

Evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad para diferentes niveles de intensidad por movimientos en masa rápidos a partir de la metodología del SGC y el convenio No. 4600076515 de 2018 entre la Universidad EAFIT y la Alcaldía de Medellín

Jorge Luis Rojas Ochoa

William Andres Uribe Montaña

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Geólogo

Asesor

Marco Fidel Gamboa Ramírez

Universidad EAFIT

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la Tierra

Medellín

2020

Agradecimientos

En estos días tan especiales, días en los que culmino mi carrera profesional como geólogo, solo quedan palabras de agradecimiento a todas las personas que aportaron un granito de arena a mi formación, agradezco principalmente a mi abuela, a mi madre y cada uno de los profesores que me inspiraron y compartieron su conocimiento conmigo, no puedo dejar de nombrar a mi hijo que viene en camino y que le ha dado la estocada final a esta etapa de mi vida. Espero seguir formándome y creciendo como persona y profesional.

Los quiero.

Jorge Luis Rojas Ochoa.

Agradezco a mis padres, por su sacrificio y apoyo incondicional, a mis hermanas y toda mi familia por su amor y motivación todos estos años. A Dios a quien vivo agradecido por las oportunidades y bendiciones que me brinda. A Daniela por su amor, compañía y comprensión. Al profesor Marco Gamboa por su colaboración, dedicación y paciencia en el desarrollo de este trabajo. A la empresa Kolcem por su aporte en mi aprendizaje dándome la oportunidad de realizar mi práctica profesional y todas las enseñanzas brindadas en el proceso. A mis amigos y compañeros por su amistad, buena energía y colaboración todos estos años de estudio. Finalmente, a todos los profesores por sus enseñanzas, consejos y aportes a mi formación como profesional.

William Andres Uribe Montaña.

Tabla de contenido

1. Introducción	12
2. Antecedentes	13
3. Planteamiento del problema	15
4. Pregunta	15
5. Hipótesis	15
6. Objetivos	16
6.1 Objetivo general	16
6.2 Objetivos específicos	16
7. Metodología	17
7.1 Revisión información secundaria	19
7.1.1 Metodología del Servicio Geológico Colombiano para el estudio de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo	19
7.1.2 Convenio no. 4600076515 entre la universidad EAFIT y la alcaldía de Medellín	23
7.1.3 Estudio de trabajos previos de otros autores	23
7.2 Homogeneización de datos	24
7.2.1 Control de calidad	24
7.2.2 Evaluación de parámetros para construir curvas	25
7.3 Construcción de curvas de fragilidad vs vulnerabilidad	25
7.3.1 Curvas con datos teóricos	25
7.3.2 Curvas con datos experimentales	26
7.4 Interpretación de resultados	26
7.4.1 Análisis individual de curvas teóricas y experimentales	26
7.4.2 Comparación entre gráficas y observación de curvas de combinadas	27
7.5 Conclusiones y recomendaciones a la metodología del SGC	27
8. Conceptualización	28
8.1 Gestión del riesgo	28
8.2 Susceptibilidad de Deslizamiento	28
8.3 Vulnerabilidad	29
8.4 Movimiento en masa	30
8.4.1 Tipos de movimientos en masa	30
8.5 Exposición	31
8.6 Intensidad	32
8.7 Fragilidad	32

8.8 Tipología de edificaciones	33
8.8.1 Construcciones simples	34
8.8.2 Estructuras ligeras	35
8.8.3 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas	36
8.8.4 Estructuras con mampostería reforzada	37
8.8.5 Edificaciones reforzadas GI y GII	38
8.8.6 Edificaciones con reforzamiento especial GII y GIV	39
9. Generalidades	40
9.1 Localización	40
9.2 Clima	42
9.3 Geología	44
9.4 Geomorfología	46
9.4.1 Valle de Aburrá Medio	48
9.5 Geología estructural	54
9.5.1 Sistema de fallas	54
10. Resultados e interpretación	57
10.1 Análisis de datos teóricos y experimentales	58
10.1.1 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades muy bajas	59
10.1.2 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades bajas	65
10.1.3 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades medias	68
10.1.4 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades altas	73
10.1.5 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades muy altas	77
10.1.6 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidad máxima	82
10.2 Vulnerabilidad y fragilidad en modelo teórico para todas las tipologías combinadas en cada nivel de intensidad	91
10.2.1 Total de tipologías combinadas en intensidades muy bajas	91
10.2.2 Total de tipologías combinadas en intensidades bajas	92
10.2.3 Total de tipologías combinadas en intensidades medias	93
10.2.4 Total de tipologías combinadas en intensidades altas	94
10.2.5 Total de tipologías combinadas en intensidades muy altas	96
10.2.6 Total de tipologías combinadas en la máxima intensidad	97
10.3 Vulnerabilidad y fragilidad en modelo teórico para todas las tipologías e intensidades combinadas.	98
11. Discusión	100

12. Conclusiones _____	108
13. Recomendaciones _____	110
14. Bibliografía _____	112
ANEXOS _____	114
ANEXO 1 _____	114
ANEXO 2 _____	114
ANEXO 3 _____	116

Lista de figuras

<i>Figura 1. Flujograma de la metodología desarrollada para la realización de este proyecto.</i>	18
<i>Figura 2. Clasificación de deslizamientos (Varnes, 1958), Traducido de Bell 1993.</i>	30
<i>Figura 3. Ilustración de tipología de construcciones simples (F). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.</i>	34
<i>Figura 4. Ilustración de tipología de estructuras ligeras (E). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.</i>	35
<i>Figura 5. Ilustración de tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas(D). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.</i>	36
<i>Figura 6. Ilustración de tipología de estructuras con mampostería reforzada(C). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.</i>	37
<i>Figura 7. Ilustración de tipología de edificaciones reforzadas GI -GII(B). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.</i>	38
<i>Figura 8. Ilustración de tipología de edificaciones con reforzamiento especial GII -GIV(A). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de internet.</i>	39
<i>Figura 9. Mapa del municipio de Medellín con corregimientos, comunas y zonas de estudio.</i>	41
<i>Figura 10. Características climatológicas del municipio de Medellín. Tomado de IDEAM (2014).</i>	43
<i>Figura 11. Mapa geológico del municipio de Medellín.</i>	44
<i>Figura 12. Mapa geomorfológico del municipio de Medellín.</i>	47
<i>Figura 13. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	60
<i>Figura 14. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	61
<i>Figura 15. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	63
<i>Figura 16. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en edificaciones reforzadas GI-GII. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	64
<i>Figura 17. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.335 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	66
<i>Figura 18. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.335 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	68

<i>Figura 19. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.525 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	70
<i>Figura 20. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.525 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	71
<i>Figura 21. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.525 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	73
<i>Figura 22. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.715 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	74
<i>Figura 23. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.715 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	76
<i>Figura 24. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	78
<i>Figura 25. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	79
<i>Figura 26. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	80
<i>Figura 27. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en edificaciones reforzadas GI - GII. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	82
<i>Figura 28. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	83
<i>Figura 29. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	85
<i>Figura 30. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	86
<i>Figura 31. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en estructuras con mampostería reforzada En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	87
<i>Figura 32. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en edificaciones reforzadas GI - GII En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	89
<i>Figura 33. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en edificaciones con reforzamiento especial GII - GIV En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.</i>	90
<i>Figura 34. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.145.</i>	92

<i>Figura 35. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.335.</i>	93
<i>Figura 36. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.525.</i>	94
<i>Figura 37. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.715.</i>	95
<i>Figura 38. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.905.</i>	96
<i>Figura 39. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 1.</i>	97
<i>Figura 40. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías e intensidades combinadas y su distribución en los niveles de vulnerabilidad establecidos por la metodología del Servicio Geológico Colombiano.</i>	98
<i>Figura 41. Grafico de barras de porcentajes de incidencia mínimo de factor de tipología en el cálculo de la fragilidad en cada una.</i>	105

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Clasificación de la vulnerabilidad para edificaciones (SGC 2015).</i>	20
<i>Tabla 2. Edificaciones, definidas a partir de los trabajos de Heinimann (1999) y Jam (2007) modificado.</i>	33
<i>Tabla 3. Niveles de intensidad según su valor numérico.</i>	58
<i>Tabla 4. Tabla de número y porcentaje de construcciones evaluadas por tipología y nivel de vulnerabilidad.</i>	104
<i>Tabla 5. Parámetro de intensidad por presión de impacto. Relación presión deslizamiento/presión límite estructura. Fuente: Du et al., 2014.</i>	114
<i>Tabla 6. Presión de falla según tipología de estructura.</i>	115
<i>Tabla 7. Parámetro de intensidad relación profundidad/altura de la estructura.</i>	115
<i>Tabla 8. Factores de fragilidad por tipología de estructuras Heinimann, 1999, en Du et al., 2013.</i>	116
<i>Tabla 9. Factor de fragilidad por altura de la edificación.</i>	116
<i>Tabla 10. Fragilidad por conservación (Du et al., 2013).</i>	117
<i>Tabla 11. Factor de fragilidad por edad de la edificación Du et al., 2013.</i>	117
<i>Tabla 12. Vida útil en función del tipo de edificación.</i>	118
<i>Tabla 13. Operador acueducto *El ítem “No aplica”, hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).</i>	118
<i>Tabla 14. Material acueducto (EAFIT 2018).</i>	119
<i>Tabla 15. Conexión. *El ítem “No aplica”, hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).</i>	119
<i>Tabla 16. Estado alcantarillado. *El ítem “No aplica”, hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).</i>	120
<i>Tabla 17. Tipo de descarga. *El ítem “No aplica”, hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).</i>	120
<i>Tabla 18. Material alcantarillado. *El ítem “No aplica”, hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).</i>	120
<i>Tabla 19. Tipo de descarga. *El ítem “No aplica”, hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).</i>	120

Lista de ecuaciones

<i>Ecuación 1. Fórmula para el cálculo de la vulnerabilidad (SGC 2015).</i>	<i>20</i>
<i>Ecuación 2. Fórmula para el cálculo de la velocidad de movimientos en masa rápidos (SGC 2015).</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 3. Cálculo de la presión de impacto (SGC 2015).</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 4. Cálculo de la fragilidad (EAFIT 2018).</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 5. Es la fórmula utilizada para escenarios de movimientos en masa rápidos (SGC 2015).</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 6. Ecuación para evaluar el parámetro por servicio de acueducto.</i>	<i>119</i>
<i>Ecuación 7. Ecuación para evaluar el parámetro por servicio de alcantarillado.</i>	<i>121</i>

1. Introducción

En las últimas décadas, en el mundo se vienen desarrollando diferentes investigaciones e invirtiendo grandes recursos económicos y humanos para mitigar el riesgo por desastres naturales en particular los movimientos en masa. En este sentido, ha sido de primordial interés evaluar y entender los aspectos que componen el riesgo, donde uno de los elementos fundamentales es la evaluación de la vulnerabilidad de las construcciones ante movimientos en masa.

