza, el tamaño de la muestra y la selección de sujetos.

Se debe considerar que al tratarse de un estudio probabilístico, hay que tener en cuenta que los resultados están directamente ligados a la naturaleza aleatoria del muestreo, es decir, la probabilidad de que dos muestras del mismo tamaño tengan el mismo resultado, es muy baja.

A continuación se presentará la metodología y su posterior aplicación dentro del código elaborado con Matlab.

### 5.1.1. Metodología

Para obtener las diferentes muestras de la población, se ha optado a utilizar la metodología empleada en [Ávila Haro \(2021\)](#) para el muestreo de las propiedades materiales (ver sección 4.1.1). A pesar de que el muestreo de las variables de interés no son especialmente relevantes para el objeto de estudio actual, puesto que se realizaron los análisis estáticos no lineales con 1.000 conjuntos de propiedades materiales sin ningún tipo de muestreo previo, es interesante utilizar los mismos métodos y criterios para que exista continuidad dentro de la misma línea de estudio.

### Tamaño de la Población (N)

Como se ha explicado anteriormente, el tamaño de la población es de 1.000 conjuntos de resultados obtenidos a partir del análisis estático no lineal del edificio.

### Intervalo y Nivel de Confianza

El intervalo de confianza (IC) representa la desviación de los resultados de la muestra. El nivel de confianza, expresado como  $1-\alpha$ , es la probabilidad de que cierto parámetro de la población se encuentre verdaderamente dentro del de dicho IC.

Los parámetros relevantes a su cálculo, son: el nivel de significación ( $\alpha$ ), probabilidad ( $p$ ) y Z-score, que se obtienen con las siguientes expresiones:

$$\alpha = 1 - IC \quad (18)$$

$$p = 1 - \frac{1}{2}\alpha \quad (19)$$

$$Z = \text{ICDF}(p) \quad (20)$$

donde ICDF es la función de distribución acumulativa inversa.

### Tamaño de la muestra (n)

Se calculó un tamaño inicial de muestra ( $n_0$ ) a partir de una distribución con sesgo equitativo (proporción de la muestra del 50%), usando la siguiente expresión:

$$n_0 = \frac{\text{prop}_m \cdot (1 - \text{prop}_m)}{(\text{err.}/Z)^2} \quad (21)$$

A continuación se aplicó un factor de corrección de población finita (FPC, relación entre el tamaño de la población y el tamaño de la muestra), puesto que algunas expresiones usadas para determinar el tamaño de muestra están basadas en el uso de una población infinita ([Ávila Haro, 2021](#)):

$$FPC = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{n_0}} = \sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \quad (22)$$

Aplicando dicho factor, se obtiene el tamaño de la muestra,  $n$ :

$$n = \frac{n_0 \cdot N}{(N - 1 + n_0)} \quad (23)$$

El último paso en la obtención del tamaño de la muestra consiste en comprobar que la relación  $n/N$  es mayor o igual a 5%. Esto se hace ya que para muestras inferiores a esta proporción, las hipótesis de obtención de la muestra a partir de población infinita y de selección con reemplazo no afectan a la investigación, por lo tanto no haría falta aplicar el FPC (Rea and Parker, 2014).

$$\frac{n}{N} \geq 0,05 \quad (24)$$

### Selección de Sujetos

Una vez determinado el tamaño de la muestra hay que seleccionar los sujetos de la población. En este caso, se ha usado el método de muestreo aleatorio simple (SRS), donde cada unidad de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionada y la muestra es completamente imparcial (Daniel, 2012).

El desarrollo del programa utilizado en el estudio original fue pensado para obtener los resultados en función del número de archivos de datos que se encuentran en el directorio de trabajo, que corresponden al tamaño de la población ( $N$ ), y no para realizar algún tipo de muestreo previo.

Para obtener los resultados deseados dada una muestra (de tamaño  $n$ ), bastaría eliminar aquellos archivos que no utilizaría Matlab para realizar los cálculos. Sin embargo, esto presenta varios problemas:

- El tratamiento estadístico se vería afectado, puesto que no sería sencillo seleccionar los archivos aleatoriamente de forma manual.
- La obtención de resultados para diferentes muestras (con tamaños distintos) no sería eficiente, ya que habría que modificar el número de archivos para cada muestra manualmente.

Esta problemática se ha solucionado gracias la creación de un código que permite la obtención de los parámetros de muestreo dado un rango de intervalos de confianza y la posterior automatización de la selección de sujetos para finalmente, utilizar una modificación del código original en la obtención de resultados. En el código, se ha separado el muestreo en tres pasos:

1. Definición del rango de intervalos de confianza (IC).
2. Cálculo del tamaño de la muestra ( $n$ ).
3. Obtención de los datos relevantes.

Estos tres pasos se han desarrollado de forma individual (en los programas `Entrada.m`, `Muestras.m` y `Muestreo.m`), para posteriormente implementar estas funciones en un único programa de Matlab, que sea capaz de obtener los datos de comparación automáticamente dados unos parámetros de entrada. Estos tres programas se pueden ver en el Anexo D.

### 5.1.2. Programa de Matlab

El tamaño de muestra depende directamente del intervalo de confianza (IC), muestra inicial y de un margen de error definido. A fin de dar continuidad a los trabajos realizados en [Avila-Haro et al. \(2021\)](#), se emplean valores de muestra inicial y margen de error idénticos, es decir, se utilizará un margen de error estándar del 5% y un tamaño inicial de muestra a partir de una distribución con sesgo equitativo (proporción de muestra del 50%).

Para obtener resultados continuos, se trabaja con un rango de valores y no con valores discretos (aunque para cierto tipo de comparaciones utilizar valores concretos agiliza el proceso). Por lo tanto, se ha desarrollado un programa (`Recopilacion_datos.m`) que cumple con este requisito. Los datos de entrada de éste son; el límite inferior, superior y la cantidad de IC que se desea obtener, es decir, un vector con diversos intervalos de confianza. Adicionalmente, también es posible definir este vector de forma manual, para casos donde sea necesario trabajar con intervalos de confianza concretos. El programa devuelve una matriz de parámetros que se utilizan para calcular el tamaño de muestra. Estos parámetros son las variables de cálculo descritas en la metodología de muestreo (ver sección 5.1.1).

A continuación, se calcula para cada intervalo de confianza definido (según el proceso descrito en la sección 5.1.1). El resultado devuelve una matriz con cada intervalo de confianza y su tamaño de muestra correspondiente, que sirven como valores de entrada para el muestreo aleatorio simple (SRS). El muestreo se realiza sobre todos los archivos de resultados del análisis estático no lineal (NSP). Finalmente, el resultado de este programa es una lista de matrices de datos (una matriz por cada muestra) que se utilizan para obtener las diferentes curvas para su posterior comparación. Este programa se puede encontrar en el en Anexo D.

## 5.2. Discusión Sobre los Intervalos de Confianza y el Muestreo

El muestreo aleatorio simple, de igual manera que el margen de error y la proporción de muestra, se ha utilizado con el objetivo de mantener una continuidad entre el muestreo de los resultados y el muestreo de las propiedades materiales, paso previo al análisis estático no lineal (ver sección 5.1.1). La aplicación de este método en el código de Matlab se ha hecho mediante la función `randsample(N,n)`. En este caso,  $N$  se corresponde con los 1.000 archivos de datos guardados en el directorio de trabajo (población) y  $n$  corresponde al tamaño de la muestra obtenido en pasos anteriores al uso de esta función.

Respecto a los intervalos de confianza utilizados, se han definido dos conjuntos de valores. El primero consiste en cinco IC seleccionados de forma manual, que permiten la comparación entre valores relevantes, considerados de control al ser aquellos que normal-

mente se utilizan en una gran cantidad de estudios según la literatura, o cuya relevancia atiende a otros aspectos que se detallan a en la Tabla 5.

Tabla 5: Tabla de intervalos de confianza específicos.

IC	n	Justificación de Uso
54 %	52	Primer IC que cumple con $n/N > 0.05$
68 %	90	Z-score igual a la unidad
90 %	213	Aceptado para la validación de resultados
95 %	278	Aceptado para la validación de resultados
99 %	399	Aceptado para la validación de resultados

Adicionalmente, también se puede ver la relación entre el tamaño de muestra y la proporción  $n/N$  para este conjunto:

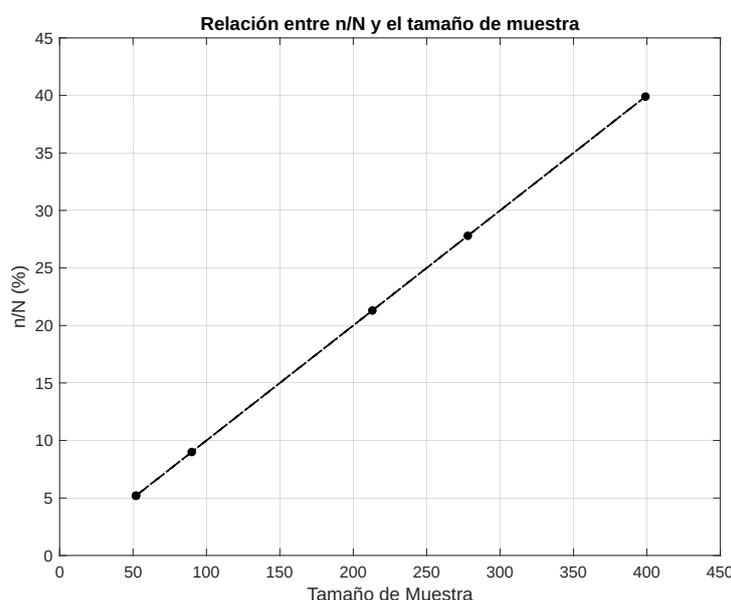


Fig. 26: Relación entre  $n/N$  y el tamaño de muestra. Conjunto de IC específicos.

Los intervalos de confianza del 54 % y del 68 % se consideran críticos por sus propiedades. A partir del primero se puede obtener el límite inferior del rango de tamaños de muestra admisible por el muestreo, mientras que el segundo tiene un Z-score igual a uno, en otras palabras, corresponde con una desviación estándar por encima de la media (Brase and Brase, 2018). Los otros tres intervalos de confianza son aceptados como aptos en la validación de resultados en estudios e investigaciones científicas.

El intervalo de confianza de 95 % es el más utilizado en los estudios y análisis de todo tipo (médicos, económicos o ingenieriles, entre otros), esto se debe a sus numerosas ventajas frente a cualquier otro intervalo (Kraaikamp and Meester, 2005). El primer argumento a su favor fue obra del estadístico británico Fisher (1956), que utilizaba dicho intervalo ya que su Z-score (1,96) es muy similar a dos veces la desviación estándar, esta justificación fue usada durante casi un siglo y gracias a ello, el IC de 95 % se considera una elección estándar. De esto se deriva la argumentación de que el uso de otros intervalos de confianza, como norma general, puede estar sesgado si no hay una justificación (Tunç et al., 2021).

Sin embargo, los intervalos de confianza de 90 % y de 99 % también son utilizados ampliamente principalmente por la necesidad de realizar un análisis con más certeza o precisión que el que se pueda obtener utilizando el intervalo estándar del 95 %. Para obtener un resultado más seguro a cambio de una pérdida de precisión, se opta por aumentar el IC, en el caso más popular, utilizando un intervalo del 99 %. En el caso opuesto, para conseguir más precisión a cambio de bajar el nivel de certeza, se opta por disminuir el IC usando un intervalo de 90 % más comúnmente (Kraaikamp and Meester, 2005). Estas modificaciones deben ser justificadas de forma detallada, pues los argumentos a favor del IC de 95 % tienen mucho peso.

El segundo conjunto consiste en un rango de valores creados a partir de un IC inicial (límite inferior), IC final (límite superior) y la cantidad de intervalos de confianza que se desea utilizar. Estos parámetros pueden encontrarse en la Tabla 6, mientras que la lista completa con sus respectivos tamaños de muestra se puede visualizar en la Tabla 7.

Tabla 6: Parámetros de cálculo para el rango de IC.

Parámetro	Valor
Límite Inferior	54 %
Límite Superior	99 %
Números de IC	25

Tabla 7: Intervalos de confianza y tamaños de muestra derivados.

IC	n	IC	n	IC	n	IC	n	IC	n
54 %	52	63 %	76	73 %	107	82 %	153	92 %	229
56 %	56	65 %	81	75 %	115	84 %	165	93 %	252
58 %	60	67 %	87	77 %	124	86 %	178	<b>95 %</b>	<b>282</b>
60 %	65	69 %	93	78 %	133	88 %	193	97 %	324
62 %	70	71 %	100	80 %	142	<b>90 %</b>	<b>210</b>	<b>99 %</b>	<b>399</b>

Adicionalmente, también se puede ver la relación entre el tamaño de muestra y la proporción  $n/N$  para este conjunto:

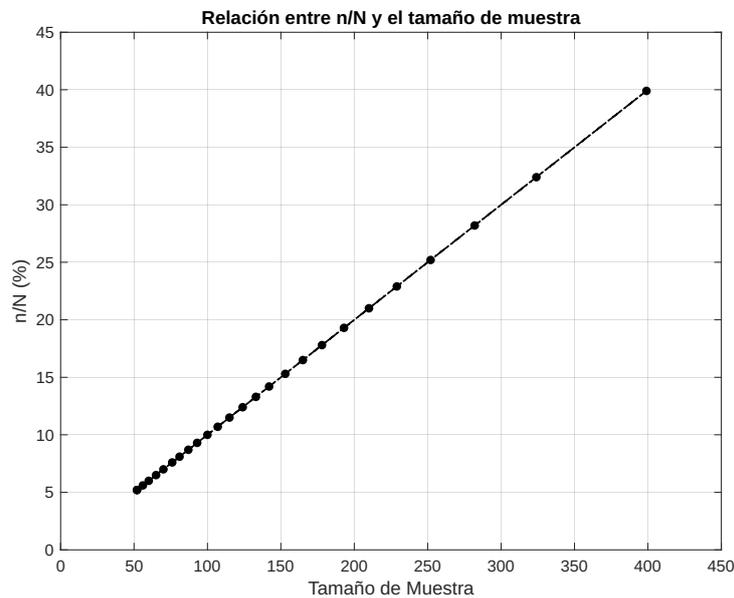


Fig. 27: Relación entre  $n/N$  y el tamaño de muestra. Rango amplio de IC.

La separación entre tamaños de muestra es más pequeña en este caso que para el primer conjunto de intervalos de confianza. Esto es interesante para realizar una comparación numérica entre los diferentes valores tamaños de muestra. También es importante destacar que se podría haber conseguido una distribución más continua aumentando el número de IC dentro del rango, sin embargo, se ha determinado que 25 valores son suficientes para determinar el comportamiento de la variación del tamaño de muestra, intervalos más grandes ralentizarían la obtención de resultados, sin aportar ningún resultado necesariamente más preciso.

### 5.3. Comparación de Curvas de Fragilidad

Para la comparación de las curvas de fragilidad se han utilizado ambos conjuntos de valores mencionados anteriormente para obtener los resultados. El conjunto de cinco valores relevantes, para realizar una comparación mayoritariamente gráfica (FullInfo-Retrieval\_mod.m y DS\_curve\_comparison.m), con una comparación numérica adicional, mientras que el conjunto de 25 intervalos de confianza, para una comparación completamente numérica (DS\_table.m).

Sin embargo, ambas comparaciones tienen unos criterios comunes:

- Todos los valores se comparan respecto a los resultados obtenidos para la población completa (referencia).
- El punto físico de la estructura definido para realizar los cálculos en [Avila-Haro et al. \(2021\)](#) es un punto céntrico en el techo del edificio, que será referido como *punto de referencia* en este trabajo.
- Para comparar las diferentes curvas con la de referencia, se han definido puntos de control, que serán diferentes según el caso de comparación.

Hay que destacar que ambas comparaciones se han hecho realizando modificaciones al código original que crea las diferentes curvas de estado de daño. Los cálculos de dicha rutina de Matlab son los especificados en la sección 4.3.

#### 5.3.1. Comparación Gráfica

El objetivo de la comparación gráfica es crear una figura que represente las diversas curvas de DS junto a sus puntos de control y lo contraste contra la curva de referencia. Estos puntos se corresponden al desplazamiento espectral  $S_d$  que asume el punto de referencia para que la probabilidad de ocurrencia del estado de daño cuatro sea del 10 %, 50 % y 90 %.

Se ha decidido usar estos valores ya que el primer y el tercer punto se encuentran suficientemente alejados de los límites del gráfico mientras que el segundo es un valor central en la distribución de probabilidad. A partir de estos valores se ha aplicado un margen del 5 % que permite determinar si los puntos de control quedan dentro o fuera de los límites establecidos (ver Tabla 8).

Tabla 8: Valores para los límites aceptados de cada punto de control.

	<b>p=10 %</b>	Lim <sub>inf</sub>	Lim <sub>sup</sub>	<b>p=50 %</b>	Lim <sub>inf</sub>	Lim <sub>sup</sub>	<b>p=90 %</b>	Lim <sub>inf</sub>	Lim <sub>sup</sub>
$S_d$ (cm)	<b>8,60</b>	8,17	9,03	<b>11,05</b>	10,50	11,60	<b>14,20</b>	13,49	14,91

Los datos de entrada de este programa son las matrices de datos obtenidos a partir del primer conjunto de muestras (cinco valores relevantes seleccionados manualmente). El código de Matlab se puede consultar en el Anexo D.

### 5.3.2. Comparación Numérica

El objetivo de la comparación numérica es crear un mapa de calor que contraste las curvas de daño dadas con la curva de referencia mediante una distribución de puntos de control. Esto se hace a modo de visualizar la tendencia del aumento o disminución del tamaño de muestra. Los puntos de control se han definido de forma parecida a la comparación gráfica: una serie de puntos que representan el desplazamiento espectral del punto de referencia para un rango de probabilidades de ocurrencia que empieza en el 5 % de probabilidad y termina en el 95 %, con una separación de cinco décimas entre valores.

Para que el mapa de calor haga una comparación coherente, se han normalizado los valores del desplazamiento espectral respecto a la curva de referencia ( $n=1.000$ ) tal que el mapa indica el porcentaje de similitud a esta. Esto se ha conseguido mediante la siguiente expresión:

$$S_d^{n,\text{norm}}(p) = 1 - \left| \frac{S_d^n(p) - S_d^{\text{ref}}(p)}{S_d^{\text{ref}}(p)} \right| \quad (25)$$

donde:

- $p$  es la probabilidad de ocurrencia del estado de daño DS.
- $n$  es el tamaño de una muestra dada.
- $S_d^{n,\text{norm}}(p)$  es el desplazamiento espectral normalizado, dada una  $p$  y una  $n$ .
- $S_d^n(p)$  es el desplazamiento espectral en  $cm$ , dada una  $p$  y una  $n$ .
- $S_d^{\text{ref}}(p)$  es el desplazamiento espectral en  $cm$  dada una  $p$ , de la curva de referencia.

De forma similar a la comparación gráfica, los datos de entrada de este programa son las matrices de datos obtenidos a partir del segundo conjunto de muestras (rango de 25 muestras). El código de Matlab se puede consultar en el Anexo D.

## 5.4. Comparación de Índices de Daño

De forma análoga a la comparación de las curvas de fragilidad, se han utilizado el conjunto de cinco intervalos de confianza (54 %, 68 %, 90 %, 95 % y 99 %) para realizar una comparación gráfica (PushoverPP\_mod.m) de los índices de daño (DI), mientras que el conjunto de 25 IC se ha usado para una comparación numérica (DI\_table.m).

También se definen unos criterios comunes similares a la comparación anterior:

- Todos los valores se comparan respecto a los resultados obtenidos para la población completa (referencia).
- El punto físico de la estructura definido para realizar los cálculos en [Avila-Haro et al. \(2021\)](#) es un punto céntrico en el techo del edificio, que será referido como *punto de referencia* en este trabajo.

Los índices de daño en ambos casos son calculados a partir de las probabilidades de ocurrencia de los distintos estados de daño, el procedimiento se puede encontrar descrito de forma detallada en la sección 4.3.

### 5.4.1. Comparación Gráfica

El objeto de esta comparación es crear una figura que enfrente los índices de daño y determinar el comportamiento de estos para las muestras derivadas de los intervalos de confianza relevantes.

Adicionalmente, se obtiene la representación bilineal del espectro de capacidad, la función de densidad de probabilidad de los estados de daño relacionados con el DI y probabilidad de ocurrencia de dichos estados, para cada muestra dada. Estos gráficos permiten reforzar la discusión de los resultados obtenidos tanto para los índices de daño como para las curvas de fragilidad.

Los datos de entrada de este programa (PushoverPP\_mod.m) son las matrices de datos obtenidos a partir del conjunto de cinco valores relevantes seleccionados manualmente. El código de Matlab se puede consultar en el Anexo D.

### 5.4.2. Comparación Numérica

Esta comparación ha surgido como fruto de determinar el comportamiento del índice de daño frente al aumento y disminución del tamaño de la población. Únicamente realizando la comparación gráfica, en este caso, no es posible obtener ningún resultado conclusivo sobre la variabilidad de las muestras, puesto que aparentemente no existe una variación muy grande respecto a la curva de referencia.

Por esta razón se ha construido un mapa de calor que facilita la visualización del comportamiento del índice de daño respecto a la curva de referencia (N=1.000). De forma análoga a la comparación de las curvas de fragilidad, se han definido una serie de puntos de control que representan el desplazamiento espectral del punto de referencia para un

rango de probabilidades de daño que empieza en el 5 % de probabilidad y termina en el 95 %, con una separación de cinco décimas entre valores.

A continuación se han normalizado estos valores para que el mapa indique el porcentaje de similitud a la curva de referencia. Esto se ha conseguido mediante la siguiente expresión:

$$S_d^{n,\text{norm}}(p) = 1 - \left| \frac{S_d^n(p) - S_d^{\text{ref}}(p)}{S_d^{\text{ref}}(p)} \right| \quad (26)$$

donde:

- $p$  es la probabilidad de daño.
- $n$  es el tamaño de una muestra dada.
- $S_d^{n,\text{norm}}(p)$  es el desplazamiento espectral normalizado, dada una  $p$  y una  $n$ .
- $S_d^n(p)$  es el desplazamiento espectral en  $cm$ , dada una  $p$  y una  $n$ .
- $S_d^{\text{ref}}(p)$  es el desplazamiento espectral en  $cm$  dada una  $p$ , de la curva de referencia.

Los datos de entrada de este programa (DI\_table.m) son las matrices de datos obtenidos a partir del rango de 25 muestras. El código de Matlab se puede consultar en el Anexo D.

## 6. Presentación y Discusión de Resultados

En esta sección se presentará una discusión sobre los diversos resultados obtenidos a de los programas de Matlab expuestos durante el capítulo 5. Estos resultados se han obtenido tras comparar los diferente parámetros obtenidos tras el análisis estático no lineal sobre la dirección X+ del edificio de interés (ver sección 3.7).

### 6.1. Comparación de Curvas de Fragilidad

Una gráfica de curvas de fragilidad está compuesta por cuatro estados no nulos de daño (ver sección 4.3). El estado de daño más crítico es el correspondiente al colapso total de la estructura (DS4), sin embargo, para realizar una comparación más representativa, también es necesario realizar las debidas comprobaciones con los estados de daño restantes (DS1, DS2 y DS3) para comprobar en efecto, todos los estados de daño se comportan de la misma manera.

#### 6.1.1. Comparación Gráfica

La curva de estado de daño es la función de distribución acumulada (CDF) para una distribución log normal de la probabilidad de ocurrencia de dicho estado, dado un desplazamiento espectral del punto de referencia. Estas curvas corresponden con cada una de las cinco muestras y la curva de referencia. Además, se puede observar los puntos de comparación de estas y los límites establecidos (visualizados mediante líneas discontinuas) durante el capítulo 5.

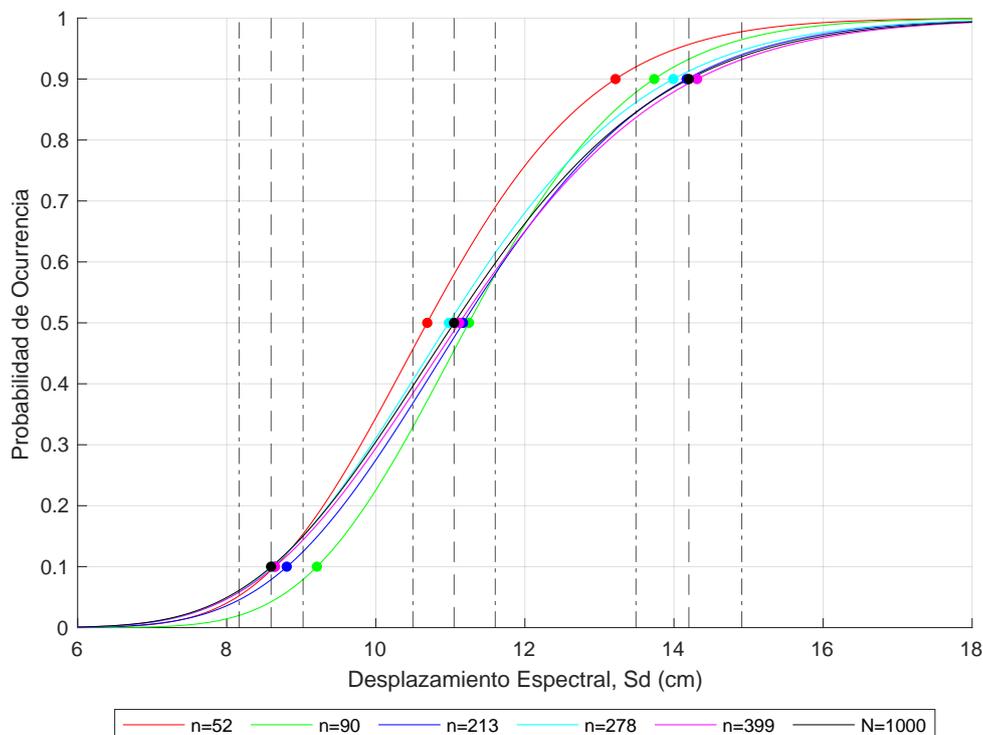


Fig. 28: Comparación de diversas curvas DS4.

Además, se ha realizado un mapa de calor con los valores normalizados del desplazamiento espectral para estas muestras:

Comparación Numérica Normalizada Derivada de la Comparación Gráfica de DS4.				
n	IC	p=10%	p=50%	p=90%
52	54%	0,994	0,967	0,931
90	68%	0,928	0,982	0,967
213	90%	0,976	0,989	0,998
278	95%	0,998	0,994	0,985
399	99%	0,994	0,994	0,992
1000	n/a	1	1	1

Fig. 29: Comparación numérica normalizada derivada de la comparación gráfica de DS4.

Visualizando las curvas DS4 (Fig. 28) para los diferentes tamaños de muestra (n), es posible ver la tendencia a los valores más cercanos a la curva de referencia cuanto mayor es n y también la convergencia a la  $S_d$  de referencia para una probabilidad de ocurrencia del 50%. Esta tendencia se puede observar en la Fig. 29, sin embargo, para un análisis en profundidad, se precisa de una distribución de muestras más grande. El mismo comportamiento se puede detectar en las curvas de DS1, DS2 y DS3 (Fig. 30), para las mismas muestras. Las curvas de comparación para los estados de daño menos críticos se encuentran en el Anexo E.

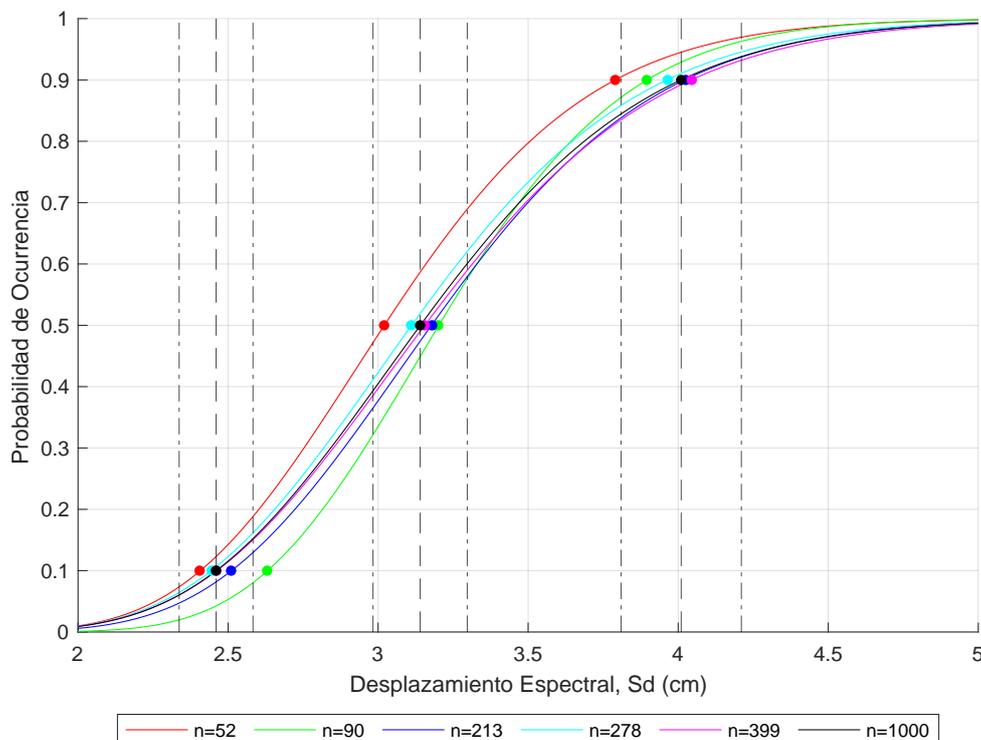


Fig. 30: Comparación de diversas curvas DS3.

La visualización de los límites de los puntos de control de referencia es interesante para poder determinar si una curva de estado de daño dada, de una muestra, es lo suficientemente parecida a la curva de referencia, es otras palabras, si los valores de este punto de control tienden al resultado obtenido tras realizar 1.000 análisis estáticos no lineales sobre el mismo modelo.

Para ello, se ha determinado que los tres puntos de control para cada cada curva deben de caer dentro de los límites para cada valor de referencia, si uno de estos no se encuentra en dicho rango la DS, y por lo tanto la muestra, no es válida para la obtención de resultados.

Tal como se observa en la Fig. 28 y Fig. 30 y según los criterios definidos, las dos primeras muestras, equivalentes a tamaños de muestra de 52 y 90 sujetos respectivamente no serían válidas. Para la primera muestra ( $n=52$ ), el punto de comparación que corresponde con una probabilidad de ocurrencia del 90 % queda fuera de los límites (tanto para la DS3 como para la DS4), mientras que para la segunda ( $n=90$ ), el punto de comparación correspondiente para una probabilidad de ocurrencia del 10 % no cumple con el criterio (en ambos estados de daño).

También se puede observar que para una probabilidad de ocurrencia del 50 %, los desplazamientos espectrales suelen tender al mismo valor. Otro punto a destacar es el cambio de tendencia de las curvas de daño alrededor de este valor, para desplazamientos espectrales entre 7 cm y 11 cm, en el caso de las DS4, se obtienen probabilidades de ocurrencia de hasta el 50 %, sin embargo, para probabilidades a partir este valor, el rango de desplazamientos espectrales es mucho mayor (entre 11 cm y 19 cm). Para el estado de daño 3, se puede comprobar que para  $S_d$  entre 2 cm y 3,2 cm se obtienen probabilidades de hasta 50 %, mientras que a partir de este valor, los desplazamientos espectrales oscilan entre 3,2 cm y 5 cm, teniendo en menor medida, el mismo comportamiento que las curvas de DS4.

Para el primer y el segundo estado de daño, no se observa este comportamiento, el rango de desplazamientos espectrales para probabilidades entre el 0 % y el 50 % es prácticamente idéntico a los correspondientes para probabilidades entre el 50 % y el 100 %.

Este comportamiento se puede observar entre los distintos estados de daño para una muestra cualquiera, a modo de ejemplificar esta visualización, se presentan las curvas de fragilidad para una muestra de tamaño  $n=213$  (ver Fig. 31).

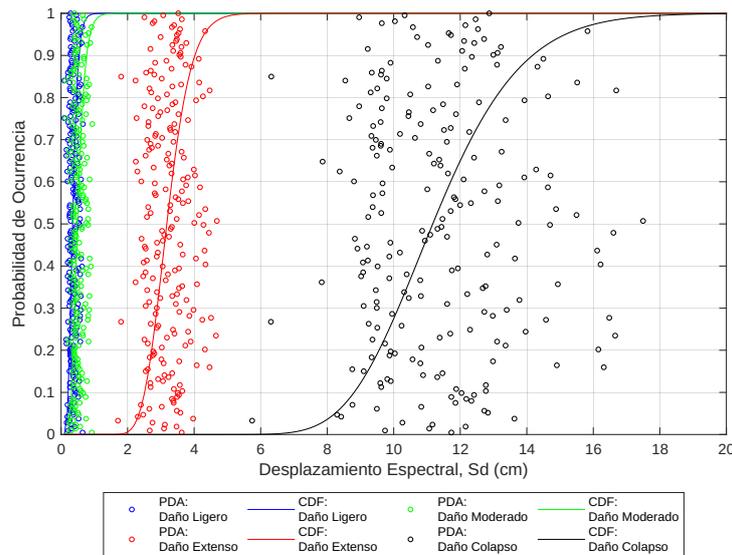


Fig. 31: Curvas de fragilidad para n=213.

Este fenómeno se puede explicar gracias a la definición de los estados de daño (ver sección 4.3). El estado de daño uno y dos se definen a partir del desplazamiento espectral relacionado al punto de fluencia ( $Sd_y$ ), mientras que el estado de daño tres se define a partir de una combinación entre el desplazamiento espectral relacionado al punto de fluencia y el relacionado al punto último ( $Sd_u$ ). Por último, el DS4 se calcula exclusivamente a partir del  $Sd_u$ .

Cuando la estructura está entre el punto de fluencia y el punto último, esta se encuentra en su estado más vulnerable, por lo que un pequeño incremento de desplazamiento espectral puede causar la ocurrencia de ambos estados de daño crítico, que dependen de la distribución de propiedades materiales utilizada para los análisis.

