UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Metodología para la identificación y evaluación rápida de la asimetría de esquina en edificios de la Ciudad de México

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Isabel Quetzaly Fontes Galindo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo Reinoso Angulo

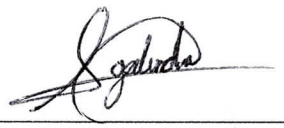
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado METODOLOGIA PARA LA IDENTIFICACION Y EVALUACION RAPIDA DE LA ASIMETRIA DE ESQUINA EN EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MEXICO que presenté para obtener el titulo de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



ISABEL QUETZALY FONTES GALINDO
Número de cuenta: 317088234

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ
Secretario:	DR. SADOTH FABIÁN HUERTA LOERA
1 er. Vocal:	DR. EDUARDO REINOSO ANGULO
2 do. Vocal:	DR. DAVID LOPEZ FLORES
3 er. Vocal:	ING. ENRIQUE CONTRERAS LIRA

INSTITUTO DE INGENIERÍA, C.U., COYOACÁN, CIUDAD DE MÉXICO, CDMX

TUTOR DE TESIS:

DR. EDUARDO REINOSO ANGULO

FIRMA

Dedicatoria

A mi madre Gabriela, cuyo amor incondicional, fortaleza y sabiduría guiaron cada paso que hoy me lleva a cumplir esta meta.

A mi hermano Jonathan, por ser guía en mis decisiones y enseñarme a elegir con sabiduría.

A mi abuela Graciela y a mi sobrino Enrique por su confianza y cariño.

A Mía, por acompañarme en cada etapa de este recorrido.

A mis amigos, por su apoyo incondicional y por los momentos compartidos que hicieron de este camino una experiencia inolvidable.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y por ser el espacio donde crecí académica y personalmente.

Al Instituto de Ingeniería, por ofrecer las herramientas, apoyo y el acompañamiento necesario para la realización de esta tesis.

A mi tutor, el Dr. Eduardo Reinoso, por su guía, paciencia y apoyo constante a lo largo de esta investigación.

Al Dr. Eric Espinosa, por compartir su conocimiento, su experiencia y por valiosas aportaciones que enriquecieron el desarrollo de este proyecto. Su experiencia y consejo fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis sinodales y profesores, M.I. Octavio García, Ing. Enrique Contreras, Dr. Sadoth Huerta y Dr. David López, quienes, a través de sus enseñanzas y exigencia académica, contribuyeron de manera decisiva a mi formación.

Índice

Agradecimientos iii
1. Introducción 4
1.1. Justificación 4
1.2. Objetivos 5
1.2.1. Objetivo general 5
1.2.2. Objetivos específicos 5
1.3. Alcances y limitaciones 6
2. Patologías estructurales en Ciudad de México 7
2.1. El Sismo del 19 de septiembre de 2017 7
2.2. Zonificación Sísmica de la Ciudad de México 8
2.3. Patologías estructurales 10
1. Asimetría de esquina 10
2. Golpeteo 11
3. Planta baja débil 12
4. Irregularidad vertical 13
5. Irregularidad en planta 14
6. Ubicación en cuña 14
7. Efecto de columna corta 15
2.4. Descripción de la base de datos utilizada 15
2.4.1. Datos Generales de Localización 16
2.4.2. Datos de Construcción 16
2.4.3. Daños Estructurales 18
2.4.4. Patologías y Deficiencias Estructurales 19
2.4.5. Revisiones Visuales Rápidas (Rapid Visual Screening) 22
3. Subcategorización cuantitativa del efecto de asimetría de equina 23
3.1. Delimitación de la zona de estudio y selección de la muestra 23
3.2. Análisis de los daños en la zona de estudio/tendencia de las patologías en la zona de estudio 37
3.3. Propuesta de subcategorización de la patología de esquina 45
4. Resultados 52
4.1. Aplicación de la metodología a la Ciudad de México 52

4.2. Evaluación de la asimetría de esquina 53
5. Conclusiones 60
6. Referencias 63

Índice de Tablas

Tabla 1 Descripción de los tipos de estructuración (Reinoso *et al*., 2018)..... 17
Tabla 2 Clasificación del daño en las estructuras (Reinoso *et al.*, 2019)..... 18

Índice de Figuras

Figura 2.1 Localización del epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017 Puebla-Morelos de acuerdo con el SSN de México y el US Geological Survey (USGS) (Galvis *et al.*, 2020)..... 7
Figura 2.2 Ilustración esquemática de un edificio que presenta asimetría de esquina, modificado de (FEMA, 2015)..... 11
Figura 2.3 Categorías del golpeteo, modificado de (Cole *et al*., 2010)..... 12
Figura 2.4 Ilustración esquemática de un edificio que presenta planta baja débil donde los espacios destinados al estacionamiento resultan en grandes aberturas (FEMA, 2015)..... 13
Figura 2.5 Ejemplo de irregularidad en planta (Gobierno de la Ciudad de México, 2023)..... 14
Figura 2.6 Ilustración esquemática de un edificio con un sistema no paralelo (FEMA, 2015)..... 14
Figura 2.7 Ilustración esquemática de un edificio con columnas cortas debido a aberturas irregulares en paredes, modificado de (FEMA, 2015)..... 15
Figura 3.1 Distribución de inmuebles dañados en la Ciudad de México. (2024). Información tomada de: Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). 24
Figura 3.2 Distribución de inmuebles dañados en la Ciudad de México según la alcaldía 25
Figura 3.3 Distribución de inmuebles dañados sobre la zonificación sísmica en la Ciudad de México. (2024). Información tomada de: Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021)..... 25
Figura 3.4 Distribución de inmuebles dañados que presentaron asimetría de esquina de forma aislada en la Ciudad de México. (2024). Información tomada de: Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021)..... 26
Figura 3.5 Número de inmuebles con asimetría de esquina dañados según el número de niveles . 27
Figura 3.6 Tipo de estructuración en los edificios con asimetría de esquina según los niveles..... 28
Figura 3.7 Año de construcción de los edificios con asimetría de esquina 28
Figura 3.8 Distribución de inmuebles dañados con asimetría de esquina aislada en la Ciudad de México según la alcaldía 29
Figura 3.9 Distribución de los inmuebles con daño y asimetría de esquina aislada según la zonificación sísmica. (2024). Información tomada de: Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). 30
Figura 3.10 Distribución de tipos de daño en las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez. (2024). Información tomada de: Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021)..... 31
Figura 3.11 Zona de estudio delimitada dentro de la alcaldía Cuauhtémoc y ubicación de la estación acelero métrica CI05. (2024). Información tomada de: Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). 32

Figura 3.12 Mapa de la zona de estudio propuesta e inmuebles con diferentes niveles de daño. (2024). Información tomada de: Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). 33
Figura 3.13 Distribución de daños en el universo de estudio de acuerdo con la clasificación propuesta 34
Figura 3.14 Categorización cualitativa de la muestra tomada de la zona de estudio 35
Figura 3.15 Tendencia de las patologías presentes en inmuebles sin daño en la zona de estudio 36
Figura 3.16 Tendencia de las patologías estudiadas en la zona de estudio 36
Figura 3.17 Número de inmuebles que presentaron patologías estructurales 37
Figura 3.18 Inmuebles con asimetría de esquina en la zona de estudio 38
Figura 3.19 Inmuebles con planta baja débil en la zona de estudio 39
Figura 3.20 Inmuebles con planta baja débil en la zona de estudio 39
Figura 3.21 Distribución de los daños en estructuras con asimetría de esquina de un total de 379 edificios en la zona de estudio 40
Figura 3.22 Distribución de los daños en estructuras con planta baja débil de un total de 408 edificios en la zona de estudio 41
Figura 3.23 Distribución de los daños en estructuras con irregularidad en planta de un total de 600 edificios en la zona de estudio 42
Figura 3.24 Daño promedio en las estructuras de acuerdo con el nivel de asimetría de esquina 43
Figura 3.25 Daño promedio en las estructuras de acuerdo con el nivel de planta baja débil 44
Figura 3.26 Daño promedio en las estructuras de acuerdo con el nivel de irregularidad en planta 44
Figura 3.27 Ilustración esquemática donde se ubican los muros colindantes de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). 47
Figura 3.28 Ilustración esquemática donde se ubican los muros colindantes de un edificio que presenta asimetría de esquina en vista 3D. (2025). 47
Figura 3.29 Ilustración esquemática donde se ubican los ejes resistentes de colindancia de un edificio que presenta asimetría de esquina en vista 3D. (2025). 48
Figura 3.30 Ilustración esquemática donde se muestra la fachada a de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). 49
Figura 3.31 Ilustración esquemática donde se muestra la fachada b de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). 49
Figura 3.32 Ilustración esquemática donde se muestran los ejes resistentes de fachada visibles de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). 50
Figura 3.33 Ilustración esquemática donde se muestran los ejes resistentes de fachada no visibles de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). 51
Figura 3.34 Ilustración esquemática donde se muestran la obtención de la rigidez de los ejes de fachada. (2025). 51
Figura 3.35 Umbrales de subcategorización de estructura con asimetría de esquina 52
Figura 4.1 Distribución de inmuebles según su rigidez lateral y eje colindante/fachada 53
Figura 4.2 Umbrales de subcategorización de estructura con asimetría de esquina ajustados 54
Figura 4.3 Umbrales de subcategorización presentados de forma gráfica 54
Figura 4.4 Combinaciones posibles de la asimetría en esquina 55

Figura 4.5 Distribución de los inmuebles de acuerdo con la combinación de asimetría de esquina 56
Figura 4.6 Distribución de inmuebles estructurados a base de Marcos de Concreto..... 57
Figura 4.7 Distribución de inmuebles estructurados a base de Marcos de Concreto..... 58
Figura 4.8 Umbrales de subcategorización de estructura con asimetría de esquina ajustados 59

1. Introducción

1.1. Justificación

El terremoto de Puebla-Morelos del 19 de septiembre de 2017, con una magnitud de Mw 7.1, generó una gran destrucción en el centro de México. Esto ha generado incógnitas relevantes sobre la amenaza sísmica en la Ciudad de México, hogar de más de 20 millones de personas. Aunque los terremotos de profundidad intermedia son menos frecuentes que los de subducción más superficiales, su impacto en la ciudad es similar, como lo evidenció el sismo de 1985, que dejó 15,000 víctimas fatales (Mirwald et al., 2019). A lo largo del tiempo se ha observado que el desempeño de las estructuras con irregularidades estructurales ha sido deficiente durante sismos de gran magnitud en comparación con edificaciones regulares. Entre las irregularidades más peligrosas destacan aquellas relacionadas con torsión, plantas bajas débiles y diafragmas flexibles (Tena-Colunga, 2021).

Aunque los reglamentos sísmicos actuales, como las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo (NTC), establecen criterios generales para evaluar irregularidades estructurales, se considera que estas irregularidades son de gran relevancia y que se requiere una metodología estandarizada para clasificar de manera cuantitativa los niveles con los que se presentan.

Por lo anterior, el presente trabajo busca desarrollar una metodología que permita clasificar y evaluar específicamente la asimetría de esquina, la cual pertenece a las irregularidades relacionadas a la torsión. Esta metodología tendrá por objetivo determinar qué edificaciones podrían suponer un peligro significativo para la vida y la integridad de las personas en caso de un sismo severo que cause su colapso como lo destaca la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, 2015).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Proponer una metodología de identificación rápida visual para clasificar y evaluar la asimetría de esquina con el fin de identificar su influencia en los daños experimentados por los inmuebles de la Ciudad de México durante el sismo de 2017.

1.2.2. Objetivos específicos

- Revisar y analizar estudios previos sobre las patologías de asimetría de esquina, planta baja débil e irregularidad en planta con el propósito de contextualizar la investigación en el sismo del 2017 en la Ciudad de México.
- Delimitar una zona de estudio dentro de la Ciudad de México que concentre una cantidad significativa de inmuebles dañados durante el sismo del 2017, seleccionar una muestra representativa de los inmuebles y clasificarlos cualitativamente según las patologías de planta baja débil, asimetría de esquina e irregularidad en planta con el fin de definir las tendencias de cada patología en la zona de estudio.
- Comparar las patologías de asimetría de esquina, irregularidad en planta y planta baja débil, para evaluar la necesidad de desarrollar una metodología de subcategorización cuantitativa para la asimetría de esquina.
- Proponer una metodología para subcategorizar de forma cuantitativa los edificios con asimetría de esquina.
- Aplicar la subcategorización propuesta a los edificios con daño en la Ciudad de México, para evaluar la influencia de la asimetría de esquina en los daños observados.

1.3. Alcances y limitaciones

La presente investigación delimita dos sectores principales de interés: a) La zona de estudio qué se ubica en la alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México, específicamente en las colonias Roma Norte e Hipódromo Condesa, áreas donde los inmuebles presentaron una cantidad significativa de daños, b) La segunda zona es la de aplicación del método de subcategorización propuesto, esta integra todos los inmuebles con daño dentro de la Ciudad de México. Los daños presentados en los inmuebles estudiados corresponden a los que resultaron del sismo del 19 de septiembre del 2017 en México. Se analizan las patologías de asimetría de esquina, planta baja débil e irregularidad en planta, y se propone una subcategorización para la asimetría de esquina. La clasificación propuesta pertenece a las denominadas inspecciones visuales rápidas por lo que no supone sustituir las revisiones formales presentadas en la Normas Técnicas Complementarias para el diseño por sismo.

Esta investigación reconoce las limitaciones que podrían influir en los resultados y la interpretación de los datos obtenidos. El método de subcategorización propuesto requiere conocer las dimensiones de los elementos estructurales de los inmuebles a estudiar, esta información únicamente pudo ser recolectada a través de Sistemas de Información Geoespacial (SIG), esto podría repercutir en la cantidad de inmuebles a los que se les podría aplicar la metodología. Debido a que la metodología se propuso en función de los datos estadísticos de la Ciudad de México, su aplicación solo será representativa para inmuebles de esta zona.

2. Patologías estructurales en Ciudad de México

2.1. El Sismo del 19 de septiembre de 2017

El 19 de septiembre de 2017, a las 13:14 horas (hora local), un terremoto de magnitud 7.1 (Mw) sacudió la región central de México, causando daños significativos en los estados de Morelos, Puebla y Ciudad de México (Galvis *et al*., 2020).

Según el Servicio Sismológico Nacional de México (SSN), el epicentro se ubicó a 12 km al sureste de la localidad de Axochiapan, cerca de la frontera entre Morelos y Puebla, con una profundidad focal de 57 km (SSN, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2017, Galvis et al., 2020) (Figura 2.1). Se registró una aceleración máxima del terreno de 223.8 cm/s² (0.23g) en la estación acelerográfica de Culhuacán, ubicada en un sitio de suelo blando en la zona sur de la Ciudad de México. Este valor es aproximadamente un 30% mayor que la aceleración máxima del terreno registrada durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Mw8.0) (Galvis *et al*., 2020).

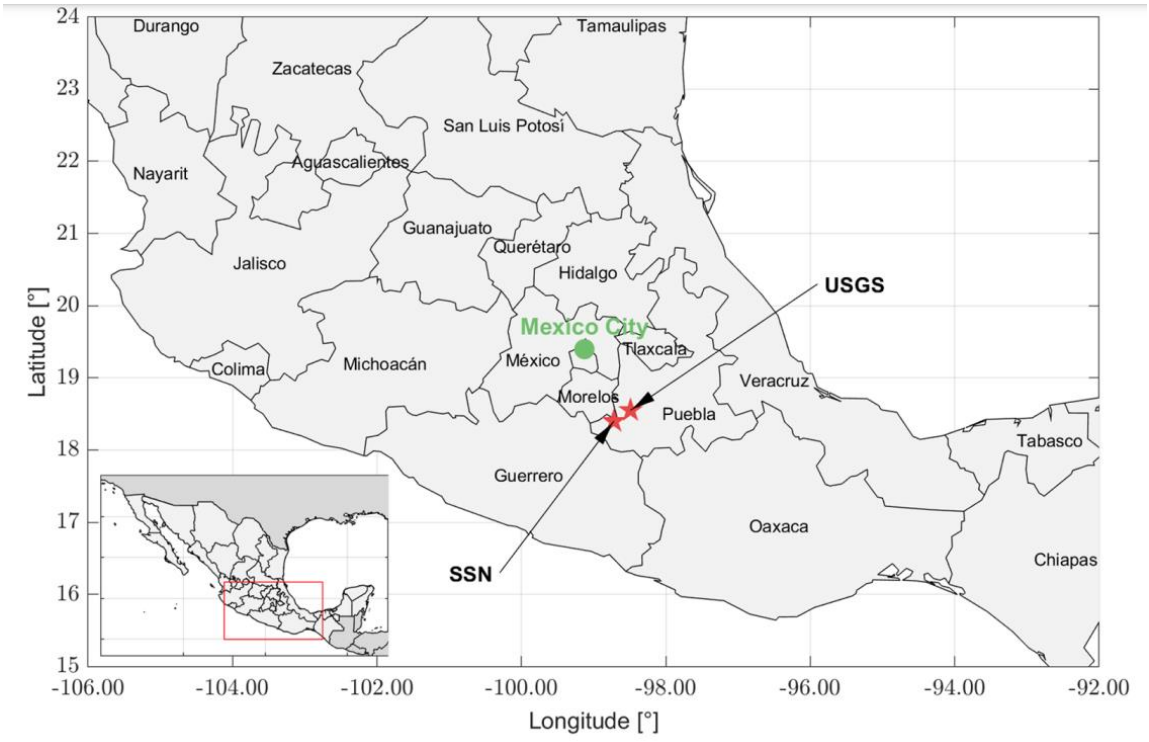


Figura 2.1 Localización del epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017 Puebla-Morelos de acuerdo con el SSN de México y el US Geological Survey (USGS), tomada de (Galvis *et al.*, 2020)

Como resultado de este evento, se reportaron 369 muertes, de las cuales 228 se dieron en la Ciudad de México (Sherman, 2017; Galvis *et al*., 2020). A través de revisiones visuales rápidas en la Ciudad de México, se lograron reconocer miles de estructuras, principalmente unidades residenciales y edificios de apartamentos, ubicadas en lechos lacustres y en la zona de transición, estas presentaban algún nivel de daño estructural que requeriría reparaciones, refuerzos sísmicos o incluso demolición. El sismo causó el colapso de 44 edificios en la Ciudad de México, lo que representa el mayor número de estructuras colapsadas después del terremoto de Michoacán de 19 de septiembre de 1985, de Mw8.0 (Galvis *et al*., 2020), en el cual se registraron 210 colapsos (Meli et al., 1986).

2.2. Zonificación Sísmica de la Ciudad de México

El código sísmico de la Ciudad de México ha sido actualizado tras importantes lecciones aprendidas de terremotos destructivos. La primera vez que se incluyeron regulaciones para el diseño sísmico fue en 1957 a través del Código de Construcción de la Ciudad de México (Rosenblueth, 1956; Galvis *et al*., 2020). Desde entonces, estas regulaciones se han renovado entre el periodo de 1957 a 2017 (Rosenblueth 1960a, 1979; Esteva, 1987; Ordaz *et al*., 2003; Ordaz y Meli, 2004; Galvis *et al*., 2020). Ediciones posteriores consideraron diferentes zonas sísmicas según las condiciones locales del suelo y asignaron coeficientes sísmicos dependientes del sitio (Esteva, 1987; Rosenblueth, 1960a ; Galvis *et al*., 2020).

La zonificación sísmica implica identificar y delimitar áreas con características sísmicas similares basándose en parámetros específicos, como el periodo dominante del suelo y la amplificación relativa del movimiento sísmico. Esto permite crear mapas detallados que muestran cómo diferentes zonas pueden responder a los movimientos telúricos. A través de la zonificación, se evalúan riesgos sísmicos locales, permitiendo clasificar áreas en términos de estabilidad, propensión a amplificaciones sísmicas o potenciales inestabilidades. Esta información es esencial para entender cómo las condiciones del terreno influyen en el comportamiento del suelo durante un sismo, y su aplicación práctica incluye la planificación urbana y el diseño de edificaciones más seguras (Esteva, 1977).

Según la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, 2020, para fines del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTCDS, 2004), la Ciudad de México se divide en tres zonas (Figura 2.2):

- Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta Zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelo para explotar minas de arena.
- Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limos arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.
- Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente comprensible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

Los suelos lacustres del Valle de México amplifican tanto el movimiento del terreno como la duración de los sismos, lo que incrementa significativamente la probabilidad de que las edificaciones sufran daños graves durante un terremoto (Lermo *et al*., 2016; Jaimes *et al*., 2016).

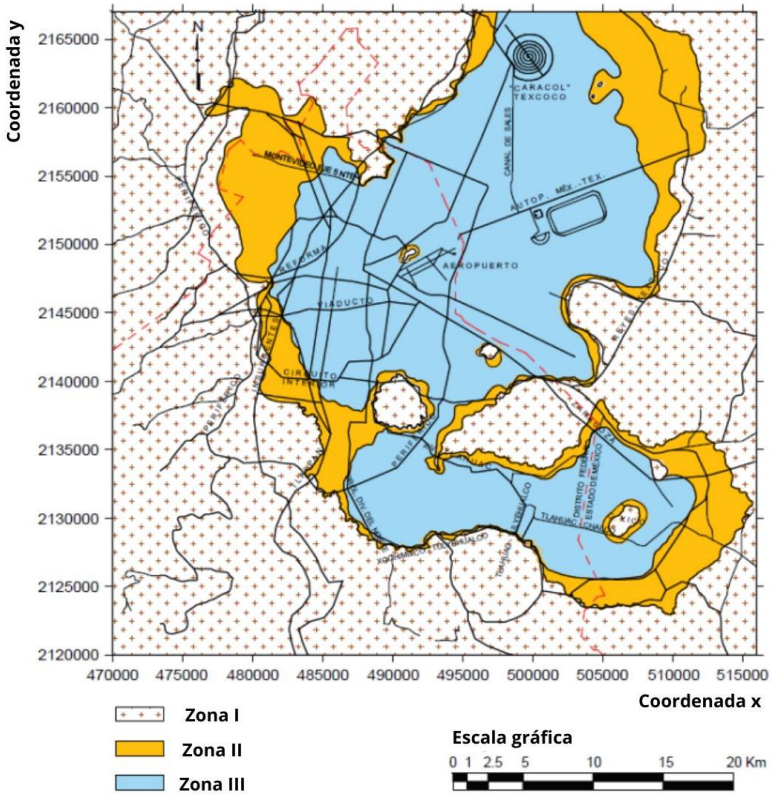


Figura 2.2 Mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México, modificado de (Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, 2020)

2.3. Patologías estructurales

Una patología estructural se refiere a una característica de su configuración que impacta de forma adversa el comportamiento de la estructura frente a un sismo, resultando en una disminución significativa de la seguridad frente al colapso o en un incremento de los daños (FEMA, 2018).