En este documento se pretendió evaluar la vulnerabilidad y la fragilidad de las construcciones según una intensidad de movimiento en masa determinada, para ello se utilizará la metodología del Servicio Geológico Colombiano; la cual fue creada con el afán de apoyar la ley 1523 del 2012 donde exige a los municipios hacer estudios de riesgos por fenómenos naturales como parte esencial en la planificación del territorio. En su guía metodológica se describen los lineamientos para realizar estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local.

Los datos para este trabajo fueron obtenidos del convenio de asociación no. 4600076515 de 2018 entre la alcaldía de Medellín y la universidad de EAFIT, el cual tenía por objeto el estudio de detalle de algunas zonas con condición de riesgo determinadas por el municipio de Medellín en su POT, teniendo en cuenta los alcances definidos por el decreto 1077 de 2015 para este tipo de estudios.

La evaluación de vulnerabilidad se presentó como el factor clave en el desarrollo de este trabajo y que motiva a plantear un modelo para la elaboración de curvas a partir de una intensidad constante para medir la variabilidad de la vulnerabilidad frente a la fragilidad de las construcciones, lo que permitió un mayor análisis y margen de interpretación para cumplir con los objetivos del proyecto.

2. Antecedentes

Históricamente el departamento de Antioquia ha sido una de las zonas del país más golpeada por movimientos en masa con 1140 eventos desde 1916 al 2002, ha dejado 2127 muertos y más de 4 millones de personas afectadas (INGEOMINAS 2002), las pérdidas económicas son incalculables. En el Valle de Aburrá las complejas condiciones físicas del territorio sumadas a los altos índices de vulnerabilidad propician escenarios con alto potencial de pérdidas humanas y económicas ante la ocurrencia de fenómenos naturales tales como movimientos en masa, los cuales representan un 35% de los eventos que ocurren en el valle y el 77% de las víctimas fatales (Gamboa M. 2010). Este panorama ha hecho necesario el crecimiento de estudios y proyectos que busquen evaluar los riesgos sociales asociados a los peligros de estos eventos geológicos, aún más hoy en día, teniendo en cuenta factores como la tendencia al desarrollo urbano en laderas, el crecimiento poblacional, y la adaptación del municipio a un desarrollo asociado a los efectos del cambio climático, por lo cual la evaluación cuantitativa de riesgos se hace cada vez más necesaria para las instituciones locales en la búsqueda de lograr una mejor prevención de efectos y consecuencias de desastres en áreas vulnerables.

Según el decreto 1077 de 2015 por el cual se reglamenta lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial, en la formulación del POT se debe realizar la delimitación y zonificación de áreas con condición de riesgo, en las cuales durante la ejecución del POT se deben realizar estudios de detalle que deben contener el análisis detallado de amenaza, evaluación de vulnerabilidad, evaluación del riesgo y determinación de medidas de mitigación.

El SGC propuso en el año 2015, una metodología en la evaluación de vulnerabilidad en construcciones que tiene en cuenta además otras variables como la intensidad de los

movimientos en masa y la fragilidad de las construcciones a partir de la tipología de cada una de estas, aunque según el análisis de algunos expertos, esta metodología puede llegar a ser conservadora en cuanto a la determinación real de la vulnerabilidad de cada construcción. A partir de una recolección de datos producto del trabajo realizado por el convenio No. 4600076515 de 2018 entre la universidad EAFIT y la alcaldía de Medellín se realizó una interpretación de esta metodología y establecieron los pros y contra que tiene la aplicación de la misma en la evaluación de la vulnerabilidad y la gestión del riesgo.

3. Planteamiento del problema

Surge la necesidad de realizar este trabajo debido a que la metodología del Servicio Geológico Colombiano es conservadora para la evaluación de vulnerabilidad y fragilidad en construcciones por movimientos en masa rápidos, ya que conlleva a que un gran número de construcciones sean categorizadas en riesgo alto por movimientos en masa, a pesar de que estos fenómenos tengan intensidades relativamente bajas. La realización de este proyecto busco a partir del análisis de los datos que se obtuvieron de la información del convenio antes mencionado, establecer conclusiones que permitieron proponer mejoras a la metodología del SGC para la gestión del riesgo de desastres en el municipio de Medellín, teniendo en cuenta las condiciones geomorfológicas, geológicas y topográficas sobre las cuales está asentada la ciudad y la hacen vulnerable a desastres provocados por movimientos en masa.

4. Pregunta

¿Es la metodología del Servicio Geológico Colombiano confiable para la evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad de construcciones frente a fenómenos naturales como los movimientos en masa rápidos?

5. Hipótesis

Los movimientos en masa con intensidades medias a bajas generan vulnerabilidades y riesgos altos al aplicar la metodología del Servicio Geológico Colombiano, independiente de la tipología de las construcciones, debido a que esta es muy conservadora.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad y fragilidad para diferentes niveles de intensidad por movimientos en masa rápidos a partir de la metodología del Servicio Geológico Colombiano y el convenio No. 4600076515 de 2018 entre la universidad EAFIT y la alcaldía de Medellín.

6.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una base de datos de vulnerabilidad y fragilidad de construcciones con intensidades de movimientos en masa a partir de la información obtenida por el convenio No. 4600076515 de 2018 entre la universidad EAFIT y la alcaldía de Medellín, realizando un control de calidad para estas variables que acompañan las más de 12.000 construcciones estudiadas.
- Construir las gráficas entre vulnerabilidad y fragilidad con una intensidad determinada para datos teóricos y experimentales.
- Interpretar los resultados arrojados por las curvas y realizar una serie de conclusiones y recomendaciones respecto a las ventajas y desventajas que presenta la metodología del Servicio Geológico Colombiano para la evaluación de la vulnerabilidad y la fragilidad.

7. Metodología

En este capítulo, se evidencia el proceso llevado a cabo para la elaboración de este proyecto. Este fue distribuido en varias etapas, las cuales constan de una serie de actividades que permitieron realizar el objetivo general y que fueron desarrolladas de la siguiente manera: *Revisión de información secundaria, homogeneización de datos, construcción de curvas de vulnerabilidad Vs fragilidad, interpretación de resultados y realización de conclusiones y recomendaciones.* A continuación, se presenta el esquema metodológico del proyecto (Figura 1), que muestra las etapas mencionadas y se visualizan las actividades que se desarrollaron en cada una de estas. Posteriormente, se describe de que trato de manera general cada etapa y actividad realizada y cuál fue el fin de cada una de ellas:

Esquema metodológico

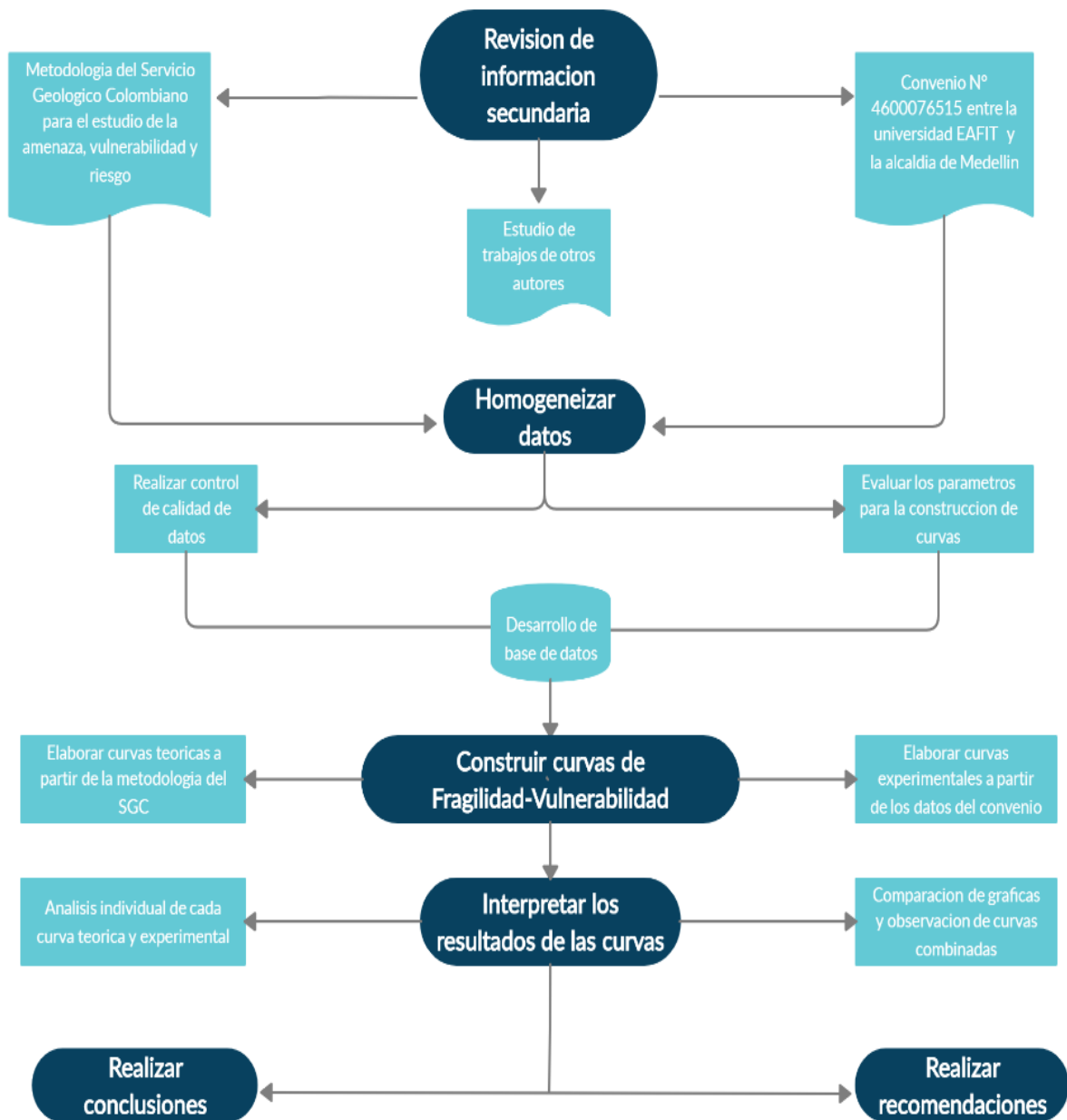


Figura 1. Flujograma de la metodología desarrollada para la realización de este proyecto.

7.1 Revisión información secundaria

La primera etapa del proyecto consistió en la revisión de la metodología del Servicio Geológico Colombiano, a partir de la cual se basan los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Por otro lado, estudiar y evaluar los resultados del convenio No. 4600076515 de 2018 entre la alcaldía de Medellín y la Universidad de EAFIT fue fundamental, ya que de ahí surgieron las bases para realizar el trabajo. Además, fue útil revisar trabajos realizados por otros autores con diferentes perspectivas para abordar la temática estudiada.