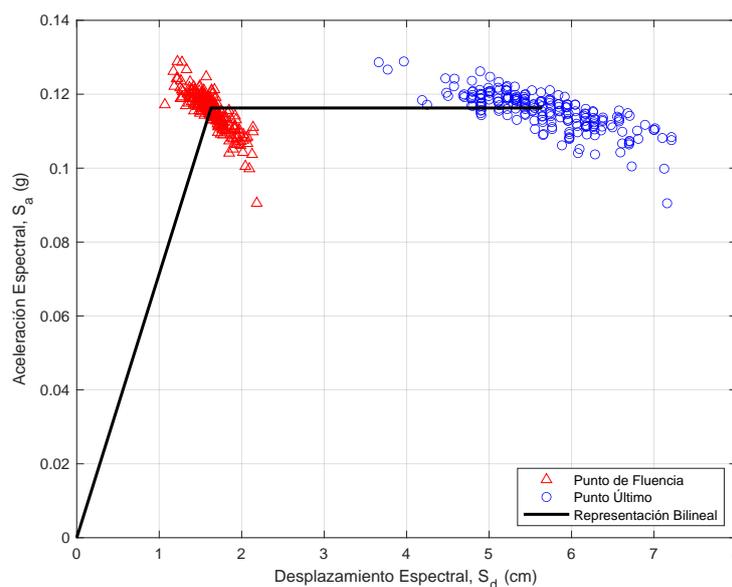


Fig. 32: Representación bilineal del espectro de capacidad para n=213.

Se puede afirmar que la dispersión en la probabilidad de ocurrencia del DS3 y DS4 viene directamente ligada al espectro de capacidad de la muestra dada. En la Fig. 32 se ve de forma clara como la dispersión de los puntos últimos es considerablemente mayor que la dispersión presentada por los puntos de fluencia. Observando la Fig. 33, se puede determinar las dispersiones de probabilidad de ocurrencia de estos estados de daño, cuanto mayor es la influencia del punto último en su definición, mayor es la dispersión del DS en cuestión.

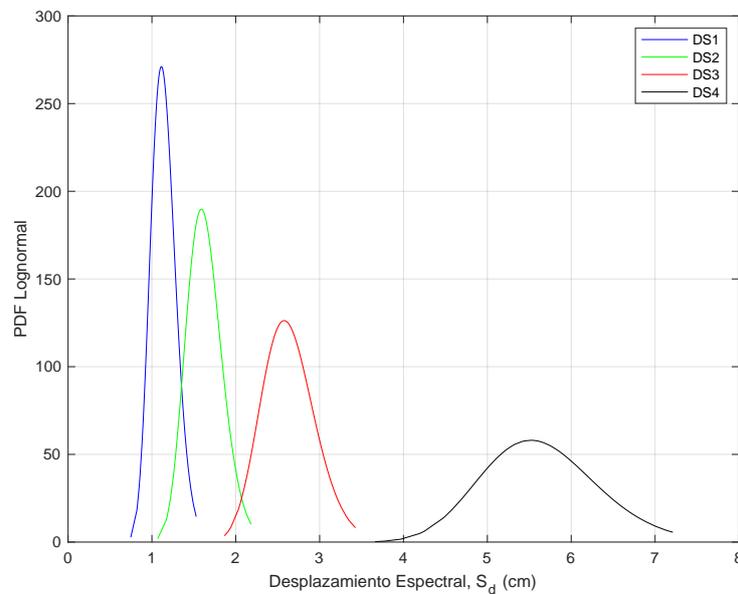


Fig. 33: Función de densidad de probabilidad de estados de daño para  $n=213$ .

Para facilitar esta comparación gráfica, en el Anexo E se puede consultar tanto las vistas de detalle de las gráficas comparativas para los puntos correspondientes a las probabilidades de ocurrencia del 10 %, 50 % y 90 % (para el DS3 y DS4), como la tabla de valores sin normalizar empleados para el obtener el mapa de calor de la curvas de estado de daño cuatro. Además, se adjuntan las gráficas de curvas de estados de daño para los tamaños de muestra de  $n=52$ ,  $n=90$ ,  $n=78$ ,  $n=399$  y  $N=1.000$ . También se puede encontrar las diversas distribuciones y la representación bilineal de la curva de capacidad para dichas muestras.

### 6.1.2. Comparación Numérica

Se ha generado un mapa de calor para cada curva de estado de daño según el rango de valores detallados en las tablas 6 y 7. Estos se han calculado gracias a la comparación numérica de diversos puntos de control que miden cuan similares son las curvas de estados de daño de una muestra respecto a la referencia (N=1.000).

Como norma general se puede observar varias características interesantes de estos mapas de calor. En primer lugar se expone cada muestra, junto al intervalo de confianza que se ha utilizado para la obtención de esta. Los tonos verdosos indican proximidad al tamaño de la población, mientras que colores rojizos indican muestras más pequeñas. En cada fila correspondiente a una muestra, se puede observar la evolución de cada curva de estado de daño cuatro y cuan semejante es respecto a la DS de referencia.

Comparación Numérica Normalizada del Estado de Daño 1 para Distintos Tamaños de Muestra.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,935	0,905	0,913	0,920	0,923	0,929	0,931	0,919	0,938	0,912	0,943	0,932	0,948	0,951	0,953	0,956	0,957	0,959	0,981
56	56%	0,871	0,786	0,826	0,840	0,846	0,875	0,879	0,919	0,906	0,941	0,929	0,959	0,961	0,988	1,000	0,989	0,978	0,980	0,962
60	58%	0,935	0,929	0,957	0,960	1,000	0,982	0,983	0,984	0,969	0,971	0,943	0,946	0,909	0,901	0,895	0,868	0,891	0,857	0,830
65	60%	0,968	0,976	0,957	1,000	0,981	1,000	1,000	0,984	0,984	0,971	0,971	0,959	0,961	0,951	0,942	0,934	0,935	0,918	0,925
70	62%	1,000	1,000	0,978	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000	1,000	0,985	1,000	0,986	1,000	1,000	0,988	0,989	0,978	0,980	1,000
76	63%	0,903	0,881	0,870	0,900	0,885	0,911	0,897	0,935	0,922	0,941	0,943	0,946	0,948	0,951	0,965	0,967	0,978	0,980	0,981
81	65%	0,935	0,905	0,913	0,940	0,923	0,964	0,948	0,984	0,969	1,000	0,986	1,000	0,987	0,988	0,965	0,967	0,957	0,959	0,943
87	67%	0,968	0,952	0,935	0,960	0,942	0,964	0,966	0,968	0,969	0,971	0,971	0,973	0,974	0,975	0,977	0,978	0,978	0,980	0,981
93	69%	0,935	0,929	0,935	0,920	0,962	0,929	0,966	0,935	0,969	0,941	0,971	0,946	0,961	0,963	0,953	0,967	0,957	0,959	0,981
100	71%	0,935	0,905	0,935	0,920	0,962	0,929	0,966	0,935	0,969	0,956	0,986	0,986	1,000	1,000	1,000	0,989	1,000	0,980	0,962
107	73%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,986	1,000	0,987	0,988	0,988	0,978	0,978	0,980	0,962
115	75%	0,903	0,905	0,891	0,920	0,923	0,929	0,948	0,935	0,969	0,956	0,971	0,973	0,987	0,988	1,000	0,989	1,000	0,980	0,962
124	77%	0,968	0,929	0,957	0,960	0,962	0,982	0,983	1,000	1,000	0,985	1,000	0,973	0,987	0,963	0,965	0,945	0,957	0,939	0,943
133	78%	0,968	0,952	0,978	0,960	1,000	0,964	1,000	0,968	1,000	0,985	0,986	0,986	0,974	0,975	0,977	0,967	0,978	0,959	0,943
142	80%	1,000	0,976	0,978	1,000	0,962	1,000	0,983	1,000	1,000	1,000	0,986	1,000	0,987	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,981
153	82%	0,968	0,976	0,978	0,960	0,981	0,964	0,966	0,968	0,969	0,971	0,971	0,973	0,974	0,975	0,977	0,978	0,978	0,980	0,981
165	84%	1,000	0,976	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,984	1,000	0,971	1,000	0,973	0,987	0,975	0,965	0,967	0,957	0,959	0,962
178	86%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,984	1,000	0,971	1,000	0,986	0,987	1,000	0,977	0,989	0,978	0,980	1,000
193	88%	0,935	0,929	0,935	0,920	0,962	0,929	0,966	0,935	0,969	0,941	0,971	0,959	0,974	0,975	0,977	0,978	0,978	0,980	1,000
210	90%	1,000	0,976	0,978	1,000	0,962	1,000	0,983	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,988	0,989	0,978	0,980
229	92%	1,000	0,976	0,978	1,000	0,962	1,000	0,983	1,000	1,000	0,985	1,000	0,986	1,000	1,000	1,000	0,988	0,989	0,978	0,980
252	93%	1,000	0,976	0,978	1,000	0,962	1,000	0,983	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
282	95%	0,968	0,952	0,957	0,960	0,981	0,964	0,983	0,968	0,969	0,971	0,986	0,986	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,981
324	97%	0,968	0,976	0,978	0,980	1,000	0,982	1,000	0,968	1,000	0,971	1,000	0,986	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,981
399	99%	0,968	0,952	0,957	0,960	0,962	0,964	0,966	0,968	0,969	0,971	0,971	0,973	0,974	0,975	0,977	0,978	0,978	0,980	1,000
1000	n/a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 34: Comparación numérica normalizada del estado de daño DS1 para distintas muestras.

Es importante destacar que, generalmente, cuanto menor es el intervalo de confianza (y por lo tanto la muestra), más varianza existe entre el valor a comparar y el valor de referencia. También se cumple el caso contrario, cuanto mayor es el intervalo de confianza, menos varianza existe entre la referencia y la DS dada. Se puede observar que para las DS3 y DS4 (Fig. 36 y Fig. 37), la densidad de tonos verdes intensos es menor que para los dos primeros estados de daño (Fig. 34 y Fig. 35), indicando una vez más que estos últimos dos estados presentan una dispersión mayor (tal como se ha observado en la comparación gráfica).

Comparación Numérica Normalizada del Estado de Daño 2 para Distintos Tamaños de Muestra.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,925	0,900	0,909	0,915	0,920	0,924	0,928	0,931	0,934	0,927	0,940	0,933	0,945	0,948	0,951	0,954	0,957	0,968	0,848
56	56%	0,850	0,783	0,818	0,831	0,853	0,861	0,880	0,897	0,901	0,927	0,940	0,952	0,964	0,974	0,984	0,992	0,971	0,948	0,534
60	58%	0,950	0,933	0,955	0,972	0,987	0,987	0,988	0,966	0,967	0,958	0,950	0,933	0,918	0,896	0,885	0,869	0,850	0,819	-0,112
65	60%	0,975	0,950	0,970	0,972	0,987	0,987	1,000	1,000	0,989	0,979	0,970	0,962	0,955	0,957	0,943	0,931	0,921	0,903	0,646
70	62%	1,000	0,983	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,990	1,000	0,990	1,000	1,000	0,992	0,992	0,986	0,987	0,933
76	63%	0,900	0,867	0,879	0,887	0,893	0,899	0,904	0,908	0,912	0,927	0,930	0,943	0,945	0,948	0,959	0,969	0,979	0,994	0,774
81	65%	0,925	0,917	0,924	0,944	0,947	0,949	0,952	0,966	0,967	0,990	0,990	1,000	0,991	0,991	0,975	0,969	0,957	0,942	0,653
87	67%	0,950	0,950	0,939	0,958	0,947	0,949	0,952	0,954	0,956	0,969	0,970	0,971	0,973	0,965	0,975	0,977	0,986	0,987	0,923
93	69%	0,950	0,933	0,939	0,944	0,947	0,949	0,952	0,954	0,956	0,948	0,960	0,952	0,964	0,965	0,967	0,969	0,971	0,974	0,929
100	71%	0,925	0,900	0,924	0,930	0,947	0,949	0,952	0,966	0,967	0,969	0,980	0,981	0,991	0,991	0,991	0,992	0,985	0,971	0,536
107	73%	1,000	0,983	1,000	0,986	1,000	1,000	1,000	0,989	0,989	0,990	0,990	0,990	0,991	0,983	0,984	0,985	0,979	0,974	0,871
115	75%	0,925	0,900	0,909	0,915	0,933	0,937	0,952	0,954	0,967	0,958	0,980	0,981	0,991	1,000	0,992	0,992	0,971	0,955	0,456
124	77%	0,950	0,933	0,939	0,972	0,960	0,975	0,976	0,989	0,989	0,990	0,990	0,981	0,973	0,974	0,959	0,954	0,943	0,929	0,661
133	78%	0,950	0,933	0,955	0,958	0,973	0,987	0,988	1,000	1,000	1,000	0,990	0,990	0,973	0,974	0,959	0,962	0,950	0,935	0,599
142	80%	1,000	0,983	0,985	0,986	0,973	0,975	0,976	0,977	0,978	0,990	0,990	0,990	0,991	0,983	0,992	0,992	1,000	0,994	0,981
153	82%	0,975	0,967	0,970	0,972	0,973	0,975	0,976	0,977	0,978	0,969	0,970	0,971	0,973	0,983	0,975	0,977	0,971	0,981	0,988
165	84%	1,000	0,983	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,990	0,990	0,981	0,982	0,983	0,975	0,977	0,964	0,968	0,853
178	86%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,990	0,990	0,990	0,991	1,000	0,992	0,992	0,986	0,987	0,949
193	88%	0,950	0,933	0,939	0,944	0,947	0,949	0,952	0,954	0,967	0,958	0,970	0,971	0,973	0,983	0,984	0,985	0,993	1,000	0,807
210	90%	0,975	0,983	0,970	0,986	0,973	0,975	0,976	0,977	0,978	0,990	0,990	1,000	1,000	1,000	1,000	0,992	0,993	0,987	0,906
229	92%	1,000	0,983	1,000	0,986	0,987	0,987	0,988	1,000	1,000	0,990	1,000	0,990	1,000	1,000	0,992	0,992	0,986	0,987	0,908
252	93%	1,000	0,983	0,985	0,986	0,973	0,975	0,976	0,977	0,978	0,990	0,990	0,990	0,991	0,983	0,992	0,992	1,000	1,000	0,968
282	95%	0,975	0,950	0,970	0,958	0,973	0,975	0,976	0,977	0,989	0,979	0,990	0,990	0,991	1,000	1,000	1,000	0,993	0,987	0,830
324	97%	0,975	0,983	0,970	0,986	0,987	1,000	1,000	1,000	1,000	0,990	1,000	0,990	1,000	1,000	1,000	1,000	0,985	0,984	0,923
399	99%	0,975	0,950	0,970	0,958	0,973	0,975	0,976	0,977	0,978	0,969	0,980	0,971	0,982	0,983	0,984	0,985	0,986	0,987	0,943
1000	n/a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 35: Comparación numérica normalizada del estado de daño DS2 para distintas muestras.

Observando la dirección vertical en los mapas, para las probabilidades de ocurrencia entre el 45 % y el 55 % los valores normalizados del desplazamiento espectral tienden a su valor respectivo en la curva de referencia. Esto se cumple en los cuatro estados de daño, de forma más dominante, en en estado de daño dos. También se puede ver que cuanto más alejado es el valor de la probabilidad de ocurrencia de este rango, los valores adquieren tonos mas rojizos, indicando que la varianza entre la referencia y el valor dado aumenta. Esto es especialmente cierto para las muestras que han sido obtenidas a partir de intervalos de confianza mayores que 90 %.

Comparación Numérica Normalizada del Estado de Daño 3 para Distintos Tamaños de Muestra.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,958	0,973	0,977	0,979	0,982	0,984	0,985	0,987	0,987	0,989	0,991	0,992	0,994	0,996	0,997	1,000	0,997	0,994	0,925
56	56%	0,879	0,928	0,938	0,944	0,949	0,952	0,959	0,960	0,968	0,974	0,976	0,981	0,984	0,989	0,993	0,999	0,993	0,993	0,852
60	58%	0,941	0,951	0,953	0,955	0,957	0,960	0,959	0,963	0,961	0,965	0,964	0,967	0,966	0,968	0,968	0,972	0,973	0,977	0,974
65	60%	0,967	0,957	0,953	0,951	0,951	0,951	0,949	0,950	0,946	0,947	0,946	0,945	0,944	0,942	0,941	0,941	0,939	0,937	0,897
70	62%	0,974	0,982	0,984	0,985	0,987	0,986	0,990	0,988	0,990	0,990	0,991	0,991	0,993	0,993	0,994	0,996	0,996	0,999	0,967
76	63%	0,912	0,953	0,961	0,966	0,971	0,974	0,979	0,980	0,987	0,987	0,992	0,994	0,999	0,999	0,993	0,989	0,984	0,977	0,851
81	65%	0,997	0,994	0,994	0,993	0,993	0,991	0,991	0,990	0,990	0,989	0,989	0,986	0,987	0,986	0,985	0,984	0,982	0,980	0,948
87	67%	0,971	0,979	0,981	0,981	0,982	0,982	0,983	0,983	0,985	0,984	0,986	0,985	0,987	0,987	0,989	0,989	0,990	0,991	0,984
93	69%	0,993	0,994	0,990	0,989	0,987	0,986	0,985	0,985	0,982	0,982	0,980	0,980	0,978	0,977	0,976	0,974	0,974	0,970	0,924
100	71%	0,997	0,990	0,990	0,989	0,989	0,988	0,988	0,987	0,987	0,986	0,986	0,983	0,985	0,983	0,983	0,981	0,979	0,978	0,952
107	73%	0,997	0,990	0,988	0,987	0,984	0,982	0,981	0,980	0,980	0,979	0,978	0,976	0,975	0,974	0,972	0,972	0,967	0,966	0,916
115	75%	0,961	0,984	0,984	0,989	0,991	0,993	0,995	0,998	0,998	0,998	0,998	0,994	0,996	0,991	0,990	0,988	0,983	0,979	0,897
124	77%	0,954	0,975	0,977	0,981	0,982	0,986	0,985	0,990	0,989	0,992	0,994	0,997	0,997	1,000	0,999	0,996	0,991	0,988	0,904
133	78%	0,993	0,996	1,000	0,998	0,998	1,000	0,997	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,996	0,994	0,995	0,995	0,994	0,975
142	80%	0,990	0,992	0,988	0,991	0,989	0,989	0,990	0,990	0,990	0,990	0,991	0,991	0,990	0,990	0,990	0,991	0,992	0,991	0,993
153	82%	0,951	0,965	0,967	0,968	0,971	0,970	0,973	0,975	0,974	0,978	0,977	0,980	0,979	0,983	0,983	0,985	0,988	0,990	0,951
165	84%	0,954	0,984	0,986	0,991	0,995	0,998	1,000	0,995	0,995	0,990	0,989	0,985	0,984	0,980	0,978	0,973	0,967	0,962	0,840
178	86%	0,964	0,977	0,981	0,983	0,984	0,986	0,988	0,988	0,992	0,990	0,994	0,992	0,996	0,996	0,999	0,999	0,999	0,996	0,944
193	88%	0,967	0,973	0,973	0,974	0,975	0,975	0,974	0,977	0,974	0,978	0,977	0,979	0,978	0,978	0,978	0,978	0,978	0,980	0,997
210	90%	0,984	0,982	0,982	0,983	0,982	0,982	0,983	0,980	0,984	0,981	0,983	0,980	0,982	0,980	0,980	0,980	0,979	0,979	0,969
229	92%	0,993	0,992	0,994	0,993	0,993	0,991	0,993	0,992	0,993	0,992	0,992	0,991	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,991	0,991
252	93%	0,997	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	0,997	1,000	0,997	1,000	0,997	0,999	0,997	0,997	0,997	0,996	0,986
282	95%	0,997	0,996	0,998	0,998	0,998	0,998	1,000	0,997	1,000	0,997	0,998	0,997	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998	0,999
324	97%	0,984	0,998	0,998	1,000	0,998	0,996	0,995	0,993	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,986	0,984	0,982	0,979	0,929
399	99%	0,967	0,982	0,979	0,983	0,984	0,984	0,986	0,988	0,987	0,990	0,989	0,992	0,991	0,994	0,994	0,996	0,999	1,000	0,954
1000	n/a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 36: Comparación numérica normalizada del estado de daño DS3 para distintas muestras.

De la misma forma, aquellas muestras que se han obtenido a partir de intervalos de confianza inferiores al 70 % presentan una densidad de tonos rojos superior al resto de IC, exceptuando el caso para las curvas de estado de daño dos (Fig. 35, donde predominan tonalidades amarillentas).

Comparación Numérica Normalizada del Estado de Daño 4 para Distintos Tamaños de Muestra.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,977	0,981	0,984	0,987	0,988	0,990	0,992	0,993	0,995	0,996	0,997	1,000	0,999	0,997	0,995	0,994	0,991	0,988	0,984
56	56%	0,940	0,946	0,952	0,956	0,959	0,962	0,965	0,968	0,970	0,973	0,975	0,978	0,981	0,983	0,986	0,990	0,993	0,998	0,995
60	58%	0,963	0,960	0,959	0,957	0,956	0,956	0,954	0,958	0,953	0,952	0,951	0,950	0,949	0,948	0,947	0,946	0,945	0,943	0,940
65	60%	0,955	0,953	0,951	0,950	0,949	0,948	0,946	0,946	0,945	0,944	0,943	0,942	0,941	0,941	0,940	0,938	0,937	0,936	0,933
70	62%	0,971	0,974	0,977	0,979	0,981	0,982	0,984	0,986	0,986	0,988	0,989	0,990	0,992	0,993	0,994	0,997	0,998	1,000	0,996
76	63%	0,957	0,965	0,971	0,975	0,980	0,983	0,986	0,990	0,992	0,995	0,998	0,999	0,996	0,993	0,990	0,985	0,982	0,976	0,968
81	65%	0,996	1,000	0,998	0,996	0,994	0,992	0,992	0,990	0,989	0,987	0,987	0,985	0,984	0,982	0,981	0,980	0,977	0,975	0,970
87	67%	0,986	0,986	0,986	0,987	0,987	0,987	0,987	0,988	0,987	0,987	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988	0,989	0,990
93	69%	0,991	0,996	0,999	0,998	0,995	0,993	0,991	0,990	0,988	0,986	0,984	0,983	0,981	0,979	0,977	0,975	0,973	0,969	0,964
100	71%	0,974	0,975	0,976	0,977	0,978	0,978	0,979	0,979	0,980	0,980	0,981	0,981	0,982	0,982	0,982	0,983	0,984	0,985	0,986
107	73%	0,983	0,980	0,980	0,979	0,979	0,978	0,978	0,977	0,976	0,976	0,976	0,975	0,975	0,974	0,973	0,973	0,972	0,970	0,970
115	75%	0,989	0,993	0,995	0,997	0,998	1,000	0,999	0,998	0,996	0,995	0,995	0,993	0,992	0,990	0,989	0,988	0,985	0,983	0,980
124	77%	0,951	0,960	0,966	0,971	0,975	0,979	0,982	0,986	0,990	0,993	0,996	1,000	0,997	0,993	0,989	0,985	0,980	0,973	0,964
133	78%	0,990	0,993	0,996	0,997	0,998	0,999	0,999	0,998	0,997	0,996	0,995	0,994	0,992	0,991	0,990	0,988	0,987	0,985	0,982
142	80%	0,985	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988	0,989	0,989	0,990
153	82%	0,961	0,965	0,968	0,970	0,971	0,973	0,974	0,974	0,977	0,977	0,979	0,980	0,981	0,983	0,985	0,985	0,988	0,990	0,993
165	84%	0,959	0,971	0,978	0,984	0,989	0,994	0,999	0,997	0,993	0,989	0,985	0,980	0,977	0,971	0,966	0,961	0,954	0,946	0,934
178	86%	0,970	0,974	0,977	0,979	0,981	0,982	0,984	0,986	0,987	0,988	0,990	0,991	0,992	0,994	0,996	0,998	0,999	0,998	0,994
193	88%	0,980	0,980	0,979	0,979	0,979	0,979	0,979	0,978	0,979	0,978	0,977	0,978	0,977	0,978	0,977	0,977	0,977	0,977	0,976
210	90%	0,983	0,981	0,981	0,981	0,981	0,980	0,980	0,980	0,979	0,979	0,979	0,978	0,978	0,978	0,977	0,978	0,976	0,976	0,976
229	92%	0,994	0,993	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,990	0,990	0,990	0,989	0,989	0,989
252	93%	0,990	0,992	0,994	0,996	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000	0,998	0,997	0,997	0,996	0,995	0,994	0,992	0,991	0,989	0,987
282	95%	0,990	0,991	0,992	0,993	0,993	0,993	0,994	0,995	0,994	0,995	0,996	0,996	0,997	0,997	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999
324	97%	0,994	0,998	1,000	0,998	0,996	0,995	0,994	0,992	0,991	0,990	0,989	0,987	0,987	0,984	0,983	0,982	0,979	0,977	0,974
399	99%	0,976	0,980	0,982	0,984	0,985	0,987	0,988	0,990	0,991	0,992	0,993	0,995	0,995	0,997	0,999	1,000	0,998	0,995	0,992
1000	n/a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 37: Comparación numérica normalizada del estado de daño DS4 para distintas muestras.

Una tendencia clara que afecta a estos mapas de calor es la cantidad valores unitarios de desplazamientos espectrales normalizados, presentados en cada estado de daño. Cuanto mayor es el estado de daño, y por lo tanto cuanto mayor es la influencia del punto último, menos valores idénticos a la DS de referencia existen. Esto se puede observar comparando la Fig. 34 y Fig. 35, que no tienen influencia del punto último, con la Fig. 36 y Fig. 37 que dependen de este.

En el Anexo E se encuentran los desplazamientos espectrales utilizados para obtener cada mapa de calor de esta sección.

## 6.2. Comparación de Índices de Daño

El índice de daño representa el porcentaje de daño general que presenta la estructura dado un determinado desplazamiento del punto de referencia (punto centrado en el techo de la estructura). Un daño del 100 % representa el colapso de la estructura mientras que un 0 % presenta ausencia de este. Con la comparativa de este parámetro para diversas muestras, es posible determinar su evolución frente a la disminución o al aumento del tamaño de muestra. En esta comparación también se hace uso tanto del conjunto de 5 muestras relevantes como del conjunto de 25 generadas a partir de los límites definidos en la Tabla 6.

### 6.2.1. Comparación Gráfica

A primera vista, no es posible realizar ninguna comparación gráfica que resulte concluyente para este trabajo, ya que los índices de daño para las diferentes muestras son muy semejantes al DI de la curva de referencia ( $N=1.000$ ).

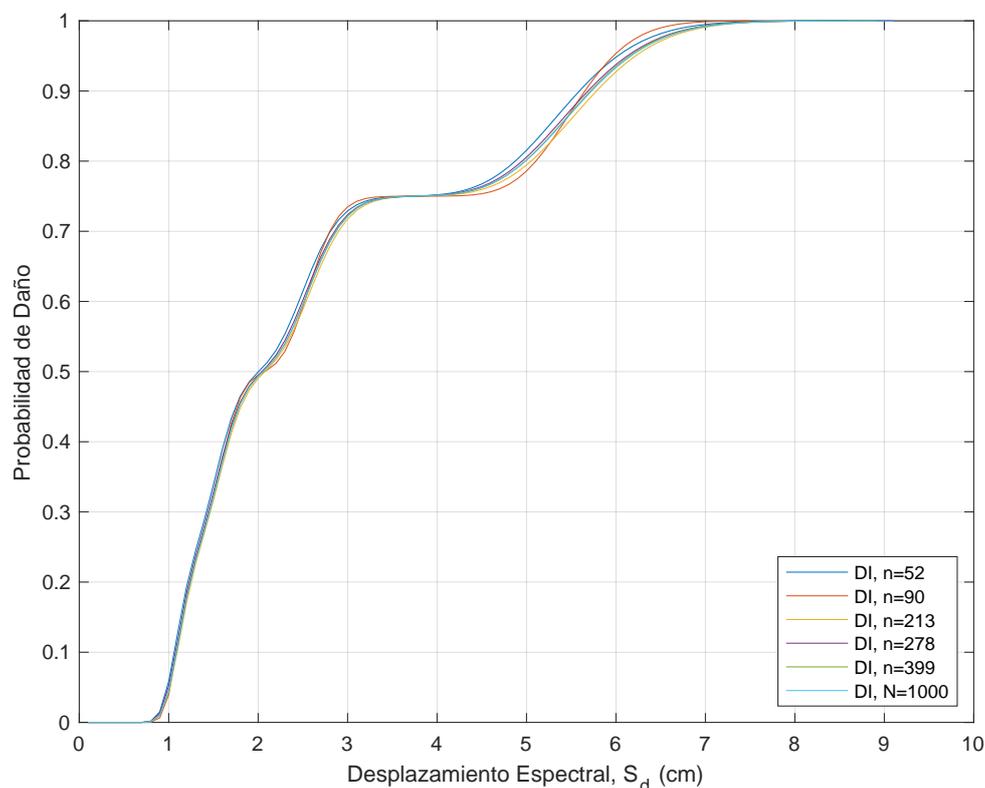


Fig. 38: Comparación gráfica del índice de daño para 5 muestras.

En la Fig. 38 se puede observar que la variación del DI entre las probabilidades del 0 % y del 50 % es prácticamente inexistente, sin embargo para el rango de probabilidades obtenidas a partir de valores de desplazamiento espectral comprendidos entre 3 cm y 4.5 cm es constante y a partir de este último valor de  $S_d$ , la varianza entre el DI de una muestra dada y el DI de referencia es significativa.

Observando la Fig. 39, se puede asociar la influencia que tiene cada estado de daño en la contribución total al índice de daño. Una vez más se puede observar que para las probabilidades de ocurrencia de estados de daño tres y cuatro hay una dispersión superior a las observadas para los estados uno y dos.

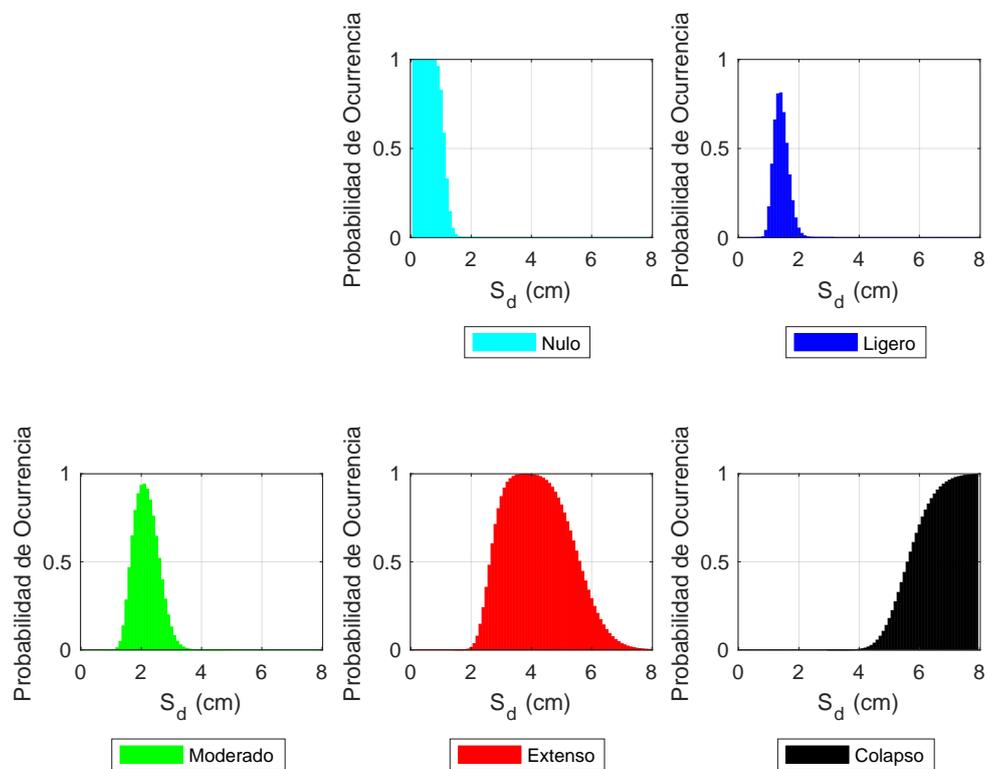


Fig. 39: Probabilidad de ocurrencia de DS.  $n=213$ .

En el Anexo E se puede encontrar las gráficas para el DI de cada muestra, de forma individual, así como las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño.

### 6.2.2. Comparación Numérica

Tal y como se ha podido observar en la comparación gráfica de los índices de daño, no existe una variabilidad muy grande entre las diferentes muestras para probabilidades de daño inferiores al 70%. Mediante la construcción de un mapa de calor para los 25 valores de intervalos de confianza (y sus respectivas muestras), se puede cuantificar esta variación.

Comparación Numérica Normalizada del índice de Daño para Distintos Tamaños de Muestra.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,929	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000	1,000	0,983	0,866
56	56%	0,857	1,000	0,957	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	1,000	0,976	1,000	0,980	1,000	0,969	0,974	0,978	0,981	0,991	0,987
60	58%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,984	0,987	0,989	1,000	0,983	0,899
65	60%	0,929	0,955	0,957	1,000	0,963	1,000	0,968	0,970	0,946	0,976	0,957	0,980	0,963	0,969	0,987	0,978	0,972	0,957	0,846
70	62%	0,929	1,000	0,957	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	1,000	0,976	1,000	0,980	0,981	0,969	0,962	0,978	0,972	0,983	0,926
76	63%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,978	1,000	0,981	1,000	1,000	0,989	0,991	0,983	0,953
81	65%	0,857	1,000	0,957	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,976	1,000	0,960	1,000	0,969	0,974	0,978	0,972	0,983	0,906
87	67%	0,929	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,987	1,000	0,991	1,000	0,919	
93	69%	1,000	0,955	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,976	0,978	0,980	0,981	0,984	0,987	0,978	0,981	0,991	0,993
100	71%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	1,000	0,976	1,000	1,000	1,000	0,984	0,987	0,978	0,991	0,991	0,987
107	73%	0,929	1,000	0,957	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	0,973	0,976	0,978	0,980	0,981	0,969	0,962	0,978	0,972	0,983	0,960
115	75%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	1,000	0,976	1,000	1,000	1,000	0,984	0,987	0,978	0,991	0,991	0,953
124	77%	1,000	0,955	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,976	0,978	0,980	0,981	0,984	0,987	0,989	0,991	0,991	0,919
133	78%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
142	80%	0,929	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,991	0,991	0,899
153	82%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,978	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000	0,991	0,991	0,913
165	84%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	1,000	0,976	1,000	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000	0,991	0,991	0,960
178	86%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,987	1,000	1,000	0,991	0,960
193	88%	0,929	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,978	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000	0,991	0,991	0,993
210	90%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	1,000	0,976	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,966
229	92%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,991	1,000	0,980
252	93%	0,929	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,987	0,989	0,991	0,991	1,000	1,000
282	95%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,926
324	97%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,970	1,000	0,976	1,000	1,000	1,000	0,984	0,987	0,978	0,991	0,983	0,973
399	99%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,978	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000	0,991	1,000	0,960
1000	n/a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 40: Comparación numérica normalizada del índice de daño para distintas muestras.

En las dos primeras columnas se puede observar cada intervalo de confianza con su tamaño de muestra correspondiente, las tonalidades verdosas indican más proximidad a los valores de referencia mientras que los tonos rojizos, más diferencia. En este mapa, y como norma general, la densidad de celdas verdes es notablemente superior a tonalidades rojizas, con una gran gama de tonos amarillentos, indicando que efectivamente hay poca variabilidad, incluso en la zona donde esta es más notable.