Para el caso del presente trabajo, se tendrá un enfoque en las irregularidades que han afectado negativamente el desempeño estructural en sismos pasados o que son comunes en las tendencias actuales de construcción (FEMA, 2018). Por lo tanto, la base de datos considera las siguientes 7 patologías estructurales.

1. Asimetría de esquina

Esta condición ocurre cuando un edificio tiene una resistencia lateral definible o buena en una dirección, pero carece de ella en la otra, o cuando hay significativas excentricidades de rigidez en el sistema estructural diseñado para resistir fuerzas sísmicas (como se muestra en

la Figura 2.3), lo que puede provocar torsión alrededor de un eje vertical. Las irregularidades en planta que generan torsión son particularmente frecuentes en edificios ubicados en esquina (FEMA, 2015).

De acuerdo con Reinoso et al., 2023, en términos más específicos, esta patología se presenta cuando el centro de rigidez no coincide con el centro de masa en la distribución en planta del inmueble. Los inmuebles con esta condición pueden presentar dos formas de irregularidad torsional:

- Irregularidad asociada a la rigidez: Se origina por la desigualdad de rigideces entre los ejes colindantes y los ejes de fachada. Mientras los muros colindantes son usualmente sólidos y carecen de aberturas, los muros de fachada presentan vanos para puertas y ventanas. Esta diferencia resulta en un desplazamiento entre el centro de rigidez y el centro de masa, dando lugar a efectos torsionales.
- Irregularidad asociada a la resistencia: Esta se relaciona con una distribución no uniforme de la resistencia estructural entre los ejes. En edificaciones de concreto reforzado, dicha resistencia está determinada en gran medida por la cuantía de acero de refuerzo, lo cual complica su evaluación a través de evaluaciones visuales.

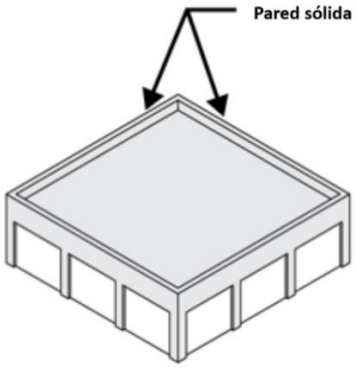


Figura 2.3 Ilustración esquemática de un edificio que presenta asimetría de esquina, modificado de (FEMA, 2015)

2. Golpeteo

El fenómeno de golpeteo ocurre cuando edificios adyacentes colisionan entre sí debido a una excitación externa, generalmente un sismo. Esto sucede cuando las estructuras cercanas presentan respuestas de vibración distintas durante el evento, generando impactos si la separación entre ellas no es suficiente. Estas colisiones se clasifican comúnmente en dos tipos: entre pisos (piso a piso) o entre pisos y columnas (piso a columna) (Figura 2.4) (Cole *et al*., 2010).

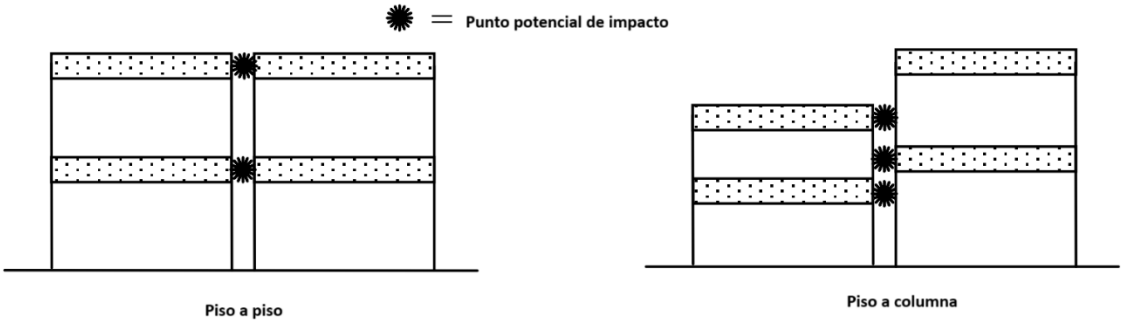


Figura 2.4 Categorías del golpeteo, modificado de (Cole *et al*., 2010)

3. Planta baja débil

La planta baja débil se manifiesta cuando un nivel tiene menor resistencia estructural, como una menor cantidad de paredes o columnas, en comparación con los pisos adyacentes. Además, se considera débil si la rigidez de ese piso es considerablemente inferior a la de los demás niveles. Aunque en una evaluación visual rápida no es posible medir ni comparar de manera precisa la resistencia y rigidez de cada piso, ciertas características observables pueden indicar la presencia de esta condición (Figura 2.5) (FEMA, 2015).

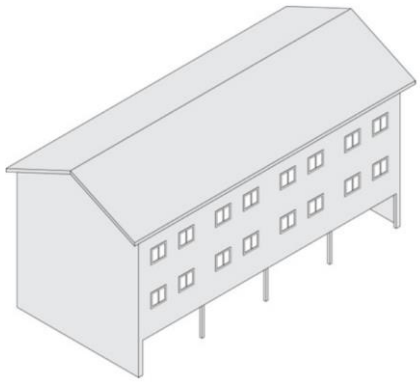


Figura 2.5 Ilustración esquemática de un edificio que presenta planta baja débil donde los espacios destinados al estacionamiento resultan en grandes aberturas, tomada de (FEMA, 2015)

4. Irregularidad vertical

Se considera una irregularidad a la condición en la que la distribución de masas, rigideces o la geometría de los niveles de un edificio varía de manera no uniforme a lo largo de su altura. Para analizar esta patología, se calcula la rigidez del entrepiso dividiendo el cortante del entrepiso, derivado de las fuerzas laterales de diseño, entre su deformación lateral. Esta última se determina midiendo la diferencia entre los desplazamientos laterales registrados en las partes superior e inferior del entrepiso, específicamente en el punto de la planta donde se encuentra el centro de masa de la losa superior (Figura 2.6) (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

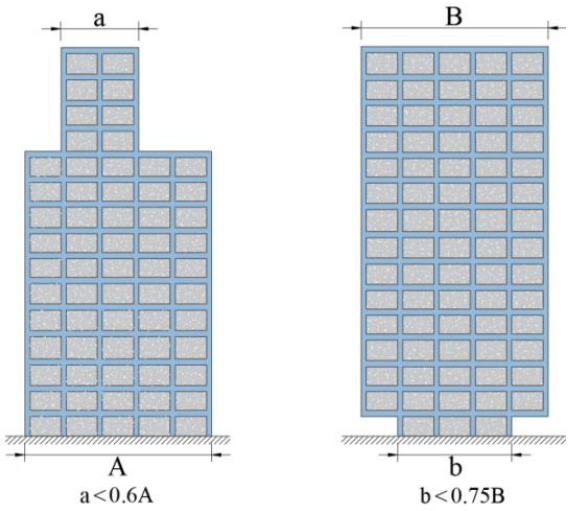


Figura 2.6 Ejemplos de irregularidad por reducciones geométricas en elevación, tomada de (Gobierno de la Ciudad de México, 2023)

5. Irregularidad en planta

Una estructura será considerada geométricamente irregular en planta, desde el punto de vista estructural, cuando presente entrantes o salientes cuyas dimensiones superen el 40 % de la medida de la planta en la dirección en la que se evalúa dicho entrante o saliente (Figura 2.7) (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

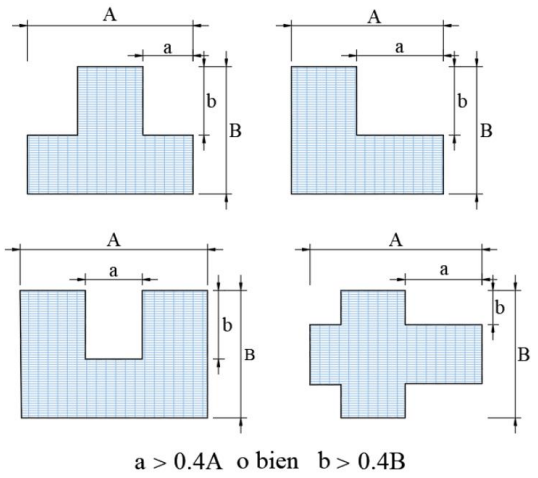


Figura 2.7 Ejemplo de irregularidad en planta, tomada de (Gobierno de la Ciudad de México, 2023)

6. Ubicación en cuña

Los edificios con forma de cuña y planta triangular, situados en esquinas donde las calles se intersecan en ángulos diferentes a los 90 grados, son propensos a experimentar torsión, lo que incrementa el riesgo de daños y colapso (Figura 2.8) (FEMA, 2015).

Figura 2.8 Ilustración esquemática de un edificio con ubicación en cuña, tomada de (FEMA, 2015)

7. Efecto de columna corta

Cuando algunas columnas tienen una altura menor que las columnas estándar, estas columnas más cortas y rígidas tienden a absorber una mayor carga lateral, lo que puede ocasionar daños considerables. Este tipo de columnas suele aparecer cuando existen muros que reducen su altura libre o cuando se agrega una losa intermedia, como en el caso de un mezzanine. También representan un riesgo las columnas o pilares cuya anchura es significativamente menor que la profundidad de las vigas, ya que en estas situaciones los daños se concentran en las columnas en lugar de las vigas, incrementando el riesgo de pérdida del soporte vertical y posible colapso. Las columnas o pilares cortos son consideradas una irregularidad vertical grave y se encuentran comúnmente en edificaciones antiguas de concreto y acero (Figura 2.9) (FEMA, 2015).

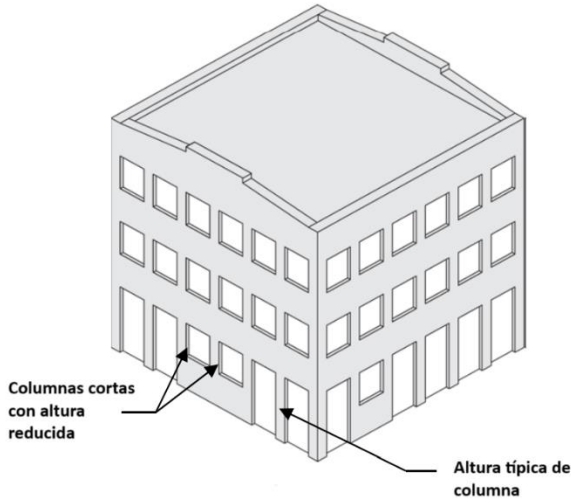


Figura 2.9 Ilustración esquemática de un edificio con columnas cortas debido a aberturas irregulares en paredes, modificado de (FEMA, 2015)

2.4. Descripción de la base de datos utilizada

Para el presente trabajo, se utilizó una base de datos que reúne información sobre edificios en la Ciudad de México. Esta base de datos se elaboró utilizando diversas fuentes, incluyendo el catastro de la ciudad, el Sistema Abierto de Información Geográfica de la Ciudad de México (SIGCDMX), datos proporcionados por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI), y estadísticas de la Dirección Nacional de Unidades Económicas (Reinoso *et al.*, 2022).

El visualizador de daños perteneciente a SÍSÉ Salud Estructural, cuenta con una base de datos que incluye registros de edificaciones afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017. La mayor parte de esta información proviene de visitas de campo y plataformas digitales dedicadas al registro de daños. Adicionalmente, se incorporaron datos de organizaciones civiles y publicaciones en redes sociales, tanto gubernamentales como de asociaciones no gubernamentales (Reinoso *et al*., 2022).

Para fines del trabajo, se consideraron las siguientes variables de la base de datos:

2.4.1. Datos Generales de Localización

- ID PROV: Es un número asignado a cada inmueble para facilitar su identificación única dentro de la base de datos.
- CLAVE: Identificador conformado por 2 secciones separadas por un guión bajo. La primera sección corresponde a la abreviación de cada alcaldía, la segunda sección numera al inmueble.
- LATITUD: La latitud geográfica del edificio en cuestión, una coordenada que ayuda a identificar su ubicación precisa en el mundo.
- LONGITUD: La longitud indica la ubicación geográfica del edificio.
- CALLE: Nombre de la calle donde se encuentra el edificio.
- NÚMERO: El número específico del edificio.
- ENTRECALLES: Las intersecciones cercanas al edificio, proporcionan más contexto sobre su ubicación y facilitan la identificación del área en inspecciones de campo.
- COLONIA: Nombre de la colonia o barrio en el que se ubica el edificio.
- DELEGACIÓN: Información sobre la delegación o alcaldía en la que se encuentra el edificio.

2.4.2. Datos de Construcción

- AÑO CONSTRUCCIÓN PROVISIONAL: Año estimado de construcción del edificio.
- DECADA: La década en la que fue construido el edificio.
- # NIVELES: El número de pisos o niveles del edificio.

- ESTRUCTURACIÓN: El tipo de estructuración de cada inmueble. Cada tipo de estructuración considerado se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los tipos de estructuración (Reinoso *et al*., 2018)

TIPO DE ESTRUCTURACIÓN	ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
Marcos de Concreto	MC	Este tipo de estructura se compone de columnas y vigas de concreto reforzado, las cuales se conectan para formar marcos. Puede incluir muros de mampostería no conectados a la estructura principal (no contribuyen a la rigidez). El sistema de pisos está formado por losas de concreto macizo, nervado o con casetones, que descansan sobre las vigas de concreto reforzado. Este sistema estructural tiene un buen comportamiento frente a cargas sísmicas, ya que es bastante dúctil. En la Ciudad de México, este tipo de estructura se utiliza comúnmente en la construcción de edificios de departamentos y oficinas de baja y media altura.
Marcos de Concreto con Muros de Mampostería	MCMM	Este tipo de estructura está compuesta por columnas y vigas de concreto que forman marcos. Esta incluye muros de mampostería que están integrados a los marcos de concreto, lo que le proporciona mayor rigidez y resistencia al edificio. El sistema de piso se compone de losas de concreto macizo, nervadas o con casetones, que descansan sobre las vigas de concreto. Este sistema tiene un buen desempeño ante cargas sísmicas. Es comúnmente utilizado en la construcción de escuelas, hospitales, edificios de departamentos y oficinas, entre otros usos.
Muros de Mampostería Confinada	MMC	Este tipo de estructura es el más común en la construcción de viviendas en la Ciudad de México. Está compuesto por muros de mampostería que pueden ser de tabiques macizos o huecos unidos con mortero, los cuales están reforzados con castillos y vigas de concreto armado, proporcionando resistencia adicional a los esfuerzos sísmicos. El techo generalmente está compuesto por losas de concreto apoyadas sobre vigas de concreto que confinan los muros. Aunque este tipo de estructura es resistente a las cargas sísmicas, a menudo está asociada con la autoconstrucción, lo que puede afectar la calidad de la construcción y su desempeño estructural.

Muros de Mampostería No Confinada	MMNC	Este tipo de estructuras, comúnmente ubicadas en zonas informales y algunas áreas urbanas de la Ciudad de México, se construyen con muros de mampostería recocida, pero sin dalas ni castillos. En muchos casos cuentan con un sistema de techo flexible formado por vigas de madera simples, sobre las que se apoyan tejas, láminas metálicas o de asbesto. Sin embargo, también existen muchos casos en los que el techo está compuesto por losas macizas de concreto. En general, estas edificaciones carecen de un diseño estructural adecuado, lo que las hace muy vulnerables a cargas sísmicas.

2.4.3. Daños Estructurales

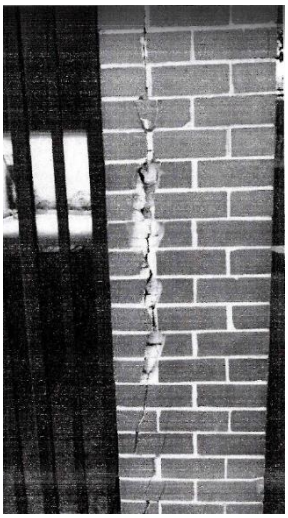
- DAÑO ESTRUCTURAL VISUALIZADOR: Descripción del daño estructural observada a simple vista. Esto ayuda a clasificar rápidamente los edificios según su nivel de daño sin la necesidad de un análisis técnico profundo.

Según Reinoso et al., 2019, el daño en las estructuras puede ser clasificado en 5 niveles, según su gravedad. Esto niveles se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del daño en las estructuras (Reinoso *et al.*, 2019)

Nivel de Daño	Descripción
Sin Daño	No se detectan daños en los componentes estructurales ni no estructurales durante las inspecciones. Tampoco hay registros de daños en las bases de datos del inmueble.
Menor	Se presentan daños ligeros que no afectan la integridad de la estructura, tales como grietas en elementos no estructurales, acabados, instalaciones, etc.
Intermedio	Adicional a los daños descritos anteriormente, se observan grietas pequeñas en elementos estructurales como vigas, columnas o muros, indicando daño estructural.
Grave	Aparecen grietas mayores y deformaciones significativas en elementos estructurales, comprometiendo la estabilidad de la estructura debido a la exposición del acero de refuerzo.
Total	El colapso de la estructura ocurre durante el sismo, o se requiere demolición debido a los daños sufridos.

(a)



(b)

(c)

(d)

Figura 2.10 Ejemplos de la clasificación de niveles de daño. (a) Edificio con daño menor en Av. Centenario 904, Canutillo 2da Sección. (b) Edificio con daño intermedio en Michoacán 34, Hipódromo. (c) Edificio con daño grave en Nápoles 48, Juárez. (d) Edificio con daño total en Edimburgo 4, Del Valle. (SÍSÉ, 2025)

2.4.4. Patologías y Deficiencias Estructurales

Este conjunto de columnas se refiere a las patologías que los inmuebles presentaban. Estas se mencionan en la sección 2.3.

A cada patología se le asignó una intensidad con la que se puede presentar. De acuerdo con Martínez (2019) se puede describir cada nivel de intensidad para cada patología de la siguiente manera:

Asimetría de esquina

- **Nula**: La estructura no está ubicada en una esquina o, si lo está, tiene cuatro fachadas.
- **Moderada**: La estructura se encuentra en una esquina, pero sus fachadas están formadas mayormente por muros o columnas robustas desde el piso hasta el techo.
- **Intensa**: La estructura está en una esquina y sus fachadas están compuestas principalmente por columnas delgadas.

Planta baja débil

- **Nula**: Las columnas o muros de la estructura son uniformes a lo largo de toda su altura.
- **Moderada**: En altura, el edificio no tiene uniformidad en su estructura. En la planta baja, la estructura tiene pocos muros, representando entre el 50% y el 20% en relación con las plantas superiores.
- **Intensa**: En altura, el edificio no es uniforme en cuanto a su tipo estructural. La planta baja cuenta con un sistema estructural con entre el 20% y el 5% de muros comparado con las plantas superiores.

Irregularidad en planta

- **Nula**: El edificio tiene una forma regular en planta, como una planta circular, cuadrada o rectangular.
- **Moderada**: La planta del edificio tiene una forma semi-regular, como un rectángulo alargado (donde el largo es más del doble que el ancho) o con salientes pequeños en forma cuadrada.
- **Intensa**: El edificio tiene una forma completamente irregular, es decir, no tiene una forma rectangular.

Irregularidad en elevación

- **Sin irregularidades**: El edificio mantiene una forma regular en elevación, por ejemplo, una forma rectangular constante con una relación de altura a base menor que 2.5.
- **Irregularidad moderada**: El edificio mantiene una forma semi-regular en elevación, con ligeros cambios en las dimensiones de sus entrepisos.
- **Alta irregularidad**: El edificio tiene una forma irregular en elevación, con cambios bruscos en las dimensiones de los entrepisos o formas no convencionales.

Columnas cortas

- **Sin columnas cortas**: El edificio tiene columnas llenas completamente de mampostería o concreto sin vacíos.
- **Con columnas cortas**: Porcentaje de altura de muros en relación con la altura total de los entrepisos.

Golpeteo entre estructuras

- **Sin golpeteo**: Las estructuras están separadas por más de 3 cm en cada nivel del edificio más bajo y no presentan contacto.
- **Poco golpeteo**: Se presenta un leve contacto entre dos estructuras con alturas iguales y losas que están alineadas.
- **Golpeteo moderado**: Las dos estructuras tienen alturas iguales, pero sus losas no están alineadas.
- **Golpeteo fuerte**: El contacto es entre estructuras con diferentes alturas y las losas no están alineadas.

2.4.5. Revisiones Visuales Rápidas (Rapid Visual Screening)

El procedimiento de Rapid Visual Screening (RVS) o Revisiones Visuales Rápidas está diseñado para identificar, registrar e inspeccionar edificios que podrían ser peligrosos frente a un sismo. Si un edificio es señalado como potencialmente riesgoso, debe ser evaluado por un profesional especializado en diseño sísmico para confirmar si realmente presenta un riesgo sísmico (FEMA, 2015).

3. Subcategorización cuantitativa del efecto de asimetría de equina

3.1. Delimitación de la zona de estudio y selección de la muestra

Este capítulo tiene por objetivo analizar los daños causados por el sismo del 19 de septiembre del 2017 en México, enfocándose en inmuebles que presentaron las patologías de asimetría de esquina, planta baja débil e irregularidad en planta y que se ubicaban en la Ciudad de México (CDMX). El análisis comienza con una visión global de los daños en los inmuebles de la CDMX, para posteriormente identificar las áreas con una concentración significativa de edificaciones afectadas. Se delimitará una zona de estudio adecuada para fines del presente estudio. Una vez se seleccione la zona de estudio se procede a tomar una muestra de inmuebles los cuales serán clasificados de manera cualitativa con el fin de obtener la tendencia que tuvo cada patología dentro de la zona.