7.1.1 Metodología del Servicio Geológico Colombiano para el estudio de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

La metodología del SGC fue publicada en el 2015 luego de la creación de la ley 1523 del 2012 donde se implementa la gestión del riesgo en Colombia. Para cumplir con esta etapa del proyecto es necesario conocer los parámetros necesarios para evaluar la vulnerabilidad, entre estos están la intensidad del movimiento y la fragilidad de las edificaciones. A continuación, se muestran los procesos de cálculo para obtener estos parámetros:

7.1.1.1 Cálculo de vulnerabilidad.

En la metodología del SGC para el estudio de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo siguen la metodología desarrollada por Uzielli et al. (2008), Li et al. (2010) y Du et al. (2013), La vulnerabilidad en función de la fragilidad de las estructuras (denominada susceptibilidad en algunos documentos y resistencia en otros) y de la intensidad del evento amenazante. En la guía metodológica del SGC, se adopta el modelo de Du et al. (2013) y Du et al. (2014).

$$V = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{I}{1-S} \right)^2 \quad I \leq 1-S \right) \quad \text{ó} \quad V = \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1-I}{S} \right)^2 \quad I > 1-S \right)$$

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo de la vulnerabilidad (SGC 2015).

V= Vulnerabilidad de los elementos expuestos

I= Intensidad del fenómeno amenazante

S= Fragilidad de las construcciones expuestas al fenómeno amenazante.

Para estructuras, con valor de vulnerabilidad de 1.0, significa la destrucción completa de la estructura; los valores menores que 1.0 representan el grado de daño, y 0 significa que la edificación no presenta ningún daño. En personas, 1 significa la pérdida de la vida, y los valores menores que 1 se traducen como la probabilidad de pérdida de la vida. En la Tabla 1 se muestra clasificación de la vulnerabilidad respecto a los valores numéricos y el nivel de daño:

Clasificación de la vulnerabilidad	Valor de vulnerabilidad	Nivel de Daño
Alta	0.50 - 1.00	Total - Colapso
Media	0.10 - 0.50	Grave
Baja	0.02- 0.10	Moderado
	0.00 - 0.02	Leve

Tabla 1. Clasificación de la vulnerabilidad para edificaciones (SGC 2015).

7.1.1.2 Cálculos de la intensidad.

Para hallar los parámetros que se utilizan para calcular la intensidad se usa una ecuación establecida (Ver conceptualización). A continuación, se muestra la ecuación que se utiliza para hallar la velocidad desarrollada por un movimiento en masa mientras baja de un punto A- B.

$$V_{AB} = \sqrt{2Hg \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \beta}\right)}$$

Ecuación 2. Fórmula para el cálculo de la velocidad de movimientos en masa rápidos (SGC 2015).

Donde:

V_{AB} = Velocidad del movimiento.

H: Altura de caída.

g: gravedad.

Tan ϕ : ángulo de fricción del talud.

Tan β : ángulo del talud.

Luego de obtener la velocidad del movimiento en masa se utiliza la siguiente ecuación para hallar la presión de impacto

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Ecuación 3. Cálculo de la presión de impacto (SGC 2015).

Donde:

P es la presión de impacto (Pa).

ρ es la densidad de la masa movida (kg/m³) y v es la velocidad (m/s).

Después de obtener la presión de impacto fue necesario identificar la tipología que posee una presión límite de la estructura, con ello se utilizó la información presente en la Tabla 5 del Anexo 2 (léase intensidad por presión de impacto (I_{pre})). Se aplicó la operación requerida y se obtuvo el parámetro de presión. Posteriormente para obtener el I_{prof} que es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento fue necesario dividir la profundidad del deslizamiento por la altura de las construcciones, como se ve en la Tabla 7 del Anexo 2. (léase intensidad por profundidad/altura de la estructura (I_{prof})).

Finalmente, después de haber calculado estos parámetros, se halla la intensidad en función de la formula mostrada en la conceptualización (Ecuación 5).

7.1.1.3 Cálculo de la fragilidad.

La Fragilidad de las edificaciones Siguiendo la metodología propuesta por Li et al. (2009), modificada por Du et al. (2013, 2014), En este trabajo se consideran cuatro parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones, relativos al tipo de estructura (S_{tip}), su altura (S_{alt}), su conservación (S_{con}) y su edad (S_{ed}). Partiendo de estos parámetros, se calcula la fragilidad de la estructura (S_e) con la ecuación (4), adicionalmente, se evalúa la fragilidad del acueducto ($S_{acueducto}$) y el alcantarillado ($S_{alcantarillado}$) esta adición fue aplicada en el convenio 4600076515 entre la Universidad EAFIT y la Alcaldía de Medellín. En el Anexo 3 se encontrarán las tablas correspondientes a cada factor de fragilidad.

$$S_e = 1 - \pi(1 - S_I)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

Ecuación 4. Cálculo de la fragilidad (EAFIT 2018).

7.1.2 Convenio no. 4600076515 entre la universidad EAFIT y la alcaldía de Medellín.

La información suministrada por este convenio fue vital para la realización del proyecto, ya que se encontraron datos de intensidad, fragilidad y vulnerabilidad de más de 12.000 construcciones estudiadas anteriormente en varias zonas del municipio de Medellín, que nos permitió aplicar la metodología del SGC. Este convenio se realizó siguiendo los requerimientos del decreto 1077 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, donde se establecen los alcances de los estudios detallados en zonas con condición de riesgo.

7.1.3 Estudio de trabajos previos de otros autores.

Esta actividad estuvo destinada a estudiar y revisar trabajos previos de otros autores en el tema para tener un contexto claro con diferentes puntos de vistas que nos permitieron definir la manera correcta en la que se manejarían los datos y se interpretaron. Se estudiaron trabajos como *“Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter”* (Prieto et al., 2018) que nos da una visión acerca de los procedimientos manejados en la metodología internacional para evaluación de vulnerabilidad de construcciones, principalmente en la denominada metodología HAZUS, la cual se conoció más a fondo revisando el trabajo *“Comparación de metodologías HAZUS vs RN- COL”* (Puerto, M. 2004) en el cual se habla como se emplea la metodología HAZUS y como se compara con otro tipo de metodologías usadas en Colombia. Finalmente, hay que mencionar que el trabajo *“Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado”* (Inteinsa, S. 2006) fue muy útil para contextualizar las condiciones geológicas y geomorfológicas donde se encuentran localizadas las zonas de estudio.

7.2 Homogeneización de datos

Para esta etapa del proyecto, fue necesario utilizar la herramienta Office Excel para realizar el almacenamiento de los datos, esto con el fin de organizar los parámetros que componen las más de 12.000 construcciones estudiadas; que están repartidos en 40 carpetas de Excel con un código asignado para cada edificación y que no se encuentran estructuradas. Primero, se examinaron las fichas correspondientes a cada uno de los polígonos estudiados por la universidad EAFIT y la alcaldía de Medellín en el convenio. Después, se definieron los datos que se necesitarían para la elaboración y se procedió a agruparlos de manera organizada en una nueva hoja de Excel. Para ello, utilizamos la opción de “BuscarV” para filtrar los datos de las variables que se requerían, que estaban repartidos en dos fichas en hojas de Excel diferentes y unirlos en un solo archivo donde concuerde la información con cada uno de los códigos de las construcciones evaluadas, adicionalmente, se debieron separar estos datos por tipología de construcción para tener un manejo adecuado de los datos.

7.2.1 Control de calidad.

El control de calidad se debe dar después de la homogeneización de los datos y del estudio de la metodología del SGC, a partir de la fórmula de vulnerabilidad propuesta por Uzielli et al. (2008), Li et al. (2010) y Du et al. (2013). La tarea principal fue corregir aquellos datos anómalos en la información obtenida acerca de las construcciones evaluadas por el convenio, o en algunos casos inclusive, fue necesario eliminar y no tomar en cuenta datos errados e incoherentes.

7.2.2 Evaluación de parámetros para construir curvas.

Esta actividad estuvo contemplada para realizar ensayos con los datos de la información proporcionada por el convenio para definir de qué manera se usarían estos para la construcción de las curvas, ya que debido a que son cuatro variables principales que se usan en la metodología del SGC se pueden plantear diferentes modelos para la elaboración de las curvas. La idea fue verificar si el modelo planteado en este trabajo (Vulnerabilidad VS Fragilidad a intensidad fija) era el más adecuado y que facilitara la interpretación de los datos. Posterior a la realización del control de calidad de los datos, se obtuvo la base de datos final, que estaba contemplado como uno de los objetivos específicos del proyecto, como apoyo para la generación de los resultados (Anexo 1).

7.3 Construcción de curvas de fragilidad vs vulnerabilidad

Para esta etapa del proyecto fue necesario utilizar una herramienta que permita elaborar las gráficas. Finalmente, se utilizó Microsoft Excel, a partir de la base datos desarrollada, se elaboraron las curvas y se analizó el comportamiento de la vulnerabilidad y la fragilidad de una construcción a una intensidad constante de un movimiento en masa, tanto con datos experimentales como con datos teóricos.

7.3.1 Curvas con datos teóricos.

En esta actividad, se dio la realización de las curvas teóricas, las cuales se realizaron a partir de las fórmulas y valores cualitativos presentes en los componentes teóricos por el SGC en su metodología. La elaboración de estas curvas estuvo condicionada por los datos que se obtuvieron tras la recopilación de la información proporcionada por el convenio No. 4600076515 de 2018, porque en la información de este no hay datos de todos los valores de intensidad estudiados para todas las tipologías, por lo cual no se pudieron comparar algunas

curvas del modelo teórico (que si nos permite elaborar curvas con cualquier valor de intensidad y fragilidad) con las del modelo experimental, ya que no se pudieron construir.

7.3.2 Curvas con datos experimentales.

Para la elaboración de estas curvas fue necesario el control riguroso de los datos experimentales, los cuales son aportados por el convenio No. 4600076515 de 2018; para que se pudiera evaluarlos y compararlos con los datos teóricos que se obtuvieron a partir de la metodología del Servicio Geológico Colombiano. Para estos datos se hizo un control adecuado de los parámetros y las variables necesarias para asegurar la calidad y viabilidad del modelo experimental planteado y que los resultados de las curvas no fueran anómalos.

7.4 Interpretación de resultados

Analizar el resultado de las gráficas fue una etapa de gran importancia para desarrollar el proyecto. Para ello fue necesario establecer metodologías de comparación entre los datos de vulnerabilidad, fragilidad de las construcciones y la intensidad de los movimientos en masa que faciliten la interpretación.

7.4.1 Análisis individual de curvas teóricas y experimentales.

En este ítem se hizo un análisis y una interpretación por cada curva generada, tanto las experimentales como las teóricas y observando los cambios que se dan en diferentes intensidades en cada tipología de edificación. En las gráficas teóricas, que valores se espera que arrojen estas dependiendo de la intensidad del movimiento, mientras que en las gráficas experimentales lo primordial es verificar cual es el verdadero nivel de riesgo de las construcciones evaluadas en el proyecto y si existe o no una sobrevaloración de la metodología del SGC en cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad.