Para probabilidades de daño inferiores al 45%, el comportamiento del índice de daño es prácticamente el mismo que el calculado para la muestra de referencia. Para probabilidades de daño superiores al 90%, se observa la diferencia más notable entre las diferentes muestras y la muestra de referencia. A diferencia de las curvas de fragilidad, no existe tamaños de muestra que destaque sobre los demás, exceptuando la muestra compuesta por 133 unidades, que es idéntica al DI de referencia para todo el rango de probabilidades de daño.

En la Fig. 41, se puede observar claramente la baja variabilidad del índice de daño para una muestra dada, haciendo énfasis en la vista ampliada de la Fig. 42, se puede comprobar que la variabilidad es efectivamente mayor para aquellas muestras que se han obtenido a partir de un índice de daño inferior al 78 %.

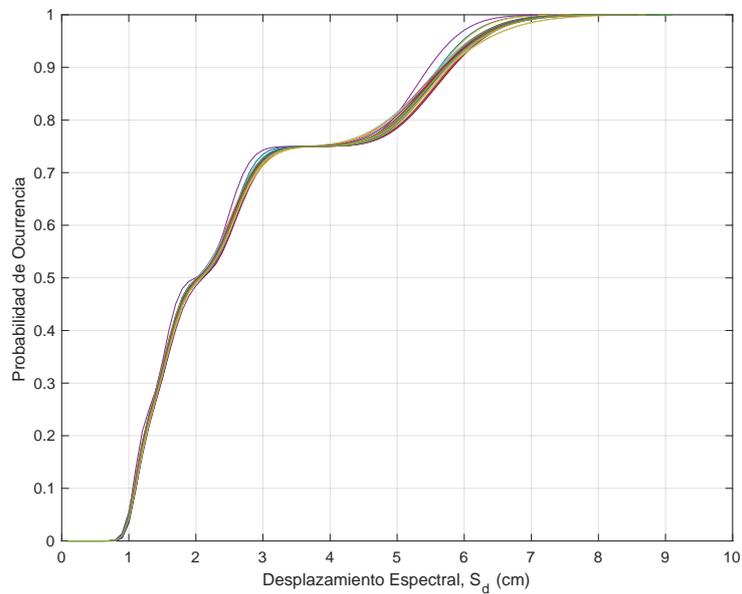


Fig. 41: Comparación gráfica del índice de daño para 25 muestras.

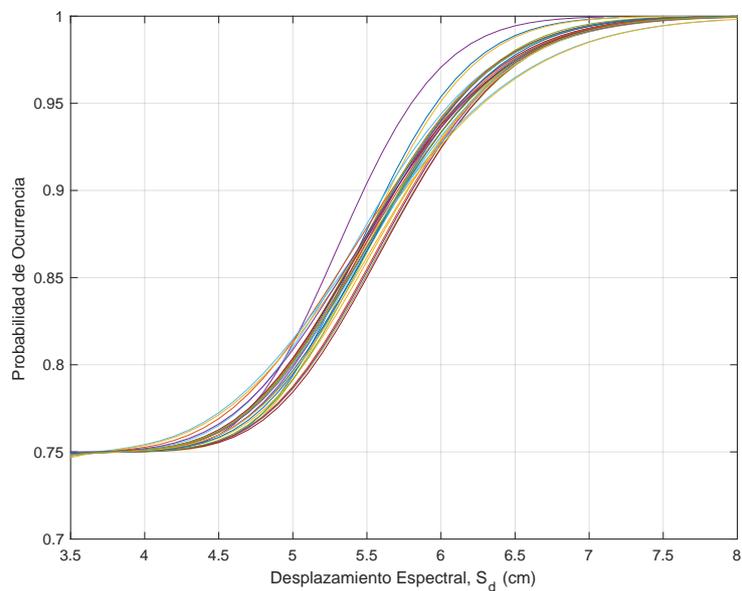


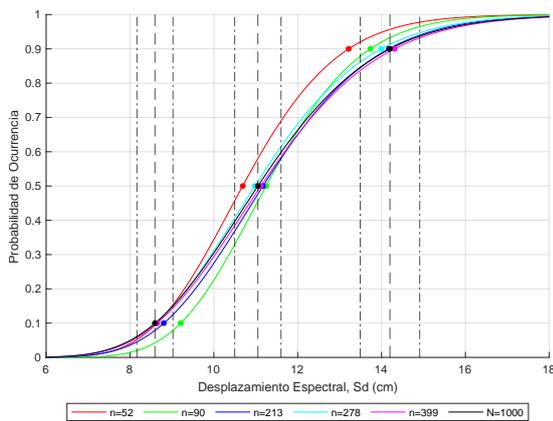
Fig. 42: Comparación gráfica del índice de daño 25 muestras. Ampliación.

## 7. Conclusiones y Líneas de Investigación Futuras

Para determinar la incidencia del tamaño de muestra en los resultados de análisis sísmicos probabilistas de edificios de mampostería no reforzada de Barcelona se han llevado a cabo comparaciones numéricas y gráficas sobre las curvas de fragilidad e índice de daño entre los resultados obtenidos para 1.000 análisis estáticos no lineales y un conjunto de muestras obtenidas a partir del muestreo aleatorio simple sobre dicha población.

Es importante destacar que la mampostería no reforzada no ha tenido una influencia en los resultados del trabajo. Es decir, las metodologías de muestreo y comparación de los diferentes resultados son agnósticos a esta. Estas comparaciones podrían ser implementables para otros estudios sobre tipologías constructivas diferentes.

Se esperaba que tanto las comparaciones de índice de daño y curvas de fragilidad para las diferentes muestras tuvieran el mismo comportamiento ante el aumento/disminución del tamaño de este, sin embargo esto no ha ocurrido. Para las curvas de fragilidad, se ha observado una clara tendencia a los valores de referencia (N=1.000) cuanto mayor es el tamaño de muestra, esto se puede observar tanto en la comparación gráfica como en la comparación numérica (Fig. 43).



(a) Gráfica

Comparación Numérica Normalizada del Estado de Daño 4 para Distintos Tamaños de Muestra.

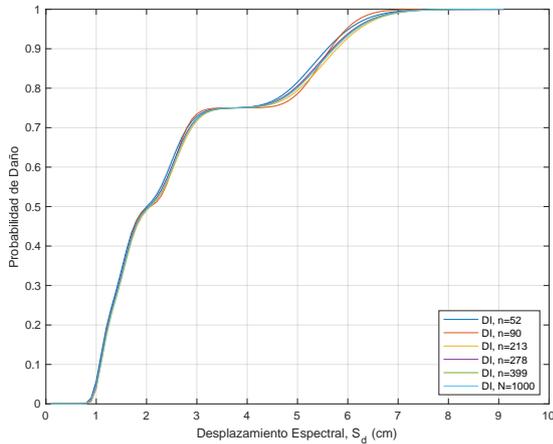
n	IC	pr=5%	pr=10%	pr=15%	pr=20%	pr=25%	pr=30%	pr=35%	pr=40%	pr=45%	pr=50%	pr=60%	pr=65%	pr=70%	pr=75%	pr=80%	pr=85%	pr=90%	pr=95%	
52	1494	0.977	0.981	0.984	0.987	0.988	0.990	0.992	0.993	0.995	0.996	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
90	1006	0.986	0.986	0.982	0.980	0.989	0.982	0.985	0.984	0.986	0.970	0.973	0.975	0.978	0.982	0.985	0.986	0.990	0.991	0.998
213	583	0.963	0.960	0.959	0.957	0.954	0.954	0.954	0.954	0.953	0.952	0.951	0.950	0.949	0.948	0.947	0.946	0.945	0.943	0.940
278	408	0.955	0.953	0.953	0.950	0.949	0.948	0.948	0.948	0.948	0.948	0.947	0.947	0.947	0.947	0.947	0.946	0.945	0.943	0.941
399	276	0.971	0.974	0.977	0.979	0.981	0.982	0.984	0.984	0.984	0.984	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.982	0.981	0.980
1000	149	0.957	0.965	0.971	0.975	0.980	0.983	0.986	0.986	0.986	0.985	0.985	0.985	0.985	0.985	0.985	0.985	0.984	0.982	0.979
52	1494	0.998	1.000	0.998	0.996	0.994	0.992	0.992	0.990	0.989	0.987	0.987	0.985	0.984	0.982	0.981	0.980	0.977	0.975	0.972
90	979	0.986	0.986	0.980	0.987	0.987	0.987	0.987	0.987	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.989
213	576	0.991	0.995	0.995	0.996	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.996
278	408	0.974	0.975	0.974	0.977	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978
399	276	0.983	0.980	0.980	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979
1000	149	0.991	0.995	0.997	0.997	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998
52	1494	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
90	979	0.985	0.987	0.987	0.987	0.987	0.987	0.987	0.987	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.989
213	576	0.991	0.995	0.995	0.996	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.996
278	408	0.959	0.971	0.974	0.984	0.989	0.994	0.999	0.997	0.993	0.989	0.985	0.980	0.977	0.971	0.966	0.961	0.954	0.946	0.934
399	276	0.970	0.974	0.977	0.979	0.981	0.982	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984
1000	149	0.990	0.992	0.994	0.996	0.997	0.998	0.999	1.000	1.000	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.992	0.991	0.991	0.991	0.991
52	1494	0.990	0.993	0.993	0.993	0.993	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994
90	979	0.984	0.988	0.990	0.992	0.994	0.995	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994
213	576	0.976	0.980	0.982	0.984	0.985	0.987	0.988	0.990	0.991	0.992	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993
278	408	0.976	0.980	0.982	0.984	0.985	0.987	0.988	0.990	0.991	0.992	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993
399	276	0.976	0.980	0.982	0.984	0.985	0.987	0.988	0.990	0.991	0.992	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993
1000	149	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

(b) Numérica

Fig. 43: Comparaciones para DS4.

En el caso del mapa de calor (Fig. 43b), se puede comprobar que para muestras con tamaño superior a 210 sujetos, los valores adquieren tonalidades verdosas, indicando su semejanza con la curva DS4 de referencia, mientras que en la comparación gráfica (Fig. 43a), las últimas tres muestras (n=213, n=278 y n=399) son similares a la referencia. El mismo comportamiento se puede observar para los otros estados de daño DS1, DS2 y DS3, tanto para la comparación gráfica como para la numérica (consultar Anexo E).

En cuanto a la comparación del índice de daño (DI), no se han obtenido resultados tan significativos como los obtenidos con la curvas de fragilidad, ya que el DI no sufre una diferencia aparente después de alterar el tamaño de la muestra (Fig. 44a), este fenómeno se puede interpretar de manera numérica con el mapa de calor generado para diferentes muestras (Fig. 44b). La mayor desviación de los resultados se puede observar una vez pasado el umbral de 75 % de daño, entonces la diferencia empieza a ser más significativa.



(a) Gráfica

Comparación Numérica Normalizada del Índice de Daño para Distintos Tamaños de Muestra.																						
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%		
52	148%	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.983	0.868
56	148%	0.937	1.000	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	1.000	0.980	1.000	0.989	0.974	0.978	0.981	0.991	0.997	0.981	0.947
60	148%	0.900	1.000	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	0.960	1.000	0.960	1.000	0.960	1.000	0.984	0.987	0.989	1.000	1.000	1.000	0.983	0.949
65	60%	0.929	0.955	0.951	1.000	0.963	1.000	0.968	0.970	0.946	0.976	0.957	0.980	0.983	0.969	0.987	0.978	0.972	0.957	0.946	0.937	0.846
70	62%	0.929	1.000	0.937	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	0.980	0.981	0.989	0.982	0.978	0.972	0.983	0.926	0.833	0.725
76	67%	0.929	1.000	0.980	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	0.980	0.981	0.989	0.982	0.978	0.972	0.983	0.926	0.833	0.725
81	65%	0.937	1.000	0.937	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	0.980	0.981	0.989	0.982	0.978	0.972	0.983	0.926	0.833	0.725
87	67%	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.919
93	69%	1.000	0.953	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.976	0.978	0.980	0.981	0.984	0.987	0.978	0.981	0.991	0.997	0.981	0.947
100	73%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	0.980	0.981	0.984	0.987	0.978	0.981	0.991	0.997	0.981	0.947
107	73%	0.929	1.000	0.937	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	0.973	0.976	0.978	0.980	0.981	0.989	0.982	0.978	0.972	0.983	0.960	0.872	0.783
115	75%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	0.980	0.981	0.984	0.987	0.978	0.981	0.991	0.997	0.981	0.947
124	77%	0.929	0.953	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.978	0.980	0.981	0.984	0.987	0.978	0.981	0.991	0.997	0.981	0.947
133	78%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
142	80%	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.889
153	82%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.889
165	84%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	1.000	0.981	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
178	86%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
193	88%	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
210	90%	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	1.000	0.981	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
229	92%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
252	93%	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
282	95%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
324	97%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.970	1.000	0.976	0.980	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
399	99%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	0.900
1000	n/a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(b) Numérica

Fig. 44: Comparaciones de DI.

Esta desviación a partir de la probabilidad de daño del 75 % se puede explicar de igual manera que la dispersión en los puntos de probabilidad de ocurrencia de los diferentes estados de daño. Como se puede observar en la Fig. 45, los estados de daño DS1 y DS2 presentan una dispersión de probabilidad de ocurrencia notablemente menor a los estados DS3 y DS4 (Fig. 45b).

Esto se debe a la definición de los estados de daño. Mientras los DS1 y DS2 se definen a partir del punto de fluencia de la estructura, lo que significa que dependen del desempeño de la misma en el dominio elástico, el DS3 se define a partir del punto último y de fluencia, y el DS4 únicamente a partir del punto último. Por lo tanto, estos últimos estados de daño dependen del desempeño plástico del edificio. Este comportamiento no lineal implica un aumento de la incertidumbre cuanto mayor son los desplazamientos espectrales del punto de referencia <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Punto céntrico en el techo del edificio de interés.

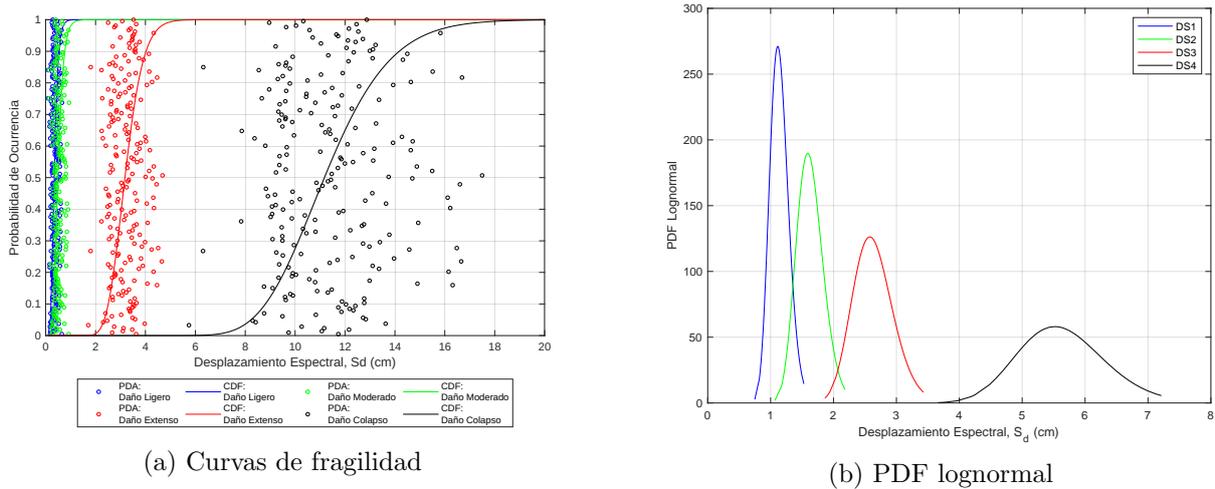


Fig. 45: Distribuciones para n=213.

Observando las distribuciones de los puntos últimos y los de fluencia de la representación bilineal del espectro de capacidad para una muestra dada (Fig. 46), se puede ver la dispersión, y consecuentemente el comportamiento no lineal, que heredan los estados de daño DS3 y DS4 y que a su vez influyen en la probabilidad de daño superior al 75 % del índice de daño.

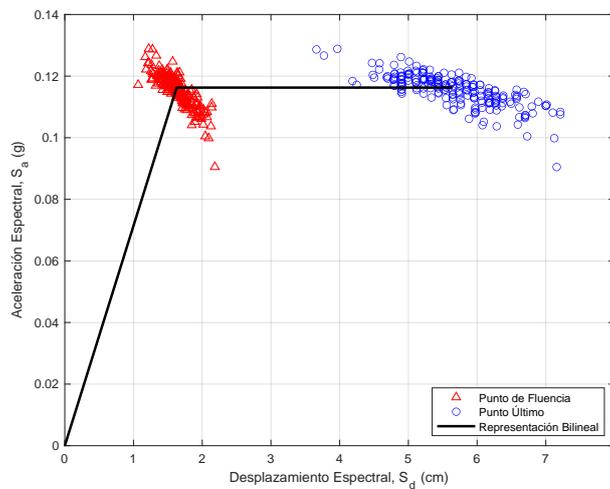


Fig. 46: Representación bilineal de la curva de capacidad para n=213.

Por lo tanto, se puede afirmar que no es posible determinar un rango de tamaños de muestra que permita un muestreo de la población basado únicamente en la comparación del índice de daño. Es decir, a partir los resultados obtenidos para las curvas de fragilidad, respaldados por distribuciones de probabilidad y representación bilineal de la curva de capacidad y complementados por la comparación de índices de daño, se recomendará un rango de tamaños de muestra válidos para realizar el muestreo previo al análisis estático no lineal.

Atendiendo a los resultados expuestos en la sección 6.1 y resumidos en la Fig. 44, las muestras obtenidas a partir de intervalos de confianza (IC) superiores al 90 % presentan un porcentaje de similitud elevado sobre los desplazamientos espectrales del punto de referencia respecto a las muestras obtenidas por IC inferiores al 90 %. Extrapolando los datos de los mapas de calor a la comparación gráfica, se puede argumentar que para muestras de tamaño inferior a  $n=213$ , al menos uno de los puntos de control<sup>2</sup> no cae dentro de los límites establecido por el margen de error del 5 %.

Por esta razón, toda muestra cuyo tamaño ha sido obtenido a partir de un intervalo de confianza superior (o igual) al 90 %, es apta para el muestreo previo al análisis estático no lineal. Esto está alineado con la discusión sobre los intervalos de confianza (ver sección 5.2), donde se expone que los IC utilizados utilizados y aceptados en investigaciones y estudios de cualquier ámbito son del: 90 %, 95 % y 99 %.

Teniendo en cuenta que el estudio original de [Avila-Haro et al. \(2021\)](#) está basado en el análisis de la población completa ( $N=1.000$ ), los tamaños de muestra de  $n=213$ ,  $n=278$  y  $n=399$  suponen una mejora sustancial en cuanto al número de modelos a simular. El tamaño de muestra se debe calcular según las necesidades del análisis; utilizando una muestra de 399 sujetos (a partir de un IC del 99 %), se obtiene resultados con más certeza que con una muestra de 278 sujetos (IC=95 %), de manera similar, una muestra de 213 sujetos (IC=90 %) permite obtener resultados más precisos que con una muestra de 278 sujetos.

A pesar de que los tres tamaños de muestra son adecuados y presentan una reducción importante de la cantidad de simulaciones a realizar (entre el 60,1 % y el 78,7 % de las simulaciones), de acuerdo a la discusión sobre los intervalos de confianza (sección 5.2), la presentación y discusión de resultados y a la información que se puede encontrar en la literatura, el tamaño de muestra más adecuado y por lo tanto óptimo para el muestreo de la población es  $n=278$ , correspondiente con un intervalo de confianza del 95 % y con una reducción del 72,2 % de las simulaciones respecto al estudio original.

Durante la elaboración de este trabajo se han discutido varias ideas de implementación, que por el tiempo requerido para su aplicación no ha sido posible implementar en el mismo. Sin embargo, se proponen algunas de estas ideas como futuras líneas de investigación derivadas de este trabajo.

La medida de intensidad (IM) seleccionada para analizar el comportamiento ante la modificación del tamaño de muestra, ha sido el desplazamiento espectral  $S_d$ . Se propone utilizar la aceleración espectral  $S_a$  como IM para realizar las comparaciones de la curva de fragilidad e índice de daño (DI) para los diversos conjuntos de muestras propuestas por este trabajo.

También se propone contrastar los resultados y conclusiones obtenidas en este trabajo con los resultados obtenido si el muestreo se hubiera realizado antes del análisis estático no lineal. Es decir, obtener los resultados reales para una muestra dada.

<sup>2</sup>Desplazamiento espectral dada una probabilidad de ocurrencia del 10 %, 50 % y 90 %,

## Bibliografía

- Agustí, D. (2014). *Historia de Cataluña*. Silex, Barcelona.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. u., and Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in europe. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(4):371–400.
- ATC-40 (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Applied Technology Council, Redwood City.
- Avila-Haro, J., Gonzalez-Drigo, R., Vargas-Alzate, Y., Beneit, L., and Barbat, A. (2021). Probabilistic seismic assessment of a high-rise urm building. *Journal of Building Engineering*, 45:103344.
- Ávila Haro, J. A. (2021). *Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño sísmico de edificios de mampostería no reforzada: aplicación a edificios aislados y agregados del distrito del Ensanche de Barcelona*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Barbat, A. H. (1982). *Cálculo sísmico de las estructuras*. Editores Técnicos Asociados.
- Barbat, H. A., Orosco, L., Hurtado Gómez, J. E., and Galindo, M. (1994). *Definición de la acción sísmica*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- Benavent, P. (1981). *Cómo debo construir : manual práctico de construcción de edificios*. Bosch, Barcelona, 9a ed. edition.
- Brase, C. H. and Brase, C. P. (2018). *Understanding Basic Statistics*. Cengage Learning.
- Busquets, J. (2004). *Barcelona : la construcción urbanística de una ciudad compacta*. La Estrella Polar ; 43. Ediciones del Serbal, Barcelona.
- Calpena, E. (2015). *Barcelona : una biografia*. Llibres a l'abast ; 430. Edicions 62, Barcelona.
- Caro, A. (2008). *Diccionario de términos cerámicos y de alfarería*. Agrija Ediciones, Cádiz.
- Cattari, S. and Lagomarsino, S. (2013). Seismic assessment of mixed masonry-reinforced concrete buildings by non-linear static analyses. *Earthquakes and Structures*, 4:241–264.
- Cid Ramos, J. (1998). Zonación sísmica de la ciudad de barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales.
- C.S.LL.PP (2008). Decreto ministeriale del 14 gennaio 2008. nuove norme tecniche per le costruzioni.
- Daniel, J. (2012). *Sampling Essentials: Practical Guidelines for Making Sampling Choices*.

- De Luca, F., Vamvatsikos, D., and Iervolino, I. (2013). *Improving Static Pushover Analysis by Optimal Bilinear Fitting of Capacity Curves*. Computational Methods in Applied Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Dolšek, M. (2008). Pbee toolbox - examples of application.
- Eurocode 8-3 (2005). Design of structures for earthquake resistance. part 3: Assessment and retrofitting of buildings.
- Fajfar, P. (1999). Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 28(9):979–993.
- Fajfar, P. and Fischinger, M. (1988). N2 - a method for non-linear seismic analysis of regular buildings. *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*.
- Figueiras, L. and Guardia, M. (2010). *El Ensanche: Génesis y Construcción*. Lunwerg, Barcelona.
- Fisher, R. A. (1956). Statistical methods and scientific inference.
- Galindo Álvarez, J. I., Pérez, A. M., and García Casado, P. J. (1995). Historia de los morteros. *Boletín informativo del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*.
- Gambarotta, L. and Lagomarsino, S. (1997). Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. part ii: The continuum model and its applications. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(4):441–462.
- Gimeno, E. (1994). *Cerdà. Ciudad y territorio. Una visión de futuro*. Editorial Electa y Fundación Catalana para la Recerca, Barcelona.
- Gonzalez-Drigo, R., Avila-Haro, J., Barbat, A., Beneit, L., Vargas, Y., Lagomarsino, S., and Cattari, S. (2015). Modernist unreinforced masonry (urm) buildings of barcelona: Seismic vulnerability and risk assessment. *International Journal of Architectural Heritage*, 9.
- Gonzalez-Drigo, R., Avila-Haro, J., Pujades, L. G., and Barbat, A. H. (2017). Non-linear static procedures applied to high-rise residential urm buildings. *Bulletin of earthquake engineering*, 15(1):149–174.
- Grünthal, G. (1998). European macroseismic scale 1998. Technical report, European Seismological Commission (ESC).
- Grupo 2C (2009). *La Barcelona de Cerdà*. Flor del Viento Ediciones, Barcelona.
- Institut d'Estadística de Catalunya (2011). Censo de edificios.
- Institut d'Estadística de Catalunya (2021). Padrón municipal de habitantes: Ampliación de resultados de la población extranjera.
- Irizarry Padilla, J. (2003). Analytical formulation for the elastic acceleration- displacement response spectra adapted to barcelona soil conditions.

- Irizarry Padilla, J. (2004). An advanced approach to seismic risk assessment : application to the cultural heritage and the urban system of barcelona.
- Kennedy, R., Cornell, C., Campbell, R., Kaplan, S., and Perla, H. (1980). Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 59(2):315–338.
- Kornmann, M. (2007). *Clay bricks and roof tiles, manufacturing and properties*. Société de l'Industrie Minerale.
- Kraaikamp, C. and Meester, H. (2005). A modern introduction to probability and statistics.
- Kreslin, M. and Fajfar, P. (2012). The extended n2 method considering higher mode effects in both plan and elevation. *Bulletin of earthquake engineering*, 10(2):695–715.
- Lagomarsino, S., Penna, A., and Galasco, A. (2006). Tremuri program: Seismic analysis program for 3d masonry buildings. *Engineering Structures*.
- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., and Cattari, S. (2013). Tremuri program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering structures*, 56:1787–1799.
- Milutinovic, Z. V. (2003). *WP4 : vulnerability of current buildings*. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology IZS, Skopje, Macedonia.
- Moreno González, R. and Bairán García, J. (2012). Evaluación sísmica de los edificios de mampostería típicos de barcelona aplicando la metodología risk-ue. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 28(3):161–169.
- Najam, F. A. (2018). Nonlinear static analysis procedures for seismic performance evaluation of existing buildings – evolution and issues. In Rodrigues, H., Elnashai, A., and Calvi, G. M., editors, *Facing the Challenges in Structural Engineering*, pages 180–198, Cham. Springer International Publishing.
- Paricio, A. (2001). *Secrets d'un sistema constructiu : l'Eixample*. Edicions UPC.
- Paricio, A., Ratera, J., and Casanovas i Boixareu, X. (1999). *Estudi de costos orientatiu de rehabilitació i manteniment de les façanes de l'Eixample*. Estudis tècnics ; 1. ProEixample, Barcelona.
- Paricio Casademunt, A. (2008). *Secrets d'un sistema constructiu : l'Eixample*. Edicions UPC, Barcelona, 2a ed. (rev. i amp.) edition.
- Permanyer, L. (2008). *L'Eixample : 150 anys d'història*. Viena, Barcelona.
- Pujades Beneit, L., Vargas Alzate, Y. F., Barbat Barbat, H. A., and González Drigo, J. R. (2015). Parametric model for capacity curves. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Rea, L. M. and Parker, R. A. (2014). *Designing and conducting survey research: A comprehensive guide*. John Wiley & Sons.

- Rodríguez Sanchez, A. (2006). Evolución de las dimensiones de los ladrillos y su coordinación desde la adopción del metro como unidad de medida. *Red temática de conservación, restauración y rehabilitación del patrimonio arquitectónico*.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., and Roca, A. (2004). Seismic hazard zonation of catalonia, spain, integrating random uncertainties. *Journal of seismology*, 8(1):25–40.
- Tunç, D. U., Tunç, M. N., and Lakens, D. (2021). The epistemic and pragmatic function of dichotomous claims based on statistical hypothesis tests.
- Valentín-Gamazo, G. (1948). *El tamaño de los ladrillos desde el punto de vista de la coordinación modulada de los elementos constructivos*. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- Venteo, D. (2012). *Autobiografía de Barcelona*. Efadós, Barcelona.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO  
Grado en Ingeniería Mecánica

INCIDENCIA DEL TAMAÑO DE MUESTRA EN LOS  
RESULTADOS DE ANÁLISIS SÍSMICOS PROBABILISTAS  
DE EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA DE  
BARCELONA



Anexos

**Autor:** Murilo Cossovan Marques  
**Director:** Jorge Arturo Ávila Haro  
**Departamento:** RMEE  
**Convocatoria:** Enero 2023

## A. Características de los Edificios Estudiados

La lista de edificios analizados por el *Dr. Jorge Arturo Ávila Haro et al.* se compone de cuatro edificios aislados y tres combinaciones de éstos.

Los edificios aislados son los siguientes:

- **ED01:** Edificio central.
- **ED02:** Edificio central.
- **ED03:** Edificio central.
- **ED04:** Edificio chaflán (o de esquina).

Y los conjuntos de agregados son lo siguientes:

- **AG01:** Combinación de dos edificios ED01.
- **AG02:** Combinación de izquierda a derecha de un ED01 y un ED02.
- **AG04:** Combinación de izquierda a derecha de un ED03, ED04 y otro ED03

A continuación se puede encontrar algunas propiedades generales y vistas varias para los edificios ED02, ED03 y ED04.

## A.1 ED02

Para el edificio ED02, se puede observar la siguiente tabla de datos generales y a continuación una vista isométrica de la planta baja (Fig. A.1), así como la distribución en planta de los niveles superiores (Fig. A.2):

Tabla A.1: Datos generales ED02 (Ávila Haro, 2021).

Parámetro	Valor	Unidades
Número de Plantas	7	N/A
Altura Total	24,50	m
Altura Planta Baja	4,00	m
Altura Plantas Intermedias	3,20	m
Altura Última Planta	3,10	m
Espesor de Forjados	0,20	m
Ancho en Planta	15,65	m
Profundidad en Planta	18,65	m
Espesor Fachada Frontal (P.B)	0,45	m
Espesor Fachada Frontal (niveles superiores)	0,30	m

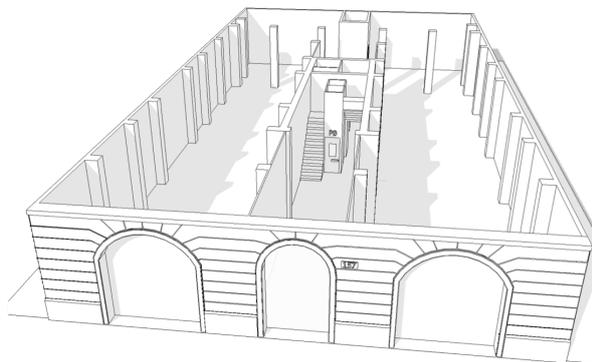


Fig. A.1: Vista isométrica de la planta baja.

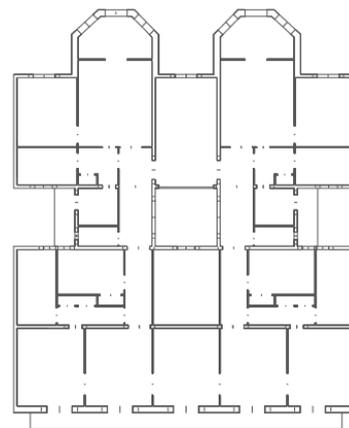


Fig. A.2: Distribución en planta de niveles superiores.

## A.2 ED03

Para el edificio ED03, se puede observar la siguiente tabla de datos generales y a continuación una vista isométrica del edificio (Fig. A.3), así cómo la distribución en planta de la planta baja (Fig. A.4):

Tabla A.2: Datos generales ED03 (Ávila Haro, 2021).

Parámetro	Valor	Unidades
Número de Plantas	7	N/A
Altura Total	24,20	m
Altura Planta Baja	5,00	m
Altura Plantas Intermedias	3,00	m
Altura Última Planta	2,80	m
Espesor de Forjados	0,20	m
Ancho en Planta	12,70	m
Profundidad en Planta	17,90	m
Espesor Fachada Frontal (P.B)	0,45	m
Espesor Fachada Frontal (niveles superiores)	0,30	m

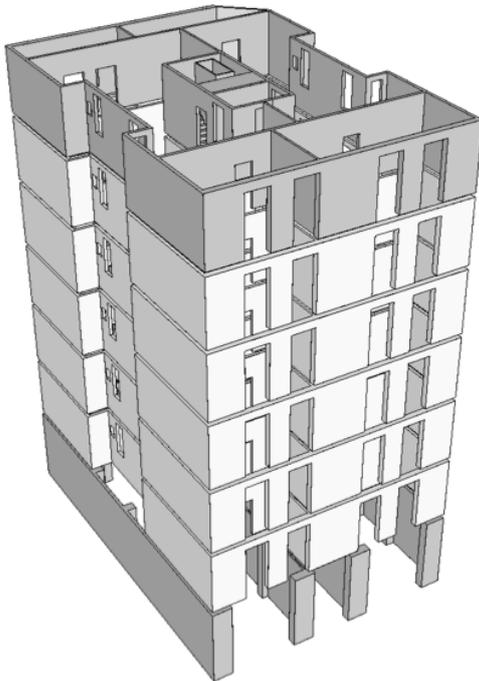


Fig. A.3: Vista isométrica del edificio.

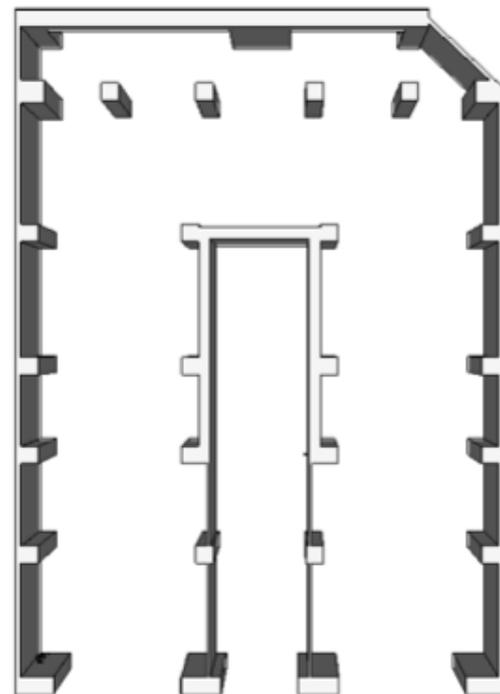


Fig. A.4: Distribución en planta de la planta baja.

### A.3 ED04

Para el edificio ED04, se puede observar la siguiente tabla de datos generales y a continuación las vistas en planta de la distribución de la planta baja (Fig. A.5 ) y de los niveles superiores (Fig. A.6):

Tabla A.3: Datos generales ED04 (Ávila Haro, 2021).