Los análisis que se presentan a continuación se realizaron a partir de la Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS perteneciente al SÍSÉ, esta contempla el daño visualizado en el inmueble y considera 7 patologías estructurales, asimetría de esquina, golpeteo, planta baja débil, irregularidad vertical, irregularidad en planta, ubicación en cuña y efecto de columna corta.

Como se mencionó anteriormente, la determinación de la zona de estudio se inicia con un análisis general, por ello se comienza delimitando una primera zona ubicada en el Valle de México, esta considera las 16 alcaldías que conforman la Ciudad de México. Dentro de la zona delimitada se tiene un total de 2194 inmuebles que presentaron daños a consecuencia del sismo. En la Figura 3.1 se observa que, aunque se está considerando toda la Ciudad de México, hay alcaldías que concentran un mayor número de inmuebles dañados. De manera visual es posible identificar fácilmente en el mapa que las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez son las que concentran un mayor número de inmuebles dañados.

La Figura 3.2 muestra de forma estadística la distribución de los inmuebles dañados, confirmando lo inferido sobre la Figura 3.1. Las alcaldías con más concentración de inmuebles dañados son Cuauhtémoc con un total de 657 inmuebles, Benito Juárez con un acumulado de 457 inmuebles y Coyoacán con 199 inmuebles.

Por otra parte, es posible notar en la Figura 3.1 que los inmuebles siguen un patrón ya que se concentran en la zona del norte de la CDMX. La Figura 3.3 presenta los inmuebles dañados

sobre el mapa de la zonificación sísmica de la CDMX, aquí se aprecia que la aglomeración de inmuebles dañados en general se da principalmente en la Zona II (transición) y Zona III (lacustre). Se puede inferir entonces que el tipo de suelo influyó en la cantidad de daños que se presentaron en cada alcaldía, por lo que este factor resulta relevante y se considerará al momento de seleccionar la zona de estudio.

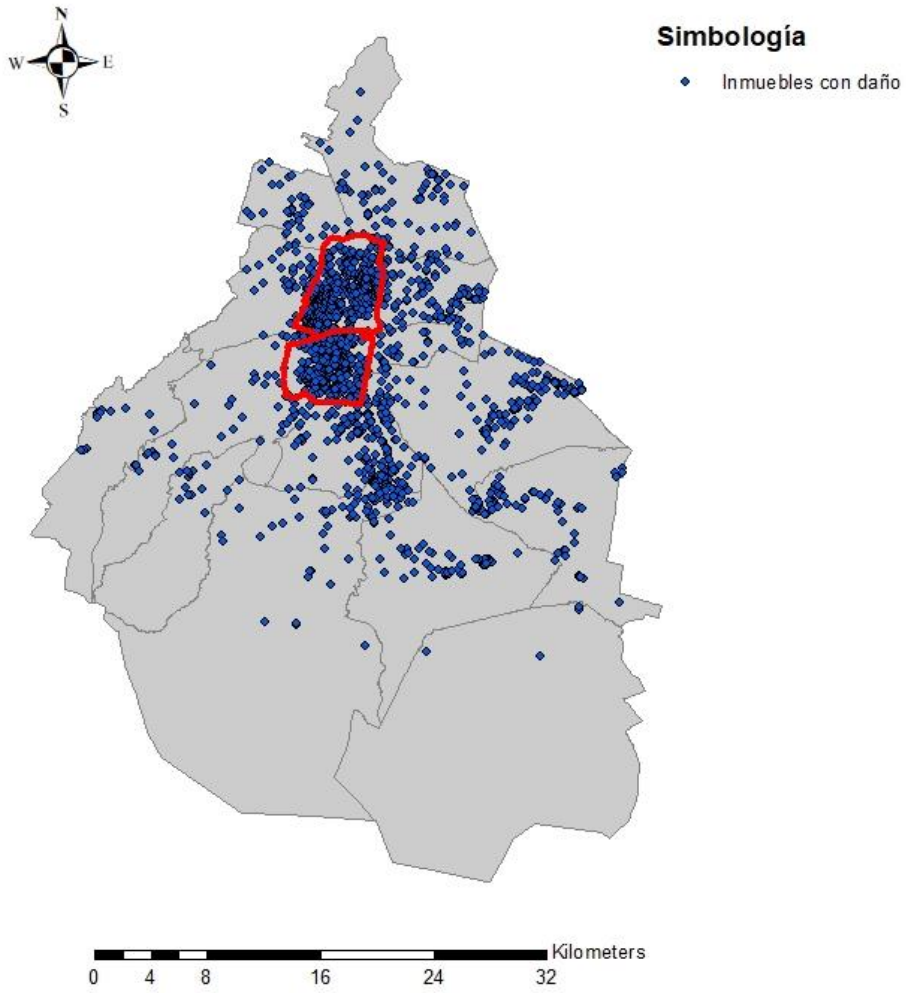


Figura 3.1 Distribución de inmuebles dañados en la Ciudad de México. (2024). Información tomada de: SÍSÉ. (2025). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). Esquema generado con el software *ArcGIS* (Esri, 2019).

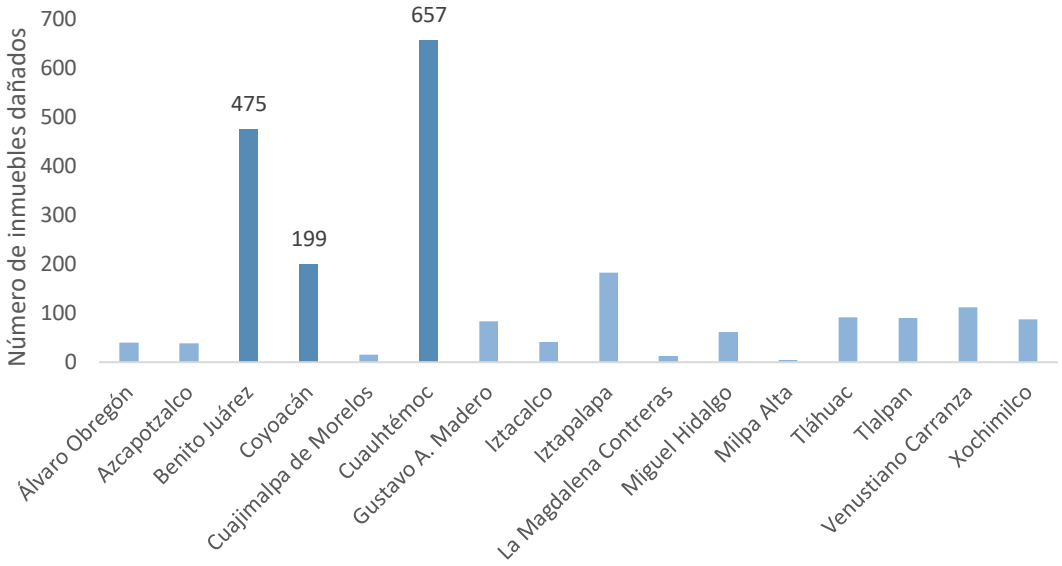


Figura 3.2 Distribución de inmuebles dañados en la Ciudad de México según la alcaldía

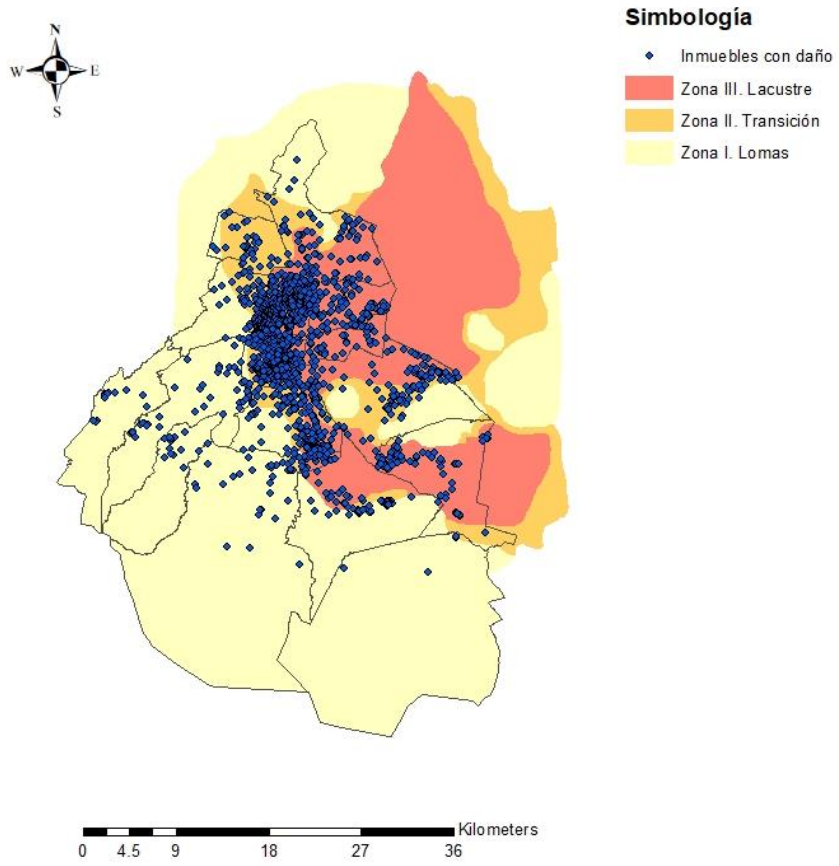


Figura 3.3 Distribución de inmuebles dañados sobre la zonificación sísmica en la Ciudad de México. (2024). Información tomada de: SÍSÉ. (2025). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). Esquema generado con el software *ArcGIS* (Esri, 2019).

Partiendo del interés por estudiar la asimetría de esquina, la zona de estudio que se busca delimitar deberá de tener un número suficiente de inmuebles dañados que hayan presentado esta patología. Por lo anterior, se revisa a continuación la distribución de inmuebles que presentaron asimetría de esquina de forma aislada, es decir, sin involucrar ninguna otra patología de las mencionadas al principio de este capítulo de manera simultánea, dentro de la Ciudad de México (Figura 3.4). Es posible notar que al igual que en la Figura 3.1, las alcaldías con mayor acumulación de inmuebles dañados son la Cuauhtémoc y Benito Juárez.

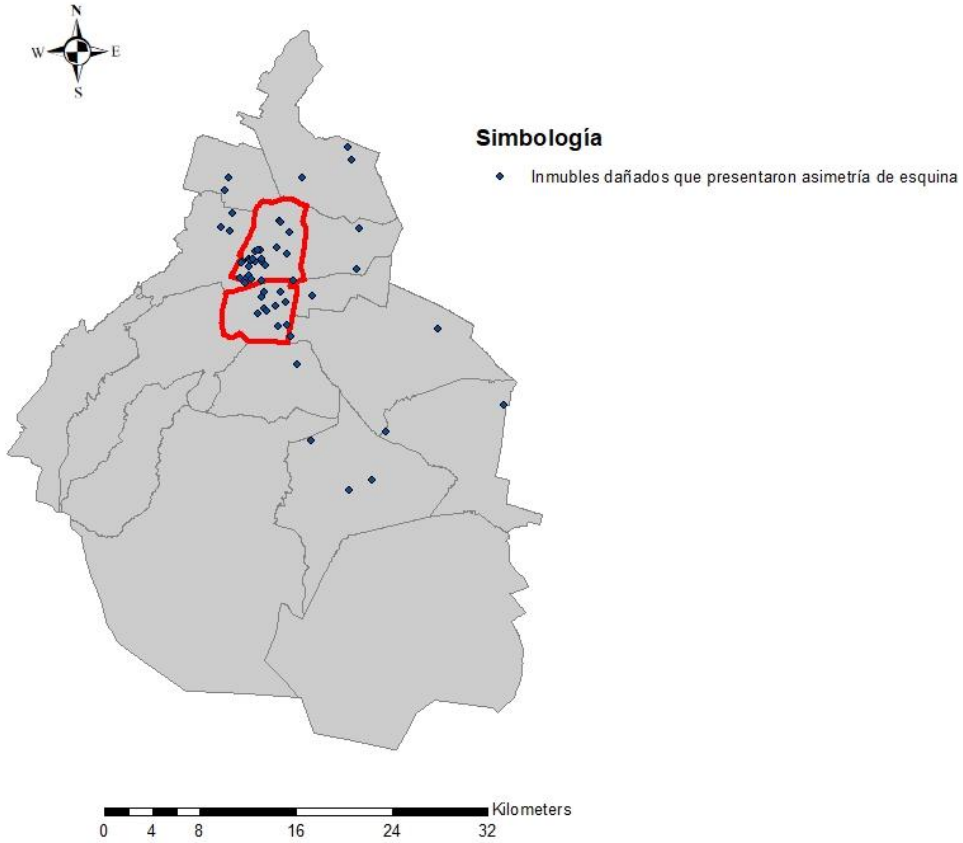


Figura 3.4 Distribución de inmuebles dañados que presentaron asimetría de esquina de forma aislada en la Ciudad de México. (2024). Información tomada de: SÍSÉ. (2025). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). Esquema generado con el software *ArcGIS* (Esri, 2019).

De acuerdo con la base de datos, en la Ciudad de México se tiene un total de 72 inmuebles que presentan asimetría de esquina de manera aislada. Se realiza una revisión visual de estas estructuras y se procede a descartar las que no servirán para el análisis. Las características que podría convertir el inmueble en uno no apto para este estudio son, estructuras con daños notables previos al sismo, estructuras que no fue posible visualizar en Sistemas de

Información Geográfica (SIG) e inmuebles que no se pueden visualizar debido a que tiene bardas cubriendo sus elementos estructurales. Una vez depurada la base de datos, se finaliza con un total de 55 inmuebles con daño que presentan asimetría de esquina de forma aislada dentro de la zona.

Se presenta a continuación un análisis de las características que este conjunto de estructuras. En la Figura 3.5 se muestran los tipos de daños presentes en las edificaciones con asimetría de esquina aislada según el número de niveles que tienen. De los 55 inmuebles dañados, 37 inmuebles tuvieron daño menor, 11 inmuebles tuvieron daño intermedio y 7 inmuebles tuvieron daño grave. Los inmuebles de 2 y 3 niveles fueron los que presentaron la mayor cantidad de daños y a su vez presentaron tres tipos de daños. Se observa que no hubo estructuras colapsadas en la Ciudad de México a causa del efecto esquina por sí solo.

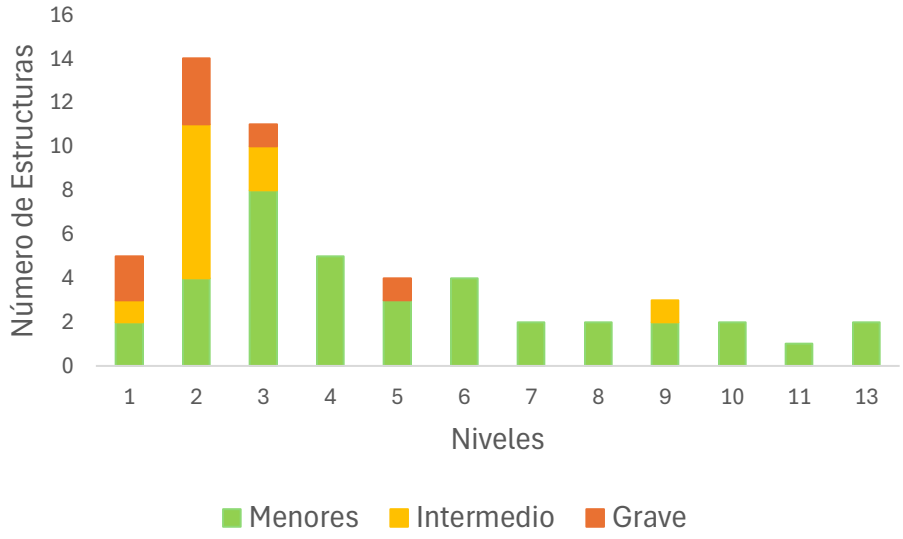


Figura 3.5 Número de inmuebles con asimetría de esquina dañados según el número de niveles

En la Figura 3.6 se muestra que, de los 55 inmuebles encontrados en la zona, 12 fueron construidos a base de Marcos de Concreto (MC), 14 a base de Marcos de Concreto con Muros de Mampostería (MCMM), 25 a base de Muros de Mampostería Confinada (MMC) y 4 a base de Muros de Mampostería No Confinada (MMNC). En su mayoría hay estructuras de 2 y 3 niveles con Muros de Mampostería Confinada.

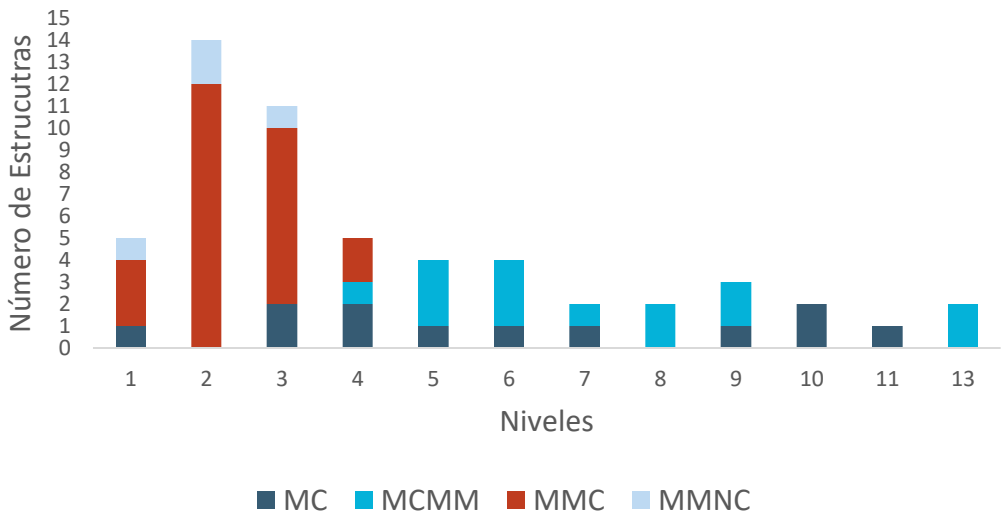


Figura 3.6 Tipo de estructuración en los edificios con asimetría de esquina según los niveles

Considerando que el sismo del 19 de septiembre de 1985 en México fue de gran relevancia, este se considera un parteaguas por lo que en la Figura 3.7, se muestra que porcentaje de los inmuebles se construyeron antes del año 1985. Se aprecia que la mayor parte de estos fueron construidos antes del año 1985.

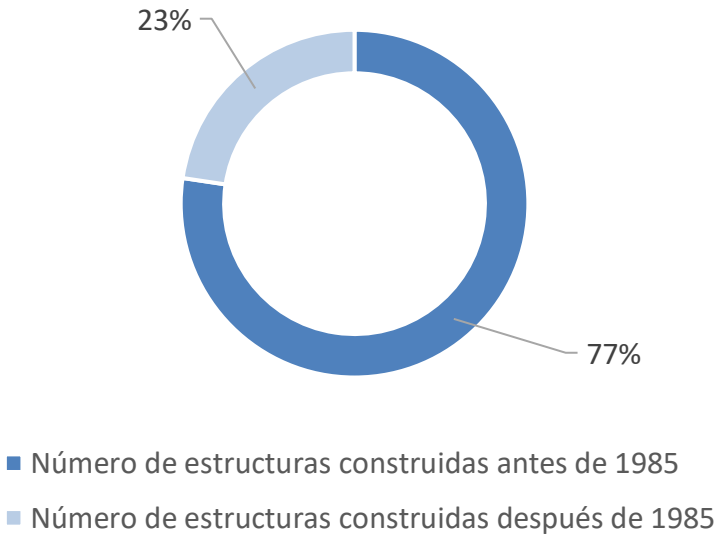


Figura 3.7 Año de construcción de los edificios con asimetría de esquina

En la Figura 3.8 se presenta de forma estadística la distribución de inmuebles con asimetría de esquina aislada según lo mostrado en la Figura 3.4. Se observa que las alcaldías que predominan son la Cuauhtémoc y Benito Juárez.

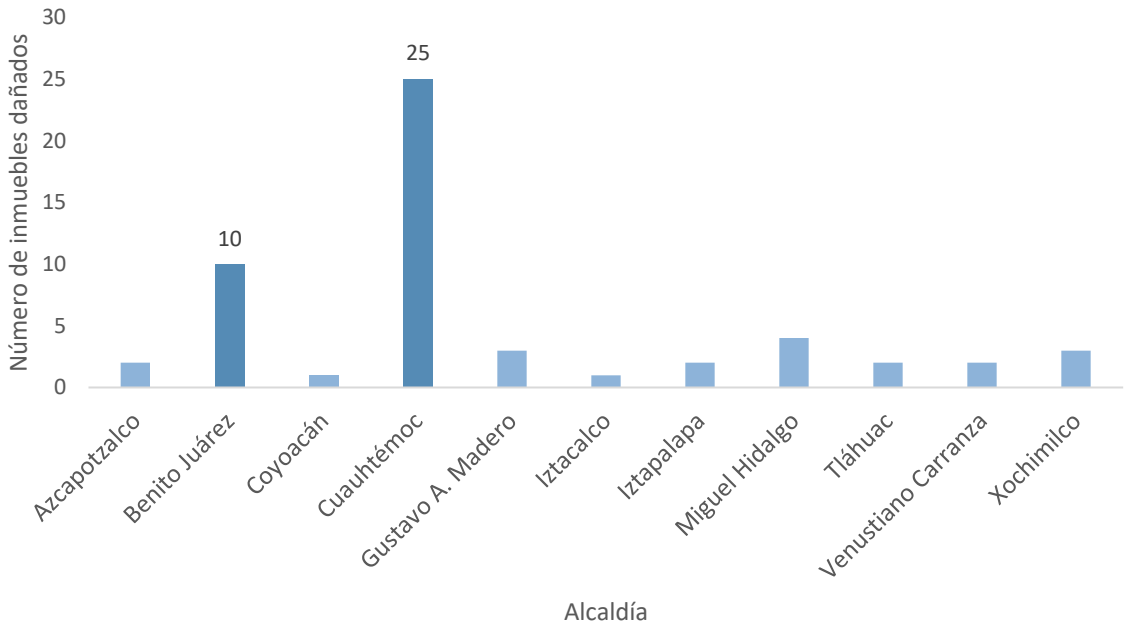


Figura 3.8 Distribución de inmuebles dañados con asimetría de esquina aislada en la Ciudad de México según la alcaldía

Finalmente, en la Figura 3.9 se muestra la distribución de los inmuebles con daño que presentaron asimetría de esquina aislada según la zonificación sísmica. Es posible observar que únicamente una estructura se encuentra en la zona I, el resto se ubican dentro de las zonas II y III (zona de lago).