7.4.2 Comparación entre gráficas y observación de curvas de combinadas.

En este punto del trabajo, se realizó una comparación entre gráficas teóricas y experimentales, para de esta manera corroborar que tan cercanos o alejados de los valores del modelo teórico se encuentran los valores arrojados por el modelo experimental. Además, se hizo el análisis de curvas combinadas entre el total de algunas variables principales, que nos permitieron mejorar la capacidad de análisis de los resultados y poder generar un mayor número de conclusiones.

7.5 Conclusiones y recomendaciones a la metodología del SGC

El resultado obtenido del proyecto dio las bases para la realización y consolidación de las conclusiones y recomendaciones, para ello se debió hacer una descripción detallada de las curvas, evaluar a fondo los diferentes parámetros para cumplir con el objetivo general del proyecto siguiendo los estándares de calidad estipulados por el convenio del SGC. Adicionalmente a esto se lograron establecer recomendaciones concretas y acordes con los resultados obtenidos para mejorar y complementar los procedimientos de evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa estipulados en la metodología del SGC.

8. Conceptualización

En este capítulo se presentan las definiciones, términos y conceptos relacionados al tema de estudio, los cuales fueron fundamentales para la realización del proyecto, principalmente aquellas variables que contribuyen a la evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones por movimientos en masa:

8.1 Gestión del riesgo

Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia de este, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (ley 1523 2012).

8.2 Susceptibilidad de Deslizamiento

Evaluación cuantitativa o cualitativa de una zona la cual pueden existir o ya existen movimientos en masa (deslizamientos). Esta evaluación considera la clasificación, volumen o área y distribución espacial de los movimientos en masa; también puede incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos potenciales o existentes. Aunque se espera que los movimientos en masa ocurran con más frecuencia en la mayoría de las zonas susceptibles, en los análisis y evaluaciones de susceptibilidad, no se tiene en cuenta el tiempo de recurrencia. La susceptibilidad a movimientos en masa incluye aquellos originados en la zona de estudio o pueden tener su fuente fuera de esta ella, pero pueden viajar de regreso hacia o desde esta área (Fell et al. 2008 en SGC, 2013).

8.3 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad, la variable principal a evaluar en este trabajo se define “como el grado de daños potenciales, expresado de 0-1, sufridos por un elemento o grupo de elementos expuestos como consecuencia de un fenómeno natural de una intensidad dada” (Garzón, Valencia & Muñoz, 2012) o como “Pérdida social o económica promedio debido a la ocurrencia de un solo evento que tiene el potencial de causar daño. Usualmente se expresa como un porcentaje del valor de construcción del bien. Naturalmente la vulnerabilidad está asociada, en términos físicos, de manera directa con la deformación permanente y de forma inversa con la resistencia de los materiales” (Prieto et al, 2006).

El SGC (Servicio Geológico Colombiano) define la vulnerabilidad como “Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos” (SGC, 2015).

8.4 Movimiento en masa

Los movimientos en masa incluyen todos aquellos movimientos ladera abajo de masas de roca, detritos o tierras por efecto de la gravedad (Cruden 1991 en PMA-GCA 2007). Los movimientos en masa ocurren como deformaciones del terreno, movimientos de tipo viscoso y otros desplazamientos de masas en cualquier parte de la tierra (SGC 2017).

8.4.1 Tipos de movimientos en masa.

En ellos se incluyen todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Existen movimientos en masa, como la reptación de que se dan en suelos y son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de falla.

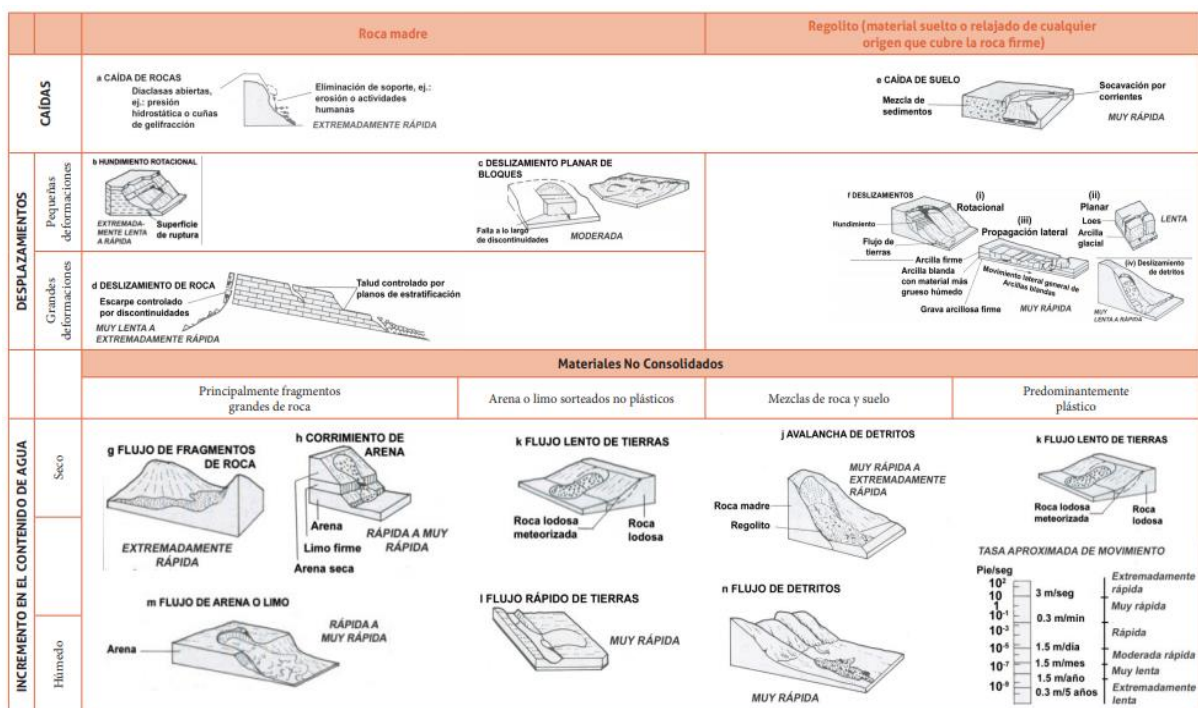


Figura 2. Clasificación de deslizamientos (Varnes, 1958), Traducido de Bell 1993.

La clasificación de Varnes de 1958 (Figura 2), relaciona cinco tipos de movimientos: caída de roca, deslizamiento, propagación lateral, flujo y avalancha, estos se producen en rocas, regolitos o suelos; sumado a esto, menciona las características de estos tipos de movimientos en masa, entre otras y muy importante su velocidad y humedad, asociadas a los efectos y daños posibles. Años más tarde, en 1978, Varnes replantea los cinco tipos básicos de movimientos reconocidos hoy día: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujo, considerando las características cinemáticas de estos procesos, las cuales se asocian a las posibilidades de prevenirlos o tratarlos (SGC 2017).

8.5 Exposición

Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (ley 1523 2012). También se define, como la vulnerabilidad física que hace referencia a la respuesta de los elementos expuestos frente a las sollicitaciones generadas por la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos. En bienes físicos, esta respuesta y la intensidad de la sollicitación dependen de dos aspectos: las características del elemento (tipología, calidad de construcción, mantenimiento, uso, etc.) y su posición relativa con respecto al área afectada por el evento (exposición).

8.6 Intensidad

En términos generales, la intensidad de los movimientos en masa en este escenario se define en función de su profundidad y de la presión de impacto según la siguiente ecuación propuesta por Du et al (2014).

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{pre})(1 - I_{prof})$$

Ecuación 5. Fórmula utilizada para escenarios de movimientos en masa rápidos (SGC 2015).

I_{rap}: Es la intensidad para el escenario con movimientos rápidos.

I_{pre}: Es el parámetro de intensidad debido a la presión y se estima a partir de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la estructura (Ver tablas 5 y 6 en Anexo 2).

I_{prof}: Es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la edificación (Ver tabla 7 en Anexo 2).

8.7 Fragilidad

El término de fragilidad se entiende como la respuesta de los elementos expuestos frente a la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos. En bienes materiales, esta respuesta depende de las características del elemento expuesto, y en personas, de la capacidad de respuesta y la posición relativa con respecto al área afectada por el evento (SGC 2015).

8.8 Tipología de edificaciones

Se observa a continuación, la clasificación de tipologías estructurales utilizadas en Colombia, se nombran y se describen sus características generales. En la Tabla 2 se podrán ver las tipologías particularizadas con un código de relación acorde con la clase escogida y su valor de fragilidad mínimo (SGC,2016).

Código	Tipología	Fragilidad
F	Construcciones simples	0.9
E	Estructuras ligeras	0.8
D	Estructuras con confinamiento deficiente y estructuras híbridas	0.65
C	Mampostería reforzada	0.4
B	Edificaciones reforzadas GI y GII	0.2
A	Edificaciones con reforzamiento especial GII y GIV	0.1

Tabla 2. Edificaciones, definidas a partir de los trabajos de Heinimann (1999) y Jam (2007) modificado.

8.8.1 Construcciones simples.

Son edificaciones que no poseen una estructura definida, de carácter improvisado, generalmente construidas utilizando materiales precarios o de recuperación. Entre estas se incluyen las edificaciones en proceso de construcción y las construidas en materiales de recuperación, pódicos y paneles de madera, y pódicos de madera y paneles en otros materiales (Heinimann,1999) & (Jam, 2007). Son ejemplo de este tipo de edificaciones tugurios, ranchos, campamentos, carpas, etc. En la Figura 3 se observa una ilustración de esta tipología.



Figura 3. Ilustración de tipología de construcciones simples (F). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.

8.8.2 Estructuras ligeras.

Edificaciones construidas con materiales tradicional eso de baja calidad, con un sistema estructural de muros cargueros. En la Figura 4 se observa esta tipología en la que se incluyen las edificaciones construidas con materiales como adobe, bahareque, madera bruta, tapia pisada y las prefabricadas (Heinimann,1999) & (Jam, 2007).



Figura 4. Ilustración de tipología de estructuras ligeras (E). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.

8.8.3 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas.

Edificaciones con muros cargueros, pero sin confinamiento adecuado (mampostería no reforzada). También se refiere a aquellas construcciones de las categorías A, B y C que tienen elementos de otros materiales no competentes, como por ejemplo mampostería no reforzada, adobe, bahareque, madera, tapia pisada, etc., con mayor componente de elementos de los grupos A, B y C (Heinimann,1999) & (Jam, 2007). Se observa una ilustración en la Figura 5.



Figura 5. Ilustración de tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas(D). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.

8.8.4 Estructuras con mampostería reforzada.

Son aquellas edificaciones que tienen un sistema estructural de mampostería con elementos de refuerzo (barras, láminas, pernos, platinas, etc.). También se incluyen las edificaciones en mampostería confinada (Heinimann,1999) & (Jam, 2007). Se observa una ilustración en la Figura 6.