Parámetro	Valor	Unidades
Número de Plantas	7	N/A
Altura Total	24,20	m
Altura Planta Baja	5,00	m
Altura Plantas Intermedias	3,00	m
Altura Última Planta	2,80	m
Espesor de Forjados	0,20	m
Espesor Fachada Frontal (P.B)	0,45	m
Espesor Fachada Frontal (niveles superiores)	0,30	m

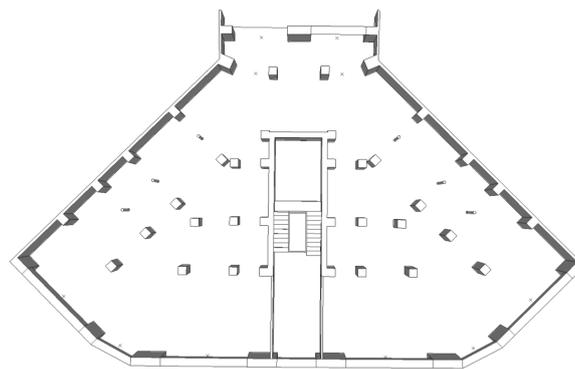


Fig. A.5: Distribución planta baja.

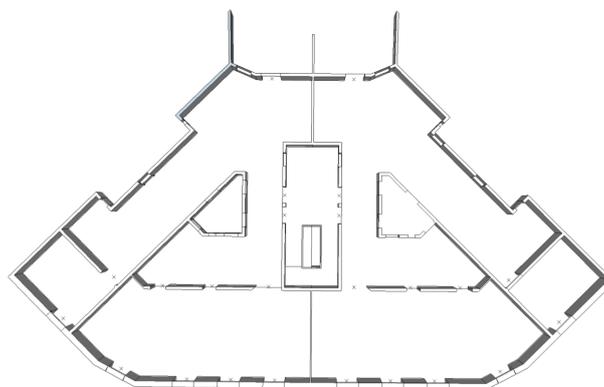


Fig. A.6: Distribución planta tipo.

## B. Formulación de Evaluación Sísmica

A continuación se puede observar la formulación desarrollada por el Instituto Cartográfico de Cataluña:

$$0 < T \ll T_B \implies S_e(T) = pga \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (B_C - 1) \right] \quad (\text{B.1})$$

$$T_B \ll T \ll T_C \implies S_e(T) = pga \cdot B_C \quad (\text{B.2})$$

$$T_C \ll T \ll T_D \implies S_e(T) = pga \cdot B_C \left[ \frac{T_C}{T} \right]^d \quad (\text{B.3})$$

$$T_D \ll T \ll 4s \implies S_e(T) = pga \cdot B_C \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (\text{B.4})$$

donde:

$$B_C = \frac{S_{a,max}}{pga} \quad (\text{B.5})$$

y,

- $S_a(T)$  es el espectro de respuesta elástico en términos de aceleraciones espectrales.
- $T$  es el período de un sistema lineal de 1GDL.
- $pga$  es la aceleración pico del terreno (peak ground acceleration).
- $T_B$  y  $T_C$  son los límites inferior y superior del tramo de aceleración constante.
- $T_D$  es el período que marca el comienzo del tramo de desplazamiento constante.

Finalmente,  $d$  es un parámetro que modula la caída del espectro para períodos superiores, se define:

$$d = - \frac{\log(T_B/T_C)}{\log(T_D/T_C)} \quad (\text{B.6})$$

En función del tipo de escenario considerado, se determinan los valores para los diferentes parámetros mencionados anteriormente (Tabla B.1).

Tabla B.1: Parámetros que definen los espectros de respuesta según el escenario y tipo de terreno (Irizarry Padilla, 2003).

Zona	R		I		II		III	
	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.
$B_C(s)$	2,26	2,29	1,91	2,00	2,45	2,50	2,29	2,57
$T_B(s)$	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$T_C(s)$	0,23	0,25	0,39	0,40	0,22	0,23	0,22	0,19
$T_D(s)$	1,75	1,75	2,30	2,85	2,20	2,21	2,00	1,77
$d$	1,12	0,94	1,70	1,34	1,43	1,28	1,40	1,12

También se determinan los valores de la aceleración pico del terreno según el terreno y el escenario (Tabla B.2).

Tabla B.2: Aceleración pico del terreno según terreno y escenario (Irizarry Padilla, 2003).

Zona	R		I		II		III	
	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.	Det.	Prob.
pga ( $g$ )	0,072	0,100	0,136	0,188	0,141	0,194	0,122	0,169

## C. Análisis Aplicado al Método N2

### C.1 Espectro de Capacidad

El procedimiento de cálculo aplicado al método N2 es el siguiente; primero se transforma el sistema de múltiples grados de libertad a un sistema equivalente de un grado de libertad con formato fuerza-desplazamiento (ecuaciones C.1, C.2, C.3 y C.4). A continuación, se transforma el sistema fuerza-desplazamiento a un sistema aceleración desplazamiento (ecuaciones C.5 y C.6). El procedimiento se puede explicar mediante las siguientes expresiones:

$$F^* = \frac{V_{base}}{\Gamma} \tag{C.1}$$

$$D^* = \frac{\Delta_{techo}}{\Gamma} \tag{C.2}$$

Donde  $F^*$  y  $D^*$  son la fuerza y el desplazamiento equivalente de un grado de libertad, y  $\Gamma$ , es el factor de participación modal, definido de la siguiente forma:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} \tag{C.3}$$

Donde  $m^*$  es la masa equivalente del sistema de un grado de libertad, definida de la siguiente forma:

$$m^* = \sum m_i \cdot \phi_i \tag{C.4}$$

Y finalmente,

$$S_d = \frac{F^*}{m^*} \tag{C.5}$$

$$S_a = D^* \tag{C.6}$$

La representación gráfica se puede observar mediante las siguientes figuras:

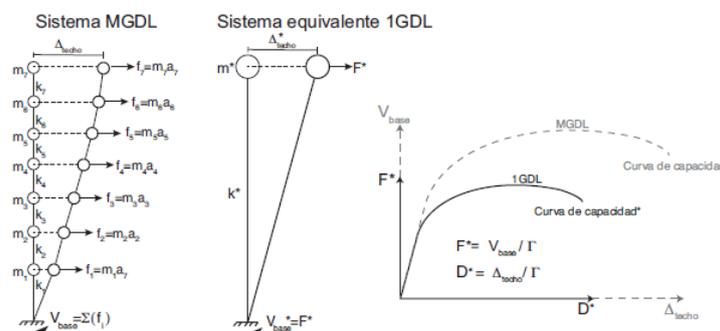


Fig. C.1: Transformación de la curva de capacidad a un sistema equivalente fuerza-deformación.

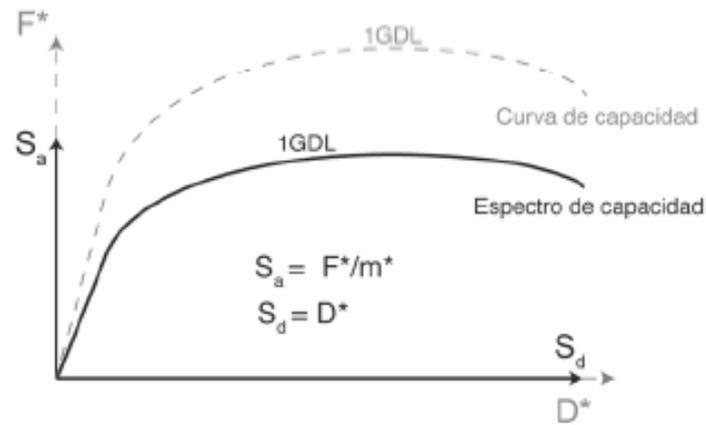


Fig. C.2: Obtención del espectro de capacidad.

### C.2 Representación Bilineal

La representación bilineal aplicada al método N2 consiste en un procedimiento no iterativo, donde se asume un comportamiento elasto-plástico perfecto para el tramo plástico del sistema equivalente de un grado de libertad, sin ablandamiento o endurecimiento del tramo inelástico. Este procedimiento anterior se basa en un equilibrio de áreas

El ajuste se lleva a cabo hasta el punto donde ocurre la formación de un mecanismo plástico, asumiendo el punto de fuerza máxima como el punto de fluencia (Dolšek, 2008).

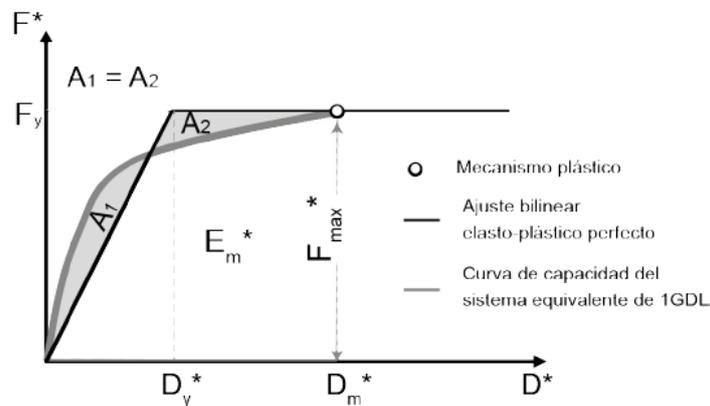


Fig. C.3: Ajuste bilineal de la curva de capacidad.

El desplazamiento de fluencia,  $D_y^*$ , se determina analíticamente a partir del equilibrio de áreas y la energía de deformación,  $E_m^*$ , hasta el desplazamiento donde ocurre el mecanismo plástico,  $D_m^*$ . Se calcula mediante la siguiente relación:

$$D_y^* = 2 \cdot \left( D_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \tag{C.7}$$

### C.3 Punto de Desempeño

Como se ha mencionado en la sección 4.2.2.4, hay dos metodologías para obtener el punto de desempeño, para el método N2 se utiliza la siguiente formulación que tienen en cuenta el período del sistema estructural equivalente de 1GDL ( $T^*$ ) y la ductilidad ( $\mu$ ):

Rangos de períodos medianos y largos:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= R_\mu \\ S_d &= S_{de}(T^*) \end{aligned} \right\} T^* \geq T_C \quad (C.8)$$

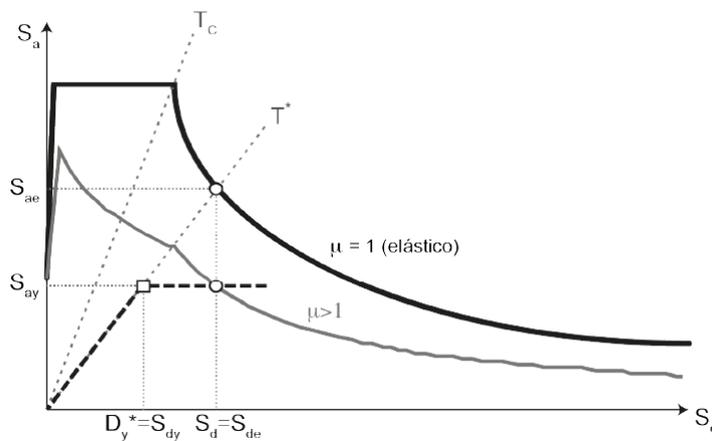


Fig. C.4: Determinación del desplazamiento espectral del sistema de 1GDL para períodos medianos y largos.

Rangos de períodos cortos:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_C}{T^*} + 1 \\ S_d &= \mu \cdot D_y^* = \frac{S_{de}}{R_\mu} \cdot \left[ 1 + (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_C}{T^*} \right] \end{aligned} \right\} T^* < T_C \quad (C.9)$$

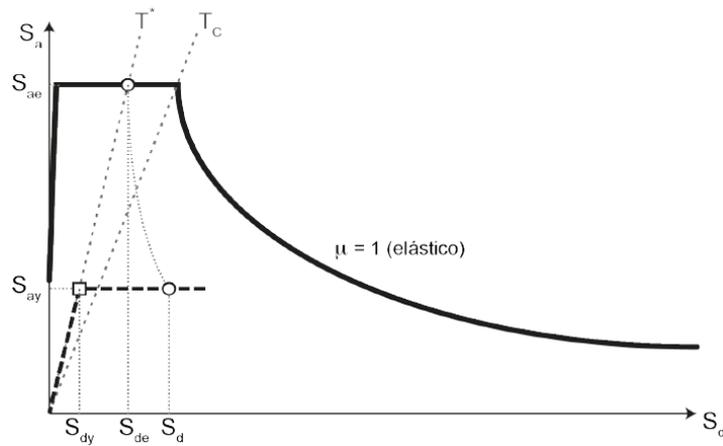


Fig. C.5: Determinación del desplazamiento espectral del sistema de 1GDL para periodos cortos.

donde:

- $\mu$  es la ductilidad del sistema equivalente de 1GDL.
- $R_\mu$  es el factor de reducción por ductilidad.
- $T_C$  es el límite superior del tramo de aceleración constante del espectro elástico.
- $T^*$  es el período del sistema equivalente de 1GDL.
- $S_{de}$  es el desplazamiento espectral elástico.



## D.2 Muestras.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Muestras %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Murilo Cossovan Marques
% 22 Dec, 2022.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% A partir de IC y Z-score, devuelve una matriz con n0, n y n/N
% correspondiente con cada IC y Z-score asociado.
% Tambien comprueba que la muestra sea más grande que el 5% de la población
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
close all
clc
tic

% Datos Comunes
error = 0.05;
proporcion = 0.5;
N = 1000;

% Datos Iniciales
input_t = readmatrix('entrada.txt'); % Guarda el IC y su respectivo Z en una matriz
num_inter = size(input_t,1); % Número de IC

parametros = zeros(num_inter, 5); % Matriz de ceros para rellenar con los parámetros

for i=1:num_inter % Matriz resultado con todos los parámetros (IC, Z, n0, n, n/N)
    parametros(i,1) = input_t(i,1); % Guarda los IC
    parametros(i,2) = input_t(i,2); % Guarda los Z
    parametros(i,3) = (proporcion*(1-proporcion))/(error/parametros(i,2))^2; % Calcula y guarda los n0
    parametros(i,3) = round(parametros(i,3),0); % Redondea al número entero
    parametros(i,4) = (parametros(i,3)*N)/(N-1+parametros(i,3)); % Calcula y guarda los n
    parametros(i,4) = round(parametros(i,4),0); % Redondea al número entero
    parametros(i,5) = parametros(i,4)/N; % Calcula y guarda la relación n/N
end

j=0;
for i = 1:num_inter % Cuenta los IC que no cumplen con la condición n/N
    if parametros(i,5)<error
        j = j + 1;
    else
        j;
    end
end

if j > 0 % Compara el valor de j para determinar si hay un error o no
    disp('Uno de los IC no cumple con n/N')
else
    disp('No hay ningun error')
end

toc

```

## D.3 Muestreo.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Muestreo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Murilo Cossovan Marques
% Dec, 2022.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtiene los datos de cálculo según la entrada de un tamaño de muestra
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
close all
clc
tic

n = 16; % Tamaño de muestra

Files_all_minCrit = dir('URM_MinCrit*.mat'); % Archivos de interés en la carpeta actual
Files_name_minCrit = {Files_all_minCrit.name}; % Nombre de los archivos de la carpeta actual

seleccion = randsample(Files_all_minCrit,n); % Selecciona la muestra según el tamaño.
seleccion_cell = {seleccion.name}; % Crea una lista con los nombres de los archivos seleccionados
data = zeros(7,n);

relacion = zeros(n, 1); % Conversión del nombre del archivo a su número correspondiente
a=0;
b=0;
c=0;
for i=1:n
    a=char(seleccion_cell(i)); % Convierte el tipo de datos a caracteres
    b=extractBetween(a,13,16); % Extrae la parte numérica de a.
    c=str2double(b); % Convierte los caracteres a números
    relacion(i,1)=c; % Rellena la matriz que relaciona cada archivo con un índice
end

for z=1:n % Rellena la matriz de datos

load(seleccion_cell{z})

data(1,z) = dy(end); % Yielding displacement, [m]
data(2,z) = Fy_Say(end); % Force associated with the yielding displacement, [kN]
data(3,z) = du(end); % Ultimate displacement, [m]
data(4,z) = Fu_Sau(end); % Force associated with the ultimate displacement, [kN]
data(5,z) = xd{1,relacion(z)}(y_max_idx); % Displacement associated with the maximum base shear, [m]
data(6,z) = y_max; % Maximum base shear, [kN]
data(7,z) = m(end);

end

toc

```

## D.4 Recopilacion\_datos.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Recopilación de Datos %%%%%%%%%
% Murilo Cossovan Marques
% Dec, 2022.
% A partir de un número determinado de intervalos de confianza. Se obtiene
% una matriz de datos por cada intervalo de confianza utilizado, con el
% número de muestra (aleatoria) correspondiente.
%
% Este script está compuesto por los scripts "entrada.m", "muestras.m" y
% "muestreo.m", con modificaciones para trabajar con rangos de datos en vez
% de valores concretos.
% Guarda: input.mat, info.mat y data_all.mat
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
close all
clc
tic
fig=1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OBTENCIÓN DEL RANGO DE INTERVALOS DE CONFIANZA (entrada.m) %%%%%%%%%

% Cálculo de un rango grande de valores -g

% num_inter = 25; % Parámetro que define cuántos IC se van a utilizar
% LIM_inf = 0.54; % Primer IC del intervalo
% LIM_sup = 0.99; % Último IC del intervalo
% IC = transpose(linspace(LIM_inf,LIM_sup,num_inter)); % Obtiene los IC que se utilizarán

% Imposición de un rango concreto de valores -c

IC = transpose([0.54 0.68 0.9 0.95 0.99]);
num_inter=5;

alfa = 1-IC; % Nivel de significación
p = 1-(0.5*alfa); % Probabilidad
Z = norminv(p); % Calcula el Z score según una probabilidad p.

input = zeros(num_inter, 4); % Matriz vacía a rellenar con IC, alfa, p y Z-score, respectivamente.

for i=1:num_inter
    input(i,1) = IC(i); % Guarda los IC en la columna 1 de la matriz
    input(i,2) = alfa(i); % Guarda los alfa en la columna 1 de la matriz
    input(i,3) = p(i); % Guarda los p en la columna 1 de la matriz
    input(i,4) = Z(i); % Guarda los Z-score en la columna 1 de la matriz
end

save('AA_input_c','input'); % input_g, para rango grande
% input_c, para rango concreto

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO (muestras.m) %%%%%%%%%

% Datos Comunes
m_error = 0.05; % Margen de error
proporcion = 0.5; % Proporción de muestra, sesgo equitativo en este caso
N = 1000; % Tamaño de la población
% Datos Iniciales
num_inter = height(input); % Número de IC

parametros = zeros(num_inter+1, 5); % Matriz de ceros para rellenar con
% los parámetros de cálculos
% Matriz resultado con todos los parámetros (IC, Z, n0, n, n/N)
for i=1:num_inter
    parametros(i,1) = input(i,1); % Guarda los IC
    parametros(i,2) = input(i,4); % Guarda los Z
    parametros(i,3) = (proporcion*(1-proporcion))/(m_error/parametros(i,2))^2; % Calcula y guarda los n0
    parametros(i,3) = round(parametros(i,3),0); % Redondea al número entero
    parametros(i,4) = (parametros(i,3)*N)/(N-1+parametros(i,3)); % Calcula y guarda los n
    parametros(i,4) = round(parametros(i,4),0); % Redondea al número entero
    parametros(i,5) = parametros(i,4)/N; % Calcula y guarda la relación n/N
end

j=0;
for i=1:num_inter % Cuenta los IC que no cumplen con la condición n/N
    if parametros(i,5)<m_error
        j=j+1;
    else
        j;
    end
end

if j > 0 % Compara el valor de j para determinar si hay un error o no
    error('Uno de los IC no cumple con n/N, el IC inicial debe ser mayor.')
```

```

else
    disp('No hay ningun error al obtener los parámetros de cálculo.')
end

parametros(num_inter+1,4)=parametros(1,4); % Crea valores artificiales para n=1000
parametros(num_inter+1,5)=parametros(1,5); % para que el gráfico no se vea afectado.

disp(' ')

figure(fig)
fig=fig+1;
hold on
plot(parametros(:,4),parametros(:,5)*100, '.', 'MarkerSize',15, 'Color', ...
      'black', 'LineWidth',1, 'LineStyle', '-.')
xlim([0 450])
ylim([0 45])
grid on
ylabel('n/N (%)')
xlabel('Tamaño de Muestra')
axis normal
title('Relación entre n/N y el tamaño de muestra')
box on

parametros(num_inter+1,4)=N; % Corrige los valores para n=1000
parametros(num_inter+1,5)=1;

info=zeros(num_inter+1,2);
for i=1:num_inter
    info(i,1)=parametros(i,4);
    info(i,2)=input(i,1);
end

info(num_inter+1,1)=N; % Guarda los IC y tamaño de muestra, incluido n=1000

save('AA_info_c','info'); % info_g, para rango grande
                        % info_c, para rango concreto

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% OBTENCIÓN DE LOS DATOS ALEATORIOS DE MUESTREO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Files_all_minCrit = dir('URM_MinCrit*.mat'); % Archivos de interés en la carpeta actual
Files_name_minCrit = {Files_all_minCrit.name}; % Nombre de los archivos de la carpeta actual

data_all=cell(1,num_inter); % Array que guardará las diferentes matrices de datos
relacion_all = cell(1,num_inter);

count=0; % Contador que determinará la posición de los elementos de data_all

for i=1:num_inter+1 % Este loop crear una matriz de datos para cada tamaño de muestra y la guarda en data_all
    count=count+1;
    seleccion = randsample(Files_all_minCrit,parametros(i,4)); % Selecciona la muestra según el tamaño
    seleccion_cell = {seleccion.name}; % Crea una lista con los nombres de los archivos seleccionados
    data = zeros(7,parametros(i,4));
    relacion = zeros(parametros(i,4), 1); % Conversión del nombre del archivo a su número correspondiente
    a=0;
    b=0;
    c=0;
    for j=1:parametros(i,4)
        a=char(seleccion_cell(j)); % Convierte el tipo de datos a caracteres
        b=extractBetween(a,13,16); % Extrae la parte numérica de a.
        c=str2double(b); % Convierte los caracteres a números
        relacion(j,1)=c; % Rellena la matriz que relaciona cada archivo con un índice
    end
    disp('Obteniendo matriz '+string(count)+'...')

    for z=1:parametros(i,4) % Rellena la matriz de datos
        load(seleccion_cell{z})
        data(1,z) = dy(end); % Yielding displacement, [m]
        data(2,z) = Fy_Say(end); % Force associated with the yielding displacement, [kN]
        data(3,z) = du(end); % Ultimate displacement, [m]
        data(4,z) = Fu_Sau(end); % Force associated with the ultimate displacement, [kN]
        data(5,z) = xd{1,relacion(z)}(y_max_idx); % Displacement associated with the maximum base shear, [m]
        data(6,z) = y_max; % Maximum base shear, [kN]
        data(7,z) = m(end);
    end

    disp('Guardando matriz '+string(count)+'...')
    disp(' ')

    data_all{count}=data;
    relacion_all{count}=relacion;
end
end

```

```
save('AA_data_all_c','data_all')           % data_all_g, para rango grande
                                           % data_all_c, para rango concreto

save('AA_relacion_c','relacion_all')       % relacion_g, para rango grande
                                           % relacion_c, para rango concreto

disp('Todos los datos han sido guardados')
disp(' ')

toc
```

## D.5 FullInfoRetrieval\_mod.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%***** Pushover Analysis (non-linear static analysis) Postprocessing %*****
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Jorge A. Avila Haro (jorge.avila-haro@upc.edu)
% Dec 2018 -- ver 1.01
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Modificado por Murilo Cossovan Marques,
% Dec 2022
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la versión original post-procesa la población entera, sin utilizar ningún
% tipo de muestro.
%
% Esta modificación del código original emplea varios algoritmos que
% aplican un muestreo aleatorio simple al proceso de datos.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear
close all
clc

fig=1; % Figure counter
tic % Time counter (initialize)
g=9.81; % Gravitational constant, [m/s^2]

fp = '/MATLAB Drive/1000_muestras/Imagenes'; % Ubicación donde se guardarán las imágenes

load('AA_data_all_c.mat'); % Carga el array de matrices obtenidos de 'recopilacion_datos.m'
muestra = 0;
for j=1:size(data_all,2) % Guarda temporalmente la matriz j como 'data', a partir de aquí se
obtienen los gráficos para cada j
    data = data_all{j};
    data;
    muestra = size(data,2);

    dy = data(1,:);
    du = data(3,:);
    d_vbmax = data(5,:);

    [dy_sort, dy_sort_idx] = sort(dy);
    [du_sort, du_sort_idx] = sort(du);
    [d_vbmax_sort, d_vbmax_sort_idx] = sort(d_vbmax);

    xm_dy=exp(1/length(dy)*sum(log(dy)));
    beta_dy=sqrt(1/(length(dy)-1)*sum((log(dy/xm_dy)).^2));

    xm_du=exp(1/length(du)*sum(log(du)));
    beta_du=sqrt(1/(length(du)-1)*sum((log(du/xm_du)).^2));

    xm_d_vbmax=exp(1/length(d_vbmax)*sum(log(d_vbmax)));
    beta_d_vbmax=sqrt(1/(length(d_vbmax)-1)*sum((log(d_vbmax/xm_d_vbmax)).^2));

    log_xm_dy=log(xm_dy);
    log_xm_du=log(xm_du);
    log_xm_d_vbmax=log(xm_d_vbmax);

    y1_dy=lognpdf(dy_sort,log_xm_dy,beta_dy);
    y1_du=lognpdf(du_sort,log_xm_du,beta_du);
    y1_d_vbmax=lognpdf(d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax);

    y_dy=logncdf(dy_sort,log_xm_dy,beta_dy); % Same as y2_dy
    y2_dy=cdf('logn',dy_sort,log_xm_dy,beta_dy); % Same as y_dy
    y_du=logncdf(du_sort,log_xm_du,beta_du); % Same as y2_du
    y2_du=cdf('logn',du_sort,log_xm_du,beta_du); % Same as y_du
    y_d_vbmax=logncdf(d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax); % Same as y2_d_vbmax
    y2_d_vbmax=cdf('logn',d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax); % Same as y_d_vbmax

    xp=icdf('logn',y2_dy,log_xm_dy,beta_dy); % Same as dy_sort

    ds_num=4; % número de estados de daño (sin contar el estado de no-daño o nulo)
    -

```

```

% DANO LEVE
% x_slight_disp=[0.0034462; 0.0037304; 0.0045612; 0.0039373; 0.0035415; 0.0036646; 0.0047938; 0.0037555;
0.0034308; 0.0039969; 0.0031724; 0.0035908; 0.0038056; 0.0044107; 0.0043815; 0.0049046; 0.0032769; 0.003395;
0.0042985; 0.0037147; 0.0049688];
x_slight_pga=0.7*dy';
x_slight_num=length(x_slight_pga);
x_slight_id=(1:length(x_slight_pga))';

% DAÑO MODERADO
x_moderate_pga=dy';
x_moderate_num=length(x_moderate_pga);
x_moderate_id=(1:length(x_moderate_pga))';

% DAÑO EXTENSO
x_extensive_pga=(dy+0.25*(du-dy))';
x_extensive_num=length(x_extensive_pga);
x_extensive_id=(1:length(x_extensive_pga))';

% DAÑO COLAPSO
x_collapse_pga=du';
x_collapse_num=length(x_collapse_pga);
x_collapse_id=(1:length(x_collapse_pga))';

x_ds_pga{1,1}=x_slight_pga;
x_ds_num(1,1)=x_slight_num;
x_ds_id{1,1}=x_slight_id;
x_ds_pga{1,2}=x_moderate_pga;
x_ds_num(1,2)=x_moderate_num;
x_ds_id{1,2}=x_moderate_id;
x_ds_pga{1,3}=x_extensive_pga;
x_ds_num(1,3)=x_extensive_num;
x_ds_id{1,3}=x_extensive_id;
x_ds_pga{1,4}=x_collapse_pga;
x_ds_num(1,4)=x_collapse_num;
x_ds_id{1,4}=x_collapse_id;

x=(0.1:0.1:20)'; % Valores de Sa hasta donde se grafican las curvas de fragilidad [g]

x_ds_pga_m=zeros(1,ds_num);
x_ds_pga_std=zeros(1,ds_num);
Pexc_ds=cell(1,ds_num);
for i=1:ds_num
    x_ds_pga_m(1,i)=exp(1/length(x_ds_pga{1,i})*sum(log(x_ds_pga{1,i})));
    % x_ds_pga_m(1,i)=mean(log(x_ds_pga{1,i}));
    x_ds_pga_std(1,i)=sqrt(1/(length(x_ds_pga{1,i})-1)*sum((log(x_ds_pga{1,i})/x_ds_pga_m(1,i)).^2));
    % x_ds_pga_std(1,i)=std(log(x_ds_pga{1,i}));
    Pexc_ds{1,i}=logncdf(x,log(x_ds_pga_m(1,i)),x_ds_pga_std(1,i));
    % Pexc_ds{1,i}=logncdf(x,x_ds_pga_m(1,i),x_ds_pga_std(1,i));
end

colors=['b';'g';'r';'k'];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% GRAFICO: CURVAS DE ESTADO DE DAÑO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(fig)
fig=fig+1;
for i=1:ds_num
    hold on
    plot(x_ds_pga{1,i},x_ds_id{1,i}/x_ds_num(1,i),'o','Markersize',3,'Color',colors(i))
    plot(x,Pexc_ds{1,i),'-','Color',colors(i))
end
legend(sprintf('PDA:\nDaño Ligero'),sprintf('CDF:\nDaño Ligero'),...
sprintf('PDA:\nDaño Moderado'),sprintf('CDF:\nDaño Moderado'),...
sprintf('PDA:\nDaño Extenso'),sprintf('CDF:\nDaño Extenso'),...
sprintf('PDA:\nDaño Colapso'),sprintf('CDF:\nDaño Colapso'),...
'Location','southoutside','FontSize',8,'Orientation','Horizontal','NumColumns',4)
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('Desplazamiento Espectral, Sd (cm)')
grid on
axis normal
yticks(0:0.1:1);
xticks(0:2:20);
box on
%title (sprintf('Curva de Estados de Daño. n=%d.',muestra),'FontSize',13)

fn = fullfile(fp, "CDS_" + muestra + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo
pause(10)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)
end
toc

```

## D.6 DS\_curve\_comparison.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Pushover Analysis (non-linear static analysis) Postprocessing %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Jorge A. Avila Haro (jorge.avila-haro@upc.edu)
% Dec 2018 -- ver 1.01
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Modificado por Murilo Cossovan Marques,
% Dec 2022
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la versión original post-procesa la población entera, sin utilizar ningún
% tipo de muestro.
%
% Esta modificación del código original crea una figura y una tabla para
% comparar los DS4 de varios tamaños de muestra.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
close all
clc
fig=1; % Figure counter
tic % Time counter (initialize)
g=9.81; % Gravitational constant, [m/s^2]
fp = 'MATLAB Drive/1000_muestras/Imagenes'; % Ubicación donde se guardarán las imágenes
load('AA_data_all_c.mat'); % Carga el array de matrices obtenidos de 'recopilacion_datos.m'
load('AA_info_c.mat');
muestra = 0;
D4=cell(1,size(data_all,2));
for j=1:size(data_all,2) % Guarda temporalmente la matriz j como 'data'
    data = data_all{j};
    data;
    muestra = size(data,2);

    dy = data(1,:);
    du = data(3,:);
    d_vbmax = data(5,:);

    [dy_sort, dy_sort_idx] = sort(dy);
    [du_sort, du_sort_idx] = sort(du);
    [d_vbmax_sort, d_vbmax_sort_idx] = sort(d_vbmax);

    xm_dy=exp(1/length(dy)*sum(log(dy)));
    beta_dy=sqrt(1/(length(dy)-1)*sum((log(dy/xm_dy)).^2));

    xm_du=exp(1/length(du)*sum(log(du)));
    beta_du=sqrt(1/(length(du)-1)*sum((log(du/xm_du)).^2));

    xm_d_vbmax=exp(1/length(d_vbmax)*sum(log(d_vbmax)));
    beta_d_vbmax=sqrt(1/(length(d_vbmax)-1)*sum((log(d_vbmax/xm_d_vbmax)).^2));

    log_xm_dy=log(xm_dy);
    log_xm_du=log(xm_du);
    log_xm_d_vbmax=log(xm_d_vbmax);

    y1_dy=lognpdf(dy_sort,log_xm_dy,beta_dy);
    y1_du=lognpdf(du_sort,log_xm_du,beta_du);
    y1_d_vbmax=lognpdf(d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax);

    y_dy=logncdf(dy_sort,log_xm_dy,beta_dy); % Same as y2_dy
    y2_dy=cdf('logn',dy_sort,log_xm_dy,beta_dy); % Same as y_dy
    y_du=logncdf(du_sort,log_xm_du,beta_du); % Same as y2_du
    y2_du=cdf('logn',du_sort,log_xm_du,beta_du); % Same as y_du
    y_d_vbmax=logncdf(d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax); % Same as y2_d_vbmax
    y2_d_vbmax=cdf('logn',d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax); % Same as y_d_vbmax

    xp=icdf('logn',y2_dy,log_xm_dy,beta_dy); % Same as dy_sort

    sample_cent_scale= (dy_sort-xm_dy)/beta_dy;
    [h_ks,p_ks,ksstat,cv_ks] = kstest(sample_cent_scale);

    [f,x_values] = ecdf(dy_sort); % Empirical cumulative distribution function

    ds_num=4; % número de estados de daño (sin contar el estado de no-daño o nulo)

```

```

% DAÑO LEVE
% x_slight_disp=[0.0034462; 0.0037304; 0.0045612; 0.0039373; 0.0035415; 0.0036646; 0.0047938; 0.0037555;
0.0034308; 0.0039969; 0.0031724; 0.0035908; 0.0038056; 0.0044107; 0.0043815; 0.0049046; 0.0032769; 0.003395;
0.0042985; 0.0037147; 0.0049688];
x_slight_pga=0.7*dy';
x_slight_num=length(x_slight_pga);
x_slight_id=(1:length(x_slight_pga))';

% DAÑO MODERADO
x_moderate_pga=dy';
x_moderate_num=length(x_moderate_pga);
x_moderate_id=(1:length(x_moderate_pga))';

% DAÑO EXTENSO
x_extensive_pga=(dy+0.25*(du-dy))';
x_extensive_num=length(x_extensive_pga);
x_extensive_id=(1:length(x_extensive_pga))';