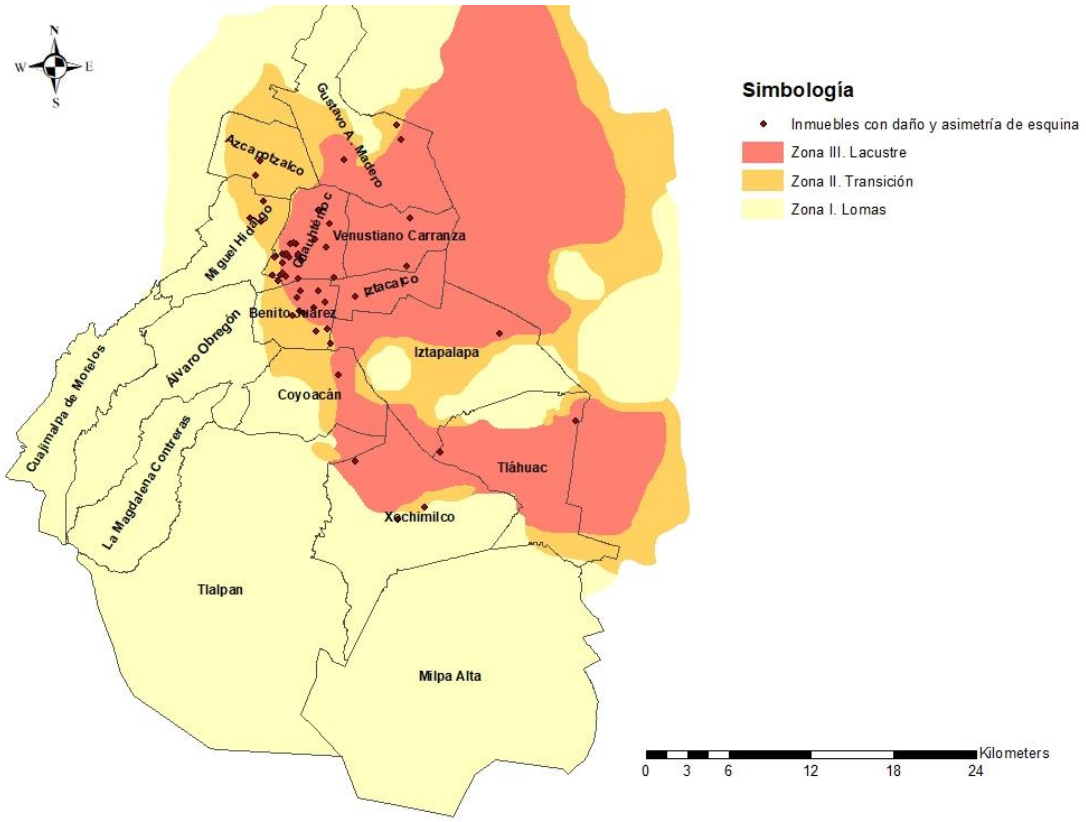


Figura 3.9 Distribución de los inmuebles con daño y asimetría de esquina aislada según la zonificación sísmica. (2024). Información tomada de: SÍSÉ. (2025). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). Esquema generado con el software *ArcGIS* (Esri, 2019).

Una vez caracterizada la primera zona, se procede a elegir una alcaldía en la cual se ubicará la zona final de estudio. Las alcaldías que se consideran en principio son con la Cuauhtémoc y Benito Juárez debido a que son las que mayor concentración de inmuebles dañados poseen (Figura 3.2), por otra parte, se considera su ubicación en la zona I y zona II. Como última consideración antes de elegir la zona, en la Figura 3.10 se muestra que tanto la alcaldía Cuauhtémoc como la Benito Juárez mostraron tres tipos de daños.

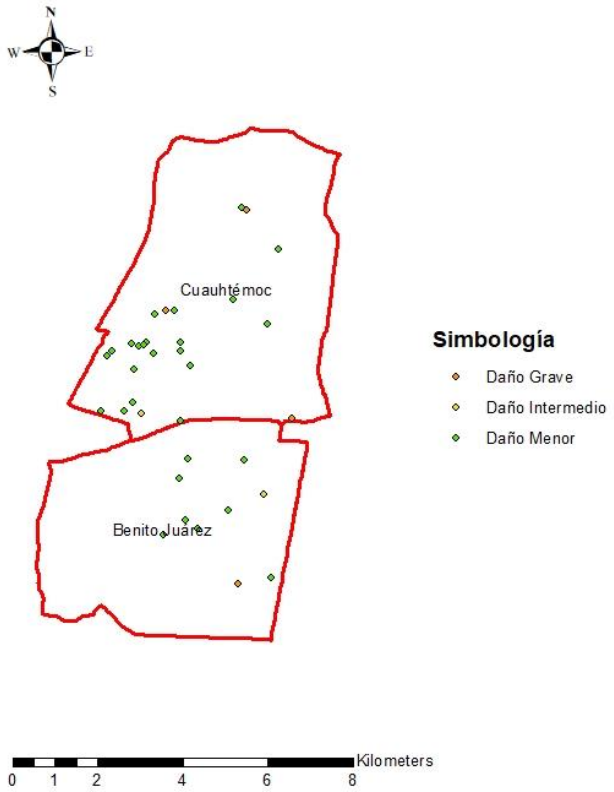


Figura 3.10 Distribución de tipos de daño en las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez. (2024). Información tomada de: SÍSÉ. (2025). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). Esquema generado con el software *ArcGIS* (Esri, 2019).

Considerando los argumentos anteriores, se opta por reducir la zona de estudio a la alcaldía Cuauhtémoc. Esta alcaldía fue la que tuvo más inmuebles con daño acumulando un total de 657, adicionalmente, esta también tuvo el mayor número de inmuebles con asimetría de esquina aislada con daño acumulando un total de 25. Se encuentra en su mayoría dentro de la Zona III lacustre, la cual es una de las zonas más desfavorables y abarca una parte de zona II. Finalmente, presenta variabilidad en los tipos de daño que se presentaron en la zona.

Por último, se delimita una zona de estudio, para esto se busca un área que posea una concentración adecuada de inmuebles dañados en la alcaldía Cuauhtémoc, en la Figura 3.11 se nota que esta área está en la parte inferior izquierda de la alcaldía. Adicional a esto, la zona elegida busca incluir la estación acelerométrica CI05.

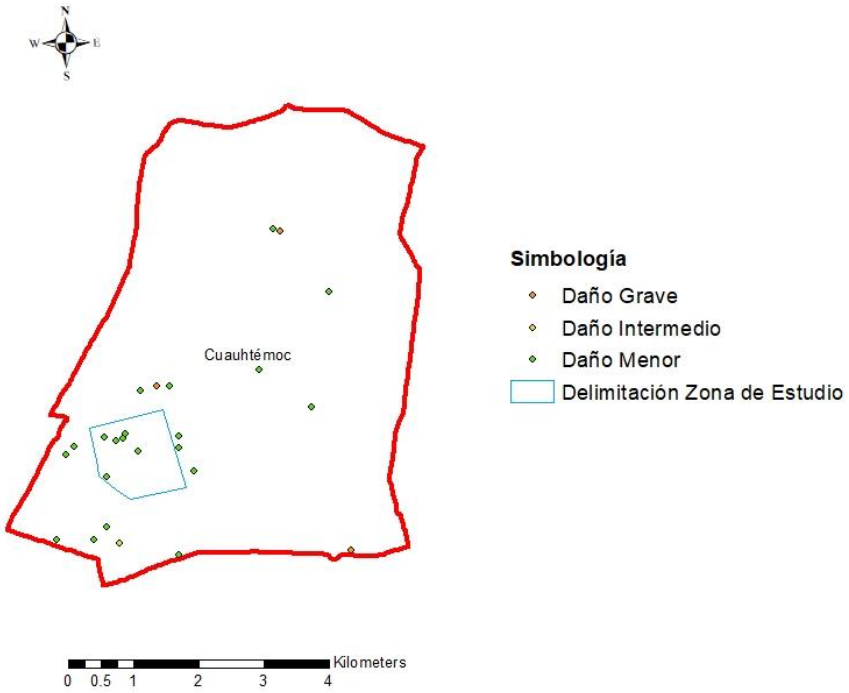


Figura 3.11 Zona de estudio delimitada dentro de la alcaldía Cuauhtémoc y ubicación de la estación acelero métrica CI05. (2024). Información tomada de: SÍSÉ. (2025). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). Esquema generado con el software *ArcGIS* (Esri, 2019).

La selección de esta zona se realizó con el fin de reducir el universo de edificios a estudiar. La zona de estudio se localiza en un perímetro que abarca parte de las colonias Roma Norte e Hipódromo Condesa dentro de la alcaldía elegida. Este perímetro está delimitado por Avenida Chapultepec, Calle Córdoba, Calle Chiapas, Calle Teotihuacán, Avenida Parras y Calle Cozumel (Figura 3.12).

Una vez establecida la zona de estudio, se revisa cómo está configurada en cuanto a los edificios sin daño y los edificios con daños. La Figura 3.12 muestra que en la zona de estudio se tiene un total de 2295 inmuebles, de los cuales 2169 no presentaron daño y 126 sí presentaron daño. La base de datos considera 4 diferentes niveles de daño, daño menor, daño intermedio, daño grave y daño total (colapso). La descripción detallada de estos niveles se presenta en la Tabla 2 del Capítulo 2, en la cual se especifican los criterios utilizados para

clasificar los daños observados en las estructuras. Los inmuebles dañados podrían tener una de las 7 patologías mencionadas al inicio del presente capítulo.

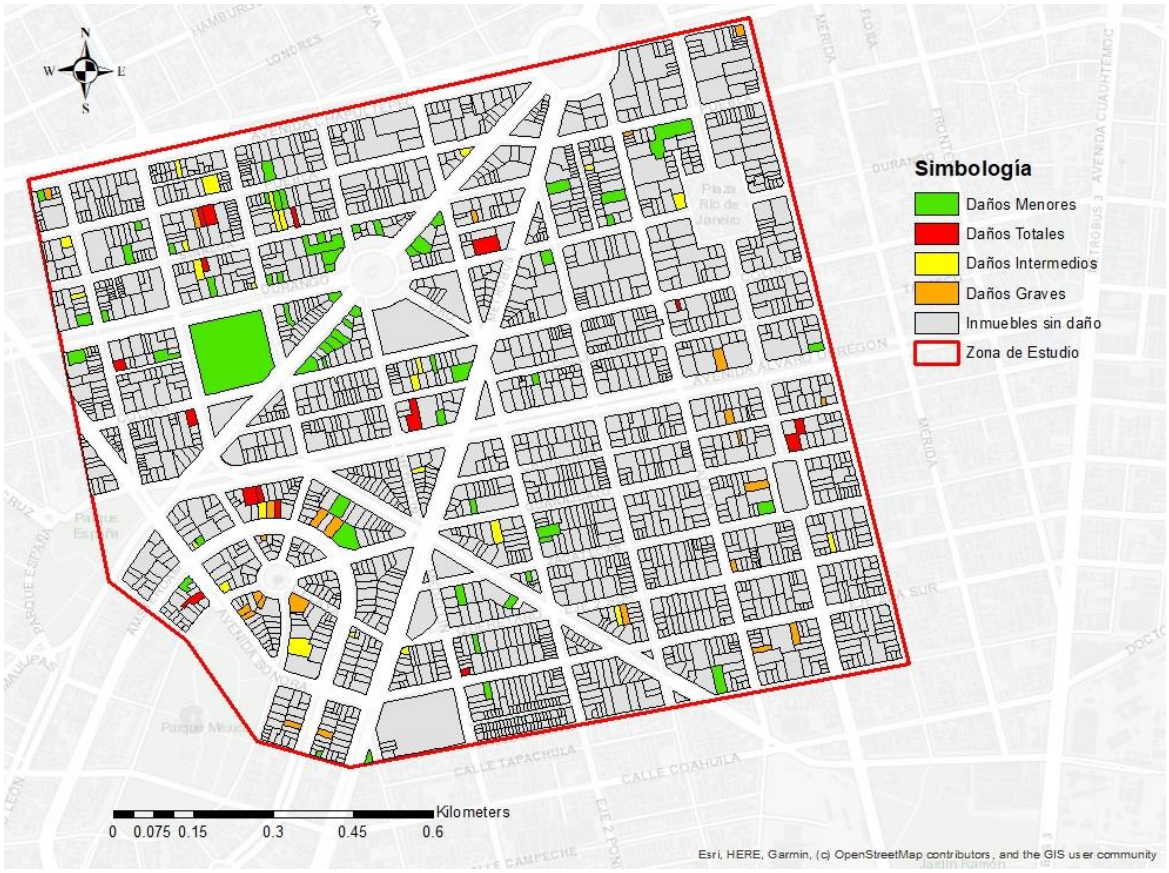


Figura 3.12 Mapa de la zona de estudio propuesta e inmuebles con diferentes niveles de daño. (2024). Información tomada de: SÍSÉ. (2025). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021). Esquema generado con el software *ArcGIS* (Esri, 2019).

La distribución de los daños, de acuerdo con la clasificación propuesta en la zona de estudio, se muestra en la Figura 3.13. Se observa que el 94 % de los inmuebles no sufrieron daños, el 2.6 % de los inmuebles tuvieron daño menor, 1.13 % de los inmuebles tuvieron daño intermedio, 1.09 % tuvieron daño grave y 0.65 % tuvieron daño total. Esto indica que menos del 6 % de los inmuebles tuvieron daños en la zona de estudio.

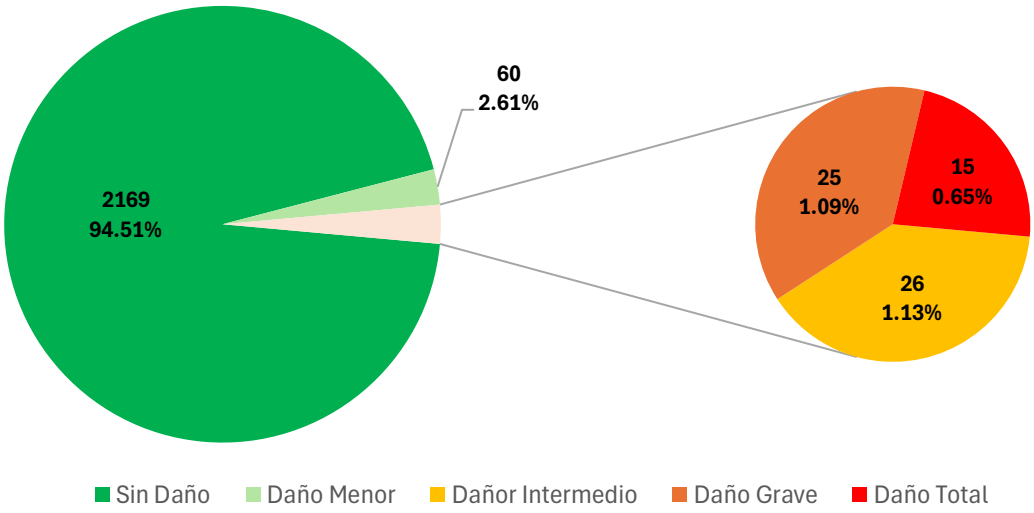


Figura 3.13 Distribución de daños en el universo de estudio de acuerdo con la clasificación propuesta

La base de datos recabada por el equipo del SÍSÉ consultando varias fuentes e instituciones, entre ellas, el mismo Instituto de Seguridad de las Construcciones (ISC), muestra los inmuebles con daños y los subcategoriza de forma cualitativa acorde con las patologías estructurales que presentaban. No se dispone de esta información para los inmuebles que no tuvieron daños y para fines de este estudio, se requiere conocer la cantidad de inmuebles sin daño dentro de la zona de estudio que presentaron asimetría de esquina, planta baja débil e irregularidad en planta. Para ello se debería de categorizar de manera cualitativa cada uno de los inmuebles que contiene la zona de estudio. Sin embargo, esto resulta laborioso debido a la gran cantidad de inmuebles que se tienen. Como alternativa se opta por tomar una muestra representativa de la zona de estudio, esta será formada por 106 inmuebles que se encuentren distribuidos en toda la zona de estudio. Posteriormente, los 106 inmuebles seleccionados se categorizarán de manera cualitativa. Para cada inmueble se determinará si tienen asimetría de esquina, planta baja débil e irregularidad en planta y en qué nivel presentan la patología. Siguiendo los criterios de categorización cualitativa presentados en el Capítulo 2 se obtuvieron los siguientes resultados.

La Figura 3.14 presenta los resultados de clasificar los inmuebles de la muestra, se encontró que el 50 % no presentaban ninguna de las 3 patologías estudiadas, el 19 % presentaron irregularidad en planta (IP) de forma aislada, el 12 % presentó planta baja débil (PBD) de forma asilada mientras que el 8 % presentó asimetría de esquina (AE), finalmente el 11 %

restante se conformó de las diferentes combinaciones de las patologías. Es importante mencionar que los inmuebles sin daño solo se clasificaron para las 3 patologías mencionadas, lo que indica que estos podrían presentar otras patologías en combinación con las estudiadas.

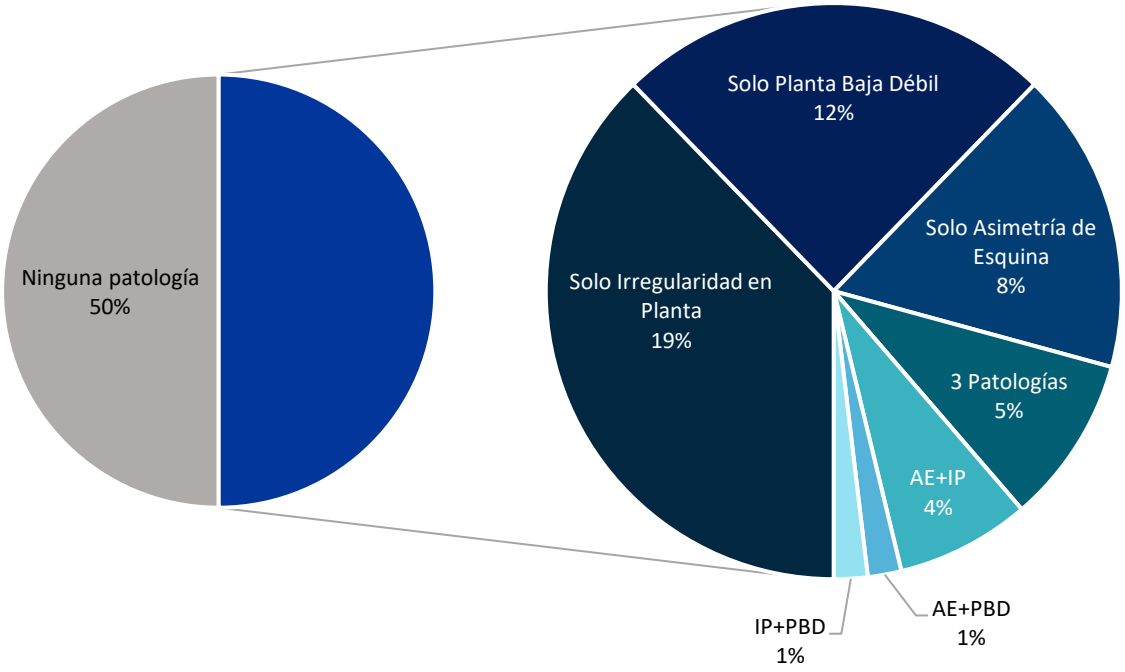


Figura 3.14 Categorización cualitativa de la muestra tomada de la zona de estudio

Una vez obtenidas la tendencia que cada patología estudiada sigue en la muestra es posible inferir el comportamiento de las patologías en todos los inmuebles dentro de la zona de estudio. En la Figura 3.15 se muestra cuantos de los 2169 inmuebles sin daños presentaron cada patología de forma asilada o combinada. Así, 1085 estructuras no presentarían ninguna patología, 409 inmuebles presentarían irregularidad en planta, 266 inmuebles presentarían planta baja débil, 184 presentarían asimetría de esquina y los 224 inmuebles restantes presentarían diferentes combinaciones de las patologías.