Figura 6. Ilustración de tipología de estructuras con mampostería reforzada(C). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.

8.8.5 Edificaciones reforzadas GI y GII.

Edificaciones con estructura en concreto y acero de los grupos de importancia I y II construidas con pórticos en concreto reforzado, sistema combinado en concreto reforzado, pórticos resistentes a momentos en acero, pórticos arriostrados en acero, etc., como se observa en la Figura 7. También se incluyen aquellas del grupo A construidas antes de 1998 (Heinimann,1999) & (Jam, 2007).



Figura 7. Ilustración de tipología de edificaciones reforzadas GI -GII(B). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de EAFIT (2018). Convenio de asociación No. 4600076515 de 2018.

8.8.6 Edificaciones con reforzamiento especial GII y GIV.

Edificaciones de concreto y acero diseñadas y construidas con requerimientos superiores a los convencionales o con la exigencia máxima de los códigos de diseño. Se incluyen las edificaciones de los grupos de importancia III y IV, definidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10, que se construyeron después de 1998, con pórticos en concreto reforzado, sistema combinado en concreto reforzado, pórticos resistentes a momentos en acero, pórticos arriostrados en acero, etc. (Heinimann,1999) & (Jam, 2007). Se observa una ilustración en la Figura 8.



Figura 8. Ilustración de tipología de edificaciones con reforzamiento especial GII -GIV(A). Ubicada en el municipio de Medellín. Tomado de internet.

9. Generalidades

A continuación, se presentan las características generales de las zonas de estudio del trabajo, lo cual es importante para contextualizar al lector en qué condiciones este fue realizado:

9.1 Localización

El municipio de Medellín está ubicado al sur occidente del departamento de Antioquia posee una extensión de 376,4 kms² la cual cuenta con 111,62 kms² de suelo urbano, 263,04 kms² de suelo rural y en expansión cuenta con 1,75 kms² (Medellín 2014.), topográficamente tiene una altura de promedio de 1479 msnm, cuenta con 16 comunas y 5 corregimientos. Las principales zonas de estudio se encuentran en la comuna 8, el sector noroccidental y la quebrada Picacha ubicada al suroccidente del municipio de Medellín (Figura 9).

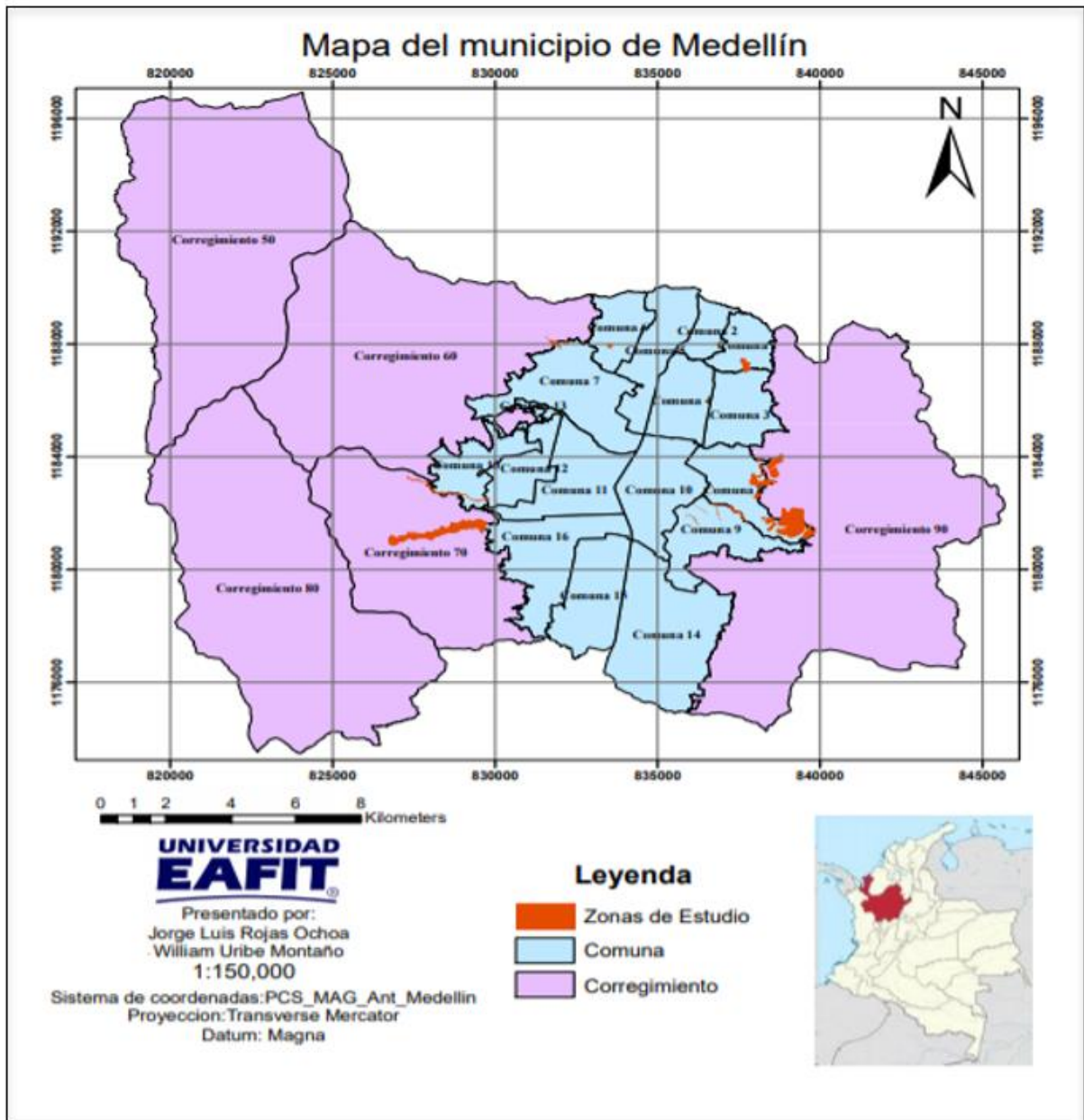


Figura 9. Mapa del municipio de Medellín con corregimientos, comunas y zonas de estudio.

9.2 Clima

El clima de Medellín es templado – seco. El promedio de lluvia total anual es de 1685 mm. Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses de enero y febrero son los más secos del año. Las temporadas de lluvia se extienden desde finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre. A mediados de año se presenta una disminución de lluvias en julio y agosto, tras lo cual, nuevamente comienzan a incrementarse. En los meses secos de principios de año, llueve alrededor de 9 días/mes; en los meses de mayores lluvias puede llover de 22 a 24 días/mes. La temperatura promedio es de 21.5 °C. Al medio día la temperatura máxima media oscila entre 26 y 28°C. En la madrugada la temperatura mínima está entre 17 y 18°C. El sol brilla cerca de 4 horas diarias en los meses lluviosos, pero en los meses secos, la insolación llega a 6 horas diarias/día (IDEAM, 2014). La humedad relativa del aire oscila durante el año entre 63 y 73 %, siendo mayor en la época lluviosa del segundo semestre. Se observan a continuación 4 graficas con la información anteriormente mencionada (Figura 10):

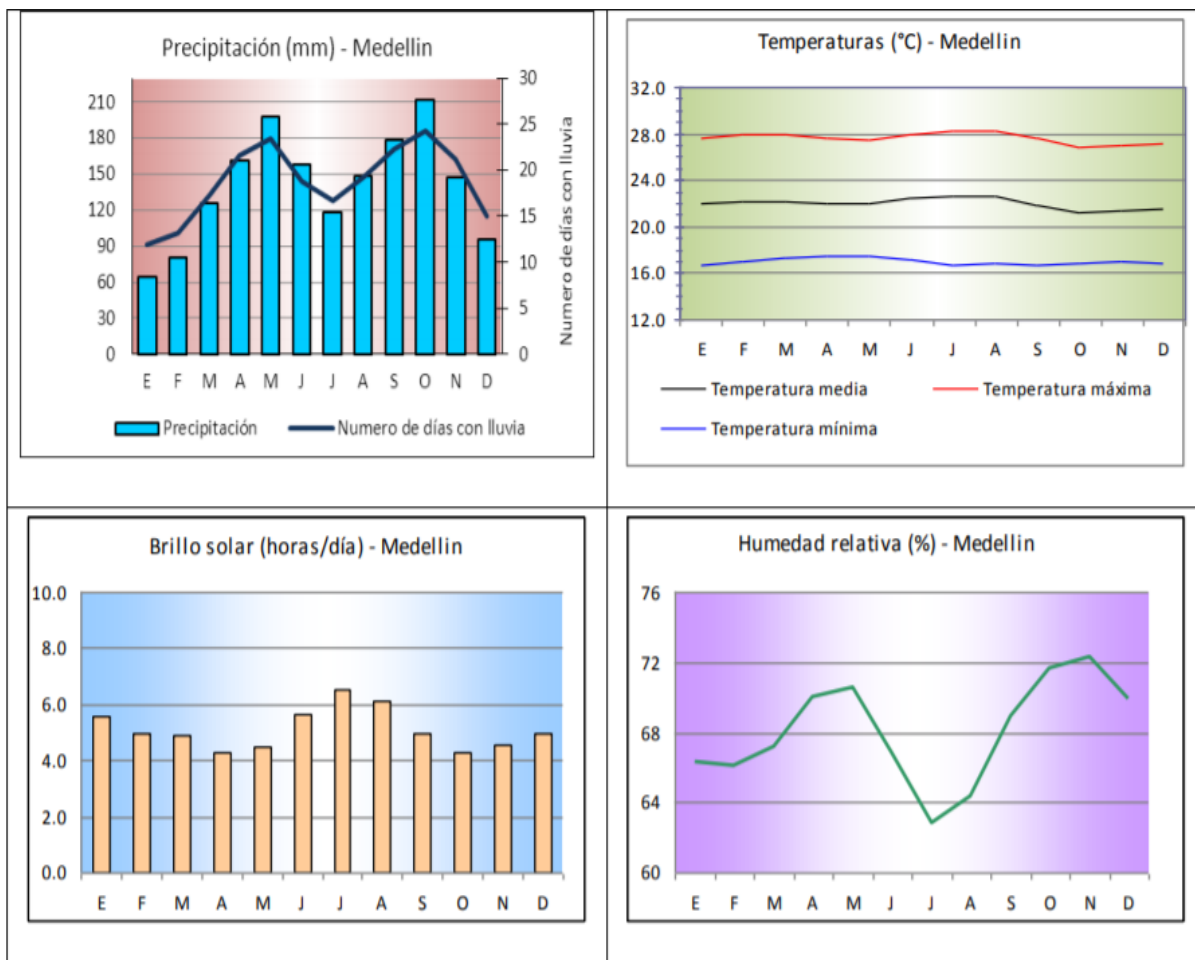


Figura 10. Características climatológicas del municipio de Medellín. Tomado de IDEAM (2014).