% DAÑO COLAPSO
x_collapse_pga=du';
x_collapse_num=length(x_collapse_pga);
x_collapse_id=(1:length(x_collapse_pga))';

x_ds_pga{1,1}=x_slight_pga;
x_ds_num(1,1)=x_slight_num;
x_ds_id{1,1}=x_slight_id;
x_ds_pga{1,2}=x_moderate_pga;
x_ds_num(1,2)=x_moderate_num;
x_ds_id{1,2}=x_moderate_id;
x_ds_pga{1,3}=x_extensive_pga;
x_ds_num(1,3)=x_extensive_num;
x_ds_id{1,3}=x_extensive_id;
x_ds_pga{1,4}=x_collapse_pga;
x_ds_num(1,4)=x_collapse_num;
x_ds_id{1,4}=x_collapse_id;

x=(0.1:0.01:20)'; % Valores de Sa hasta donde se grafican las curvas de fragilidad [g]

x_ds_pga_m=zeros(1,ds_num);
x_ds_pga_std=zeros(1,ds_num);
Pexc_ds=cell(1,ds_num);
for i=1:ds_num
    x_ds_pga_m(1,i)=exp(1/length(x_ds_pga{1,i})*sum(log(x_ds_pga{1,i})));
    % x_ds_pga_m(1,i)=mean(log(x_ds_pga{1,i}));
    x_ds_pga_std(1,i)=sqrt(1/(length(x_ds_pga{1,i})-1)*sum((log(x_ds_pga{1,i})/x_ds_pga_m(1,i)).^2));
    % x_ds_pga_std(1,i)=std(log(x_ds_pga{1,i}));
    Pexc_ds{1,i}=logncdf(x,log(x_ds_pga_m(1,i)),x_ds_pga_std(1,i));
    % Pexc_ds{1,i}=logncdf(x,x_ds_pga_m(1,i),x_ds_pga_std(1,i));
end

D4{1,j}=Pexc_ds{1,4}; %Guarda las curvas DS4 para graficarlas

colors=['b';'g';'r';'k'];

end

tol = 0.001;
%Busca los valores de x para ciertos y, para n=1000.
x50_1000=mean(x(abs(0.5-D4{1,6}) < tol));
x10_1000=mean(x(abs(0.1-D4{1,6}) < tol));
x90_1000=mean(x(abs(0.9-D4{1,6}) < tol));

%Busca los valores de x para ciertos y, para n=52.
x50_52=mean(x(abs(0.5-D4{1,1}) < tol));
x10_52=mean(x(abs(0.1-D4{1,1}) < tol));
x90_52=mean(x(abs(0.9-D4{1,1}) < tol));

%Busca los valores de x para ciertos y, para n=90.
x50_90=mean(x(abs(0.5-D4{1,2}) < tol));
x10_90=mean(x(abs(0.1-D4{1,2}) < tol));
x90_90=mean(x(abs(0.9-D4{1,2}) < tol));

%Busca los valores de x para ciertos y, para n=213.
x50_213=mean(x(abs(0.5-D4{1,3}) < tol));
x10_213=mean(x(abs(0.1-D4{1,3}) < tol));
x90_213=mean(x(abs(0.9-D4{1,3}) < tol));

%Busca los valores de x para ciertos y, para n=278.
x50_278=mean(x(abs(0.5-D4{1,4}) < tol));
x10_278=mean(x(abs(0.1-D4{1,4}) < tol));
x90_278=mean(x(abs(0.9-D4{1,4}) < tol));

%Busca los valores de x para ciertos y, para n=399.
x50_399=mean(x(abs(0.5-D4{1,5}) < tol));
x10_399=mean(x(abs(0.1-D4{1,5}) < tol));
x90_399=mean(x(abs(0.9-D4{1,5}) < tol));

```

```

colors2=['r';'g';'b';'c';'m';'k'];

figure(fig)
fig=fig+1;

hold on

plot(x,D4{1,1},'Color',colors2(1))
plot(x,D4{1,2},'Color',colors2(2))
plot(x,D4{1,3},'Color',colors2(3))
plot(x,D4{1,4},'Color',colors2(4))
plot(x,D4{1,5},'Color',colors2(5))
plot(x,D4{1,6},'Color',colors2(6))

%Líneas de límite superior
xline(x90_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x90_1000*0.95,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x90_1000*1.05,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')

%Líneas de límite medio
xline(x50_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x50_1000*0.95,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x50_1000*1.05,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')

%Líneas de límite inferior
xline(x10_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x10_1000*0.95,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x10_1000*1.05,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')

%Puntos de comparación DS4_52
plot(x50_52,0.5,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(1))
plot(x10_52,0.1,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(1))
plot(x90_52,0.9,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(1))

%Puntos de comparación DS4_90
plot(x50_90,0.5,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(2))
plot(x10_90,0.1,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(2))
plot(x90_90,0.9,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(2))

%Puntos de comparación DS4_213
plot(x50_213,0.5,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(3))
plot(x10_213,0.1,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(3))
plot(x90_213,0.9,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(3))

%Puntos de comparación DS4_278
plot(x50_278,0.5,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(4))
plot(x10_278,0.1,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(4))
plot(x90_278,0.9,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(4))

%Puntos de comparación DS4_399
plot(x50_399,0.5,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(5))
plot(x10_399,0.1,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(5))
plot(x90_399,0.9,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(5))

%Puntos de comparación DS4_1000
plot(x50_1000,0.5,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(6))
plot(x10_1000,0.1,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(6))
plot(x90_1000,0.9,'.', 'MarkerSize',15,'color',colors2(6))

grid on
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('Aceleración Espectral, Sa (g)')
xlim([6 18])
ylim([0 1])
title('Comparación de Curvas de Estado de Daño 4, Colapso')
legend('n=52','n=90','n=213','n=278','n=399','n=1000',...
       'Orientation','horizontal', ...
       'Location','southoutside')

figure(fig)
fig=fig+1;

hold on

plot(x,D4{1,1},'Color',colors2(1))
plot(x,D4{1,2},'Color',colors2(2))
plot(x,D4{1,3},'Color',colors2(3))
plot(x,D4{1,4},'Color',colors2(4))
plot(x,D4{1,5},'Color',colors2(5))
plot(x,D4{1,6},'Color',colors2(6))

xline(x90_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x90_1000*0.95,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x90_1000*1.05,'LineStyle','-.','linewidth',0.3,'color','k')

%Líneas de límite medio
xline(x50_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')

```

```

xline(x50_1000*0.95,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x50_1000*1.05,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')

%Líneas de límite inferior
xline(x10_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x10_1000*0.95,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x10_1000*1.05,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')
%Puntos de comparación DS4_52
plot(x50_52,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(1))
plot(x10_52,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(1))
plot(x90_52,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(1))

%Puntos de comparación DS4_90
plot(x50_90,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(2))
plot(x10_90,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(2))
plot(x90_90,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(2))

%Puntos de comparación DS4_213
plot(x50_213,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(3))
plot(x10_213,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(3))
plot(x90_213,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(3))

%Puntos de comparación DS4_278
plot(x50_278,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(4))
plot(x10_278,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(4))
plot(x90_278,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(4))

%Puntos de comparación DS4_399
plot(x50_399,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(5))
plot(x10_399,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(5))
plot(x90_399,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(5))

%Puntos de comparación DS4_1000
plot(x50_1000,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(6))
plot(x10_1000,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(6))
plot(x90_1000,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(6))

grid on
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('Aceleración Espectral, Sa (g)')
title('Comparación de Curvas de Estado de Daño 4, Colapso')
legend('n=52','n=90','n=213','n=278','n=399','n=1000', ...
'Orientation','horizontal', ...
'Location','southoutside')
xlim([7.5 9.5])
ylim([0 0.25])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(fig)
fig=fig+1;

hold on

plot(x,D4{1,1},'Color',colors2(1))
plot(x,D4{1,2},'Color',colors2(2))
plot(x,D4{1,3},'Color',colors2(3))
plot(x,D4{1,4},'Color',colors2(4))
plot(x,D4{1,5},'Color',colors2(5))
plot(x,D4{1,6},'Color',colors2(6))

xline(x90_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x90_1000*0.95,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x90_1000*1.05,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')

%Líneas de límite medio
xline(x50_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x50_1000*0.95,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x50_1000*1.05,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')

%Líneas de límite inferior
xline(x10_1000,'LineStyle','--','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x10_1000*0.95,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')
xline(x10_1000*1.05,'LineStyle','-','linewidth',0.3,'color','k')

%Puntos de comparación DS4_52
plot(x50_52,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(1))
plot(x10_52,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(1))
plot(x90_52,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(1))

%Puntos de comparación DS4_90
plot(x50_90,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(2))
plot(x10_90,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(2))
plot(x90_90,0.9,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(2))

%Puntos de comparación DS4_213
plot(x50_213,0.5,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(3))
plot(x10_213,0.1,'.','MarkerSize',15,'color',colors2(3))

```

```

plot(x90_213,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(3))

%Puntos de comparación DS4_278
plot(x50_278,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(4))
plot(x10_278,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(4))
plot(x90_278,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(4))

%Puntos de comparación DS4_399
plot(x50_399,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(5))
plot(x10_399,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(5))
plot(x90_399,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(5))

%Puntos de comparación DS4_1000
plot(x50_1000,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(6))
plot(x10_1000,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(6))
plot(x90_1000,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(6))

grid on
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('Aceleración Espectral, Sa (g)')
title('Comparación de Curvas de Estado de Daño 4, Colapso')
legend('n=52', 'n=90', 'n=213', 'n=278', 'n=399', 'n=1000', ...
       'Orientation', 'horizontal', ...
       'Location', 'southoutside')
xlim([10.2 11.8])
ylim([0.48 0.52])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(fig)
fig=fig+1;

hold on

plot(x,D4{1,1}, 'Color', colors2(1))
plot(x,D4{1,2}, 'Color', colors2(2))
plot(x,D4{1,3}, 'Color', colors2(3))
plot(x,D4{1,4}, 'Color', colors2(4))
plot(x,D4{1,5}, 'Color', colors2(5))
plot(x,D4{1,6}, 'Color', colors2(6))

xline(x90_1000, 'LineStyle', '--', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')
xline(x90_1000*0.95, 'LineStyle', '-.', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')
xline(x90_1000*1.05, 'LineStyle', '-.', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')

%Líneas de límite medio
xline(x50_1000, 'LineStyle', '--', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')
xline(x50_1000*0.95, 'LineStyle', '-.', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')
xline(x50_1000*1.05, 'LineStyle', '-.', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')

%Líneas de límite inferior
xline(x10_1000, 'LineStyle', '--', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')
xline(x10_1000*0.95, 'LineStyle', '-.', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')
xline(x10_1000*1.05, 'LineStyle', '-.', 'linewidth', 0.3, 'color', 'k')

%Puntos de comparación DS4_52
plot(x50_52,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(1))
plot(x10_52,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(1))
plot(x90_52,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(1))

%Puntos de comparación DS4_90
plot(x50_90,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(2))
plot(x10_90,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(2))
plot(x90_90,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(2))

%Puntos de comparación DS4_213
plot(x50_213,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(3))
plot(x10_213,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(3))
plot(x90_213,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(3))

%Puntos de comparación DS4_278
plot(x50_278,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(4))
plot(x10_278,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(4))
plot(x90_278,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(4))

%Puntos de comparación DS4_399
plot(x50_399,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(5))
plot(x10_399,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(5))
plot(x90_399,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(5))

%Puntos de comparación DS4_1000
plot(x50_1000,0.5, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(6))
plot(x10_1000,0.1, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(6))
plot(x90_1000,0.9, '.', 'MarkerSize', 15, 'color', colors2(6))

grid on
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('Aceleración Espectral, Sa (g)')

```

```

title('Comparación de Curvas de Estado de Daño 4, Colapso')
legend('n=52','n=90','n=213','n=278','n=399','n=1000', ...
       'Orientation','horizontal', ...
       'Location','southoutside')
xlim([13.2 15.2])
ylim([0.85 0.95])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% TABLA DE VALORES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Obtiene los puntos de control para cada curva

x10=transpose(zeros(size(D4)));
x50=transpose(zeros(size(D4)));
x90=transpose(zeros(size(D4)));

tol = 0.001; % Tolerancia que permite obtener los valores a partir del CDF

for i=1:size(D4,2)
    x10(i,1) = mean(x(abs(0.10-D4{1,i}) < tol));
    x50(i,1) = mean(x(abs(0.50-D4{1,i}) < tol));
    x90(i,1) = mean(x(abs(0.90-D4{1,i}) < tol));
end

% Guarda las n e IC asociada a cada curva

n=info(:,1);
IC=info(:,2);

% Crea la tabla de valores y la exporta a un archivo excel

DS_table=table(n,IC,x10,x50,x90);

writetable(DS_table,'AA_DS_table_short.xlsx')

toc

```

## D.7 DS\_table.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Pushover Analysis (non-linear static analysis) Postprocessing %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Jorge A. Avila Haro (jorge.avila-haro@upc.edu)
% Dec 2018 -- ver 1.01
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Modificado por Murilo Cossovan Marques
% Dec 2022
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% la versión original post-procesa la población entera, sin utilizar ningún
% tipo de muestro.
%
% Esta modificación del código original obtiene una tabla que compara los
% DS4 para cada tamaño de muestra.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
close all
clc

fig=1; % Figure counter
tic % Time counter (initialize)
g=9.81; % Gravitational constant, [m/s^2]

fp = '/MATLAB Drive/1000_muestras/Imagenes'; % Ubicación donde se guardarán las imágenes
load('AA_data_all_g.mat'); % Carga el array de matrices obtenidos de 'recopilacion_datos.m'
load('AA_info_g.mat');
muestra = 0;
D4=cell(1,size(data_all,2));
for j=1:size(data_all,2) % Guarda temporalmente la matriz j como 'data'
    data = data_all{j};
    data;
    muestra = size(data,2);

    dy = data(1,:);
    du = data(3,:);
    d_vbmax = data(5,:);

    [dy_sort, dy_sort_idx] = sort(dy);
    [du_sort, du_sort_idx] = sort(du);
    [d_vbmax_sort, d_vbmax_sort_idx] = sort(d_vbmax);

    xm_dy=exp(1/length(dy)*sum(log(dy)));
    beta_dy=sqrt(1/(length(dy)-1)*sum((log(dy/xm_dy)).^2));

    xm_du=exp(1/length(du)*sum(log(du)));
    beta_du=sqrt(1/(length(du)-1)*sum((log(du/xm_du)).^2));

    xm_d_vbmax=exp(1/length(d_vbmax)*sum(log(d_vbmax)));
    beta_d_vbmax=sqrt(1/(length(d_vbmax)-1)*sum((log(d_vbmax/xm_d_vbmax)).^2));

    log_xm_dy=log(xm_dy);
    log_xm_du=log(xm_du);
    log_xm_d_vbmax=log(xm_d_vbmax);

    y1_dy=lognpdf(dy_sort,log_xm_dy,beta_dy);
    y1_du=lognpdf(du_sort,log_xm_du,beta_du);
    y1_d_vbmax=lognpdf(d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax);

    y2_dy=logncdf(dy_sort,log_xm_dy,beta_dy); % Same as y2_dy
    y2_du=logncdf(du_sort,log_xm_du,beta_du); % Same as y2_dy
    y2_d_vbmax=logncdf(d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax); % Same as y2_dy
    y2_d_vbmax=cdf('logn',d_vbmax_sort,log_xm_d_vbmax,beta_d_vbmax); % Same as y2_d_vbmax

    xp=icdf('logn',y2_dy,log_xm_dy,beta_dy); % Same as dy_sort

    sample_cent_scale=(dy_sort-xm_dy)/beta_dy;
    [h_ks,p_ks,ksstat,cv_ks] = kstest(sample_cent_scale);

    [f,x_values] = ecdf(dy_sort); % Empirical cumulative distribution function

    ds_num=4; % número de estados de daño (sin contar el estado de no-daño o nulo)

```

```

% DAÑO LEVE
% x_slight_disp=[0.0034462; 0.0037304; 0.0045612; 0.0039373; 0.0035415; 0.0036646; 0.0047938; 0.0037555;
0.0034308; 0.0039969; 0.0031724; 0.0035908; 0.0038056; 0.0044107; 0.0043815; 0.0049046; 0.0032769; 0.003395;
0.0042985; 0.0037147; 0.0049688];
x_slight_pga=0.7*dy';
x_slight_num=length(x_slight_pga);
x_slight_id=(1:length(x_slight_pga))';

% DAÑO MODERADO
x_moderate_pga=dy';
x_moderate_num=length(x_moderate_pga);
x_moderate_id=(1:length(x_moderate_pga))';

% DAÑO EXTENSO
x_extensive_pga=(dy+0.25*(du-dy))';
x_extensive_num=length(x_extensive_pga);
x_extensive_id=(1:length(x_extensive_pga))';

% DAÑO COLAPSO
x_collapse_pga=du';
x_collapse_num=length(x_collapse_pga);
x_collapse_id=(1:length(x_collapse_pga))';

x_ds_pga{1,1}=x_slight_pga;
x_ds_num{1,1}=x_slight_num;
x_ds_id{1,1}=x_slight_id;
x_ds_pga{1,2}=x_moderate_pga;
x_ds_num{1,2}=x_moderate_num;
x_ds_id{1,2}=x_moderate_id;
x_ds_pga{1,3}=x_extensive_pga;
x_ds_num{1,3}=x_extensive_num;
x_ds_id{1,3}=x_extensive_id;
x_ds_pga{1,4}=x_collapse_pga;
x_ds_num{1,4}=x_collapse_num;
x_ds_id{1,4}=x_collapse_id;
x=(0.1:0.01:20)'; % Valores de Sa hasta donde se grafican las curvas de fragilidad [g]
x_ds_pga_m=zeros(1,ds_num);
x_ds_pga_std=zeros(1,ds_num);
Pexc_ds=cell(1,ds_num);
for i=1:ds_num
    x_ds_pga_m(1,i)=exp(1/length(x_ds_pga{1,i})*sum(log(x_ds_pga{1,i})));
    % x_ds_pga_m(1,i)=mean(log(x_ds_pga{1,i}));
    x_ds_pga_std(1,i)=sqrt(1/(length(x_ds_pga{1,i})-1)*sum((log(x_ds_pga{1,i})/x_ds_pga_m(1,i)).^2));
    % x_ds_pga_std(1,i)=std(log(x_ds_pga{1,i}));
    Pexc_ds{1,i}=logncdf(x,log(x_ds_pga_m(1,i)),x_ds_pga_std(1,i));
    % Pexc_ds{1,i}=logncdf(x,x_ds_pga_m(1,i),x_ds_pga_std(1,i));
end
D4{1,j}=Pexc_ds{1,4}; % Guarda las curvas DS4 para graficarlas
end

% Obtiene los puntos de control para cada curva
x05=transpose(zeros(size(D4)));
x10=transpose(zeros(size(D4)));
x15=transpose(zeros(size(D4)));
x20=transpose(zeros(size(D4)));
x25=transpose(zeros(size(D4)));
x30=transpose(zeros(size(D4)));
x35=transpose(zeros(size(D4)));
x40=transpose(zeros(size(D4)));
x45=transpose(zeros(size(D4)));
x50=transpose(zeros(size(D4)));
x55=transpose(zeros(size(D4)));
x60=transpose(zeros(size(D4)));
x65=transpose(zeros(size(D4)));
x70=transpose(zeros(size(D4)));
x75=transpose(zeros(size(D4)));
x80=transpose(zeros(size(D4)));
x85=transpose(zeros(size(D4)));
x90=transpose(zeros(size(D4)));
x95=transpose(zeros(size(D4)));
tol = 0.001; % Tolerancia que permite obtener los valores a partir del CDF
for i=1:size(D4,2)
    x05(i,1) = mean(x(abs(0.05-D4{1,i}) < tol));
    x10(i,1) = mean(x(abs(0.10-D4{1,i}) < tol));
    x15(i,1) = mean(x(abs(0.15-D4{1,i}) < tol));
    x20(i,1) = mean(x(abs(0.20-D4{1,i}) < tol));
    x25(i,1) = mean(x(abs(0.25-D4{1,i}) < tol));
    x30(i,1) = mean(x(abs(0.30-D4{1,i}) < tol));
    x35(i,1) = mean(x(abs(0.35-D4{1,i}) < tol));
    x40(i,1) = mean(x(abs(0.40-D4{1,i}) < tol));
    x45(i,1) = mean(x(abs(0.45-D4{1,i}) < tol));
    x50(i,1) = mean(x(abs(0.50-D4{1,i}) < tol));
    x55(i,1) = mean(x(abs(0.55-D4{1,i}) < tol));
    x60(i,1) = mean(x(abs(0.60-D4{1,i}) < tol));
    x65(i,1) = mean(x(abs(0.65-D4{1,i}) < tol));
    x70(i,1) = mean(x(abs(0.70-D4{1,i}) < tol));

```

```
x75(i,1) = mean(x(abs(0.75-D4{1,i}) < tol));
x80(i,1) = mean(x(abs(0.80-D4{1,i}) < tol));
x85(i,1) = mean(x(abs(0.85-D4{1,i}) < tol));
x90(i,1) = mean(x(abs(0.90-D4{1,i}) < tol));
x95(i,1) = mean(x(abs(0.95-D4{1,i}) < tol));
end

% Guarda las n e IC asociada a cada curva
n=info(:,1);
IC=info(:,2);
% Crea la tabla de valores y la exporta a un archivo excel
DS_table=table(n,IC,x05,x10,x15,x20,x25,x30,x35,x40,x45,x50, ...
               x55,x60,x65,x70,x75,x80,x85,x90,x95);

writetable(DS_table,'AA_DS_table_long.xlsx')
toc
```

## D.8 PushoverPP\_mod.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PUSHOVER postprocessing %%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Jorge Avila Haro (jorge.avila-haro@upc.edu)
% Ver 1.0 - Feb 2019
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Modificado por Murilo Cossovan Marques
% Dec 2022
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtiene curvas de IM, representación bilineal, y distribución de
% probabilidad para un rango dado de muestras
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
close all
clc
fig = 1;
tic
fp = '/Users/MuriloMarques/MATLAB-Drive/02_Códigos_JAAH_Frag_DI/AA_Resultados'; % Ubicación donde se guardarán
las imágenes
load('materialProperties.mat')
load('M153_POMAZ_X_P05_20pctDecay.mat')
load('AA_relacion_c.mat')
muestra = 0;
fileNumbers = number;
for k=1:size(relacion_all,2)

    muestra=size(relacion_all{k},1);
    numSample_ = 1:length(relacion_all{k});
    numSample = transpose(relacion_all{k});

    yieldingPoint = zeros(length(numSample),2);
    ultimatePoint = zeros(length(numSample),2);
    maxBaseShearPoint = zeros(length(numSample),2);
    for i = numSample_
        yieldingPoint(i,1) = dRoof_yield(numSample(i));
        yieldingPoint(i,2) = vBase_yield(numSample(i));
        ultimatePoint(i,1) = dRoof_ult(numSample(i));
        ultimatePoint(i,2) = vBase_ult(numSample(i));
        maxBaseShearPoint(i,1) = dRoof_maxVbase(numSample(i));
        maxBaseShearPoint(i,2) = vBase_max(numSample(i));
    end

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % 20% decay criteria
    [yieldingPointStats, ultimatePointStats, maxBaseShearPointStats] = statsCutCC(numSample_, ...
        yieldingPoint, ultimatePoint, maxBaseShearPoint);

    dy_mean = yieldingPointStats(1,1)*100;
    dy_median = yieldingPointStats(1,3)*100;
    dy_std = yieldingPointStats(1,5)*100;
    dy_min = yieldingPointStats(1,7)*100;
    dy_max = yieldingPointStats(1,9)*100;

    du_mean = ultimatePointStats(1,1)*100;
    du_median = ultimatePointStats(1,3)*100;
    du_std = ultimatePointStats(1,5)*100;
    du_min = ultimatePointStats(1,7)*100;
    du_max = ultimatePointStats(1,9)*100;

    d_vBmax_mean = maxBaseShearPointStats(1,1)*100;
    d_vBmax_median = maxBaseShearPointStats(1,3)*100;
    d_vBmax_std = maxBaseShearPointStats(1,5)*100;
    d_vBmax_min = maxBaseShearPointStats(1,7)*100;
    d_vBmax_max = maxBaseShearPointStats(1,9)*100;

    y_vBase_mean = yieldingPointStats(1,2)/1000;
    y_vBase_median = yieldingPointStats(1,4)/1000;
    y_vBase_std = yieldingPointStats(1,6)/1000;
    y_vBase_min = yieldingPointStats(1,8)/1000;
    y_vBase_max = yieldingPointStats(1,10)/1000;

    u_vBase_mean = ultimatePointStats(1,2)/1000;
    u_vBase_median = ultimatePointStats(1,4)/1000;
    u_vBase_std = ultimatePointStats(1,6)/1000;
    u_vBase_min = ultimatePointStats(1,8)/1000;
    u_vBase_max = ultimatePointStats(1,10)/1000;

```

```

vBmax_mean = maxBaseShearPointStats(1,2)/1000;
vBmax_median = maxBaseShearPointStats(1,4)/1000;
vBmax_std = maxBaseShearPointStats(1,6)/1000;
vBmax_min = maxBaseShearPointStats(1,8)/1000;
vBmax_max = maxBaseShearPointStats(1,10)/1000;

TableStatsCC_sample = table(dy_mean, dy_median, dy_std, dy_min, dy_max,...
    du_mean, du_median, du_std, du_min, du_max,...
    d_vBmax_mean, d_vBmax_median, d_vBmax_std, d_vBmax_min, d_vBmax_max,...
    y_vBase_mean, y_vBase_median, y_vBase_std, y_vBase_min, y_vBase_max,...
    u_vBase_mean, u_vBase_median, u_vBase_std, u_vBase_min, u_vBase_max,...
    vBmax_mean, vBmax_median, vBmax_std, vBmax_min, vBmax_max);

[Sd_ADRS, Sa_ADRS, yieldPoint_ADRS] = convertCctoADRS_sample(numSample_, numSample, ...
    dRoof, vBase, yieldingPoint, gamma, mStar);

[Sd, Sa] = normalizeMeshOfCS(numSample_, ...
    Sd_ADRS, Sa_ADRS);

[yieldingPointN2_Bilinear, ultimatePointN2_Bilinear, yieldingPointN2_Bilinear_60pct] =
obtainBilinearCurveN2(numSample_, ...
    Sd, Sa);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtain bilinear curve
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(fig)
fig=fig+1;
hold on
for i = numSample_
    plot(yieldingPointN2_Bilinear(i,1)*100, yieldingPointN2_Bilinear(i,2), '^', 'Color', 'r')
    plot(ultimatePointN2_Bilinear(i,1)*100, ultimatePointN2_Bilinear(i,2), 'o', 'Color', 'b')
end

plot([0 median(yieldingPointN2_Bilinear(:,1))*100 median(ultimatePointN2_Bilinear(:,1))*100], ...
    [0 median(yieldingPointN2_Bilinear(:,2)) median(ultimatePointN2_Bilinear(:,2))], 'k', 'LineWidth', 2)
h = zeros(3, 1);
h(1) = plot(NaN,NaN,'^r');
h(2) = plot(NaN,NaN,'ob');
h(3) = plot(NaN,NaN,'Color','k','LineWidth',2);
legend(h, 'Punto de Fluencia', 'Punto Último', 'Representación Bilineal', 'Location', 'Southeast');
xlabel('Desplazamiento Espectral, S_d (cm)')
ylabel('Aceleración Espectral, S_a (g)')
grid on
box on

fn = fullfile(fp, "BILINEAL_" + muestra + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo
pause(5)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtain stats for dy, du of bilinears
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% N2
Sdy_N2_mean = mean(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_median = median(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_std = std(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_min = min(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_max = max(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);

Say_N2_mean = mean(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_median = median(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_std = std(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_min = min(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_max = max(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));

Sdu_N2_mean = mean(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_median = median(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_std = std(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_min = min(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_max = max(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);

Sau_N2_mean = mean(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_median = median(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_std = std(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_min = min(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_max = max(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));

[DamageStates_N2_RISKUE] = defineDamageStates_RISKUE(numSample_, ...
    yieldingPointN2_Bilinear, ultimatePointN2_Bilinear);

[xi_N2_RISKUE, excProb_N2_RISKUE, PDF_N2_RISKUE, CDF_N2_RISKUE, sortedDS_N2_RISKUE] = fragility(numSample_, ...
    DamageStates_N2_RISKUE);

[excProbN2_N2_RISKUE] = fragility2(fileNumbers, ...

```

```

    DamageStates_N2_RISKUE);

[probDS_N2_RISKUE, damageRatio_N2_RISKUE, cumMeanDamageRatio_N2_RISKUE] = probability(numSample_, ...
excProb_N2_RISKUE);

[probDS2_N2_RISKUE, damageRatio2_N2_RISKUE, cumMeanDamageRatio2_N2_RISKUE] = probability(fileNumbers, ...
excProb2_N2_RISKUE);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Distribución DS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
colors=['b','g','r','k'];

figure(fig)
fig = fig+1;
for i = 1:size(DamageStates_N2_RISKUE, 2)
    hold on
    plot(sortedDS_N2_RISKUE(:,i)*100, PDF_N2_RISKUE{1,i},'color',colors(i))
end
legend('DS1', 'DS2', 'DS3', 'DS4')
ylabel('PDF Lognormal')
xlabel('Desplazamiento Espectral, S_d (cm)')
grid on
box on

fn = fullfile(fp, "LOGNPDF_" + muestra + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo
pause(5)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtain Probability of ocurrence
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(fig)
fig=fig+1;
hold on
grid on
subplot(2,3,2)
bar(xi_N2_RISKUE*100, probDS_N2_RISKUE{1,1}, 'stacked', 'FaceColor','cyan','EdgeColor','cyan')
ylim([0 1])
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('S_d (cm)')
legend('Nulo','Location','southoutside')
grid on
subplot(2,3,3)
bar(xi_N2_RISKUE*100, probDS_N2_RISKUE{1,2}, 'stacked', 'FaceColor','b','EdgeColor','b')
ylim([0 1])
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('S_d (cm)')
legend('Ligero','Location','southoutside')
grid on
subplot(2,3,4)
bar(xi_N2_RISKUE*100, probDS_N2_RISKUE{1,3}, 'stacked', 'FaceColor','g','EdgeColor','g')
ylim([0 1])
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('S_d (cm)')
legend('Moderado','Location','southoutside')
grid on
subplot(2,3,5)
bar(xi_N2_RISKUE*100, probDS_N2_RISKUE{1,4}, 'stacked', 'FaceColor','r','EdgeColor','r')
ylim([0 1])
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('S_d (cm)')
legend('Extenso','Location','southoutside')
grid on
subplot(2,3,6)
bar(xi_N2_RISKUE*100, probDS_N2_RISKUE{1,5}, 'stacked', 'FaceColor','k','EdgeColor','k')
ylim([0 1])
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
xlabel('S_d (cm)')
legend('Colapso','Location','southoutside')
grid on

fn = fullfile(fp, "DistDS_" + muestra + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo
pause(5)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtain Damage Index
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[DI_N2_RISKUE]=damageIndex(numSample_, probDS_N2_RISKUE);
DIy{1,k}=DI_N2_RISKUE; %Guarda las curvas DI para graficarlas
DIx{1,k}=xi_N2_RISKUE;

figure(fig)
fig = fig+1;
plot(xi_N2_RISKUE*100, DI_N2_RISKUE, 'b')

```

```

legend(sprintf('DI, n=%d.',muestra))
xlabel('Desplazamiento Espectral, S_d (cm)')
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
% title('Índice de Daño, DI')
grid on

fn = fullfile(fp, "DI_" + muestra + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo
pause(5)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtiene comparación gráfica de DI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(fig)
fig=fig+1;
hold on
for j=1:size(DIy,2)
    plot(DIx{j}*100,DIy{j})
end
legend('DI, n=52','DI, n=90','DI, n=213','DI, n=278','DI, n=399','DI, n=1000','Location','southeast')
xlabel('Desplazamiento Espectral, S_d (cm)')
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
grid on
box on

fn = fullfile(fp, "DI_" + "all" + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo
pause(5)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)
toc

```

## D.9 DI\_table.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PUSHOVER postprocessing %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Jorge Avila Haro (jorge.avila-haro@upc.edu)
% Ver 1.0 - Feb 2019
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Modificado por Murilo Cossovan Marques
% Dec 2022
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Crea una comparación gráfica de los DI dado un rango de muestras
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear
close all
clc
fig = 1;
tic
fp = '/Users/MuriloMarques/MATLAB-Drive/02_Códigos_JAAH_Frag_DI/AA_Resultados'; % Ubicación donde se guardarán
las imágenes
load('materialProperties.mat')
load('M153_POMAZ_X_POS_20pctDecay.mat')
load('AA_relacion_g.mat')
load('AA_data_all_g.mat'); % Carga el array de matrices obtenidos de 'recopilacion_datos.m'
load('AA_info_g.mat');
muestra = 0;
fileNumbers = number;
for k=1:size(relacion_all,2)

    muestra=size(relacion_all{k},1);
    numSample_ = 1:length(relacion_all{k});
    numSample = transpose(relacion_all{k});

    yieldingPoint = zeros(length(numSample),2);
    ultimatePoint = zeros(length(numSample),2);
    maxBaseShearPoint = zeros(length(numSample),2);
    for i = numSample_
        yieldingPoint(i,1) = dRoof_yield(numSample(i));
        yieldingPoint(i,2) = vBase_yield(numSample(i));
        ultimatePoint(i,1) = dRoof_ult(numSample(i));
        ultimatePoint(i,2) = vBase_ult(numSample(i));
        maxBaseShearPoint(i,1) = dRoof_maxVbase(numSample(i));
        maxBaseShearPoint(i,2) = vBase_max(numSample(i));
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 20% decay criteria
[yieldingPointStats, ultimatePointStats, maxBaseShearPointStats] = statsCutCC(numSample_, ...
    yieldingPoint, ultimatePoint, maxBaseShearPoint);

dy_mean = yieldingPointStats(1,1)*100;
dy_median = yieldingPointStats(1,3)*100;
dy_std = yieldingPointStats(1,5)*100;
dy_min = yieldingPointStats(1,7)*100;
dy_max = yieldingPointStats(1,9)*100;

du_mean = ultimatePointStats(1,1)*100;
du_median = ultimatePointStats(1,3)*100;
du_std = ultimatePointStats(1,5)*100;
du_min = ultimatePointStats(1,7)*100;
du_max = ultimatePointStats(1,9)*100;

d_vBmax_mean = maxBaseShearPointStats(1,1)*100;
d_vBmax_median = maxBaseShearPointStats(1,3)*100;
d_vBmax_std = maxBaseShearPointStats(1,5)*100;
d_vBmax_min = maxBaseShearPointStats(1,7)*100;
d_vBmax_max = maxBaseShearPointStats(1,9)*100;

y_vBase_mean = yieldingPointStats(1,2)/1000;
y_vBase_median = yieldingPointStats(1,4)/1000;
y_vBase_std = yieldingPointStats(1,6)/1000;
y_vBase_min = yieldingPointStats(1,8)/1000;
y_vBase_max = yieldingPointStats(1,10)/1000;

u_vBase_mean = ultimatePointStats(1,2)/1000;
u_vBase_median = ultimatePointStats(1,4)/1000;
u_vBase_std = ultimatePointStats(1,6)/1000;
u_vBase_min = ultimatePointStats(1,8)/1000;
u_vBase_max = ultimatePointStats(1,10)/1000;