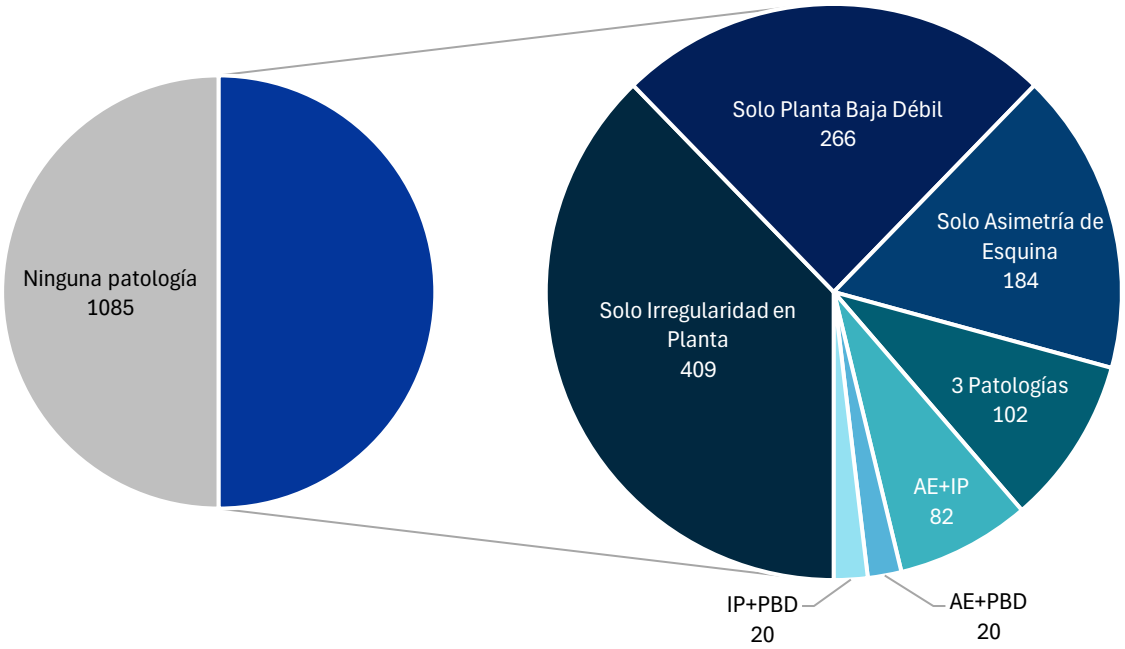


Figura 3.15 Tendencia de las patologías presentes en inmuebles sin daño en la zona de estudio

Finalmente se integran los datos de los inmuebles que tuvieron algún tipo de daño con el fin de exponer un panorama general en la zona de estudio (Figura 3.16)

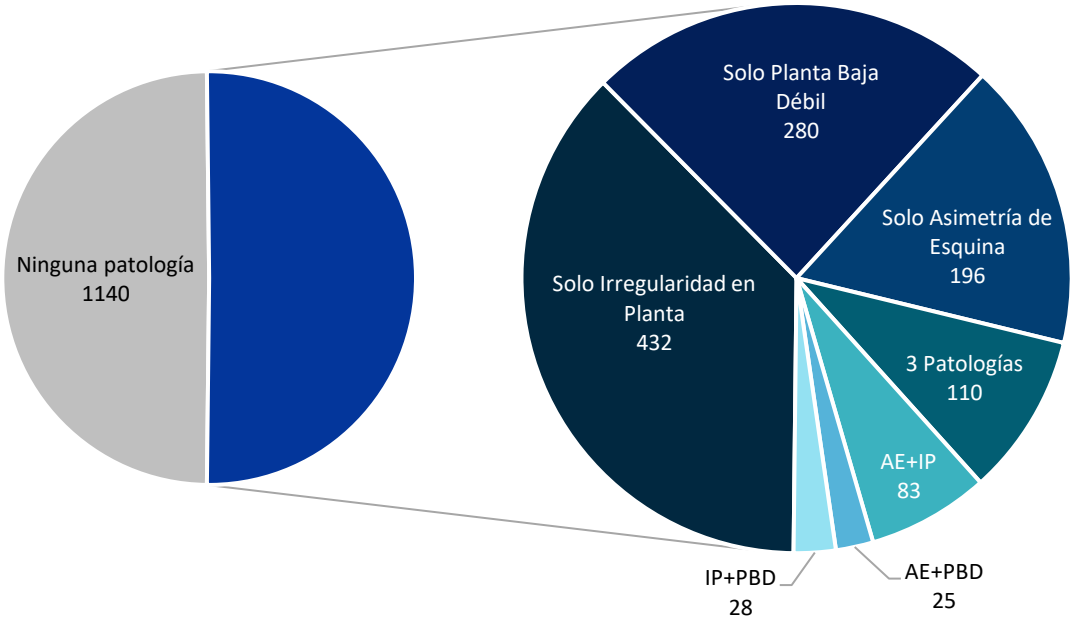


Figura 3.16 Tendencia de las patologías estudiadas en la zona de estudio

3.2. Análisis de los daños en la zona de estudio/tendencia de las patologías en la zona de estudio

En la sección 3.1 se obtuvieron las tendencias que cada una de las tres patologías estudiadas siguen dentro de la zona de estudio cuando los inmuebles son subcategorizados de forma cualitativa. En el presente capítulo, se pretende realizar un análisis más detallado de los inmuebles que mostraron algún tipo de daño de acuerdo con la patología que presentaron y comparar cada una de las 3 patologías estudiadas con el fin de valorar la necesidad de proponer una metodología que permita subcategoriza de forma cuantitativa los inmuebles que tuvieron asimetría de esquina.

En la Figura 3.17 se muestra cuántos inmuebles de los 1156 con y sin daño presentaron por lo menos una de las patologías estructurales estudiadas. Se observa que 196 inmuebles tuvieron asimetría de esquina, 280 inmuebles planta baja débil, 432 irregularidad en planta, 83 inmuebles tuvieron asimetría de esquina e irregularidad en planta, 25 inmuebles tuvieron asimetría de esquina y planta baja débil, 28 inmuebles tuvieron irregularidad en planta y planta baja débil y finalmente, 110 presentaron las 3 patologías de manera simultánea. Cabe mencionar que los inmuebles presentaron alguna de las 3 patologías de interés, pero podrían también presentar otras patologías.

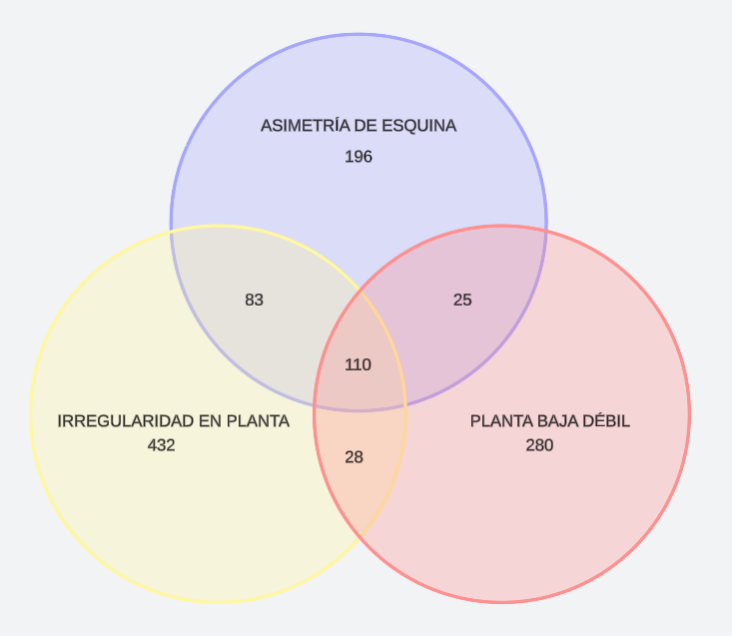


Figura 3.17 Número de inmuebles que presentaron patologías estructurales

Si bien la asimetría de esquina está asociada con irregularidades en planta por torsión (Reinoso et al., 2023), su relevancia radica en los efectos torsionales que produce, los cuales se intensifican debido a la configuración geométrica propia de las esquinas. Esta condición se agrava cuando se presenta en conjunto con otras patologías estructurales como lo es la planta baja débil.

A continuación, se presenta, para cada una de las tres patologías de interés, la comparación entre el número de inmuebles en la zona de estudio que no presentaron la patología estudiada y el número de inmuebles que si la presentaron, así como la distribución de los inmuebles según el nivel con el que se presentó la patología. Los niveles considerados con los que se presentó la patología fueron moderado e intenso.

Es importante señalar que el total de inmuebles considerados para cada patología incluirá aquellos que presentaron la patología de manera aislada, los que exhibieron una patología adicional además de la estudiada, y los que manifestaron las tres patologías de manera simultánea (Figura 3.17).

En la Figura 3.18 se observa como de los 2295 inmuebles presentes en la zona de estudio, 1880 no presentaron la patología de asimetría de esquina, 289 inmuebles la presentaron de forma moderada y 126 inmuebles la presentaron de forma intensa. Esto quiere decir que casi el 82 % de los inmuebles no presentaron asimetría de esquina mientras que el 18 % sí presentaron asimetría de esquina.

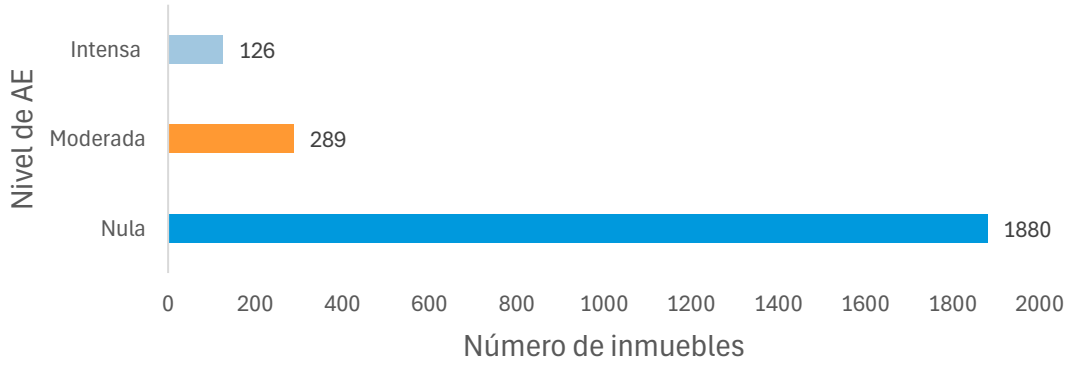


Figura 3.18 Inmuebles con asimetría de esquina en la zona de estudio

Para el caso de los inmuebles con planta baja débil presentados en la Figura 3.19, se aprecia que, de los 2295 inmuebles, 1851 no presentaron la patología de planta baja débil, 354 inmuebles la presentaron de forma moderada y 90 inmuebles la presentaron de forma intensa. Esto quiere decir que alrededor del 80 % de los inmuebles no presentaron planta baja débil, mientras que aproximadamente el 20 % sí presentaron planta baja débil.

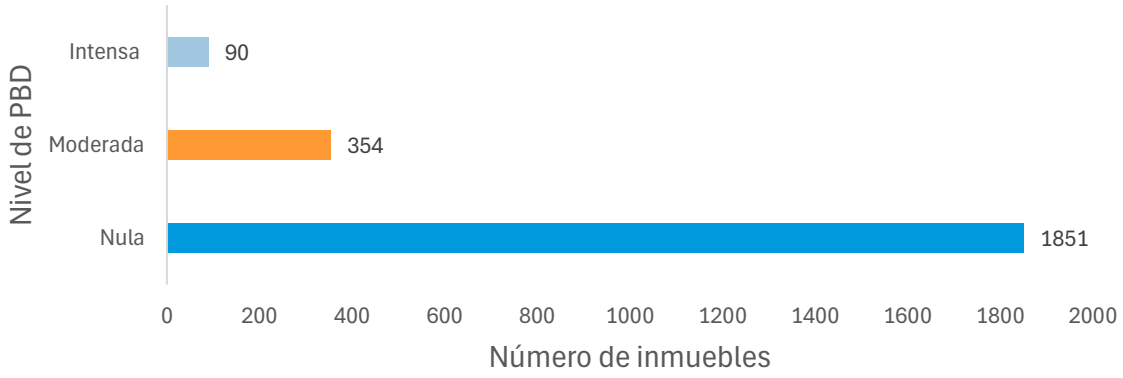


Figura 3.19 Inmuebles con planta baja débil en la zona de estudio

Los inmuebles que presentaron irregularidad en planta tuvieron la distribución mostrada en la Figura 3.20, de los 2295 inmuebles, 1641 no presentaron la patología de irregularidad en planta, 643 inmuebles la presentaron de forma moderada y 11 inmuebles la presentaron de forma intensa. Esto quiere decir que, el 71.46 % de los inmuebles no presentaron irregularidad en planta mientras que el 28.54 % si presentaron irregularidad en planta.

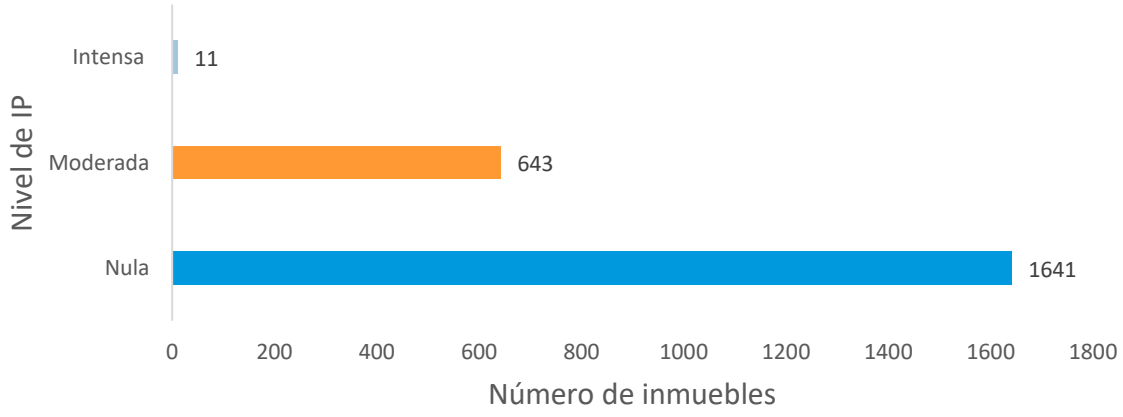


Figura 3.20 Inmuebles con planta baja débil en la zona de estudio

En general, la patología de asimetría de esquina y la de planta baja débil tuvieron valores similares, manteniendo al rededor del 80 % los inmuebles que no presentaron ninguna de

estas y con un aproximado del 19 % los inmuebles que sí las presentaron. En el caso de la irregularidad en planta, los porcentajes varían considerablemente respecto a las dos patologías mencionadas anteriormente, los valores sugieren que es la patología que tiene mayor número de inmuebles que la presentan.

Las figuras anteriores (Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20) presentaron el número de inmuebles que mostraron alguna de las patologías; sin embargo, no todos los inmuebles que las tuvieron sufrieron daños. A continuación, se muestra cuántos de los inmuebles que presentaron alguna de las patologías en cuestión, presentaron algún nivel de daño.

Para el caso de asimetría de esquina, se tiene un total de 414 inmuebles, en la Figura 3.21 se muestra la distribución de los daños presentados en estas estructuras. De acuerdo con la información recabada, de las estructuras con asimetría de esquina (moderada e intensa), 388 no presentaron daño, 12 sufrieron daño menor, 6 daño intermedio y 8 daños grave o total. En total se dañaron 26 inmuebles.

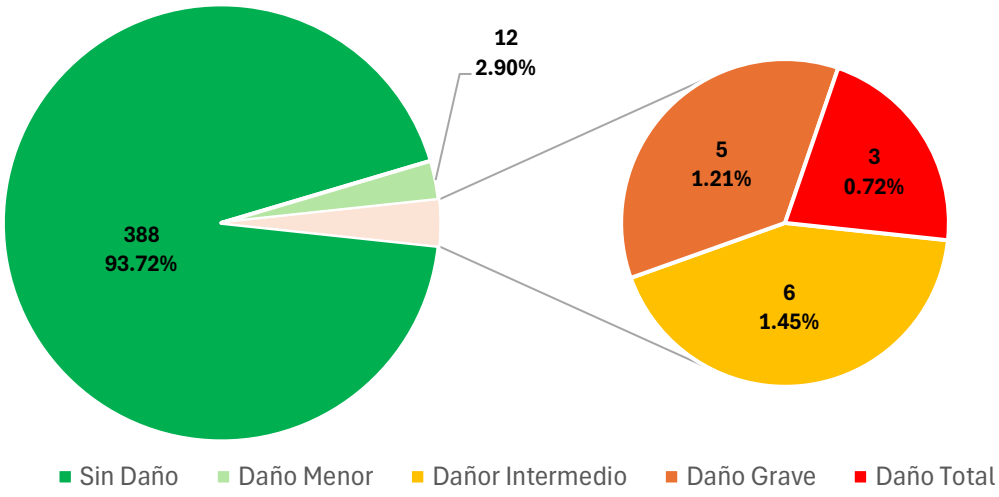


Figura 3.21 Distribución de los daños en estructuras con asimetría de esquina de un total de 414 edificios en la zona de estudio

En la zona de estudio se tiene un total de 444 inmuebles con planta baja débil, en la Figura 3.22 se muestra la distribución de los daños presentados en estas estructuras. De acuerdo con la información recabada, de las estructuras con planta baja débil (moderada e intensa), 409

no presentaron daño, 11 sufrieron daño menor, 9 daño intermedio y 15 daño grave o total. En total se dañaron 35 inmuebles.

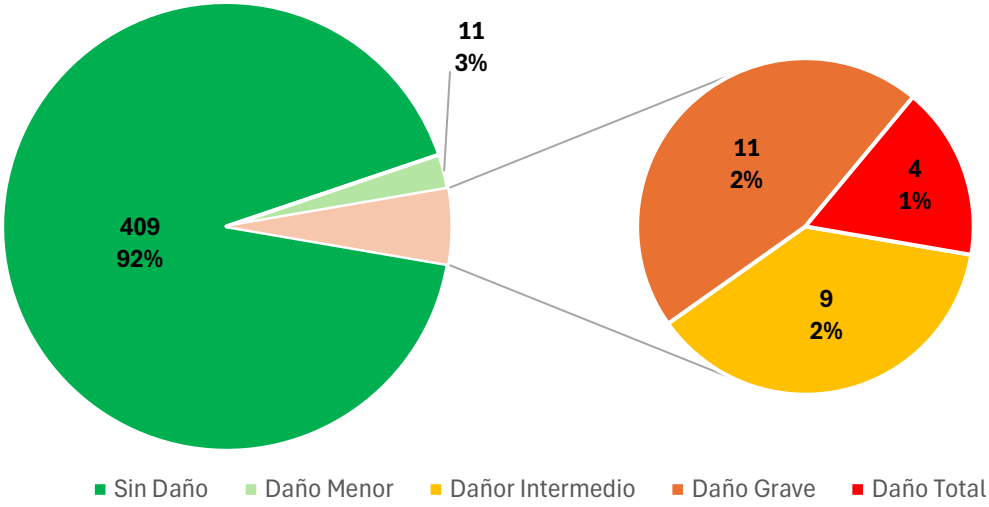


Figura 3.22 Distribución de los daños en estructuras con planta baja débil de un total de 444 edificios en la zona de estudio

Finalmente, en la zona de estudio se tiene un total de 654 inmuebles con irregularidad en planta, en la Figura 3.23 se muestra la distribución de los daños presentados en estas estructuras. De acuerdo con la información recabada, de las estructuras con irregularidad en planta (moderada e intensa), 614 no presentaron daño, 13 sufrieron daño menor, 14 daño intermedio y 13 daño grave o total. Dejando un total de 40 inmuebles dañados.

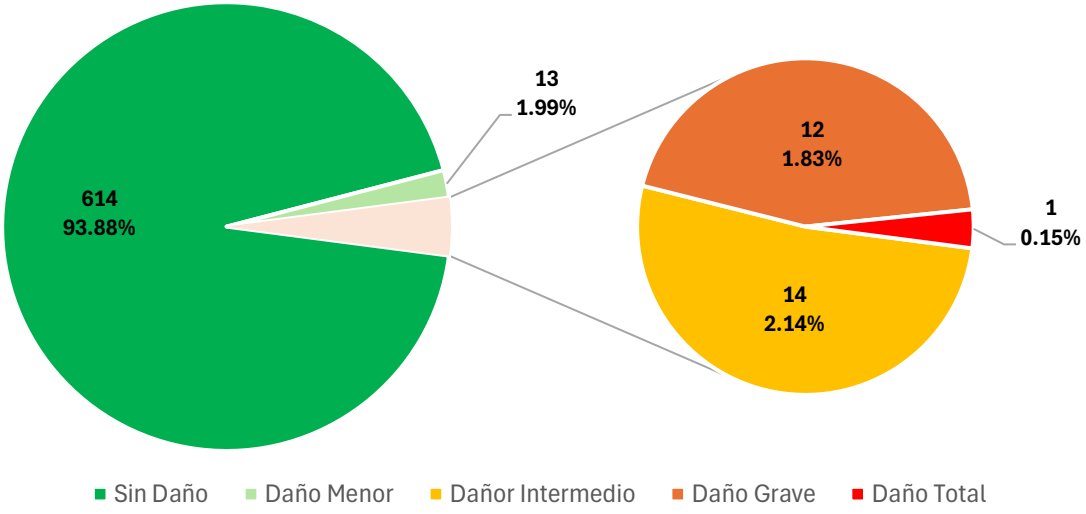


Figura 3.23 Distribución de los daños en estructuras con irregularidad en planta de un total de 654 edificios en la zona de estudio

En general, se puede observar que el daño total en los inmuebles fue de entre el 6 % y 8 %, y que los daños menores fueron los predominantes en todos los casos. La planta baja débil fue la patología con mayor porcentaje de inmuebles dañados con un total del 8 %. Estos valores son cercanos al porcentaje de daños totales en toda la zona de estudio de aproximadamente el 6 %, esto indica que los daños varían según la patología, no obstante, se mantienen en un rango.

El conjunto de gráficos presentados anteriormente ofreció una vista global de cuántos inmuebles tuvieron daño (diferenciados según el nivel de daño) dentro de un grupo de inmuebles que presentaban una patología de interés, para este caso, las patologías de asimetría de esquina, planta baja débil e irregularidad en planta.

Cada estructura fue categorizada de manera cualitativa según el nivel con que el presentaba una o varias patologías. Este método puede resultar ambiguo, por ello, a continuación, se busca calcular el nivel de daño promedio en conjuntos de estructuras. Estos conjuntos estarán diferenciados según su el nivel con el que presentaron una patología o un conjunto de estas. De esta manera, se podrá conocer la severidad del daño causado por cada patología.

Para el conjunto de inmuebles que presentaron asimetría de esquina, la Figura 3.24 muestra el nivel de daño promedio de acuerdo con el nivel con el que se presenta la patología. Se

observa que un conjunto de inmuebles que no presentan la asimetría de esquina tiene un daño promedio del 1.34 %, cuando esta se presenta de manera moderada el daño es del 1.86 % y cuando se presenta de forma intensa el daño es del 2.44 %. Este gráfico evidencia cómo el nivel de daño promedio en edificaciones incrementa a medida que aumenta la intensidad de la asimetría de esquina.