9.3 Geología

En la zona de estudio encontramos una variedad litológica y estructural que está asociada a dinámicas por procesos endógenos y exógenos. En la Figura 11 se describen las unidades espacialmente de acuerdo con la propuesta de AMVA (2007) y AMVA – Alcaldía de Medellín (2017), de este último trabajo se conserva también el nombre de las unidades.

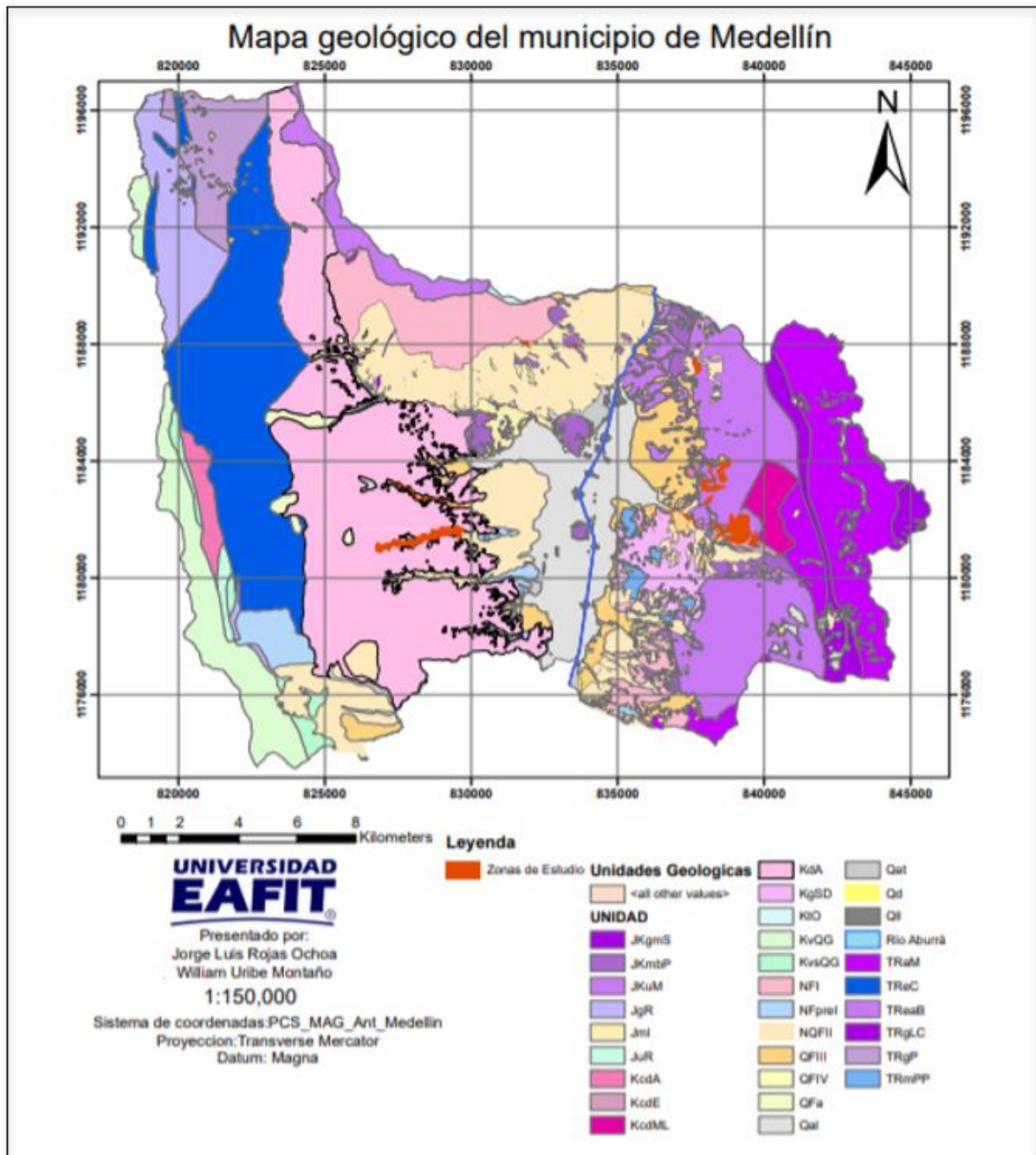


Figura 11. Mapa geológico del municipio de Medellín.

Regionalmente las zonas de estudios ubicadas de color naranja rojizo en la Figura 11, están sobre la vertiente occidental y oriental del Valle de Aburrá, donde el basamento rocoso que son las rocas más antiguas son representadas por rocas metamórficas de edad triásica - jurásica la cual la Anfibolita de Medellín (TRaM), Milonita de la Iguaná (JmI) y Metabasitas de Picacho (JKmbP) afloran en la vertiente occidental y sobre la vertiente oriental del Valle de Aburrá aflora únicamente la Anfibolita de Medellín (TRaM), estas unidades se caracterizan por presentar salientes topográficas en ambas vertientes. La Anfibolita de Medellín sobre la vertiente oriental fue obducida durante el jurásico por rocas alargadas de composición dunitica, basaltos y sedimentos de origen marino denominado “Dunita de Medellín (JKuM)”. Sumado a esto la anfibolita de Medellín y la Dunita de Medellín han sido intruidos por rocas ígneas de edad cretácicas como el stock de sandiego (KgSD) y el stock de la Estancias (KcdE). Ampliando un poco más la estratigrafía del Valle de Aburrá aparecen los depósitos cuaternarios, estos depósitos son resultado de procesos naturales que han afectado a la roca de ambas vertientes la cual han despendido material de las laderas y que se acumulan en zonas de menores pendientes que en el registro abarcan tiempos del terciario tardío hasta el cuaternario (EAFIT 2018).

9.4 Geomorfología

El municipio de Medellín se ubica en la zona más septentrional de la cordillera Central. La evolución geomorfológica se retoma para este estudio de la interpretación evolutiva es a partir del análisis desarrollado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en el estudio de Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, donde jerarquiza se jerarquiza en unidades de Paisaje, macrounidades y unidades geomorfológicas (EAFIT 2018).

De acuerdo con la Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, el área de estudio se localiza dentro de las unidades de paisaje denominadas Valle Medio. En esta unidad se reconocieron macrounidades geomorfológicas denominadas en este informe como Bloques (Figura 12), los cuales muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y que se distinguen, en forma clara, de los adyacentes (EAFIT 2018).

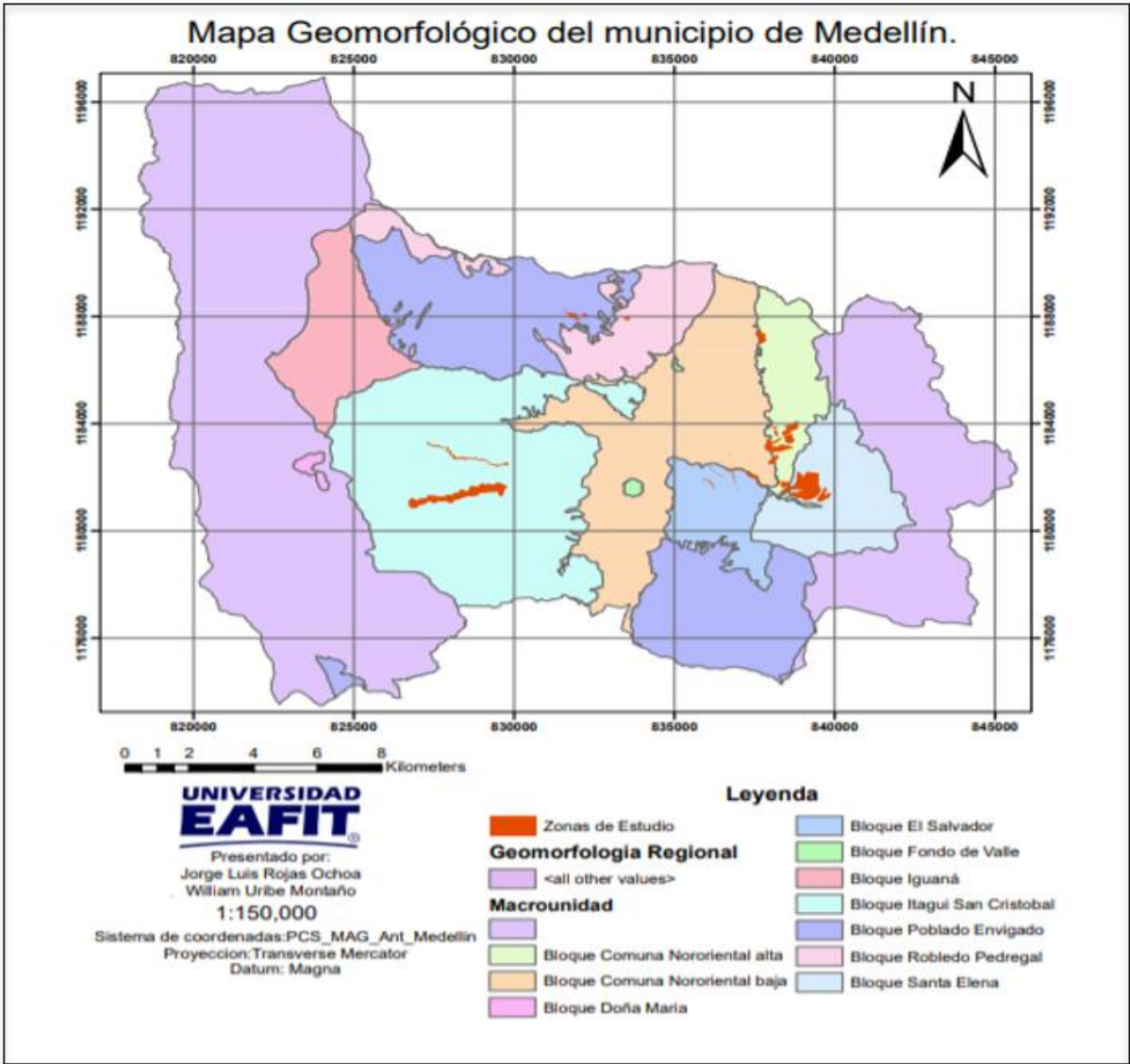


Figura 12. Mapa geomorfológico del municipio de Medellín.

9.4.1 Valle de Aburrá Medio.

Se extiende aproximadamente desde los municipios de Itagüí y Envigado hasta los límites entre Bello y Copacabana. Es el valle más ancho, con un fondo amplio y plano, flanqueado por superficies suaves en distintos depósitos de vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos. La zona estudiada, se localiza dentro de los bloques denominados como: Bloque Comuna Nororiental Alta, Bloque comuna Nororiental baja, Bloque Santa Elena, bloque El Salvador, Bloque El Poblado – Envigado, Bloque Fondo del Valle, Bloque Palencia y Zajón Bogotá. Estas macrounidades se localizan sobre la vertiente oriental del Valle Medio de Aburrá y sobre la vertiente occidental del Valle medio están las macrounidades Bloque Itagüí – San Cristóbal, Bloque Iguaná y Bloque Robledo - Pedregal y Bloque Palencia y Zajón Bogotá (AMVA, 2007).