```

```

vBmax_mean = maxBaseShearPointStats(1,2)/1000;
vBmax_median = maxBaseShearPointStats(1,4)/1000;
vBmax_std = maxBaseShearPointStats(1,6)/1000;
vBmax_min = maxBaseShearPointStats(1,8)/1000;
vBmax_max = maxBaseShearPointStats(1,10)/1000;

TableStatsCC_sample = table(dy_mean, dy_median, dy_std, dy_min, dy_max,...
    du_mean, du_median, du_std, du_min, du_max,...
    d_vBmax_mean, d_vBmax_median, d_vBmax_std, d_vBmax_min, d_vBmax_max,...
    y_vBase_mean, y_vBase_median, y_vBase_std, y_vBase_min, y_vBase_max,...
    u_vBase_mean, u_vBase_median, u_vBase_std, u_vBase_min, u_vBase_max,...
    vBmax_mean, vBmax_median, vBmax_std, vBmax_min, vBmax_max);

[Sd_ADRS, Sa_ADRS, yieldPoint_ADRS] = convertCCtoADRS_sample(numSample_, numSample, ...
    dRoof, vBase, yieldingPoint, gamma, mStar);

[Sd, Sa] = normalizeMeshOfCS(numSample_, ...
    Sd_ADRS, Sa_ADRS);

[yieldingPointN2_Bilinear, ultimatePointN2_Bilinear, yieldingPointN2_Bilinear_60pct] =
obtainBilinearCurveN2(numSample_, ...
    Sd, Sa);
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% % Obtain stats for dy, du of bilinears
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% N2
Sdy_N2_mean = mean(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_median = median(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_std = std(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_min = min(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdy_N2_max = max(yieldingPointN2_Bilinear(:,1)*100);

Say_N2_mean = mean(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_median = median(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_std = std(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_min = min(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));
Say_N2_max = max(yieldingPointN2_Bilinear(:,2));

Sdu_N2_mean = mean(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_median = median(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_std = std(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_min = min(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);
Sdu_N2_max = max(ultimatePointN2_Bilinear(:,1)*100);

Sau_N2_mean = mean(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_median = median(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_std = std(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_min = min(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));
Sau_N2_max = max(ultimatePointN2_Bilinear(:,2));

[DamageStates_N2_RISKUE] = defineDamageStates_RISKUE(numSample_, ...
    yieldingPointN2_Bilinear, ultimatePointN2_Bilinear);

[xi_N2_RISKUE, excProb_N2_RISKUE, PDF_N2_RISKUE, CDF_N2_RISKUE, sortedDS_N2_RISKUE] = fragility(numSample_, ...
    DamageStates_N2_RISKUE);

[excProb2_N2_RISKUE] = fragility2(fileNumbers, ...
    DamageStates_N2_RISKUE);

[probDS_N2_RISKUE, damageRatio_N2_RISKUE, cumMeanDamageRatio_N2_RISKUE] = probability(numSample_, ...
    excProb_N2_RISKUE);

[probDS2_N2_RISKUE, damageRatio2_N2_RISKUE, cumMeanDamageRatio2_N2_RISKUE] = probability(fileNumbers, ...
    excProb2_N2_RISKUE);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Obtain Damage Index
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[DI_N2_RISKUE]=damageIndex(numSample_, probDS_N2_RISKUE);
DIy{1,k}=DI_N2_RISKUE; %Guarda las curvas DI para graficarlas
DIx{1,k}=xi_N2_RISKUE;

end

figure(fig)
fig=fig+1;
hold on
for j=1:size(DIy,2)
    plot(DIx{j}*100,DIy{j})
end
xlabel('Desplazamiento Espectral, S_d (cm)')
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
grid on
box on

fn = fullfile(fp, "DI_" + "all_g" + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo

```

```

pause(5)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)
toc

figure(fig)
fig=fig+1;
hold on
for j=1:size(DIy,2)
    plot(DIx{j}*100,DIy{j})
end
xlabel('Desplazamiento Espectral, S_d (cm)')
ylabel('Probabilidad de Ocurrencia')
grid on
box on
xlim([3.5 8.0])
ylim([0.7 1.0])
fn = fullfile(fp, "DI_" + "all_g_zoom" + ".pdf"); % Construye el nombre del archivo
pause(5)
exportgraphics(gcf, fn)
close(gcf)
toc

x=0;
% Obtiene los puntos de control para cada curva
x05=transpose(zeros(size(DIy)));
x10=transpose(zeros(size(DIy)));
x15=transpose(zeros(size(DIy)));
x20=transpose(zeros(size(DIy)));
x25=transpose(zeros(size(DIy)));
x30=transpose(zeros(size(DIy)));
x35=transpose(zeros(size(DIy)));
x40=transpose(zeros(size(DIy)));
x45=transpose(zeros(size(DIy)));
x50=transpose(zeros(size(DIy)));
x55=transpose(zeros(size(DIy)));
x60=transpose(zeros(size(DIy)));
x65=transpose(zeros(size(DIy)));
x70=transpose(zeros(size(DIy)));
x75=transpose(zeros(size(DIy)));
x80=transpose(zeros(size(DIy)));
x85=transpose(zeros(size(DIy)));
x90=transpose(zeros(size(DIy)));
x95=transpose(zeros(size(DIy)));

tol = 0.05; % Tolerancia que permite obtener los valores a partir del CDF
for i=1:size(DIy,2)
    x=DIx{1,i}*100;
    x05(i,1) = mean(x(abs(0.05-DIy{1,i}) < tol));
    x10(i,1) = mean(x(abs(0.10-DIy{1,i}) < tol));
    x15(i,1) = mean(x(abs(0.15-DIy{1,i}) < tol));
    x20(i,1) = mean(x(abs(0.20-DIy{1,i}) < tol));
    x25(i,1) = mean(x(abs(0.25-DIy{1,i}) < tol));
    x30(i,1) = mean(x(abs(0.30-DIy{1,i}) < tol));
    x35(i,1) = mean(x(abs(0.35-DIy{1,i}) < tol));
    x40(i,1) = mean(x(abs(0.40-DIy{1,i}) < tol));
    x45(i,1) = mean(x(abs(0.45-DIy{1,i}) < tol));
    x50(i,1) = mean(x(abs(0.50-DIy{1,i}) < tol));
    x55(i,1) = mean(x(abs(0.55-DIy{1,i}) < tol));
    x60(i,1) = mean(x(abs(0.60-DIy{1,i}) < tol));
    x65(i,1) = mean(x(abs(0.65-DIy{1,i}) < tol));
    x70(i,1) = mean(x(abs(0.70-DIy{1,i}) < tol));
    x75(i,1) = mean(x(abs(0.75-DIy{1,i}) < tol));
    x80(i,1) = mean(x(abs(0.80-DIy{1,i}) < tol));
    x85(i,1) = mean(x(abs(0.85-DIy{1,i}) < tol));
    x90(i,1) = mean(x(abs(0.90-DIy{1,i}) < tol));
    x95(i,1) = mean(x(abs(0.95-DIy{1,i}) < tol));
end

% Guarda las n e IC asociada a cada curva

n=info(:,1);
IC=info(:,2);

% Crea la tabla de valores y la exporta a un archivo excel
DI_table=table(n,IC,x05,x10,x15,x20,x25,x30,x35,x40,x45,x50, ...
    x55,x60,x65,x70,x75,x80,x85,x90,x95)

writetable(DI_table,'AA_DI_table_long.xlsx')

toc

```

## E. Resultados

### E.1 Muestreo

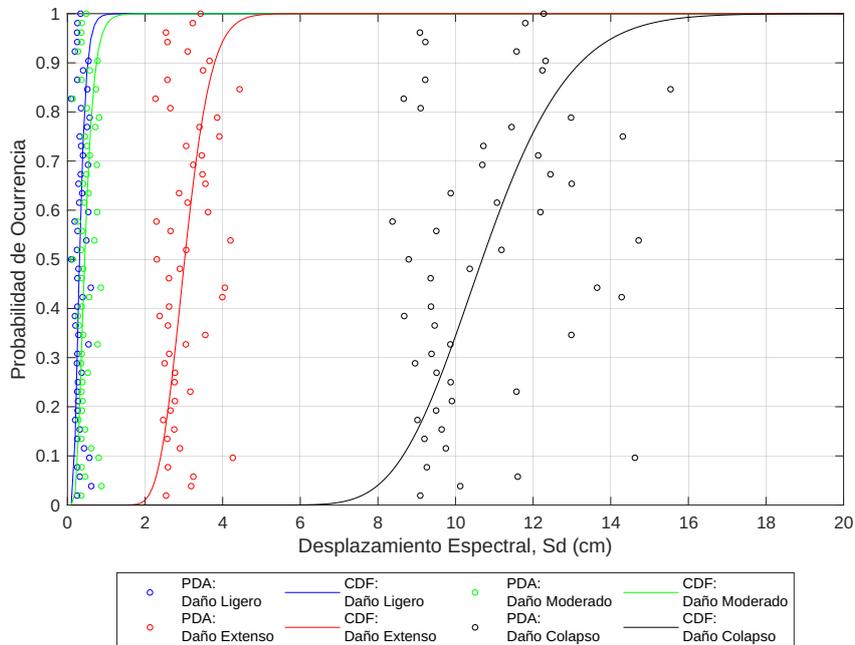


Fig. E.1: Curvas de fragilidad. n=52.

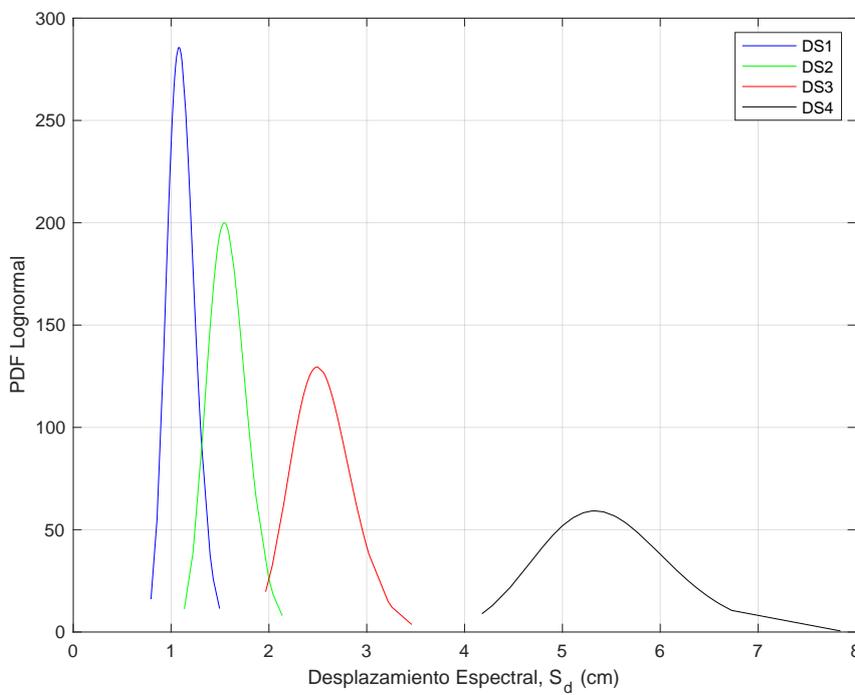


Fig. E.2: PDF lognormal de los estados de daño. n=52.

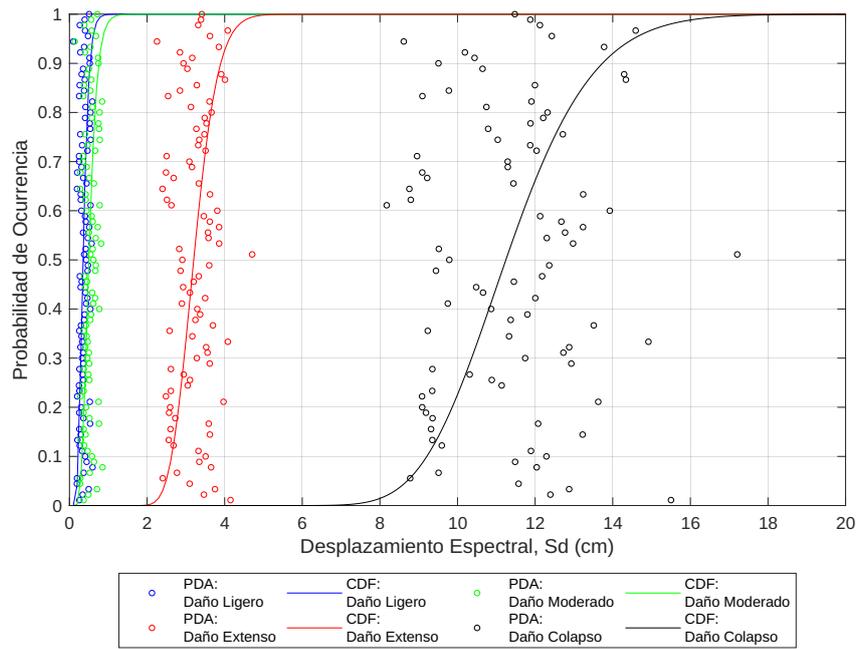


Fig. E.3: Curvas de fragilidad. n=90.

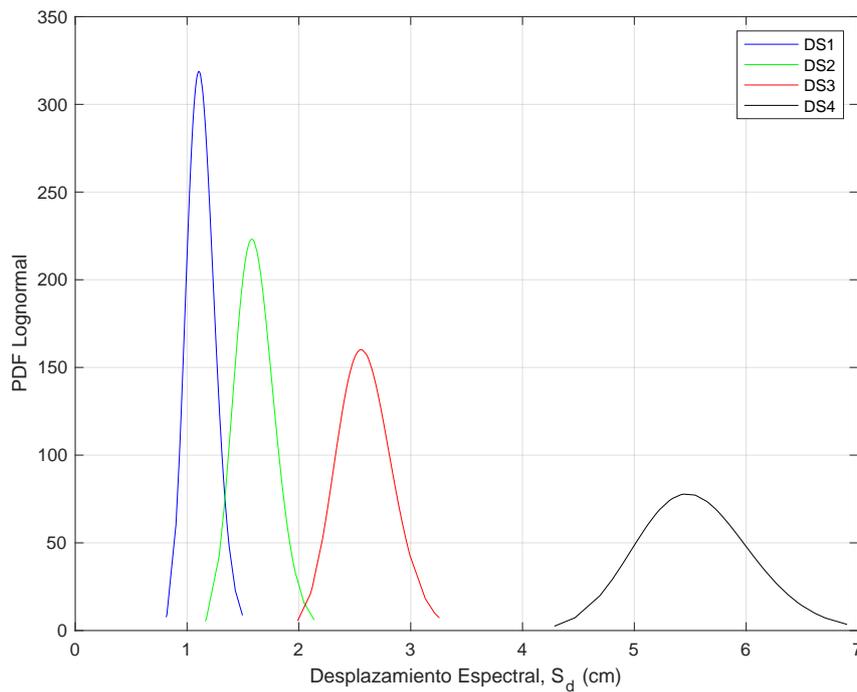


Fig. E.4: PDF lognormal de los estados de daño. n=90.

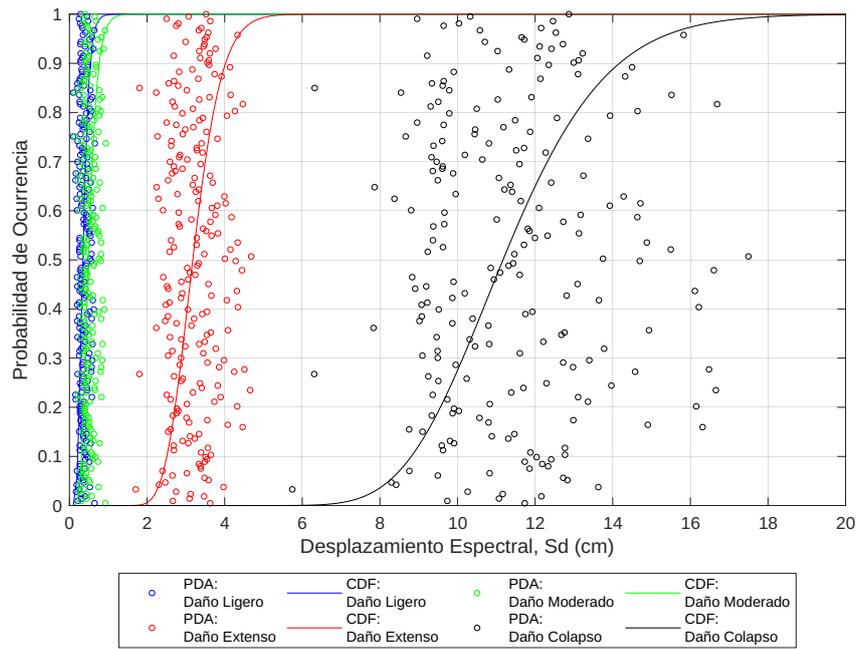


Fig. E.5: Curvas de fragilidad. n=213.

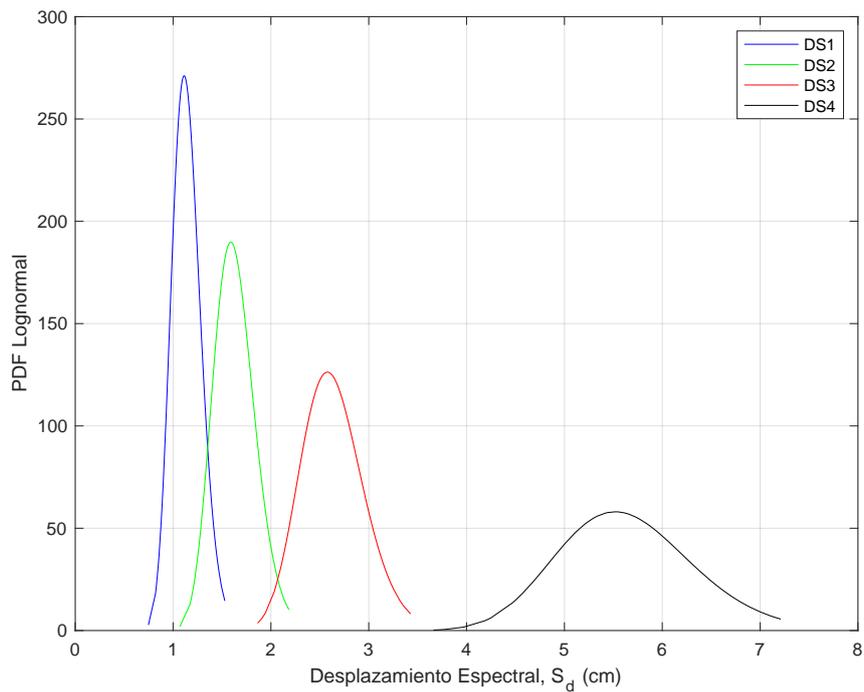


Fig. E.6: PDF lognormal de los estados de daño. n=213.

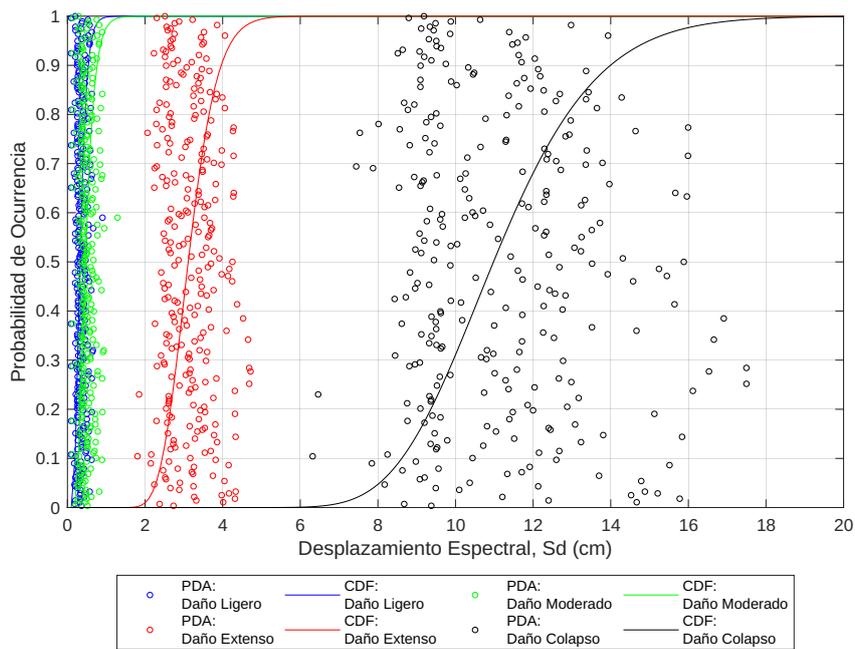


Fig. E.7: Curvas de fragilidad. n=278.

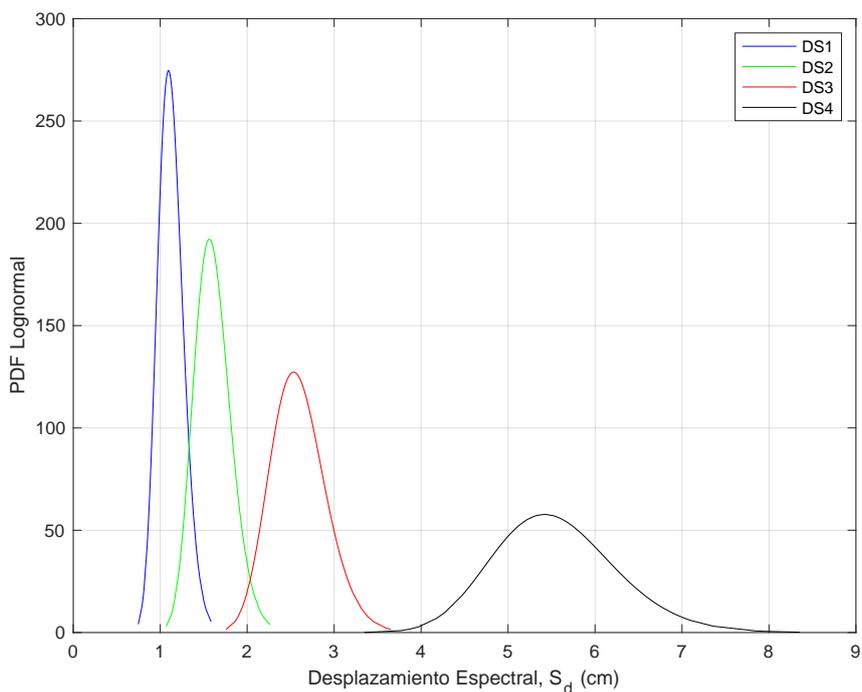


Fig. E.8: PDF lognormal de los estados de daño. n=278.

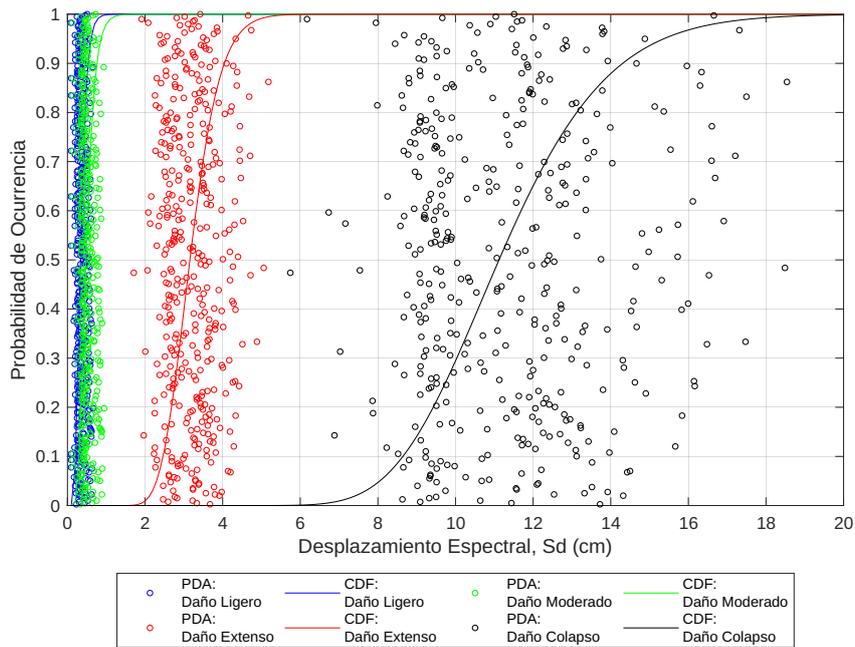


Fig. E.9: Curvas de fragilidad. n=399.

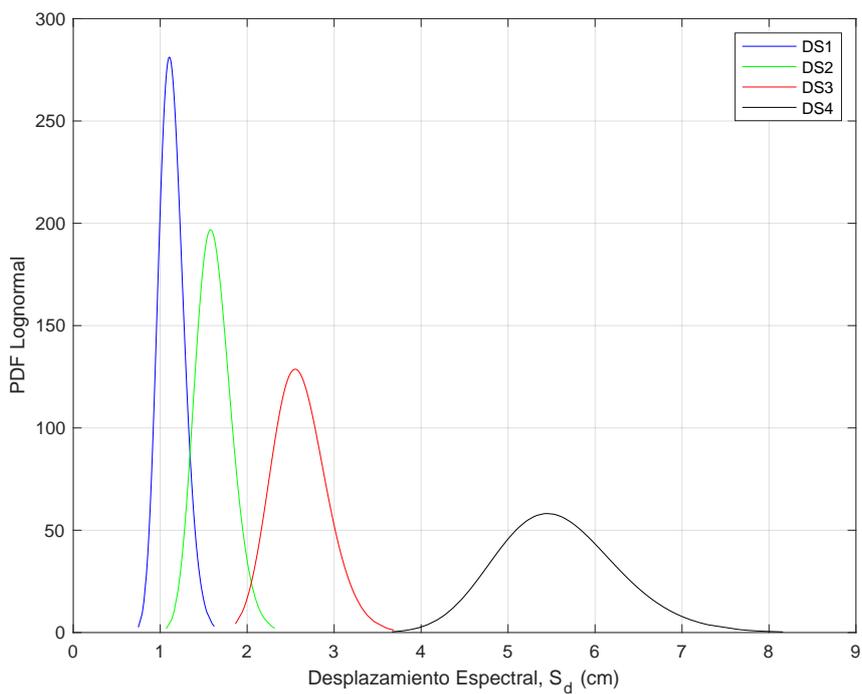


Fig. E.10: PDF lognormal de los estados de daño. n=399.

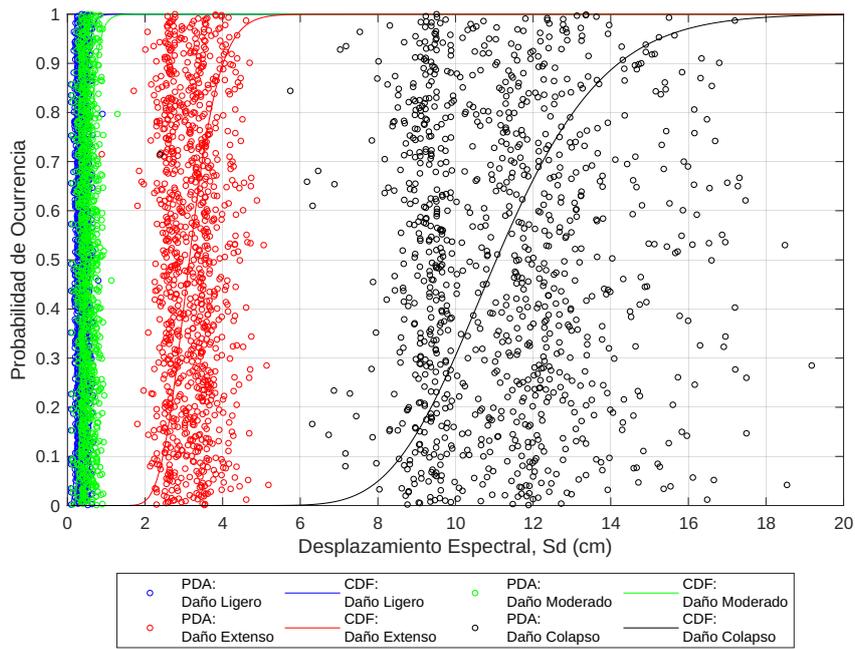


Fig. E.11: Curvas de fragilidad. N=1000.

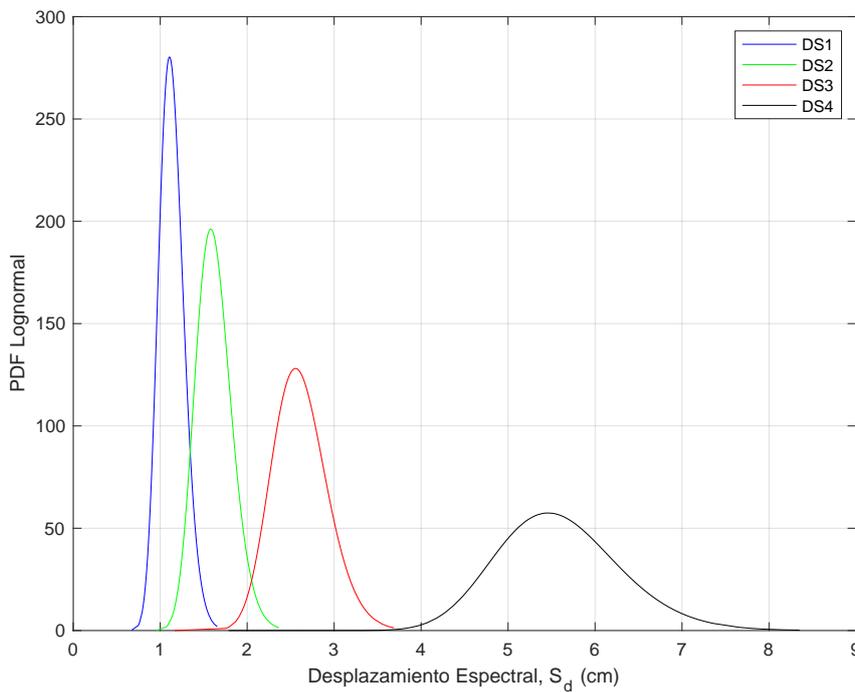


Fig. E.12: PDF lognormal de los estados de daño. N=1000.

## E.2 Curvas de Fragilidad

### E.2.1 Comparación Gráfica

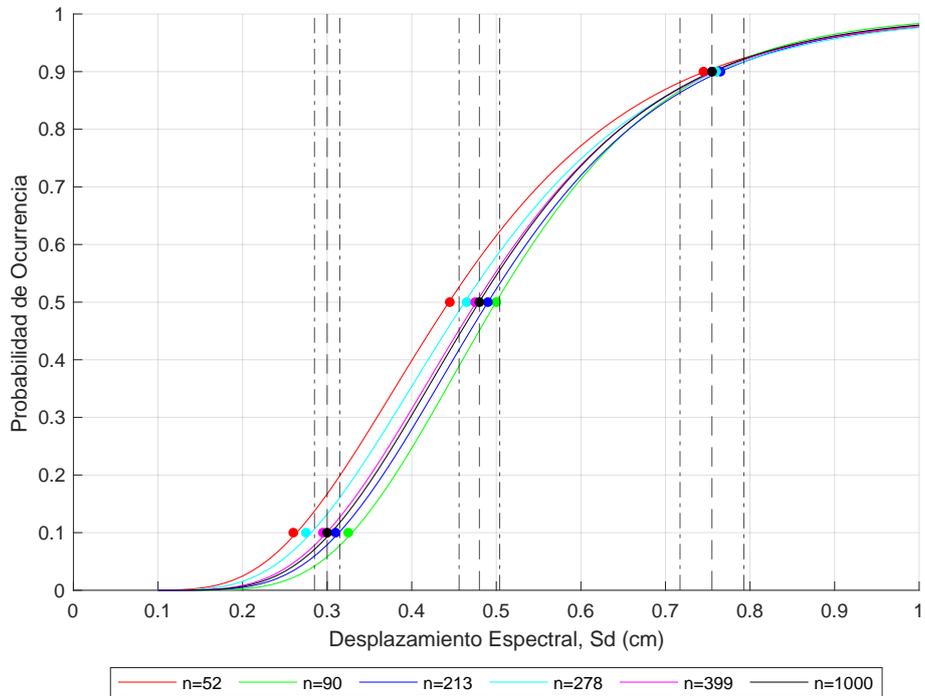


Fig. E.13: Comparación gráfica para DS1. Gráfico completo.

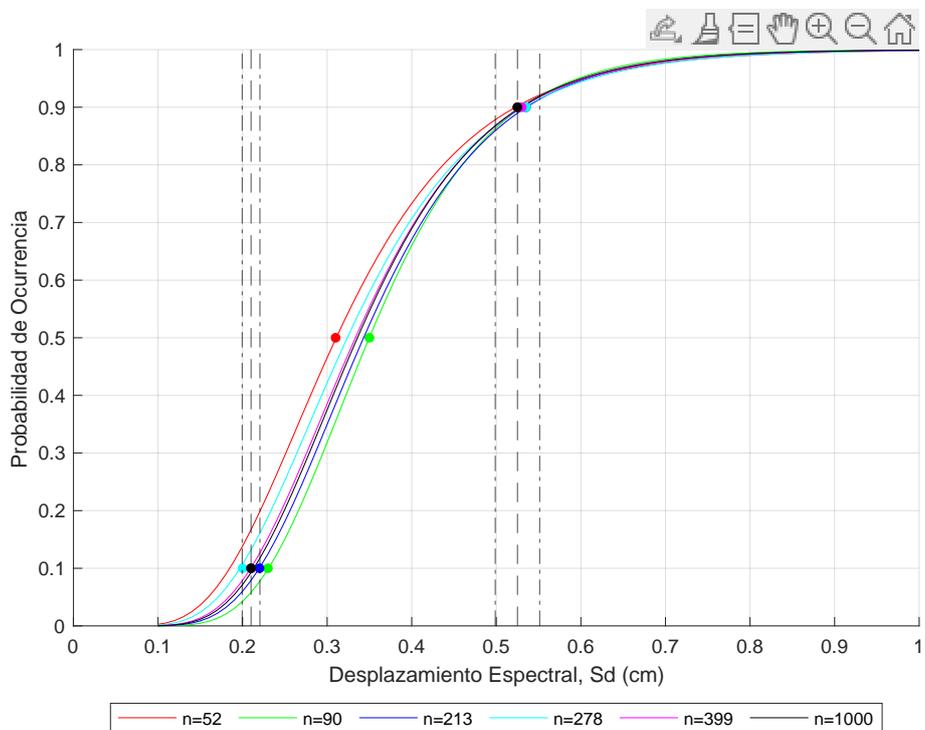


Fig. E.14: Comparación gráfica para DS2. Gráfico completo.