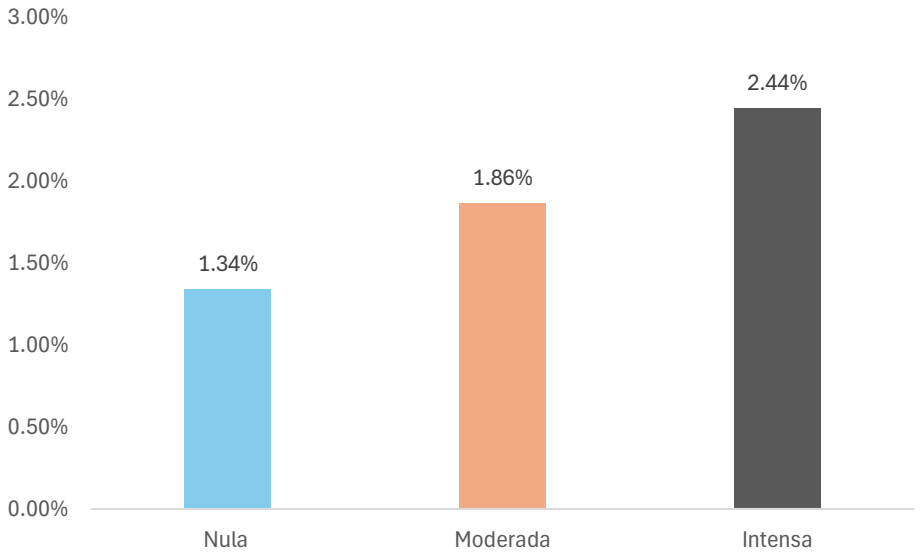


Figura 3.24 Daño promedio en las estructuras de acuerdo con el nivel de asimetría de esquina

Para el conjunto de inmuebles que presentaron planta baja débil, la Figura 3.25 muestra el nivel de daño promedio de acuerdo con el nivel con el que se presenta la patología. Se observa que el conjunto de inmuebles que no presentan la planta baja débil tiene un daño promedio del 1.13 %, cuando esta se presenta de manera moderada el daño es del 1.98 % y cuando se presenta de forma intensa el daño es del 8.4 %. Para este conjunto, el daño promedio aumenta a medida que la planta baja débil se intensifica.

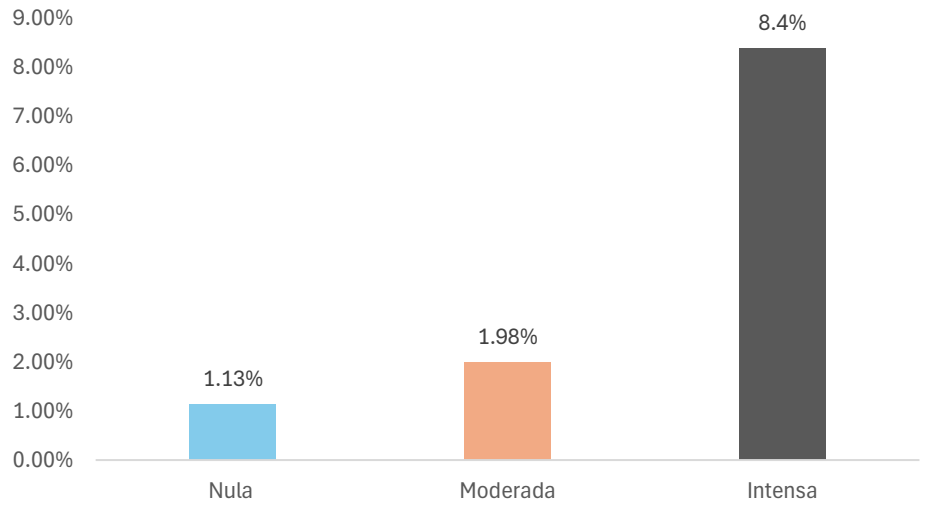


Figura 3.25 Daño promedio en las estructuras de acuerdo con el nivel de planta baja débil

Para el conjunto de inmuebles que presentaron irregularidad en planta, la Figura 3.26 muestra el nivel de daño promedio de acuerdo con el nivel con el que se presenta la patología. Se observa que un conjunto de inmuebles que no presentan la irregularidad en planta tiene un daño promedio del 1.37 %, cuando esta se presenta de manera moderada el daño es del 0.89 % y cuando se presenta de forma intensa el daño es del 31.14 %. Para el último conjunto, la severidad aumenta de manera importante cuando la irregularidad en planta se presenta de manera intensa.

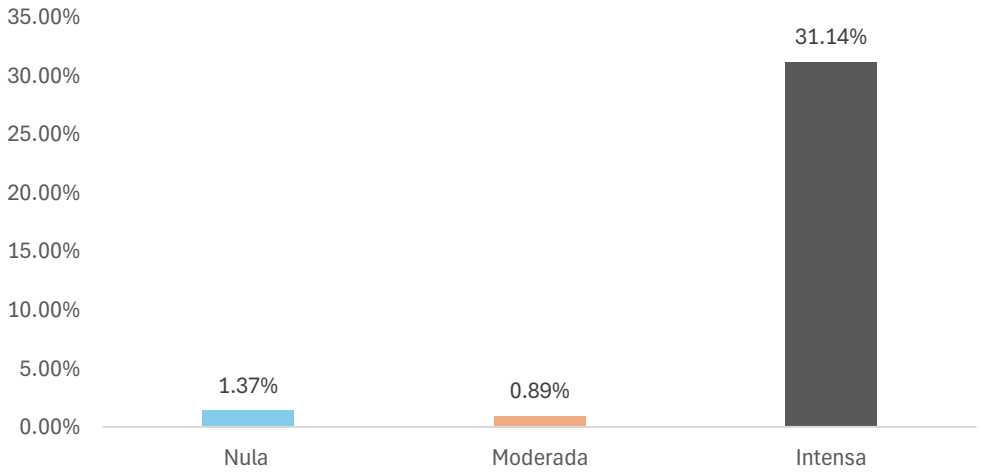


Figura 3.26 Daño promedio en las estructuras de acuerdo con el nivel de irregularidad en planta

Los tres gráficos presentados anteriormente reflejan el impacto que tienen distintas patologías estructurales en el daño promedio de las edificaciones, permitiendo establecer comparaciones clave entre la asimetría de esquina, la planta baja débil y la irregularidad en planta. Tanto la asimetría de esquina como la planta baja débil muestran un aumento gradual del daño promedio con la intensidad de la patología. Aunque la tendencia del daño para estas patologías es la misma, el daño en la planta baja débil fue significativamente mayor, alcanzando un 8.4% de daño. Finalmente, la irregularidad en planta intensa se destaca como la patología más crítica, con un daño promedio alarmante de 31.14%.

Es importante resaltar que la metodología utilizada para categorizar los inmuebles fue cualitativa. Para el caso de la irregularidad en planta, la categorización se realizó a través del uso de sistemas de información geográfica por lo que las huellas de las construcciones pudieron no ser claras o haber generado múltiples formas dejando de esta manera la categorización a juicio del evaluador. Esto es notable en los resultados del nivel de daño, ya que estos parecen no seguir una tendencia y varían radicalmente entre nivel moderado e intenso. En el caso de la planta baja débil se obtuvieron resultados más consistentes, se infiere que se debe a que visualmente es más sencillo identificar el nivel de severidad de esta patología.

De la anterior comparación se supone que debido a que la patología de planta baja débil es más fácil de categorizar correctamente de manera visual otorga resultados más sólidos, mientras que una patología como lo es la irregularidad en planta presenta dificultades al momento de su categorización por lo que se tienen resultados inciertos.

Bajo este razonamiento, la asimetría de esquina carece de un método para ser categorizada de acuerdo con la severidad con la que se presenta. Esto representa limitaciones similares a las de la irregularidad en planta. Por ello, el desarrollo de un enfoque cuantitativo para categorizar la asimetría de esquina permitirá reducir la subjetividad en su análisis y mejorará la precisión de los resultados

3.3. Propuesta de subcategorización de la patología de esquina

En la sección 3.2 se determinó la necesidad de proponer una nueva metodología que permita subcategorizar de manera más precisa los inmuebles con asimetría de esquina según el nivel con el que presentan la patología. Por lo anterior, en el presente capítulo se realiza la propuesta de esta metodología, la cual buscará definir una subcategorización cuantitativa para estructuras con asimetría de esquina. Es de gran relevancia señalar que esta propuesta no busca sustituir ningún reglamento, sino que tiene como objetivo formar parte de las inspecciones visuales rápidas (Rapid Visual Screening).

En la sección 3.2 se mostró que en total 26 edificios en la zona de estudio presentaban una condición de esquina y tuvieron algún tipo de daño (Figura 3.21); sin embargo, no se menciona como estos daños se distribuyen en función de la clasificación del efecto de esquina. Además, también se mencionó que la clasificación de esquina propuesta tiene un carácter cualitativo, por lo que queda al juicio de quien evalua la definición entre bajo y alto. Finalmente, las estructuras clasificadas con asimetría baja y alta pueden ser susceptibles a una subcategorización si se conocen algunas propiedades geométricas del edificio.

Para plantear la propuesta de subcategorización de la patología de edificios con asimetría en esquina se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis:

- La patología de asimetría en esquina se debe a la diferencia entre la ubicación entre el centro de masas y el centro de rigidez
- Las dimensiones de la sección transversal de las columnas resultan en una buena medida de la rigidez lateral
- La diferencia entre la longitud del eje colindante resistente y el eje de fachada resistente permite estimar, de manera aproximada, el nivel de torsión en el edificio

No se considera la condición de irregularidad por torsión debida a la resistencia, debido a que es difícil determinar el acero de refuerzo contenido en las columnas y muros.

Para ejemplificar en qué consiste la propuesta de subcategorización, considere una estructura en planta como la que se muestra en la Figura 3.27. Se considera una planta para la cual: la longitud del eje resistente donde se localiza el muro colindante largo se denomina L_c y la longitud del muro colindante corto se llama d_c (Figura 3.28). Esto muros representan los ejes resistentes de colindancia (Figura 3.29).

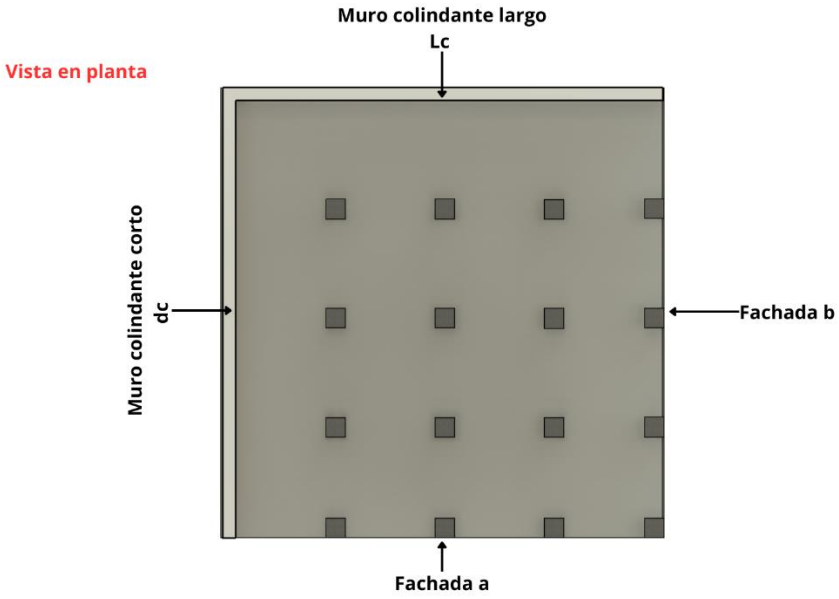


Figura 3.27 Ilustración esquemática donde se ubican los muros colindantes de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

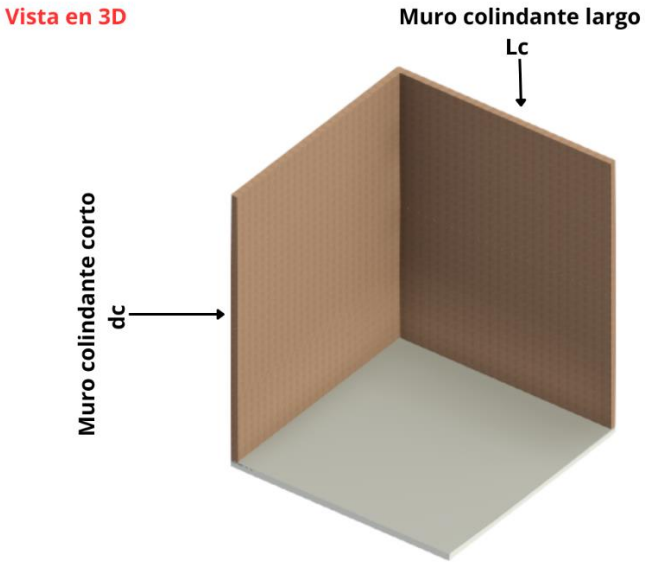


Figura 3.28 Ilustración esquemática donde se ubican los muros colindantes de un edificio que presenta asimetría de esquina en vista 3D. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

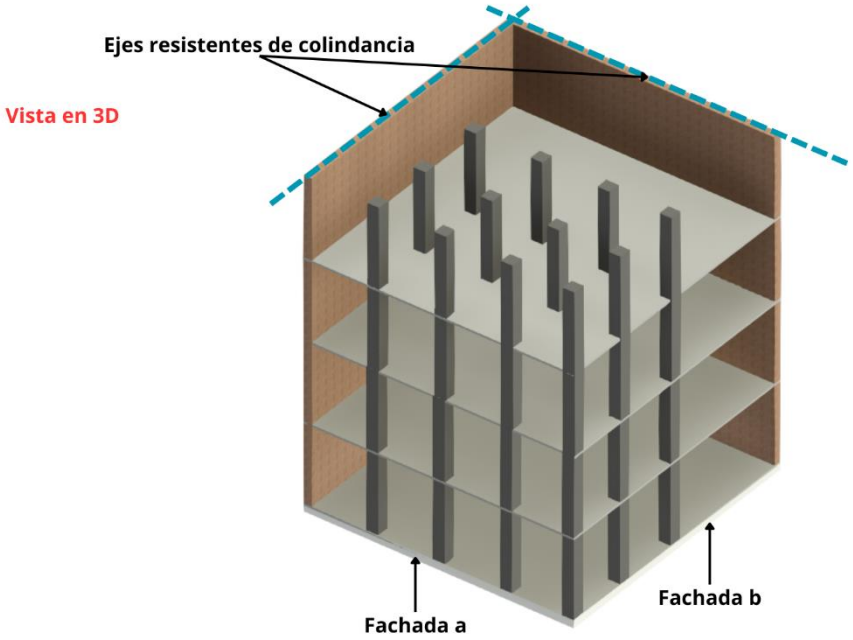


Figura 3.29 Ilustración esquemática donde se ubican los ejes resistentes de colindancia de un edificio que presenta asimetría de esquina en vista 3D. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

En cuanto a las fachadas, la longitud de la fachada paralela al lado largo del edificio (fachada a) se denomina L_f y la longitud de la fachada paralela al lado corto del edificio (fachada b) se asigna como d_f. Paralelo al eje largo se tienen 4 columnas, el ancho de esas columnas es igual a b_L, por otro lado, en el eje corto se tienen 3 columnas cuyo largo es igual a b_d. Lo anterior se encuentra representado en la Figura 3.30 y Figura 3.31.

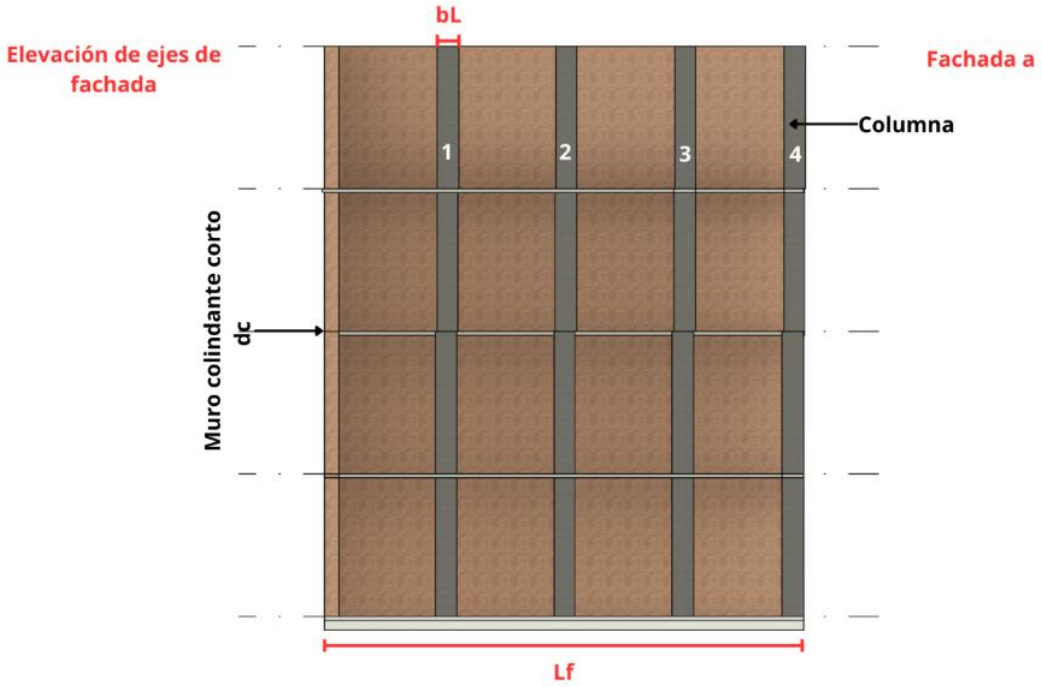


Figura 3.30 Ilustración esquemática donde se muestra la fachada a de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

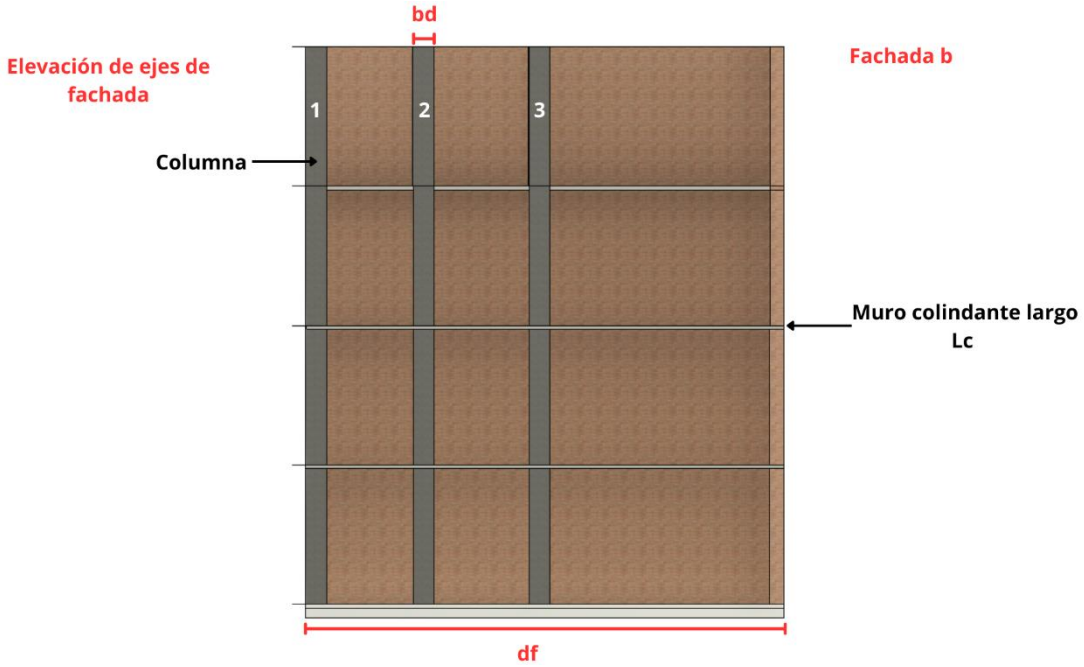


Figura 3.31 Ilustración esquemática donde se muestra la fachada b de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

Por lo tanto, es posible establecer, de manera simplificada que la rigidez lateral de los ejes de fachada es igual a la suma del ancho de cada una de las columnas contenidas en el eje. Este conjunto de columnas representa los ejes resistentes de fachada, se considera que estos ejes se conforman por los ejes resistentes de fachada visibles (Figura 3.32) y por los ejes resistentes de fachada no visibles fácilmente (Figura 3.33).