9.4.1.1 Bloque Robledo – Pedregal.

El bloque robledo pedregal representa uno de los rasgos de mayor contraste morfológico dentro de la zona de estudio. Corresponde a la vertiente noroccidental de la ciudad de Medellín, limitada al sur y al occidente por el cauce de la quebrada La Iguaná, al oriente por el río Aburrá y al norte por la quebrada La Loca hasta sus cabeceras y continuando por la divisoria de aguas hasta la serranía de Las Baldías (EAFIT 2018).

9.4.1.2 Bloque Comuna Nororiental Alta.

Esta macrounidad corresponde a una franja de terreno alargada en sentido N-S, desarrollada sobre rocas ultrabásicas (Dunitas de Medellín) y muy localmente sobre depósitos de vertiente. Su característica principal es el claro control estructural. Esta franja de terreno

involucra alturas desde los 2 600 msnm en inmediaciones de Santa Elena hasta los 1 750 msnm por debajo de los barrios San Blas y Santo Domingo Savio (EAFIT 2018).

Dentro de este polígono predominan las pendientes moderadas, con algunos sectores escarpados hacia la parte alta y sobre la vertiente derecha de la quebrada La Sucia (límite Bello - Medellín), además de algunos sectores de pendientes suaves que a su vez conforman una franja en el centro de la macrounidad, definiendo de esta manera un escalonamiento de la vertiente. El avance remontante del frente erosivo del río Aburrá, a través de las corrientes del sector, ha generado un sistema de lomos, que en la parte norte tienen una tendencia N-W a N-S (paralelos a la falla Rodas) y en el sector sur E-W. Dichos lomos en general tienen flancos empinados, rectos y de tope agudo; además, las corrientes que los separan transcurren por profundos y estrechos cañones con tendencias similares (EAFIT 2018).

9.4.1.3 Bloque Comuna Nororiental Baja.

La macrounidad comuna nororiental baja presenta otra franja de terreno diferente a la anterior con tendencia N-S, que se encuentra localizada sobre la misma vertiente nororiental del Valle medio, ocupa terrenos con alturas entre los 1750 y 1450 msnm. Esta macrounidad posee un control estructural por una serie de fallas y lineamientos con tendencia N-S que coinciden con las pendientes altas. Dentro de esta macrounidad se identifican dos sectores. Al norte se observan pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada con vergencia hacia al fondo del valle; constituidas principalmente por espesos suelos residuales de rocas ultrabásicas cizalladas y localmente por depósitos de vertiente; en medio de las cuales las corrientes han labrado sus cauces, generando una red poco densa de vaguadas moderadamente incisadas de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas (EAFIT 2018). Dentro de estos materiales es factible identificar sectores con diverso grado de incisión. Por otro lado, dentro del polígono también se identificaron una serie de zonas de

pendiente suave a diferentes alturas, que por su localización (cercana a las trazas de las fallas o lineamientos) u orientación se cartografiaron como peldaños (AMVA, 2007).

9.4.1.4 Bloque Santa Elena.

Esta macrounidad coincide con la parte alta de la cuenca de la quebrada Santa Elena, aunque vale la pena aclarar que las cabeceras de esta corriente están por fuera del Valle de Aburrá. Este polígono tiene la forma semicircular característica de un frente erosivo, realizada por el contraste morfológico respecto a los remanentes de la superficie de erosión localizados al oriente y que están claramente cortados por este rasgo regional. Dentro de esta macrounidad se observa el predominio de laderas empinadas y escarpadas hacia la parte superior (cota 2.650 msnm aproximadamente), definiendo un sistema de escarpes semicirculares asociados a las cabeceras de las quebradas del sector. Por debajo de estas vertientes y como resultados también de la erosión, se identificaron varios tipos de lomos (EAFIT 2018).

Sobre la vertiente sur (margen derecha de la quebrada Santa Elena), los lomos tienen orientación S-N a SSE-NNW, con topes redondeados, flancos convexos y vaguadas intermedias, estrechas y moderadamente entalladas. Por el contrario, los lomos de la vertiente norte exhiben topes agudos, flancos rectos, empinados y con vaguadas profundamente encañonadas (p.e. quebradas La Castro y Chorro Hondo); además, presentan orientación diversa con claros efectos tectónicos en la parte inferior, sector de Las Estancias y La Sierra, siguiendo los lineamientos cartografiados. Un rasgo característico de esta macrounidad es la presencia de descansos topográficos o zonas de pendiente suave en medio de las laderas, definidos en este trabajo como peldaños.

9.4.1.5 Bloque El Salvador.

Este bloque corresponde a la margen izquierda de la cuenca baja de la quebrada Santa Elena, sobre el extremo occidental y el flanco norte del lomo regional que involucra los terrenos del Seminario Mayor de Medellín. Este polígono ocupa zonas desde los 2100 y los 1500 msnm, con vertientes suaves a moderadas, cóncavas e irregulares; las cuales están constituidas por suelos residuales del Gabro de San Diego y depósitos de vertiente. Hacia la parte alta de la margen norte de la cuenca de la Santa Elena y toda la vertiente occidental (hacia el río Medellín) se presentan lomos irregulares, poco incisados y de baja altura, con topes redondeados y amplios (EAFIT 2018). Más abajo, cerca de la quebrada Santa Elena, se presenta una ladera regular poco incisada desarrollada en suelos residuales. En el extremo noroccidental de este polígono se presenta un cerro bajo, de vertientes moderadas, tope suave y amplio que resalta en el oriente de Medellín, denominado cerro El Salvador; el cual fue cartografiado como un picacho. En sus flancos, especialmente hacia la quebrada Santa Elena, se identifican una serie de laderas muy suaves, cuya configuración revela su origen depositacional (flujos de lodos y/o escombros) además de superficies en suelos residuales poco incisados (AMVA, 2007).

9.4.1.6 Bloque Fondo de Valle.

Esta macrounidad corresponde como su nombre lo dice, al fondo del valle del río, caracterizada por ser una zona conformada casi en su totalidad por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas entre los que se identifican los cerros el Volador y Nutibara. Es una zona de pendientes rectas a levemente cóncavas en su cercanía a las vertientes occidental y oriental del valle. Estas zonas están relacionadas a los eventos de depositación del río Medellín y su red de drenaje asociada (EAFIT 2018).

9.4.1.7 Bloque Itagiüí – San Cristóbal.

Esta área se ubica sobre la vertiente occidental de la ciudad de Medellín, involucrando el área de la cuenca de la quebrada La Picacha. Geológicamente está caracterizada sobre las rocas del Stock de AltaVista, Metabasitas y los depósitos de vertiente (EAFIT 2018). La presencia de lomos regionales de tendencia W-E es la característica fundamental de esta macrounidad. Dichos lomos forman valles en “V” de fondo estrecho con vertientes largas, rectas a cóncavas y de inclinación moderada a localmente empinadas. Hacia las cabeceras las laderas rematan en escarpes semicirculares, evidencia del proceso remontante del frente erosivo del río Aburrá. El tope de los lomos es en general estrecho y redondeado, con pendientes longitudinales suaves moderadas. Se presentan en general relieves relativos menores y se conforman sistema de colinas medias a altas con base circular y laderas empinadas (AMVA, 2006).

9.4.1.8 Bloque La Palencia y Zajón Bogotá.

Este bloque como su nombre lo dice coincide con la parte alta de la cuenca de la quebrada La Palencia y Zajón Bogotá. Este bloque tiene la forma semicircular característica de un frente erosivo, esta es reflejada por el contraste morfológico respecto a los remanentes de la superficie de erosión localizados al oriente y que están claramente cortados por este rasgo regional. Dentro de esta macrounidad se observa que estas laderas se encuentran empinadas y escarpadas hacia la parte superior (cota 2.650 msnm aproximadamente), definiendo un sistema de escarpes semicirculares asociados a las cabeceras de las quebradas del sector. Por debajo de estas vertientes y como resultados también de la erosión, se identificaron varios tipos de lomos (EAFIT 2018).

9.4.1.9 Bloque el Poblado – Envigado.

El Bloque Poblado – Envigado, “se localiza sobre la vertiente oriental del Valle Medio de Aburrá y sobre ellas se asienta el sector de El Poblado y gran parte del casco urbano de Envigado. Esta limitado al sur por el cauce de la quebrada La Ayurá, el cual a su vez es el límite con el Valle Superior, al este por el marcado cambio morfológico con la zona del oriente antioqueño y sus típicos remanentes de superficies de erosión; al oeste por un pequeño escarpe erosivo asociado al frente de los depósitos de vertiente generados en su interior y al norte la divisoria de aguas con la cuenca de la quebrada Santa Elena (AMVA, 2006).

9.4.1.10 Bloque la Iguaná.

Esta macrounidad tiene forma de rombo alargado en dirección N – S; se ubica en el extremo centro occidental del Valle de Aburrá, está limitado al sureste por el cauce de la quebrada San Francisca, al noreste por el de la quebrada La Iguaná (en sus tramos medio y alto) y al occidente se extiende hasta la divisoria de aguas entre el Valle de Aburrá y el río Cauca, involucrado al lado sur del Boquerón, y el cerro del Padre Amaya (AMVA, 2006).

9.5 Geología estructural

El municipio de Medellín está localizado en el flanco Oeste de la Cordillera Central, el sistema de fallas Cauca-Romeral el cual atraviesa el territorio nacional con una dirección aproximada N-S es la dominante en la tectónica local. Este sistema Cauca Romeral se divide al Oeste por el sistema Cauca y al Este por el sistema Romeral (EAFIT 2018).

La falla más oriental del sistema de falla de Romeral es la falla de San Jerónimo, esta falla tiene incidencia directamente en algunos municipios del Valle de Aburrá. Adicionalmente a esto se distinguen 3 eventos de deformación asociados a la actividad de esta falla, en régimen dúctil, frágil, cohesivo, y frágil no cohesivo (EAFIT 2018).

9.5.1 Sistema de fallas.

A continuación, se describen las principales características de las fallas presentes en la zona de estudio:

9.5.1.1 Falla de Rodas.

Se describe como una falla de cabalgamiento de ángulo a subhorizontal. Se localiza aproximadamente a 15 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y aproximadamente a 12 km al nororiente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado (INGEOMINAS, 2007). Esta falla tiene una dirección general NS/45°NS/45°E, pone en contacto las Dunitas de Medellín con las Anfibolitas. Con buzamiento 45°NE y de carácter normal. No presenta evidencias de desplazamientos horizontales y con desplazamiento vertical desconocido (AMVA, 2007).