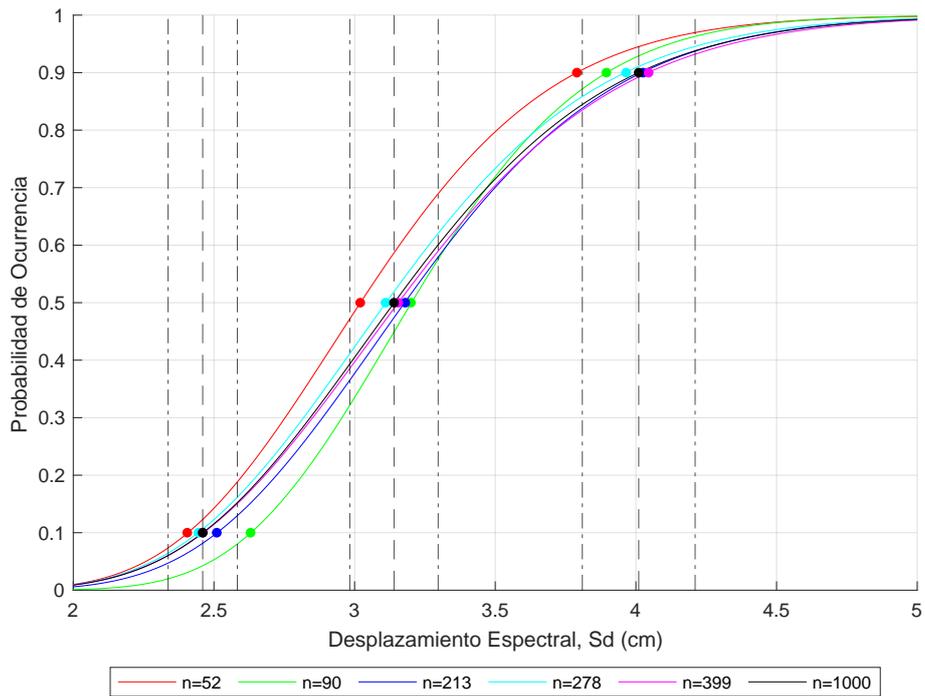


Fig. E.15: Comparación gráfica para DS3. Gráfico completo.

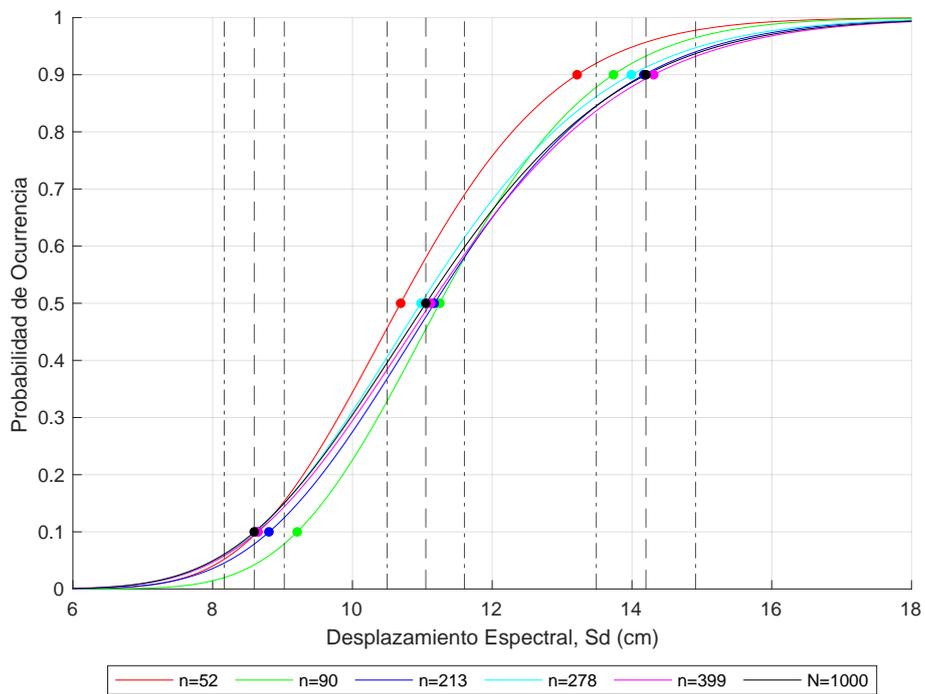


Fig. E.16: Comparación gráfica para DS4. Gráfico completo.

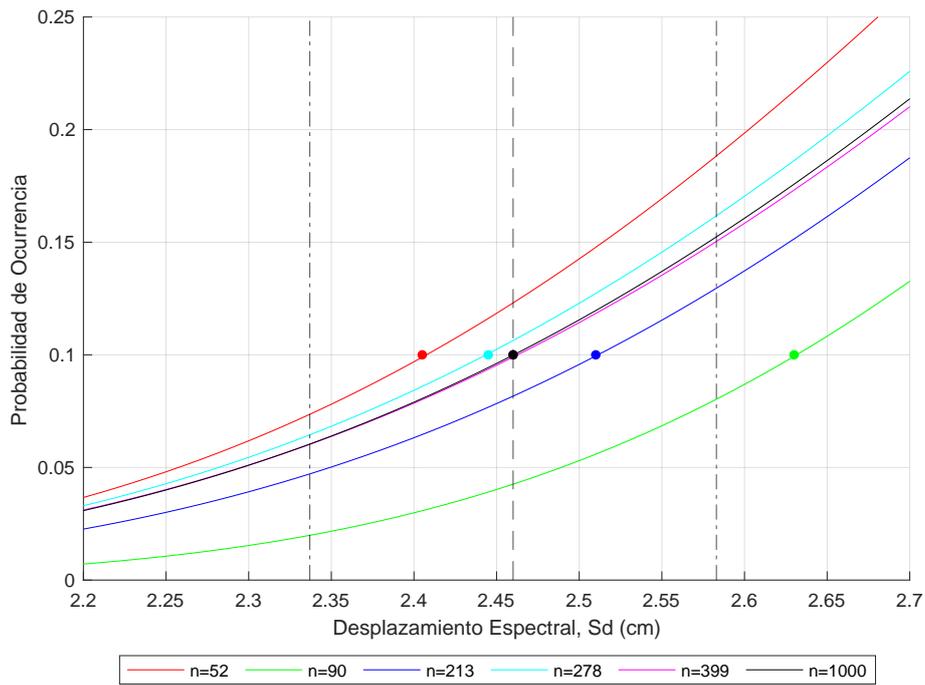


Fig. E.17: Comparación gráfica para DS3. Detalle en p=10 %.

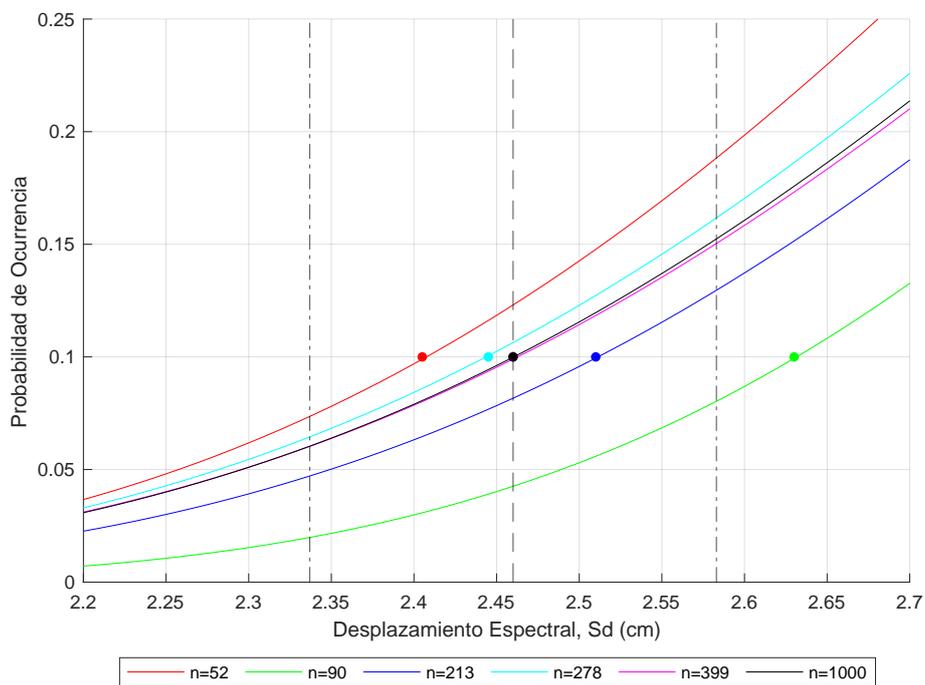


Fig. E.18: Comparación gráfica para DS4. Detalle en p=10 %.

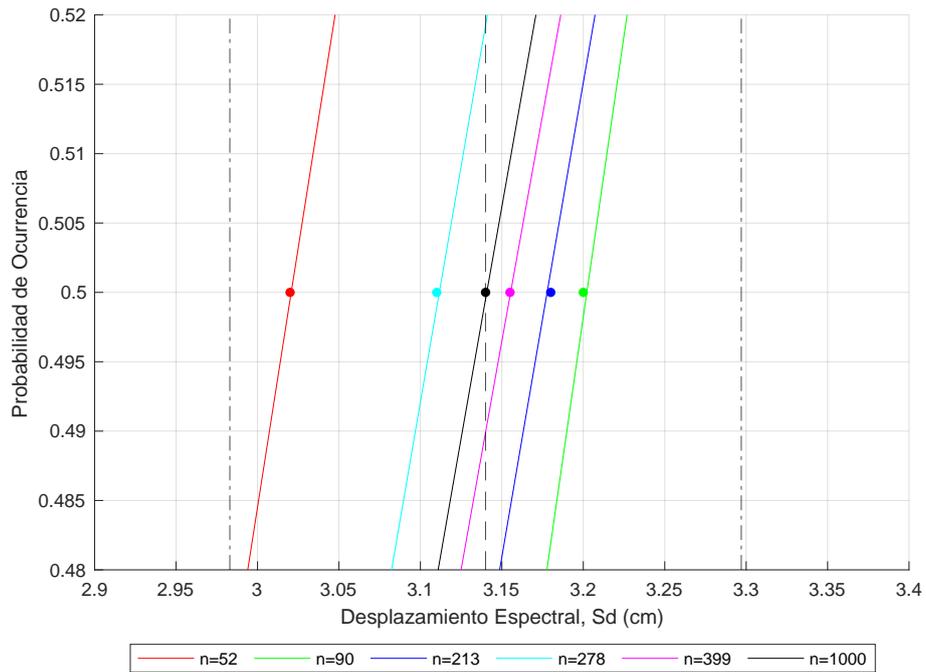


Fig. E.19: Comparación gráfica para DS3. Detalle en  $p=50\%$ .

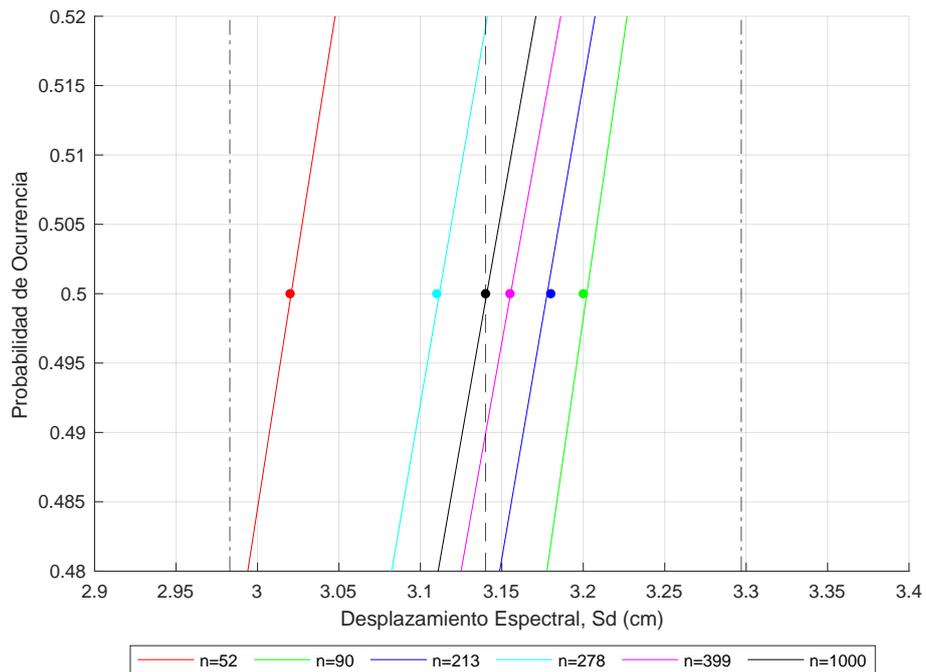


Fig. E.20: Comparación gráfica para DS4. Detalle en  $p=50\%$ .

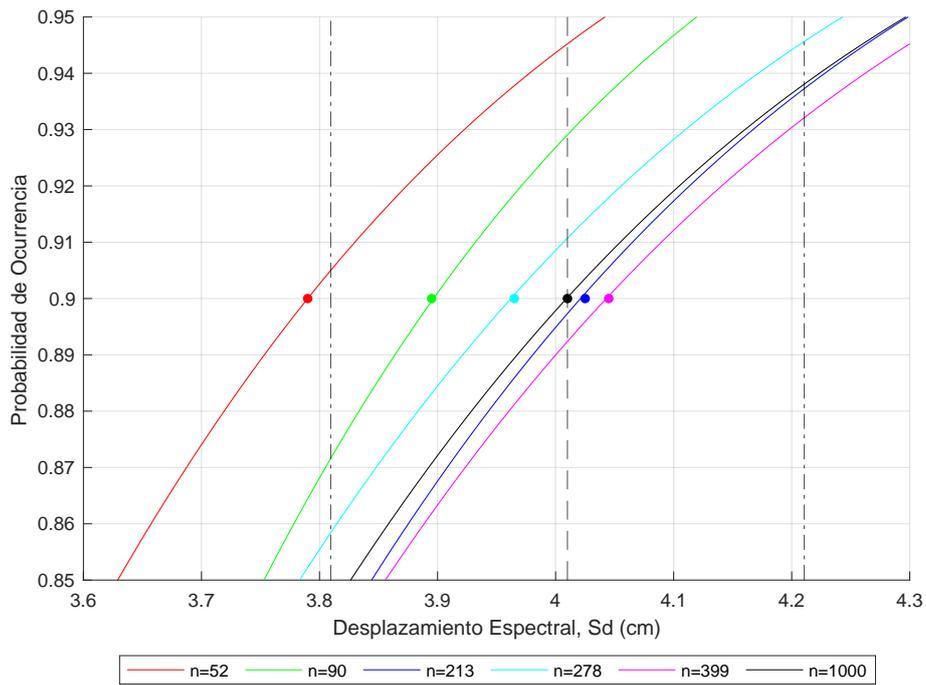


Fig. E.21: Comparación gráfica para DS3. Detalle en  $p=90\%$ .

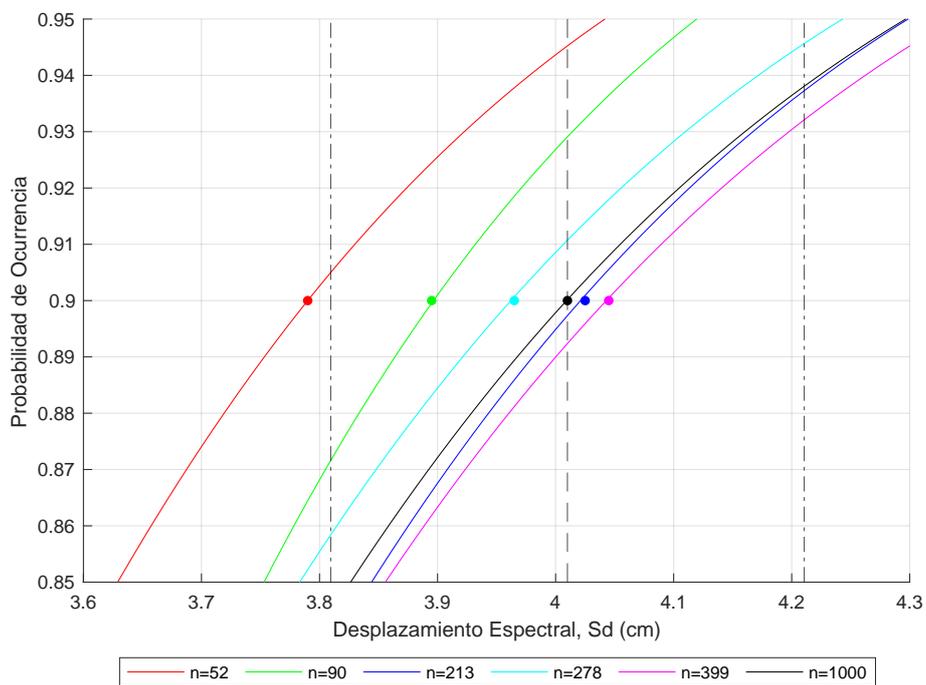


Fig. E.22: Comparación gráfica para DS4. Detalle en  $p=90\%$ .

### E.2.2 Comparación Numérica

Comparación Numérica del Estado de Daño 1 para Distintos Tamaños de Muestra. Valores en cm.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,15	0,19	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,44	0,44	0,47	0,52
56	56%	0,18	0,26	0,27	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,38	0,39	0,40	0,41	0,43	0,45	0,45	0,48	0,51
60	58%	0,15	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,39	0,42	0,45	0,48	0,52	0,51	0,56	0,62
65	60%	0,16	0,22	0,24	0,25	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41	0,43	0,43	0,45	0,49
70	62%	0,16	0,21	0,24	0,25	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,45	0,48	0,53
76	63%	0,17	0,24	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,35	0,36	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,47	0,50	0,54
81	65%	0,17	0,23	0,25	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,34	0,36	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,44	0,47	0,50
87	67%	0,16	0,22	0,25	0,26	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,47	0,47	0,50	0,54
93	69%	0,15	0,20	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,41	0,44	0,44	0,47	0,52
100	71%	0,15	0,19	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,46	0,50	0,55
107	73%	0,16	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41	0,44	0,47	0,47	0,50	0,55
115	75%	0,14	0,19	0,21	0,23	0,24	0,26	0,28	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,40	0,43	0,46	0,46	0,50	0,55
124	77%	0,16	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36	0,38	0,39	0,42	0,43	0,44	0,46	0,50
133	78%	0,15	0,20	0,23	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,47	0,47	0,51	0,56
142	80%	0,16	0,22	0,24	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,46	0,49	0,54
153	82%	0,15	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,45	0,45	0,48	0,52
165	84%	0,16	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,44	0,47	0,51
178	86%	0,16	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,35	0,37	0,38	0,41	0,42	0,45	0,45	0,48	0,53
193	88%	0,15	0,20	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,45	0,45	0,48	0,53
210	90%	0,16	0,22	0,24	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,45	0,48	0,53
229	92%	0,16	0,22	0,24	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,45	0,48	0,52
252	93%	0,16	0,22	0,24	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,46	0,49	0,53
282	95%	0,15	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,46	0,49	0,54
324	97%	0,15	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,46	0,49	0,54
399	99%	0,15	0,20	0,22	0,24	0,25	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,45	0,45	0,48	0,53
1000	0	0,16	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,46	0,49	0,53

Fig. E.23: Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS1.

Comparación Numérica del Estado de Daño 2 para Distintos Tamaños de Muestra. Valores en cm.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,19	0,27	0,30	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,52	0,55	0,58	0,62	0,67	0,75	5,65
56	56%	0,23	0,37	0,39	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,50	0,52	0,53	0,55	0,57	0,59	0,62	0,65	0,68	0,74	2,62
60	58%	0,19	0,28	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,60	0,64	0,68	0,74	0,81	0,92	10,35
65	60%	0,21	0,32	0,34	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,58	0,61	0,65	0,70	3,17
70	62%	0,20	0,31	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,55	0,58	0,61	0,65	0,69	0,77	4,57
76	63%	0,22	0,34	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,61	0,64	0,67	0,72	0,78	3,80
81	65%	0,22	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,60	0,63	0,67	0,73	3,20
87	67%	0,21	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,57	0,60	0,63	0,67	0,71	0,79	4,53
93	69%	0,19	0,28	0,31	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,53	0,56	0,59	0,63	0,68	0,76	5,25
100	71%	0,19	0,27	0,31	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,47	0,49	0,52	0,55	0,58	0,62	0,66	0,72	0,81	7,18
107	73%	0,20	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,66	0,72	0,80	5,53
115	75%	0,19	0,27	0,30	0,33	0,35	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,52	0,55	0,58	0,62	0,66	0,72	0,81	7,57
124	77%	0,21	0,32	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,59	0,62	0,66	0,72	3,24
133	78%	0,19	0,28	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,44	0,46	0,48	0,51	0,53	0,57	0,59	0,64	0,68	0,74	0,83	6,87
142	80%	0,20	0,31	0,34	0,36	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,66	0,70	0,78	4,81
153	82%	0,20	0,29	0,32	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,68	0,76	4,96
165	84%	0,20	0,31	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,57	0,60	0,64	0,68	0,75	4,18
178	86%	0,20	0,30	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,55	0,58	0,61	0,65	0,69	0,77	4,65
193	88%	0,19	0,28	0,31	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,70	0,78	5,85
210	90%	0,21	0,31	0,34	0,36	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,58	0,61	0,65	0,70	0,77	4,44
229	92%	0,20	0,31	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,55	0,58	0,61	0,65	0,69	0,77	4,45
252	93%	0,20	0,31	0,34	0,36	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,66	0,70	0,78	4,75
282	95%	0,20	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,50	0,52	0,55	0,58	0,61	0,65	0,71	0,79	5,74
324	97%	0,20	0,30	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,55	0,58	0,61	0,65	0,70	0,78	5,28
399	99%	0,20	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,69	0,77	5,18
1000	0	0,20	0,30	0,33	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,53	0,55	0,58	0,61	0,65	0,70	0,78	4,90

Fig. E.24: Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS2.

Comparación Numérica del Estado de Daño 3 para Distintos Tamaños de Muestra. Valores en cm.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	1,47	2,37	2,51	2,62	2,71	2,80	2,88	2,95	3,03	3,11	3,19	3,27	3,37	3,46	3,57	3,70	3,86	4,09	10,35
56	56%	1,72	2,61	2,73	2,82	2,90	2,98	3,04	3,11	3,17	3,24	3,31	3,38	3,45	3,53	3,62	3,73	3,85	4,03	8,21
60	58%	1,45	2,32	2,45	2,55	2,64	2,73	2,80	2,88	2,95	3,03	3,11	3,19	3,27	3,37	3,47	3,60	3,74	3,97	9,88
65	60%	1,49	2,33	2,45	2,54	2,63	2,70	2,77	2,84	2,91	2,98	3,05	3,12	3,20	3,28	3,37	3,48	3,61	3,81	8,63
70	62%	1,58	2,48	2,61	2,71	2,80	2,88	2,95	3,03	3,10	3,17	3,25	3,33	3,41	3,50	3,60	3,72	3,86	4,07	9,31
76	63%	1,67	2,55	2,67	2,76	2,84	2,92	2,98	3,05	3,11	3,18	3,25	3,32	3,39	3,47	3,56	3,66	3,79	3,97	8,19
81	65%	1,53	2,45	2,59	2,69	2,78	2,87	2,95	3,02	3,10	3,18	3,26	3,34	3,43	3,53	3,64	3,76	3,92	4,14	10,13
87	67%	1,58	2,49	2,62	2,72	2,81	2,89	2,97	3,04	3,12	3,19	3,27	3,35	3,43	3,52	3,62	3,74	3,89	4,10	9,47
93	69%	1,55	2,42	2,55	2,64	2,73	2,80	2,88	2,95	3,02	3,09	3,16	3,23	3,31	3,40	3,50	3,61	3,75	3,94	8,89
100	71%	1,54	2,46	2,60	2,70	2,79	2,88	2,96	3,03	3,11	3,19	3,27	3,35	3,44	3,54	3,64	3,77	3,93	4,15	10,09
107	73%	1,53	2,46	2,60	2,71	2,81	2,89	2,98	3,05	3,13	3,21	3,29	3,38	3,47	3,57	3,68	3,81	3,97	4,20	10,44
115	75%	1,48	2,40	2,53	2,64	2,74	2,82	2,91	2,99	3,07	3,15	3,23	3,32	3,40	3,51	3,62	3,75	3,91	4,15	10,62
124	77%	1,47	2,38	2,51	2,62	2,71	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12	3,20	3,29	3,38	3,48	3,59	3,72	3,88	4,11	10,55
133	78%	1,55	2,45	2,57	2,68	2,76	2,84	2,91	2,99	3,06	3,13	3,21	3,29	3,37	3,46	3,56	3,68	3,83	4,04	9,38
142	80%	1,52	2,42	2,54	2,65	2,73	2,81	2,89	2,96	3,04	3,11	3,19	3,27	3,35	3,44	3,55	3,67	3,82	4,03	9,56
153	82%	1,46	2,35	2,49	2,59	2,68	2,76	2,84	2,92	2,99	3,07	3,15	3,23	3,32	3,42	3,52	3,65	3,80	4,02	10,10
165	84%	1,47	2,40	2,54	2,65	2,75	2,84	2,92	3,01	3,09	3,17	3,26	3,35	3,44	3,55	3,66	3,80	3,97	4,22	11,17
178	86%	1,59	2,49	2,62	2,72	2,81	2,88	2,96	3,03	3,10	3,17	3,24	3,32	3,40	3,49	3,59	3,71	3,84	4,05	9,09
193	88%	1,49	2,37	2,50	2,60	2,69	2,77	2,85	2,92	2,99	3,07	3,15	3,23	3,31	3,40	3,50	3,62	3,77	3,98	9,60
210	90%	1,56	2,48	2,62	2,72	2,81	2,89	2,97	3,05	3,12	3,20	3,28	3,36	3,45	3,55	3,65	3,78	3,93	4,15	9,92
229	92%	1,55	2,46	2,59	2,69	2,78	2,87	2,94	3,02	3,09	3,17	3,25	3,33	3,41	3,50	3,61	3,73	3,88	4,10	9,72
252	93%	1,54	2,44	2,57	2,67	2,76	2,84	2,92	2,99	3,06	3,14	3,21	3,30	3,38	3,47	3,57	3,69	3,84	4,05	9,49
282	95%	1,54	2,45	2,58	2,68	2,77	2,85	2,92	3,00	3,07	3,15	3,23	3,31	3,39	3,48	3,59	3,71	3,86	4,07	9,63
324	97%	1,51	2,43	2,57	2,67	2,77	2,85	2,94	3,01	3,09	3,17	3,25	3,33	3,43	3,52	3,63	3,76	3,92	4,15	10,31
399	99%	1,49	2,39	2,52	2,63	2,72	2,80	2,88	2,96	3,03	3,11	3,19	3,27	3,36	3,46	3,56	3,69	3,84	4,06	10,07
1000	0	1,54	2,44	2,57	2,67	2,76	2,84	2,92	2,99	3,07	3,14	3,22	3,30	3,39	3,48	3,58	3,70	3,85	4,06	9,63

Fig. E.25: Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS3.

Comparación Numérica del Estado de Daño 4 para Distintos Tamaños de Muestra. Valores en cm.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	7,83	8,44	8,88	9,25	9,57	9,88	10,17	10,45	10,73	11,01	11,30	11,61	11,93	12,28	12,67	13,12	13,66	14,37	15,50
56	56%	8,49	9,06	9,46	9,79	10,08	10,35	10,61	10,86	11,10	11,35	11,61	11,87	12,15	12,45	12,79	13,17	13,64	14,24	15,18
60	58%	7,71	8,26	8,65	8,97	9,26	9,53	9,78	10,08	10,27	10,52	10,77	11,03	11,31	11,61	11,94	12,33	12,79	13,39	14,34
65	60%	7,65	8,20	8,58	8,90	9,19	9,45	9,70	9,95	10,19	10,43	10,68	10,94	11,22	11,52	11,85	12,23	12,69	13,29	14,23
70	62%	8,24	8,82	9,23	9,57	9,87	10,15	10,41	10,67	10,93	11,19	11,45	11,73	12,02	12,33	12,68	13,08	13,57	14,20	15,19
76	63%	8,36	8,90	9,28	9,60	9,88	10,14	10,39	10,63	10,87	11,11	11,35	11,60	11,87	12,16	12,48	12,85	13,29	13,86	14,76
81	65%	7,98	8,60	9,04	9,41	9,74	10,05	10,34	10,62	10,90	11,19	11,48	11,79	12,11	12,46	12,85	13,30	13,84	14,56	15,69
87	67%	8,12	8,72	9,15	9,50	9,81	10,10	10,38	10,65	10,92	11,19	11,47	11,76	12,06	12,40	12,76	13,19	13,70	14,36	15,42
93	69%	8,08	8,63	9,03	9,35	9,64	9,90	10,16	10,41	10,65	10,90	11,15	11,41	11,69	11,99	12,32	12,71	13,17	13,76	14,70
100	71%	8,22	8,81	9,24	9,59	9,90	10,19	10,47	10,74	11,00	11,27	11,55	11,84	12,14	12,47	12,84	13,26	13,76	14,42	15,47
107	73%	8,15	8,77	9,20	9,57	9,89	10,19	10,48	10,76	11,04	11,32	11,61	11,91	12,22	12,57	12,95	13,39	13,92	14,62	15,72
115	75%	7,92	8,54	8,98	9,34	9,67	9,97	10,26	10,54	10,82	11,10	11,39	11,70	12,02	12,37	12,75	13,20	13,74	14,45	15,57
124	77%	7,62	8,26	8,72	9,10	9,45	9,77	10,07	10,37	10,67	10,97	11,28	11,61	11,95	12,33	12,75	13,23	13,81	14,58	15,81
133	78%	8,09	8,66	9,06	9,40	9,70	9,98	10,24	10,50	10,75	11,01	11,27	11,54	11,83	12,14	12,49	12,89	13,37	13,99	14,98
142	80%	7,89	8,48	8,90	9,25	9,56	9,84	10,12	10,38	10,65	10,92	11,19	11,47	11,78	12,10	12,47	12,89	13,39	14,05	15,10
153	82%	7,70	8,30	8,73	9,09	9,40	9,70	9,98	10,25	10,53	10,80	11,09	11,38	11,70	12,04	12,42	12,85	13,38	14,07	15,16
165	84%	7,68	8,35	8,82	9,22	9,58	9,92	10,24	10,55	10,86	11,18	11,50	11,84	12,20	12,60	13,04	13,54	14,16	14,97	16,27
178	86%	8,25	8,82	9,23	9,57	9,87	10,15	10,41	10,67	10,92	11,18	11,44	11,72	12,01	12,32	12,67	13,07	13,55	14,17	15,16
193	88%	7,85	8,43	8,84	9,18	9,48	9,76	10,03	10,29	10,55	10,81	11,08	11,35	11,65	11,97	12,33	12,73	13,23	13,87	14,89
210	90%	8,15	8,76	9,19	9,55	9,87	10,17	10,46	10,73	11,01	11,28	11,57	11,86	12,18	12,52	12,90	13,33	13,86	14,54	15,63
229	92%	8,06	8,66	9,09	9,45	9,76	10,05	10,33	10,61	10,88	11,15	11,43	11,72	12,03	12,37	12,74	13,17	13,68	14,36	15,43
252	93%	8,09	8,67	9,08	9,41	9,72	9,99	10,26	10,52	10,78	11,03	11,30	11,58	11,87	12,18	12,53	12,94	13,42	14,05	15,05
282	95%	8,09	8,68	9,10	9,44	9,75	10,04	10,31	10,57	10,84	11,10	11,38	11,66	11,96	12,28	12,65	13,06	13,56	14,21	15,25
324	97%	7,96	8,58	9,02	9,39	9,72	10,02	10,31	10,60	10,88	11,16	11,46	11,76	12,08	12,44	12,83	13,28	13,82	14,53	15,66
399	99%	7,82	8,43	8,86	9,22	9,54	9,84	10,13	10,41	10,68	10,96	11,25	11,55	11,87	12,21	12,60	13,04	13,57	14,27	15,38
1000	0	8,01	8,60	9,02	9,37	9,69	9,97	10,25	10,52	10,78	11,05	11,33	11,61	11,92	12,25	12,61	13,04	13,54	14,20	15,26

Fig. E.26: Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DS4.

### E.3 Índices de Daño

#### E.3.1 Comparación Gráfica

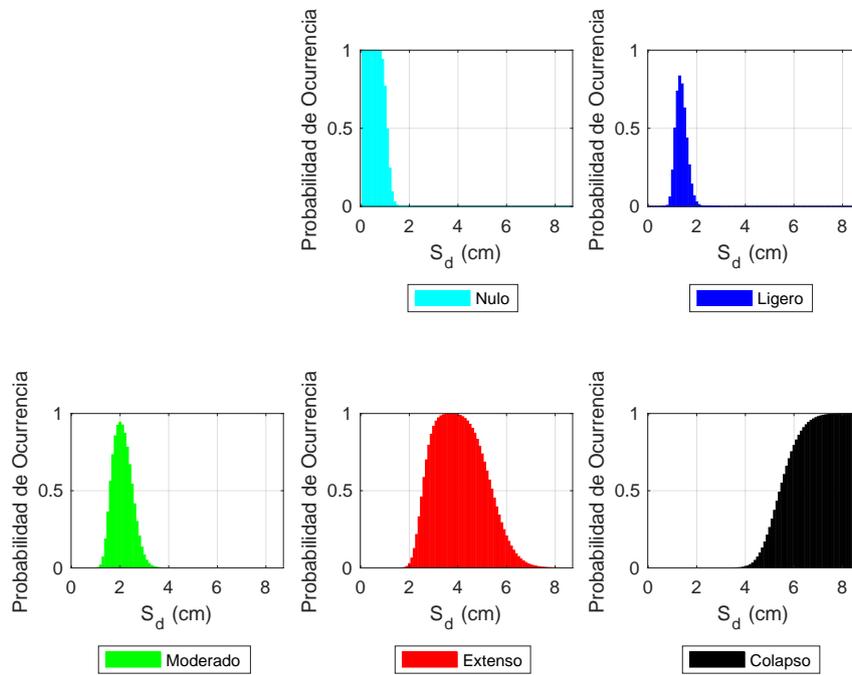


Fig. E.27: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño.  $n=52$ .