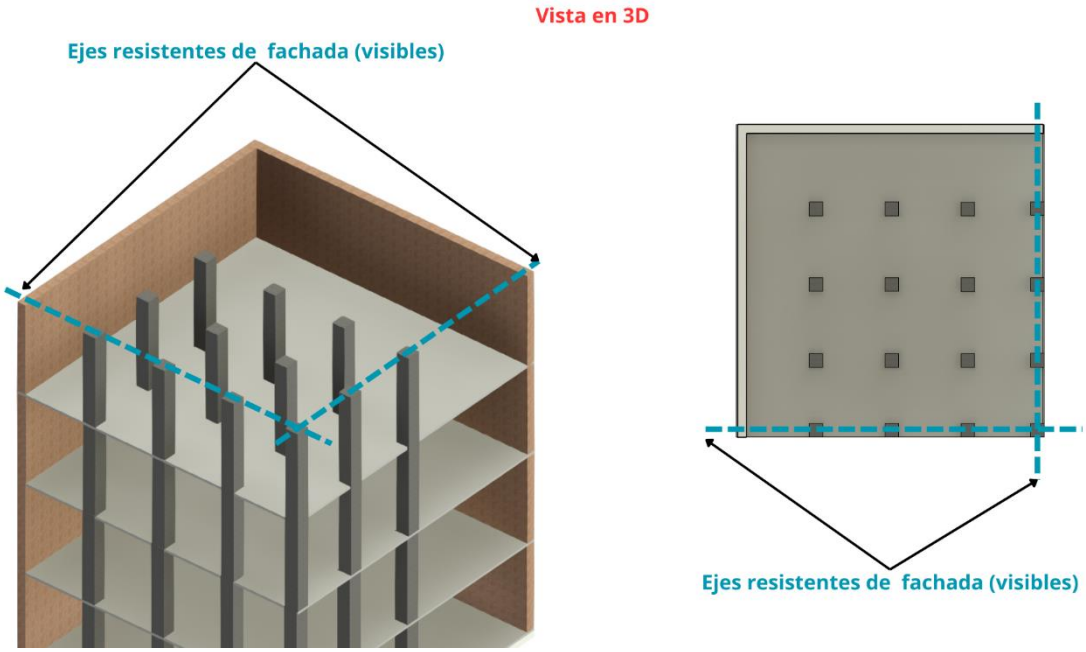


Figura 3.32 Ilustración esquemática donde se muestran los ejes resistentes de fachada visibles de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

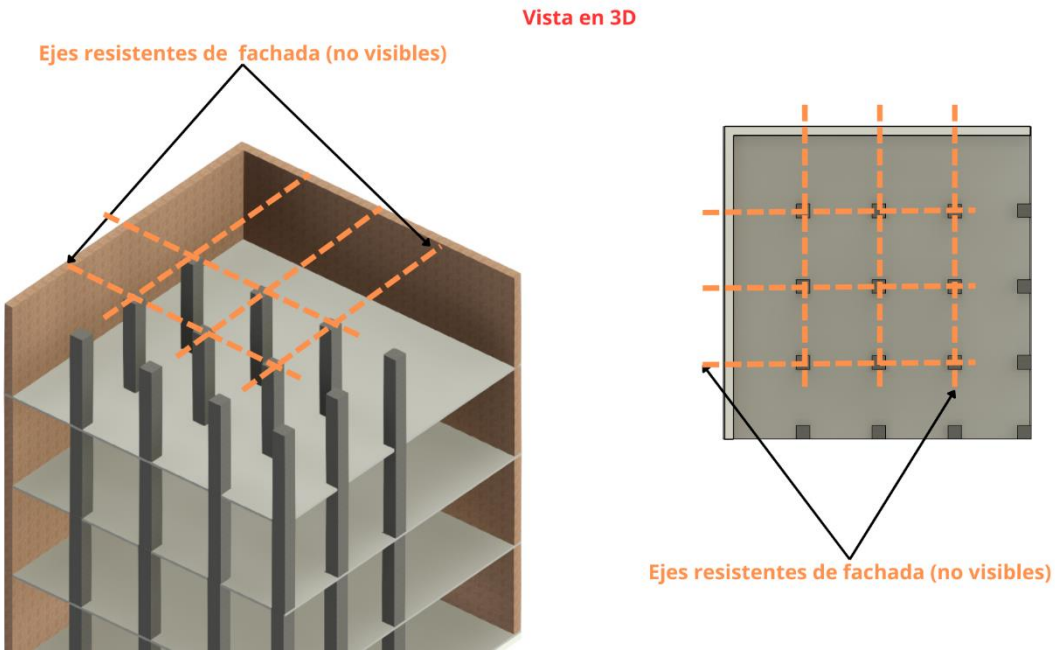


Figura 3.33 Ilustración esquemática donde se muestran los ejes resistentes de fachada no visibles de un edificio que presenta asimetría de esquina. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

Entonces la rigidez de los ejes de fachada es igual a la suma de los anchos de las columnas, se denomina LC_{Lf} y LC_{df} para la fachada en la dirección larga (fachada a) y para fachada en la dirección corta (fachada b) respectivamente y donde nc se refiere al número de columnas en eje (Figura 3.34).

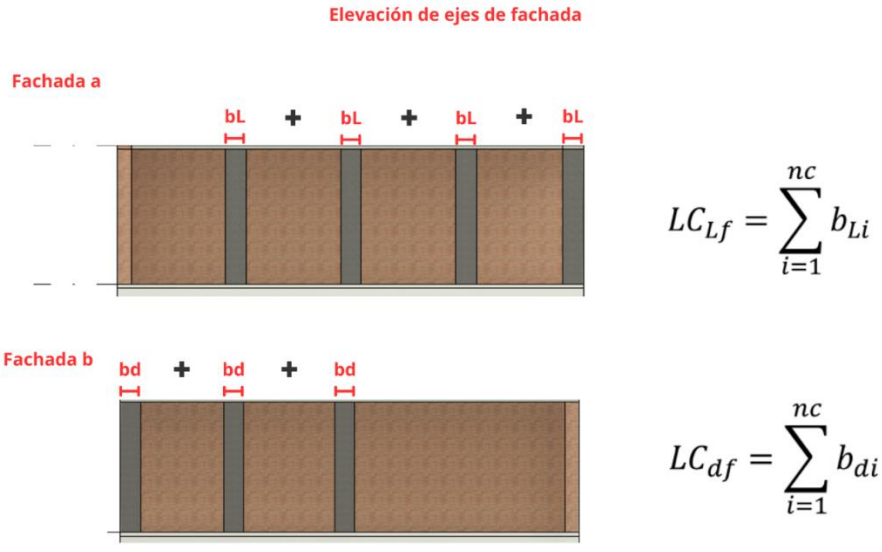


Figura 3.34 Ilustración esquemática donde se muestran la obtención de la rigidez de los ejes de fachada. (2025). Esquema generado con el software *Revit v1.0.8* (Autodesk, 2022).

Entonces, para definir la diferencia entre la rigidez lateral del eje colindante y el eje de fachada, basta con comparar la longitud L_c y d_c con longitud de la suma de las columnas LC_{Lf} y LC_{df} respectivamente. Para realizar esta comparación, de manera tentativa se propone el criterio mostrado en la Figura 3.35. Dicho criterio tendrá que ser validado mediante la observación de los datos estadísticos y mediante la construcción de modelos de análisis estructural que posean características representativas de los edificios encontrados en los datos estadísticos.

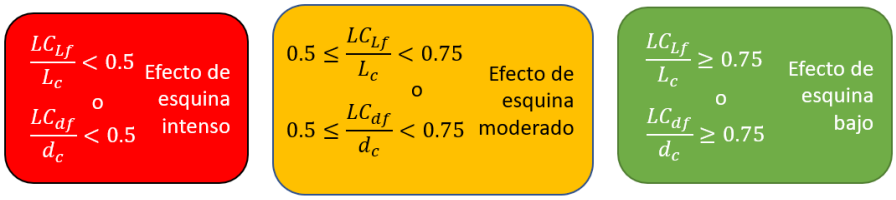


Figura 3.35 Umbrales de subcategorización de estructura con asimetría de esquina

4. Resultados

4.1. Aplicación de la metodología a la Ciudad de México

En los puntos anteriores de definieron 2 zonas de estudio, la primera considera toda la Ciudad de México y la segunda considera la zona de Roma Norte e Hipódromo. En la zona de la Ciudad de México se encontraron 55 inmuebles que presentaron asimetría de esquina aislada mientras que en la zona de Roma Norte e Hipódromo se encontraron 8 inmuebles que presentaron asimetría de esquina asilada.

Para aplicar el criterio de subcategorización, se deben obtener las propiedades geométricas de las estructuras. Anteriormente se mencionó que 4 inmuebles fueron construidos a base de Muros de Mampostería No Confinada, este tipo de estructuración no permite que se aplique la subcategorización propuesta, por ello, los inmuebles a subcategorizar se reducen a 51. Las propiedades geométricas necesarias para aplicar el criterio de subcategorización se obtienen mediante herramientas de visualización geoespacial. Por eso, hay casos en los que es imposible obtener todos los datos que se requieren.

De los 51 inmuebles en la zona de la Ciudad de México, solo fue posible obtener las propiedades geométricas de 25 de ellos. En la Figura 4.1 se presenta la distribución de los 25

inmuebles con asimetría de esquina aislada, en el eje “x” se presenta la diferencia entre la rigidez lateral en la dirección corta, mientras que en el eje “y” se presenta la diferencia entre la rigidez lateral en la dirección larga. Cada punto representa un inmueble y se encuentran identificados con un código de colores con el fin de diferenciar los que tuvieron daño menor, daño intermedio y daño grave.

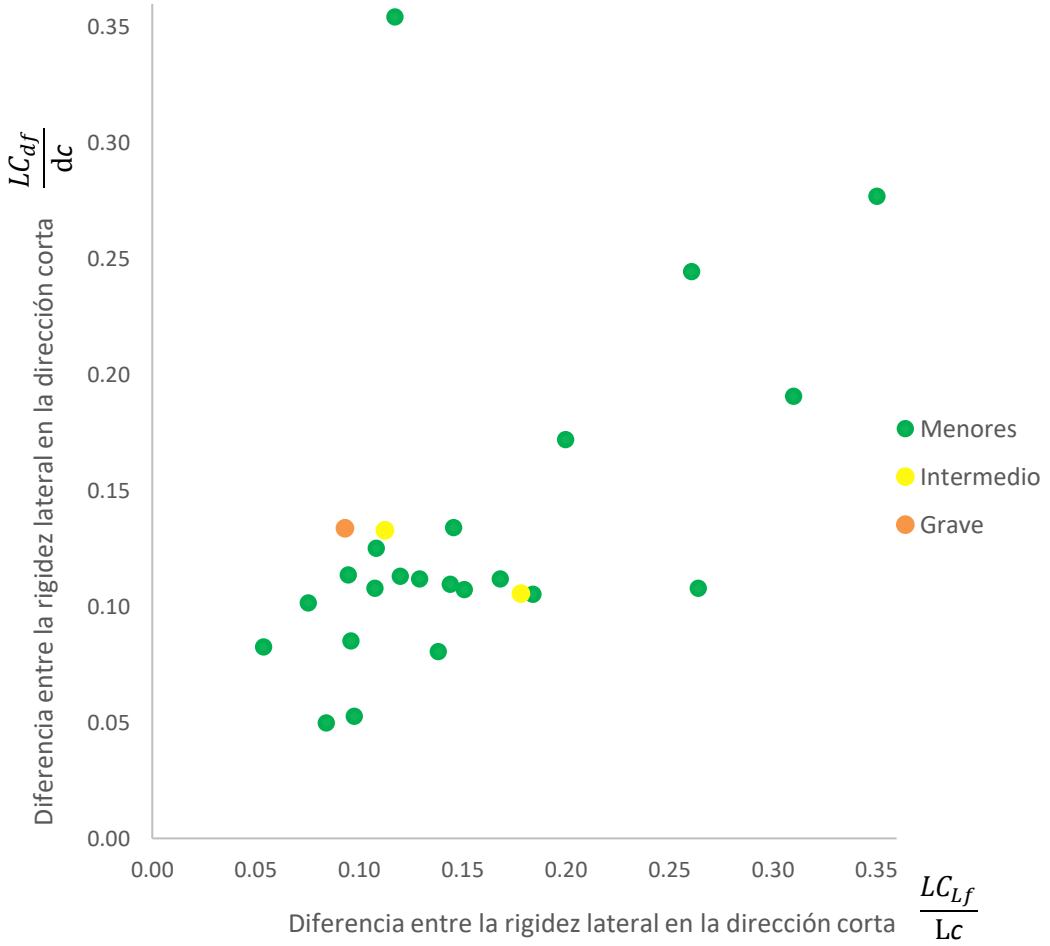


Figura 4.1 Distribución de inmuebles según su rigidez lateral y eje colindante/fachada

4.2. Evaluación de la asimetría de esquina

Luego de observar la distribución de los inmuebles, se sugiere el ajuste de los umbrales propuestos anteriormente. En la Figura 4.2 se muestran los umbrales ajustados y en la Figura 4.3 se muestra de manera gráfica la forma en la que los inmuebles quedan delimitados de acuerdo con los valores de subcategorización establecidos.

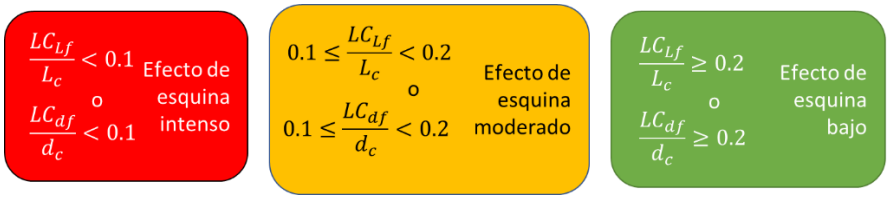


Figura 4.2 Umbrales de subcategorización de estructura con asimetría de esquina ajustados

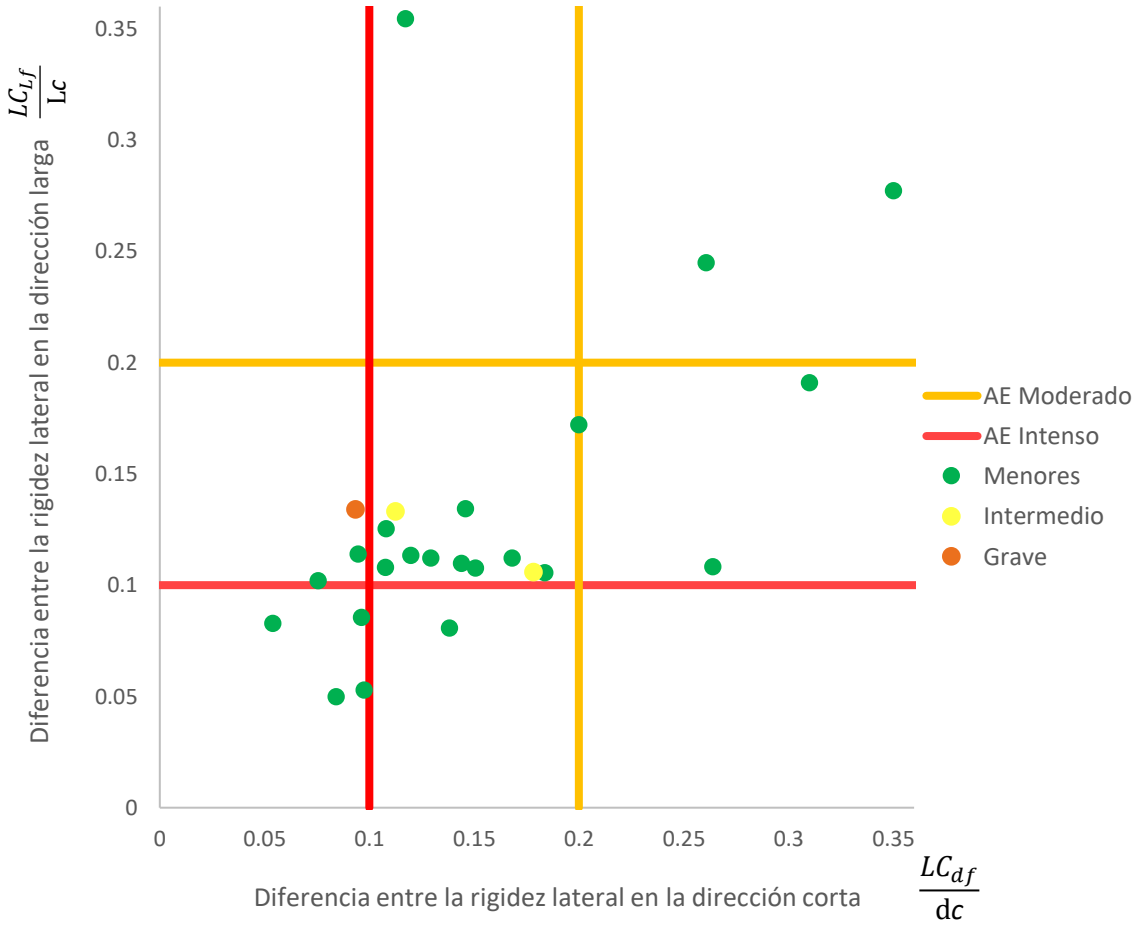


Figura 4.3 Umbrales de subcategorización presentados de forma gráfica

Es posible identificar diferentes combinaciones de la asimetría de esquina dentro del gráfico. En la Figura 4.4 se muestran las diferentes zonas.

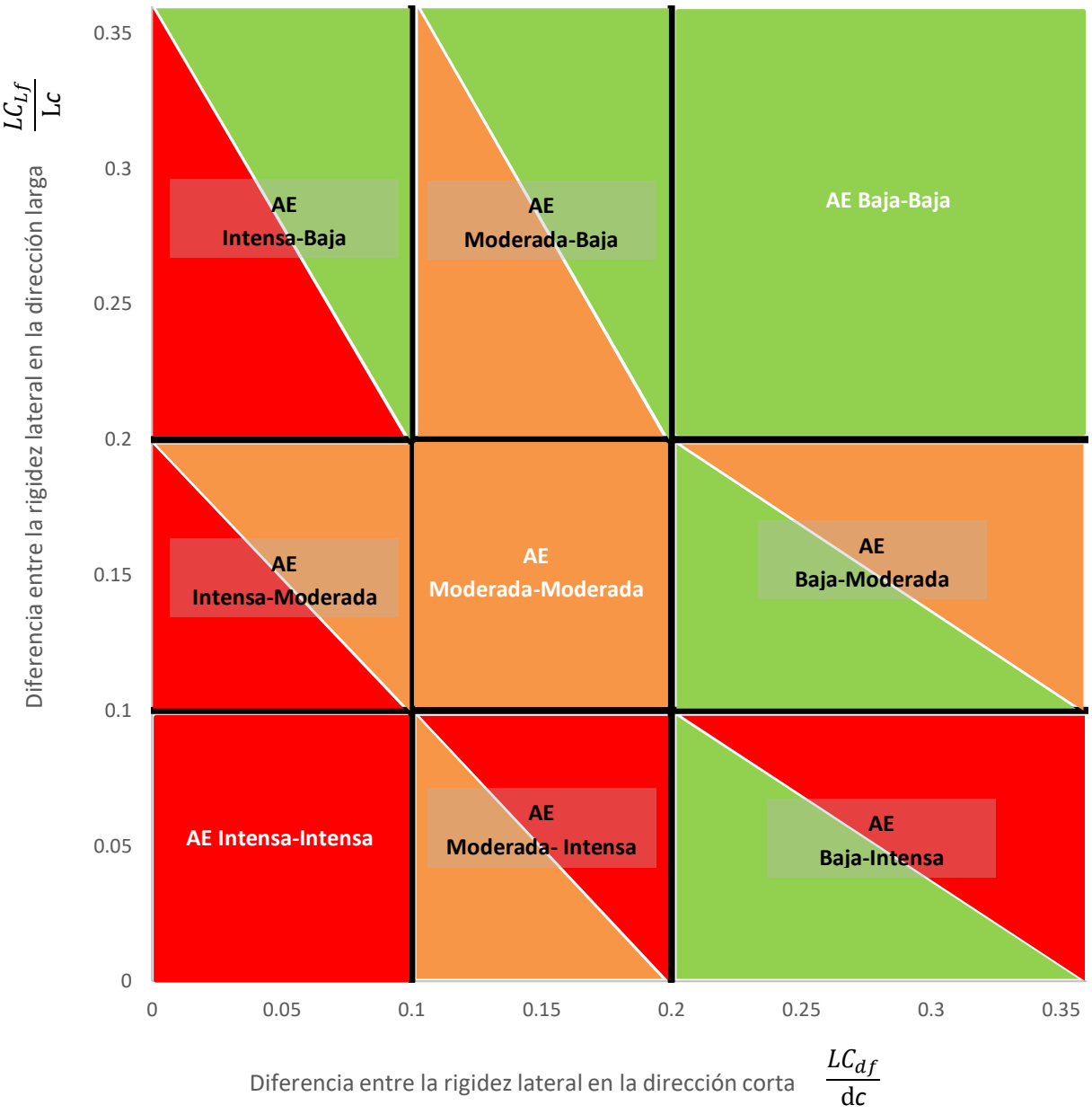


Figura 4.4 Combinaciones posibles de la asimetría en esquina

Finalmente, en la Figura 4.5 se presentan los edificios estudiados y el tipo de combinación de asimetría de esquina que presentan. De los 25 inmuebles con asimetría de esquina aislada estudiados, 4 inmuebles presentaron asimetría de esquina intensa tanto en su dirección larga como en la corta, 11 inmuebles presentaron asimetría de esquina moderada tanto en su dirección larga como en la corta y 2 inmuebles presentaron asimetría de esquina baja tanto

en su dirección larga como en la corta. Se observa que más de la mitad de los inmuebles presentan la misma asimetría de esquina tanto en su lado corto como en su lado largo.

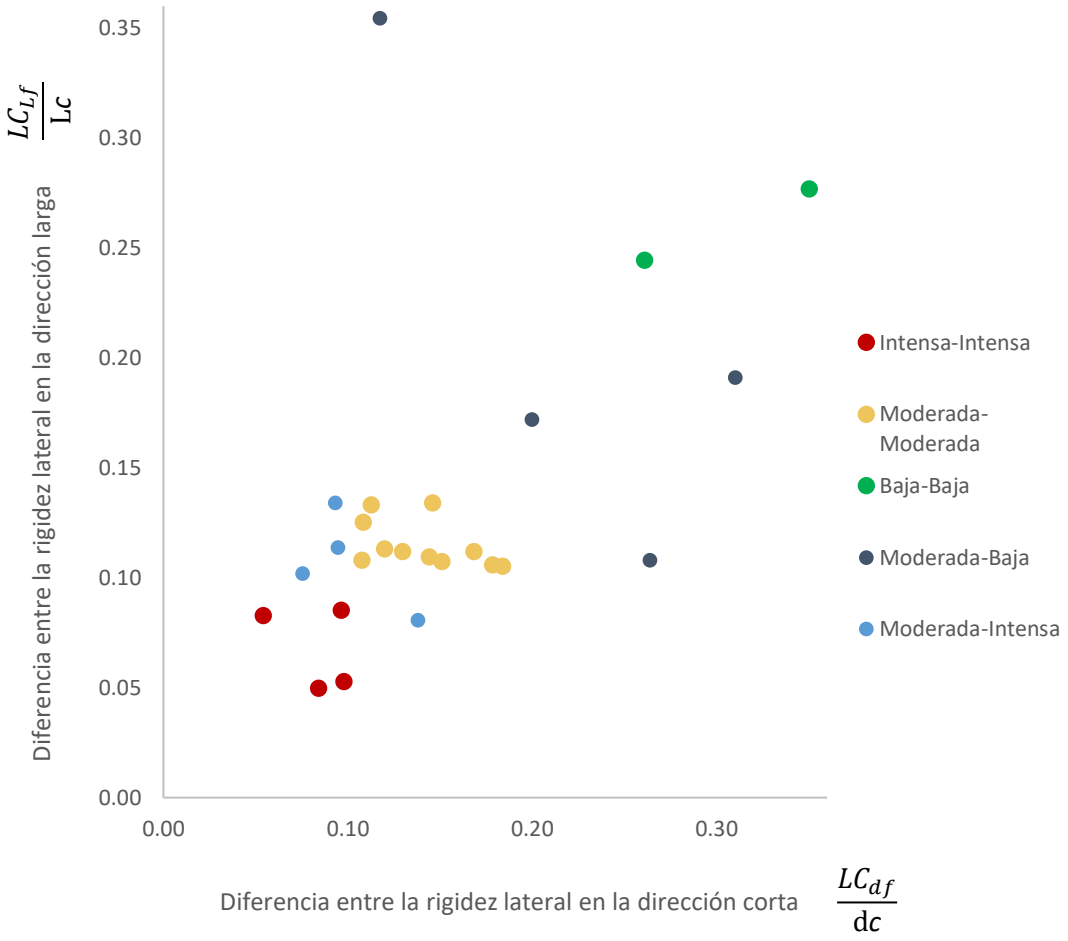


Figura 4.5 Distribución de los inmuebles de acuerdo con la combinación de asimetría de esquina

Se sugiere que, por tener más de un tipo de estructuración en la muestra estudiada en el punto anterior, los umbrales de subcategorización se pueden ajustar de manera individualizada para cada estructuración. Así, se propone tomar de manera aislada los inmuebles estructurados a base de Marcos de Concreto y los estructurados a base de Muros de Mampostería Confinada para ajustar los umbrales de cada uno.

En la Figura 4.6 se muestra la distribución de los inmuebles que presentaron asimetría de esquina y que su estructuración es a base de Marcos de Concreto.

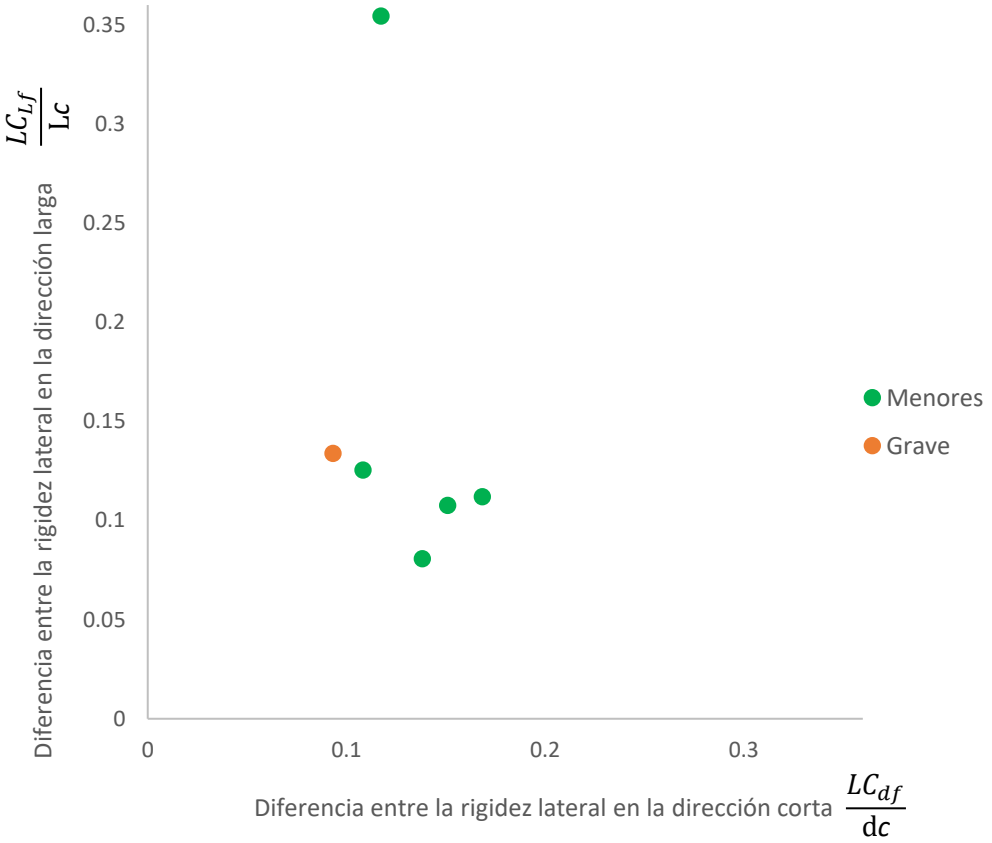


Figura 4.6 Distribución de inmuebles estructurados a base de Marcos de Concreto

En la Figura 4.7 se muestra la distribución de los inmuebles que presentaron asimetría de esquina y que su estructuración es a base de Muros de Mampostería Confinada.

Se observa que, para ambos tipos de estructuración, la mayoría de los inmuebles siguen una tendencia y se encuentran cerca unos de otros, sin embargo, se presenta un inmueble para ambos casos que se aleja de manera considerable de esta tendencia.

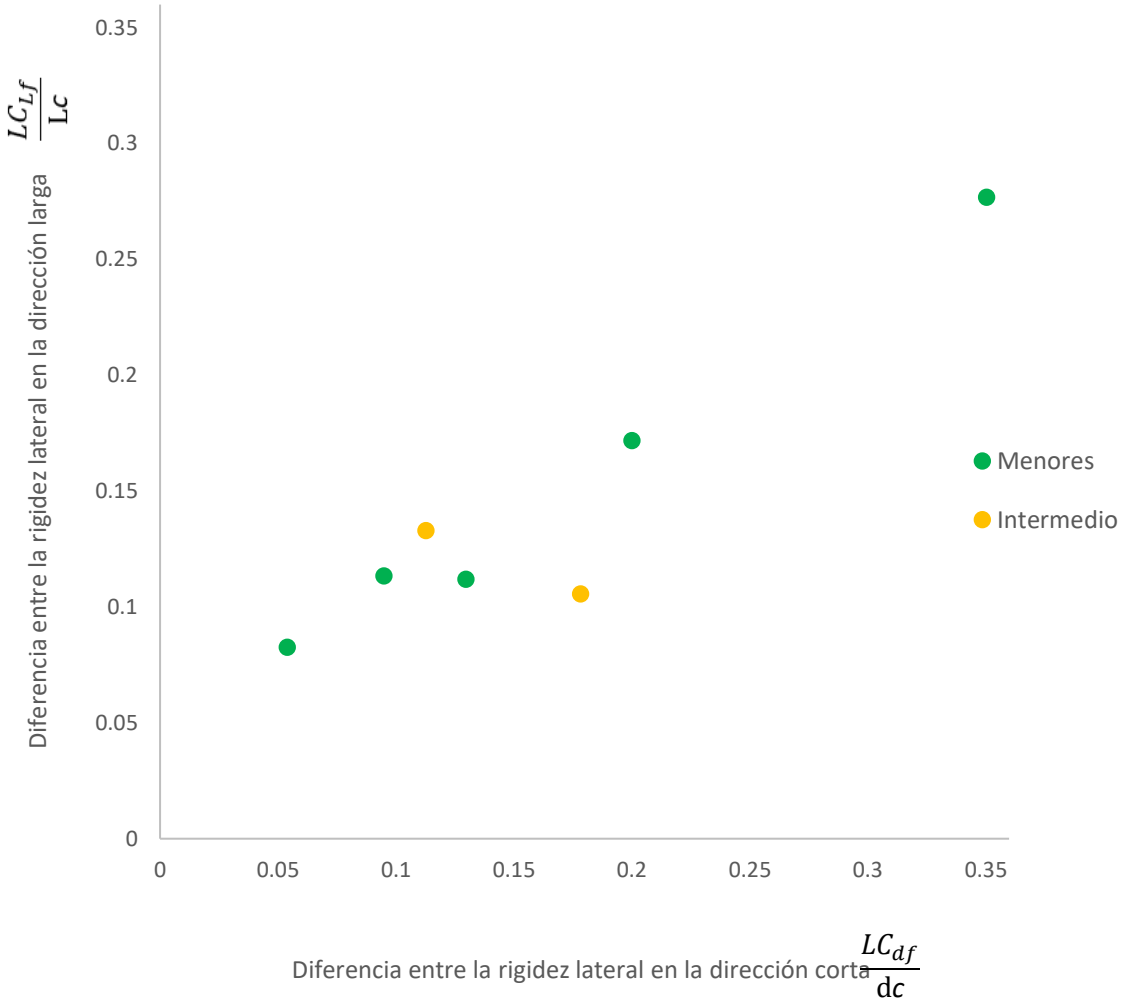


Figura 4.7 Distribución de inmuebles estructurados a base de Muros de Mampostería Confinada

De lo anterior se puede decir que, para ambos tipos de estructuración, los umbrales propuestos en el punto anterior son adecuados y que no se sugiere modificar ningún valor. Por otro lado, los dos puntos atípicos que se presentan podrían indicar que existe una cuarta categoría donde el inmueble de manera cualitativa presenta la asimetría de esquina pero que al considerar sus propiedades geométricas resulta en una asimetría de esquina nula.

En la Figura 4.8 se presentan los umbrales ajustados a la nueva subcategorización propuesta, el efecto de esquina nulo.

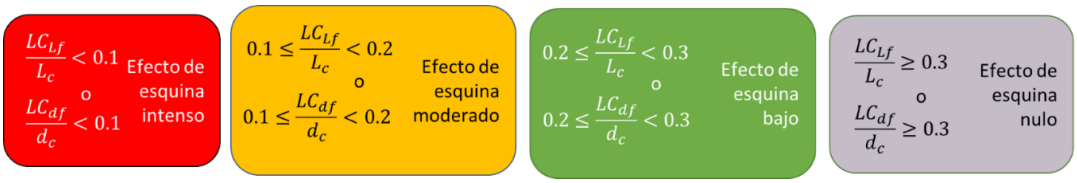


Figura 4.8 Umbrales de subcategorización de estructura con asimetría de esquina ajustados

Resulta relevante mencionar que la muestra con la que se ajustaron estos umbrales es pequeña y que para obtener valores más confiables es conveniente repetir el procedimiento con una muestra más representativa.

Al tener una muestra más representativa, se puede realizar un mejor análisis con el fin de entender por qué hay varios edificios en la Ciudad de México que no tuvieron daños aun presentando la asimetría de esquina.

5. Conclusiones

- La revisión y análisis de estudios previos sobre patologías estructurales, como la asimetría de esquina, la planta baja débil y la irregularidad en planta, permitieron contextualizar su influencia en los daños observados tras el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. Se identificaron dos factores clave que incrementan la vulnerabilidad de los inmuebles: por un lado, la presencia de estas patologías estructurales y, por otro, la amplificación de los movimientos sísmicos debido a las condiciones geotécnicas de las zonas de suelo lacustre y de transición. Este análisis proporciona una base sólida para comprender el impacto de estas deficiencias estructurales en la respuesta sísmica de los edificios, contribuyendo al desarrollo de estrategias para mejorar la seguridad estructural en áreas de alta sismicidad.
- La delimitación de una zona de estudio que concentraba un gran número de inmuebles dañados a causa del sismo del 2017 permitió obtener la tendencia que las patologías de planta baja débil, asimetría de esquina e irregularidad en planta siguieron, esto a través de la clasificación cualitativa de un grupo representativo de estructuras. A través de un análisis general, se determinó que las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez presentaron la mayor cantidad de edificaciones dañadas. Partiendo de criterios tales como distribución geográfica, número de edificaciones con patologías estructurales y la influencia de las condiciones geotécnicas, se seleccionó una zona de estudio dentro de la alcaldía Cuauhtémoc, específicamente en las colonias Roma Norte e Hipódromo Condesa. Posteriormente, se tomó una muestra de 106 inmuebles dentro de la zona designada, este conjunto fue clasificado cualitativamente según las patologías de planta baja débil, asimetría de esquina e irregularidad en planta. Los resultados reflejan que la patología más recurrente fue la irregularidad en planta, seguida de la planta baja débil y finalmente la asimetría de esquina. La planta baja débil fue la patología que presentó el mayor porcentaje de inmuebles con daño significativo. Este análisis permitió establecer las tendencias en la distribución y severidad de estas patologías en la zona de estudio.
- El análisis comparativo de las patologías de asimetría de esquina, irregularidad en planta y planta baja débil permitió evaluar su impacto en los inmuebles que presentaron daños por el sismo del 19 de septiembre del 2017, determinando así que

se requiere una metodología que permita la subcategorización cuantitativa de la asimetría de esquina. Se observó que todas las patologías estudiadas en el trabajo incrementan el riesgo de daño estructural; sin embargo, cada una presenta diferencias significativas en su nivel de la afectación y en su facilidad de ser identificadas y categorizadas. La patología con mayor porcentaje de inmuebles afectados fue la planta baja débil, esta mostró un incremento notable en el nivel de daño a medida que se incrementaba su severidad. La irregularidad en planta presentó el mayor número de edificaciones afectadas, pero tuvo variaciones en los niveles de daño, lo cual evidenció una mayor incertidumbre en su clasificación. La asimetría de esquina mostró una tendencia de daño progresiva similar a la planta baja débil; sin embargo, se considera que la asimetría de esquina resulta más difícil de identificar por lo que su evaluación pudo no ser precisa. Esto resulta en la necesidad de desarrollar una metodología de subcategorización cuantitativa para esta patología. Su implementación basada en parámetros geométricos y estructurales permitiría reducir la incertidumbre al momento de su análisis y mejoraría la evaluación de su impacto en los inmuebles.

- Partiendo de la necesidad de mejorar la clasificación de los niveles de severidad presentados por la asimetría de esquina, se realizó la propuesta de una metodología para subcategorizar cuantitativamente los edificios que presentan dicha patología y que hasta ahora solo se ha clasificado de manera cualitativa. A través del análisis de la base de datos, se identificó que la asimetría de esquina es un factor que contribuye al daño estructural de los edificios; sin embargo, su impacto varía dependiendo de la distribución de rigideces y la configuración geométrica del inmueble. Con el fin de reducir la subjetividad en su clasificación, se propone el uso de un método basado en parámetros geométricos y estructurales, considerando la relación entre los ejes resistentes de colindancia y los de fachada. Se definieron criterios cuantificables para establecer niveles de severidad en la asimetría de esquina. El uso de esta metodología permitirá una clasificación más precisa de los edificios con asimetría de esquina**,** facilitando las inspecciones visuales rápidas y la evaluación de vulnerabilidad estructural.
- Al aplicar la metodología de subcategorización cuantitativa de la asimetría de esquina en los inmuebles dañados durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad

de México se evaluó su influencia en los daños visualizados. Se realizó el análisis de 55 inmuebles que presentaron asimetría de esquina asilada, de los cuales 25 pudieron ser subcategorizados según sus propiedades geométricas Partiendo de los resultados obtenidos, se identificaron diferentes combinaciones de severidad en la patología, estas se caracterizaron en baja, moderada e intensa en ambas direcciones del edificio. Se identificó que más de la mitad de los inmuebles presentaban la misma severidad en sus dos direcciones sugiriendo que la distribución de rigidez influye en la forma en que la asimetría de esquina impacta su respuesta sísmica. Se analizaron los inmuebles con estructuración en Marcos de Concreto y Muros de Mampostería Confinada, y se confirmó que los umbrales propuestos para la subcategorización eran adecuados. Se identificaron casos atípicos en los que la clasificación cualitativa indicaba la presencia de asimetría de esquina, pero el análisis geométrico mostró que su efecto estructural era nulo. Se propuso una nueva categoría: asimetría de esquina nula**,** para aquellos inmuebles que, a pesar de su configuración, no presentan una influencia significativa en la distribución de rigidez lateral. Finalmente, los resultados sugieren que se pude mejorar la precisión del método de subcategorización al ampliar la muestra analizada. No obstante, una alternativa complementaria al incremento del muestreo consiste en modelar inmuebles representativos a través de un software especializado para posteriormente simular su respuesta ante solicitaciones sísmicas Este análisis permitiría evaluar con mayor precisión el comportamiento estructural de cada inmueble, así como identificar la aparición de efectos torsionales, lo que contribuiría a validar los criterios propuestos para la subcategorización.

6. Referencias

1. Autodesk. (2022). *Revit* (Versión 2023, 23.0.11.19) [Software]. Disponible en: https://www.autodesk.com/products/revit
2. Cole, G. L., Dhakal, R. P., Carr, A. J. y Bull, D. K. (2010). *Building pounding state of the art: Identifying structures vulnerable to pounding damage* [ponencia]. Conferencia de la Sociedad Neozelandesa de Ingeniería Sísmica (NZSEE), Wellington, Nueva Zelanda. https://www.researchgate.net/publication/46118013
3. Esri. (2019). *ArcGIS Desktop* (Versión 10.8, 10.7.0.10450) [Software]. Disponible en: https://www.esri.com
4. Esteva, L. (1977). *Microzoning: Models and reality* [ponencia]. En *Actas de la 6.ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica* (pp. 27–43), Nueva Delhi, India.
5. Esteva, L. (1987). *Earthquake engineering research and practice in Mexico after the 1985 earthquake* [ponencia]. Conferencia del Pacífico sobre Ingeniería Sísmica, Wairakei, Nueva Zelanda.
6. Federal Emergency Management Agency. (2015). *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook* (3.ª ed., FEMA P-154).
7. Federal Emergency Management Agency. (2018). *Assessing seismic performance of buildings with configuration irregularities: Calibrating current standards and practices* (FEMA P-2012).
8. Galvis, F. A., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H. y Ruiz-García, J. (2020). Overview of collapsed buildings in Mexico City after the 19 September 2017 (Mw7.1) earthquake. *Earthquake Spectra*, *36*(S2), 83–109. https://doi.org/10.1177/8755293020936694
9. Instituto de Ingeniería. (2017). Base de datos BD 19S-17 IINGEN-RECONS (Actualización ENE-2021).
10. Jaimes, M. A., Lermo, J. y García-Soto, A. D. (2016). Ground-motion prediction model from local earthquakes of the Mexico Basin at the Hill Zone of Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *106*(6), 2532–2544. https://doi.org/10.1785/0120150283
11. Lermo, J., Santoyo, M. A., Jaimes, M. A., Antayhua, Y. y Chavacán, M. (2016). Local earthquakes of the Mexico Basin in Mexico City: κ, Q, source spectra, and stress drop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *106*(4), 1423–1437. https://doi.org/10.1785/0120150189
12. Martínez, J. Z. (2019). *Estudio estadístico de patologías en edificaciones y su influencia en la vulnerabilidad sísmica durante el sismo 19S-2017* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
13. Meli, R., Miranda, E., López, C., & López Bátiz, O. (1986). *Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en la Ciudad de México. Volumen I: Evaluación estructural de edificios*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
14. Mirwald, A., Cruz, V., Díaz, J., Iglesias, A., Singh, S., Villafuerte, C. y Tago, J. (2019). The 19 September 2017 (Mw7.1) intermediate-depth Mexican earthquake: A slow and energetically inefficient deadly shock. *Geophysical Research Letters*, *46*(4), 2054–2064. https://doi.org/10.1029/2018GL080904
15. NTCDS. (2004). *Norma técnica complementaria para el diseño por sismo. Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II (103-Bis), pp. 55-77.

16. NTCDS. (2023). *Norma técnica complementaria para el diseño por sismo* Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México.
17. Ordaz, M. y Meli, R. (2004). *Seismic design codes in Mexico* [ponencia]. En *Actas de la 13.ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica* (Vol. 2), Vancouver, Canadá.
18. Ordaz, M., Miranda, E. y Avilés, J. (2003). Proposal of seismic design spectra for Mexico DF. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, *8*, 189–208.
19. RCDF. (1976). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.
20. Reinoso, E., Espinosa Cazarín, E. F., Gómez Palacios, D., Díaz Martínez, A., Ordaz Miranda, R., Arroyo Moreno, J. M., Catalán Pérez, V. I., Martínez Camargo, J. E., Fontes Galindo, I. Q., López Palacios, J. A., y Ortiz Martínez, O. D. (2023). *Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones de mitigación. (Etapa 6)(ISCDF/CEC-04/2023-24).* Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Instituto de Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México.
21. Reinoso, E., Espinosa, E. F., Quinde, P., Gómez, D., Díaz, A., Ordaz, R., Arroyo, J. M., Villaseñor, M. N. y Márquez, O. A. (2022). *Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones de mitigación (Etapa 5)* (ISCDF/CEC-04/2022-27). Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Instituto de Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México.
22. Reinoso, E., Quinde, P., Martínez, J. Z., Buendía, L. M., Gómez, D., Torres, M. A. y Martínez, J. E. (2019). *Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones (Etapa 2)* (ISCDF/CEC-04/2019-19). Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Instituto de Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México.
23. Reinoso, E., Ventura, F., Buendía, L. M., Torres, M. A., Martínez, J. Z., Cabrera, M., Meléndez, B. V., Godínez, K. L., Pérez, X. A. y Mariscal, O. D. (2018). *Vulnerabilidad de edificaciones con base en la "Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones de mitigación"*. Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Instituto de Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México.
24. Rosenblueth, E. (1956). *Aseismic design in Mexico* [Ponencia]. En *Actas de la 1.ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica* (pp. 24-1–24-7), Berkeley, California, Estados Unidos.
25. Rosenblueth, E. (1960a). *Aseismic provisions for the Federal District's Mexico* [ponencia]. En *Actas de la 2.ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica* (pp. 2009–2026), Tokio, Japón.
26. Rosenblueth, E. (1979). Seismic design requirements in a Mexican 1976 code. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *7*(1), 49–61.
27. Servicio Sismológico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México. (2017). *Reporte especial: Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)*.
28. Sherman, C. (2017). *Recuperan cuerpo de última víctima del terremoto en México*. Associated Press. https://apnews.com/70b3a90e267d44138eb30203d96aab7d
29. SÍSÉ Salud Estructural. (30 de mayo de 2025). Visualizador de Daños. https://visualizador.si-se.mx/
30. Tena-Colunga, A. (2021). Conditions of structural irregularity: Relationships with observed earthquake damage in Mexico City in 2017. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *143*, 106630. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106630

31. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. (2020). *Actualización de la zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas – Parte Norte* (Informe técnico No. ISCDF/CEC-04/2020-13).