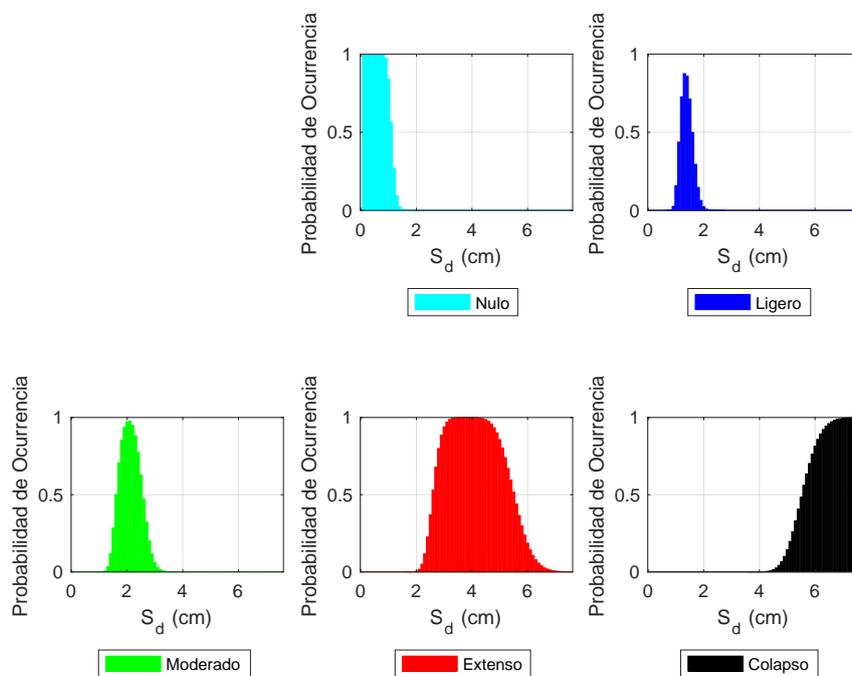


Fig. E.28: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño.  $n=90$ .

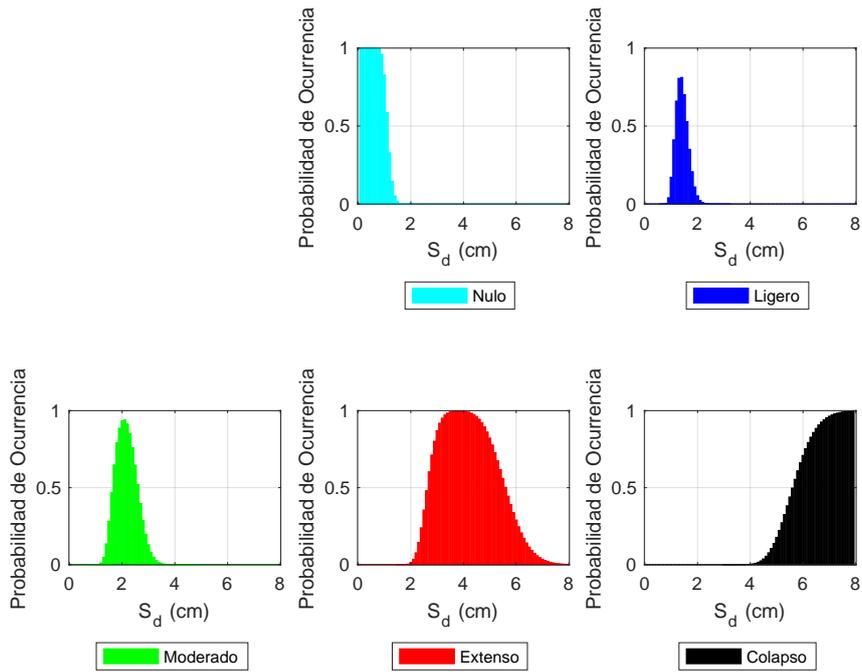


Fig. E.29: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. n=213.

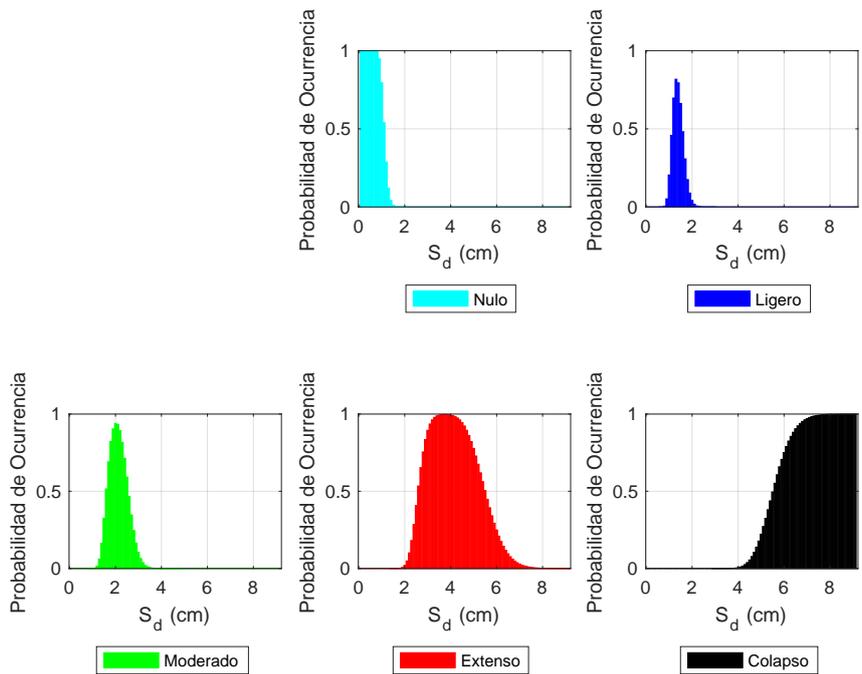


Fig. E.30: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño. n=278.

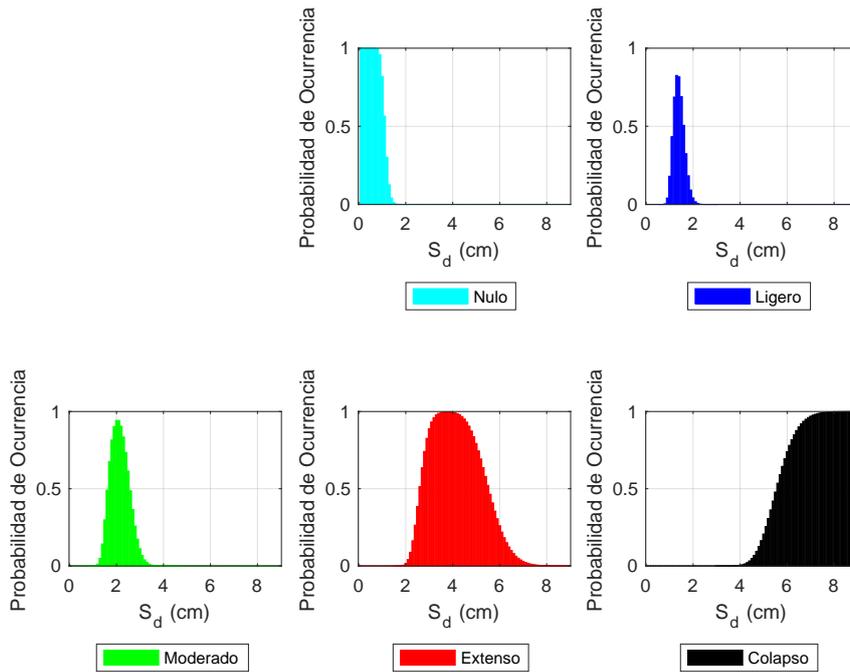


Fig. E.31: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño.  $n=399$ .

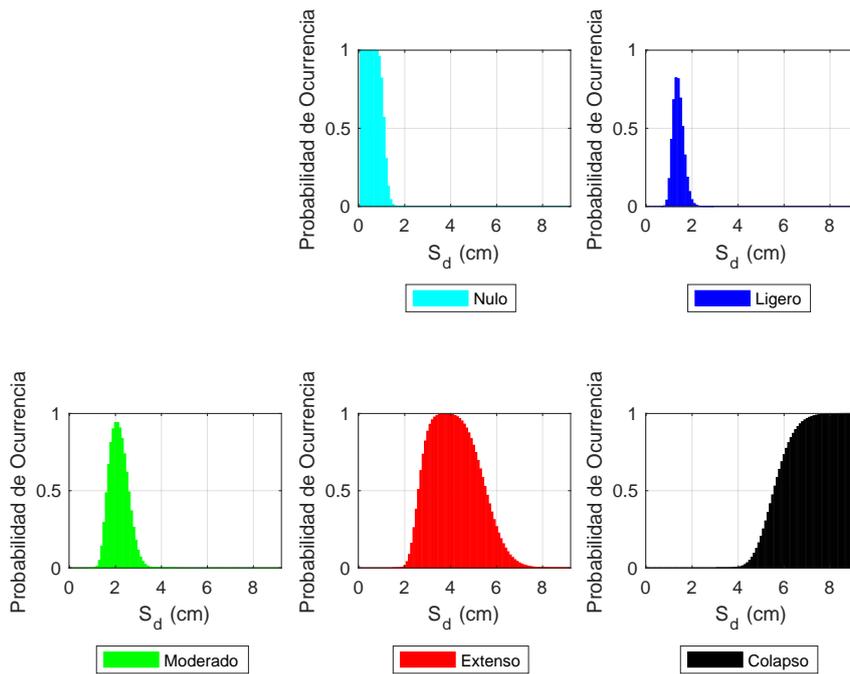


Fig. E.32: Probabilidad de ocurrencia de los estados de daño.  $N=1000$ .

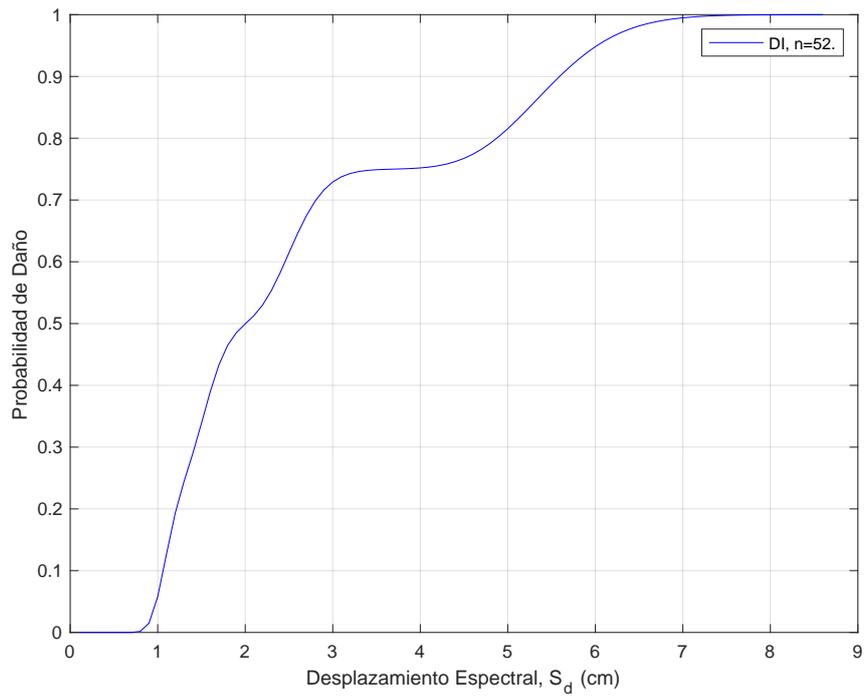


Fig. E.33: Índice de daño.  $n=52$ .

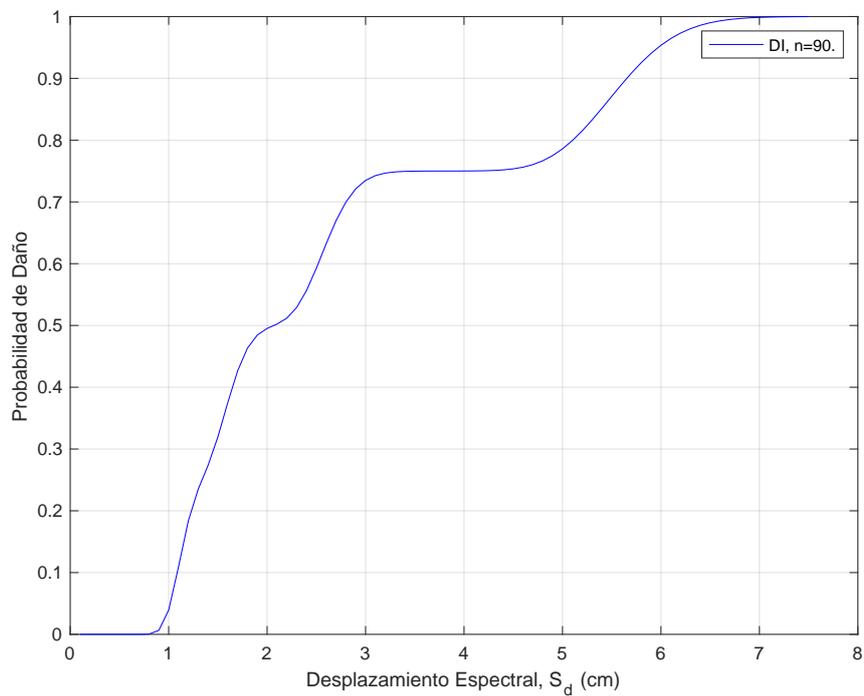


Fig. E.34: Índice de daño.  $n=90$ .

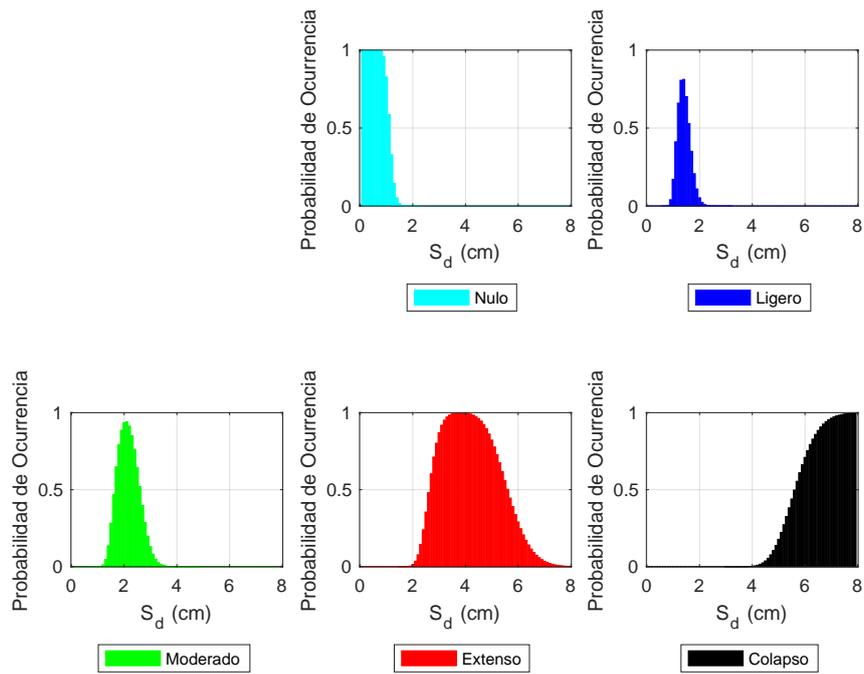


Fig. E.35: Índice de daño.  $n=213$ .

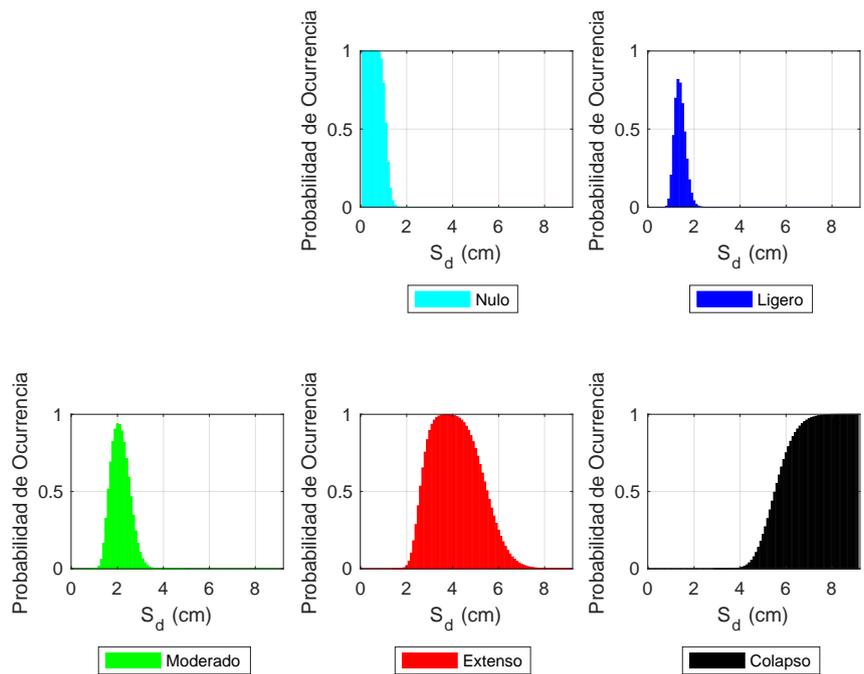


Fig. E.36: Índice de daño.  $n=278$ .

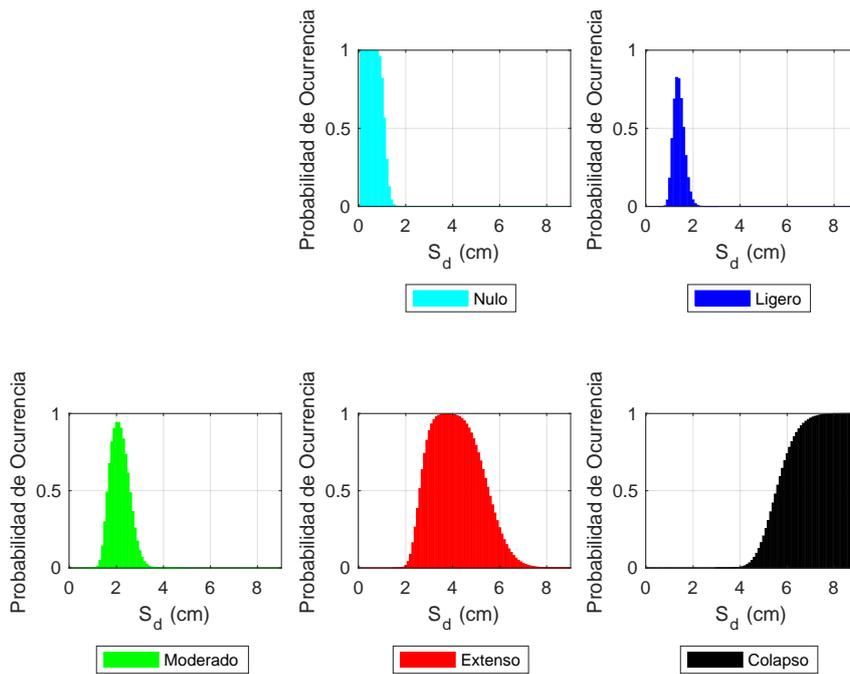


Fig. E.37: Índice de daño.  $n=399$ .

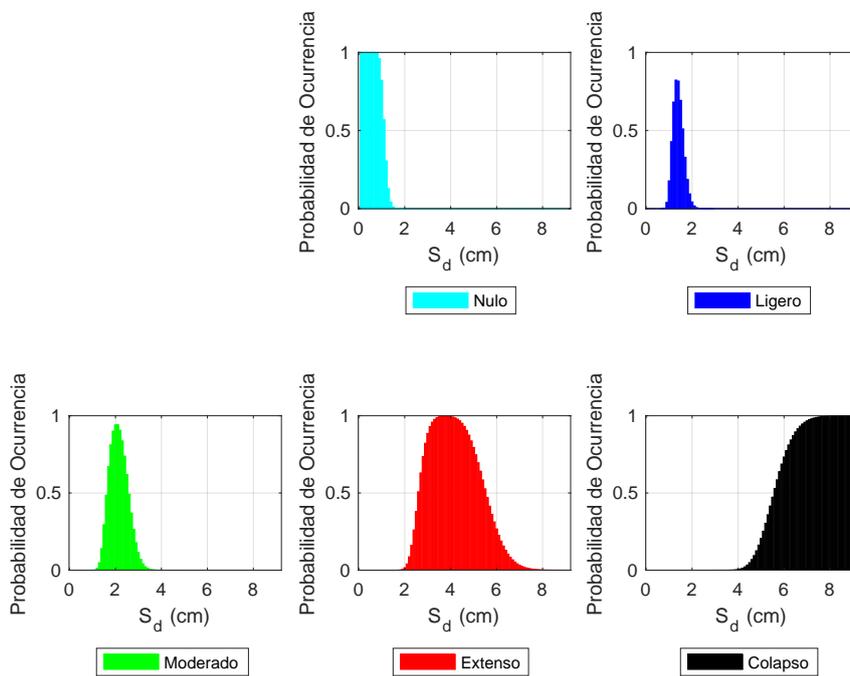


Fig. E.38: Índice de daño.  $N=1000$ .

### E.3.2 Comparación Numérica

Comparación Numérica Normalizada del índice de Daño para Distintos Tamaños de Muestra. Valores en cm.																				
n	IC	p=5%	p=10%	p=15%	p=20%	p=25%	p=30%	p=35%	p=40%	p=45%	p=50%	p=55%	p=60%	p=65%	p=70%	p=75%	p=80%	p=85%	p=90%	p=95%
52	54%	0,75	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,65	3,20	3,90	4,55	5,35	5,65	6,45
56	56%	0,80	1,10	1,20	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,85	2,10	2,30	2,55	2,70	3,30	4,00	4,65	5,45	5,80	7,35
60	58%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,25	3,95	4,60	5,35	5,65	6,70
65	60%	0,75	1,05	1,10	1,25	1,30	1,45	1,50	1,60	1,75	2,00	2,20	2,45	2,60	3,10	3,85	4,45	5,20	5,50	6,30
70	62%	0,75	1,10	1,20	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,85	2,10	2,30	2,55	2,75	3,30	4,05	4,65	5,50	5,85	6,90
76	63%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,25	2,50	2,65	3,20	3,90	4,50	5,30	5,65	7,10
81	65%	0,80	1,10	1,20	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,10	2,30	2,60	2,70	3,30	4,00	4,65	5,50	5,85	6,75
87	67%	0,75	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,95	4,55	5,40	5,75	6,85
93	69%	0,70	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,00	2,25	2,45	2,65	3,15	3,85	4,45	5,25	5,70	7,40
100	71%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,85	2,10	2,30	2,50	2,70	3,25	3,95	4,65	5,40	5,80	7,35
107	73%	0,75	1,10	1,20	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,90	2,10	2,35	2,55	2,75	3,30	4,05	4,65	5,50	5,85	7,15
115	75%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,85	2,10	2,30	2,50	2,70	3,25	3,95	4,65	5,40	5,80	7,10
124	77%	0,70	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,00	2,25	2,45	2,65	3,15	3,85	4,50	5,30	5,80	6,85
133	78%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,90	4,55	5,35	5,75	7,45
142	80%	0,75	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,90	4,55	5,30	5,70	6,70
153	82%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,25	2,50	2,65	3,20	3,90	4,55	5,30	5,70	6,80
165	84%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,85	2,10	2,30	2,50	2,75	3,20	3,90	4,55	5,30	5,80	7,15
178	86%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,95	4,55	5,35	5,70	7,15
193	88%	0,75	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,25	2,50	2,65	3,20	3,90	4,55	5,30	5,70	7,40
210	90%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,85	2,10	2,30	2,50	2,70	3,20	3,90	4,55	5,35	5,75	7,20
229	92%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,90	4,55	5,30	5,75	7,30
252	93%	0,75	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,95	4,60	5,40	5,80	7,45
282	95%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,90	4,55	5,35	5,75	6,90
324	97%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,70	1,85	2,10	2,30	2,50	2,70	3,25	3,95	4,65	5,40	5,85	7,25
399	99%	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,25	2,50	2,65	3,20	3,90	4,55	5,30	5,75	7,15
1000	0	0,70	1,10	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,85	2,05	2,30	2,50	2,70	3,20	3,90	4,55	5,35	5,75	7,45

Fig. E.39: Desplazamientos espectrales para la obtención del mapa de calor DI.

### E.4 Representación Bilineal del Espectro de Capacidad

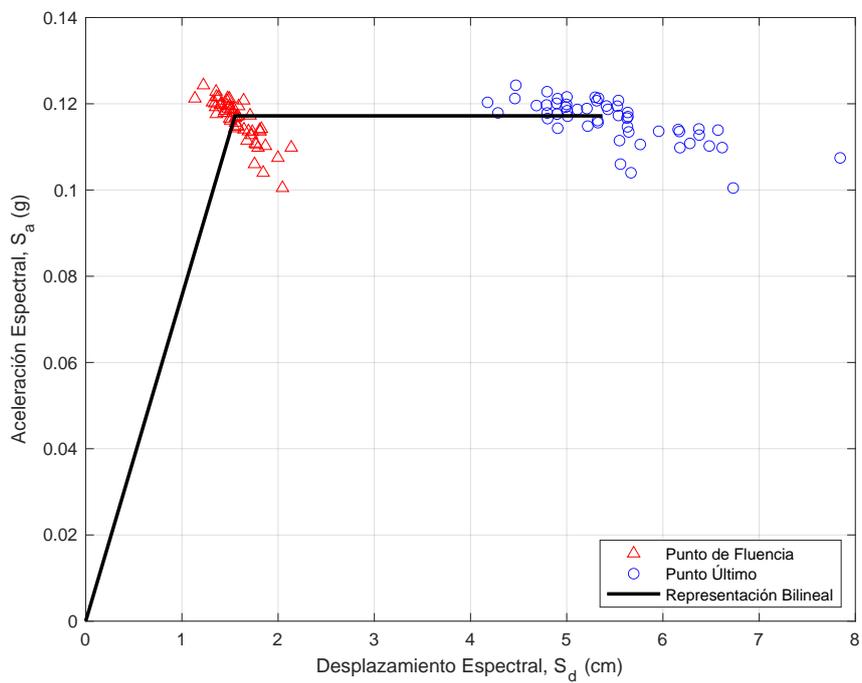


Fig. E.40: Representación bilineal del espectro de capacidad. n=52.

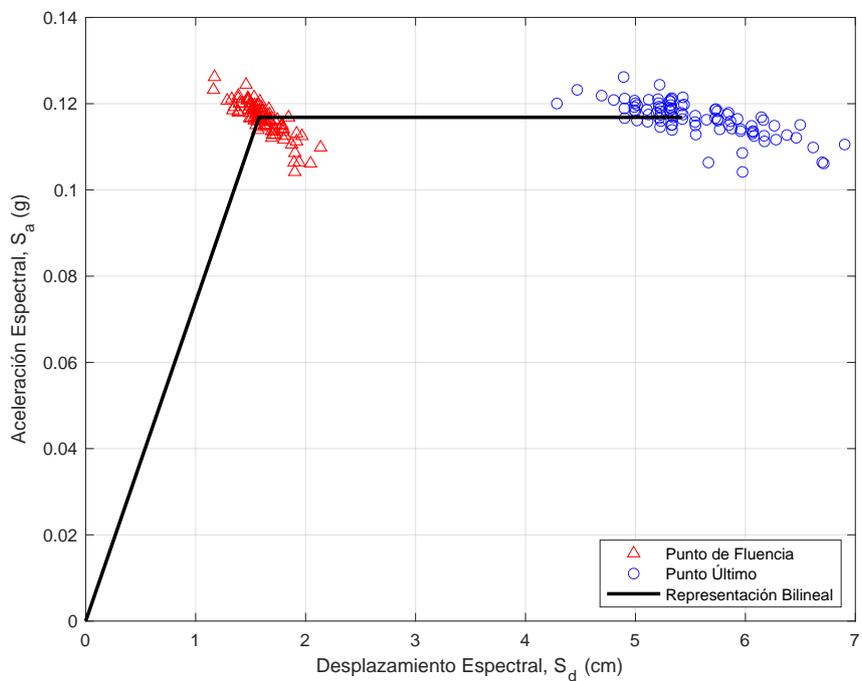


Fig. E.41: Representación bilineal del espectro de capacidad. n=90.

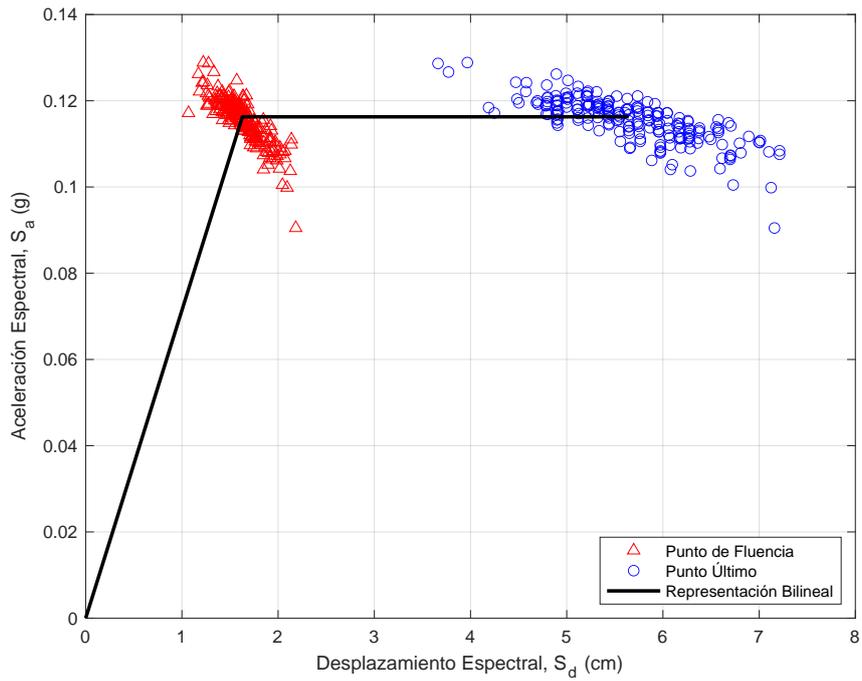


Fig. E.42: Representación bilineal del espectro de capacidad. n=213.

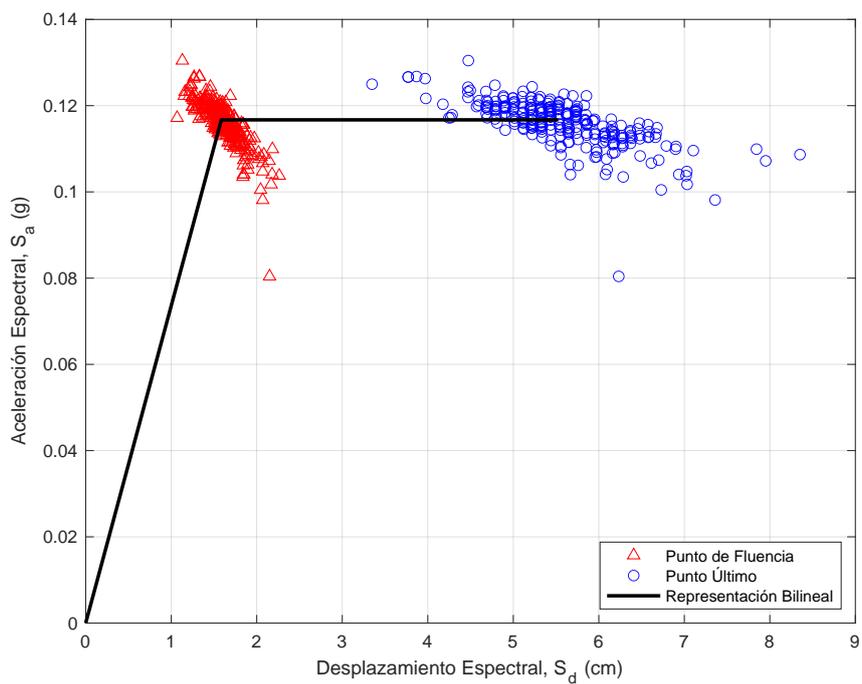


Fig. E.43: Representación bilineal del espectro de capacidad. n=278.

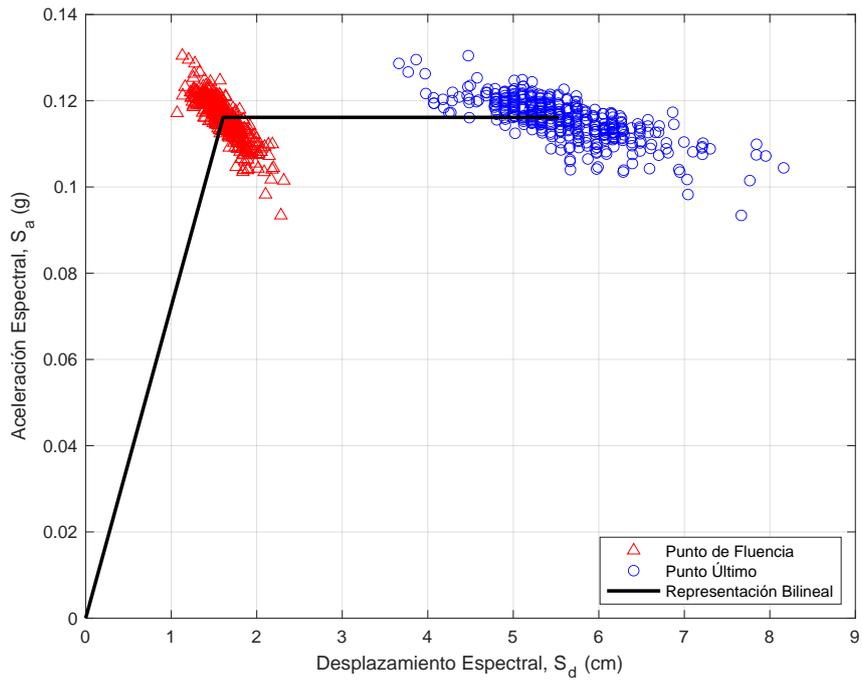


Fig. E.44: Representación bilineal del espectro de capacidad. n=399.

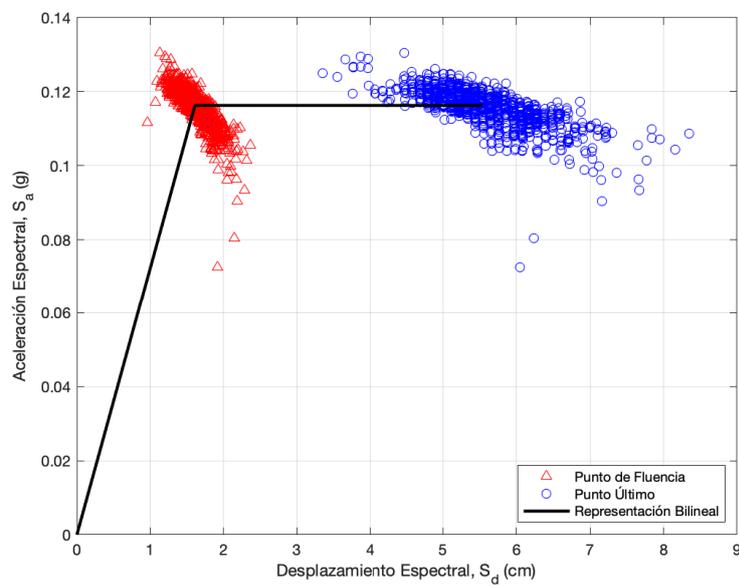


Fig. E.45: Representación bilineal del espectro de capacidad. N=1000.