9.5.1.2 Falla de Iguaná – Boquerón.

Se localiza aproximadamente a 25 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a 12 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado (AMVA, 2006). Se describe como una falla con dirección general N15°W, que controla parte del cauce de la quebrada La Iguana al occidente de la ciudad de Medellín. En los sitios que este grupo evaluó para identificar su actividad neotectónica no se encontraron evidencias, por lo que estiman su grado de actividad de bajo a muy bajo, (GSM, 1999).

9.5.1.3 Falla La Acuarela.

La falla La Acuarela tiene un rumbo de N-S a N NW, se caracteriza Geomorfológicamente como una falla que presenta un fuerte cambio de pendiente, se presentan dos trazas bien diferenciadas, desde la quebrada Las Palmas(Sector Paulandia) hasta la Curva de Rodas sobre la vía Medellín – Bogotá, también lineamientos de drenajes (quebrada Rodas y quebrada Seca; quebrada Santa Elena y quebrada Espíritu Santo), forma además una depresión a lo largo de su traza y entre las dos trazas de la falla se forman colinas alongadas en sentido NS en los sectores de las veredas Pericos y Santa Elena (EAFIT 2018). La traza occidental de la falla presenta rumbo NS y N15°W con buzamientos de 58°W a verticales, mientras que la traza oriental presenta valores entre N10°E y N10°W, y buzamientos entre 56° y vertical generalmente hacia el oriente. Le asignan un movimiento lateral izquierdo (AMVA, 2007).

9.5.1.4 Falla Santa Elena.

Inicialmente fue descrita por Sierra y Zapara (1989), como lineamiento Buenos Aires, y asociado a la Falla Santa Elena. Evidenciado por cambios notables de pendiente y facetas triangulares, hacia la parte baja del cerro El Gallo sobre el cauce de la quebrada El Viento, presenta una zona de unos seis metros de material cizallado y dirección EW a N80°NS/45°E y buzamiento subvertical y es una falla de carácter normal que tiene un desplazamiento vertical sobre el plano de cabalgamiento de la Dunita en aproximadamente 270 m. Su buzamiento se encuentra entre 55° y 75°N (AMVA, 2007).

10. Resultados e interpretación

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos después de haber construido curvas para la evaluación de vulnerabilidad y la fragilidad en construcciones, en un modelo teórico y un modelo experimental, a partir de la base datos desarrollada con la información adquirida del convenio y las bases teóricas (formulas, conceptos y clasificaciones cualitativas) de la metodología usada por el Servicio Geológico Colombiano para el estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (Anexo 1). Se planteó en este trabajo un modelo de evaluación diferente al del SGC, ya que no se construyeron las curvas en una relación vulnerabilidad - intensidad , ya que a nuestro criterio arroja conclusiones demasiado homogéneas y poco concluyentes, así que se planteó un modelo basado en la construcción de curvas en una relación vulnerabilidad - fragilidad a una intensidad constante por tipología de edificación, en el cual se puede observar una mayor variación y se pueden realizar una mayor cantidad de conclusiones que permiten identificar los factores que promueven una posible sobrevaloración de la metodología convencional del SGC que se usa en la actualidad. Teniendo en cuenta que la elaboración de las gráficas experimentales se realiza a partir de los datos disponibles en la información del convenio, solo se construyeron curvas teóricas a partir de intensidades presentes y evaluadas en los datos experimentales, para de esa manera lograr una comparación puntual entre cada gráfica teórica y experimental según su tipología y la intensidad fija. Los valores de intensidad usados para la construcción de las curvas se clasificaron desde los valores más bajos (0,145) hasta los valores máximos (1), estos últimos se clasificaron en una categoría aparte de las intensidades muy altas, con el fin de facilitar la interpretación de los datos, ya que estos valores están presentes en la gran mayoría de construcciones evaluadas y tienen un comportamiento particular, como se verá más adelante. La clasificación fue la siguiente (Tabla 3):

NIVEL DE INTENSIDAD	VALOR NUMERICO
Intensidades muy bajas	0.145
Intensidades bajas	0.335
Intensidades medias	0.525
Intensidades altas	0.715
Intensidades muy altas	0.905
Intensidades máximas	1

Tabla 3. Niveles de intensidad según su valor numérico.

Después de haber construido las gráficas, se compararon los valores de vulnerabilidad y fragilidad por niveles de intensidad entre el modelo teórico y el modelo experimental, además de la realización de curvas combinadas entre tipologías e intensidades que permitió un mayor análisis. A continuación, se presentan estos resultados:

10.1 Análisis de datos teóricos y experimentales

Se realizó una comparación entre los resultados teóricos y los experimentales, para favorecer el análisis y establecer un mayor número de conclusiones de los resultados a partir de la interpretación de los datos de distintas maneras. A continuación, se muestran los resultados en orden de tipologías y a partir de intensidades bajas hasta las más altas:

10.1.1 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades muy bajas.

A continuación, se presentarán los comparativos entre los resultados teóricos y los experimentales, para valores de intensidad constante muy bajos (0.145), esto para los tipos de construcciones (construcciones simples, estructuras ligeras, con confinamiento deficiente e híbridas y reforzadas GI – GII) en los que se encuentran estos niveles de intensidad:

10.1.1.1 Construcciones simples (Intensidad=0.145).

En el siguiente gráfico se observan un modelo teórico y uno experimental (Figura 13), en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs fragilidad, para una tipología de construcciones simples a una intensidad constante (0.145). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.9 (valor mínimo para la tipología de construcciones simples) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima de 0.54, es decir, aproximadamente un 54% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.62, es decir, representa el 62% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una diferencia de 8 % en los valores de vulnerabilidad, esto debido a que los datos de fragilidad experimentales oscilan todos entre 0.99 - 1. Si observamos el valor mínimo experimental (0.99) y se compara con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos vemos una alta similitud entre los valores de vulnerabilidad entre ambas gráficas. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda de la curva del modelo teórico, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo

experimental se encuentran en la parte limite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican en teoría.

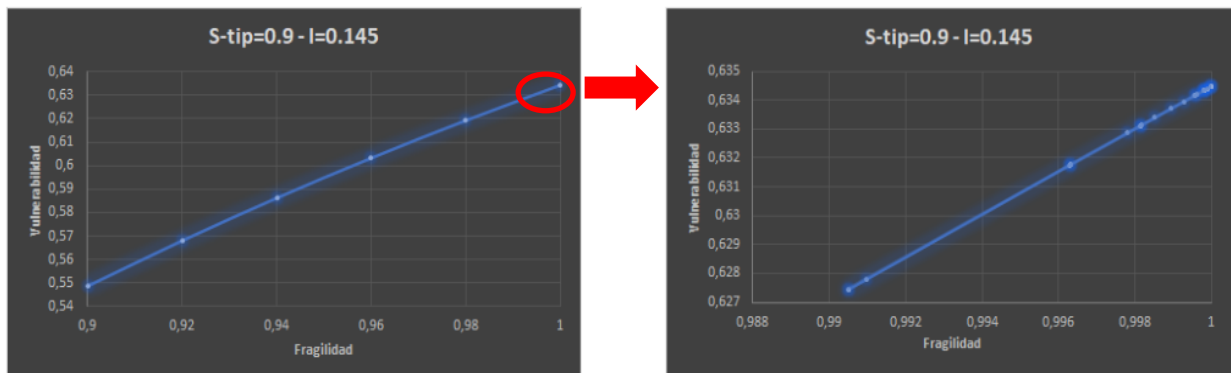


Figura 13. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Como síntesis, se tiene que, para esta tipología de construcciones simples, para muy bajas intensidades siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte más alta de los posibles valores teóricos, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación.

10.1.1.2 Estructuras ligeras (Intensidad=0.145).

En la Figura 14 se observan un modelo teórico y un modelo experimental, en los que se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras ligeras a una intensidad constante (0.145). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento creciente no lineal, con punto de quiebre en valor de fragilidad=0.86, y que a partir de ahí adopta un comportamiento lineal ascendente. Se encuentra que para una fragilidad de 0.8 (valor mínimo para la tipología de estructuras ligeras) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima de 0.26, es decir, aproximadamente un 26% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad media según la

metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se aprecia una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.51, es decir, representa el 51% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una diferencia de 25 % entre los valores de vulnerabilidad, aunque la mayoría de los valores experimentales oscilan entre 0.98-1. Si analizamos este rango de valores experimentales y se compara con los mismos valores, pero en el modelo teórico, vemos una alta similitud entre los valores de vulnerabilidad que arrojan ambas gráficas. Al analizar las gráficas, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte media y superior de la curva del modelo teórico, con lo cual podemos afirmar que los valores de vulnerabilidad y fragilidad del modelo experimental se encuentran prácticamente después del punto de quiebre de la curva teórica.

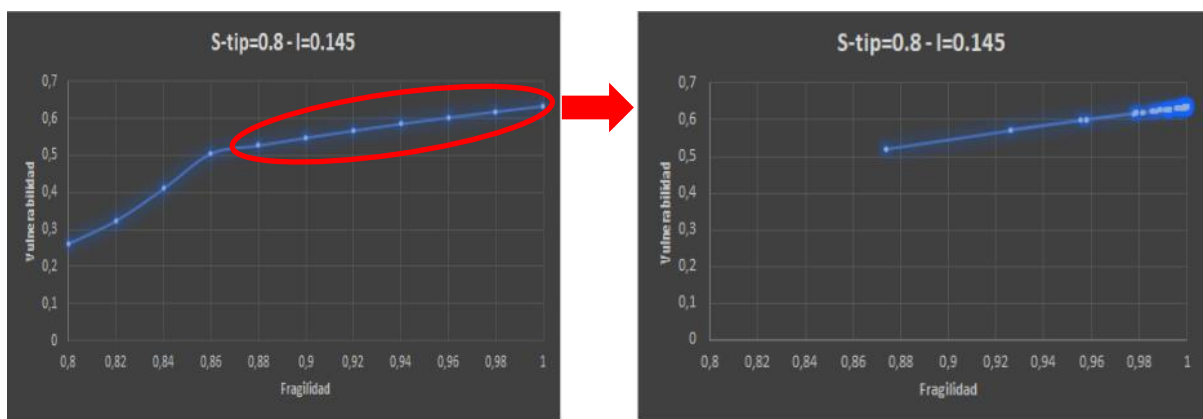


Figura 14. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se puede afirmar que esta tipología de estructuras ligeras, para intensidades muy bajas, será de vulnerabilidad media hasta un valor de fragilidad=0.86, a partir de ahí será clasificado como vulnerabilidad alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte justo después del punto de quiebre (0.86)

de los valores teóricos, aunque la mayoría se encuentran en la franja de valores más alta posible, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación.

10.1.1.3 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (Intensidad=0.145).

Partiendo de la Figura 15, se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas a una intensidad constante (0.145). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento cóncavo creciente hasta un punto de quiebre en fragilidad=0.86, a partir de ahí, adopta un comportamiento lineal ascendente. Se encuentra que para una fragilidad de 0.65 (valor mínimo para la tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas) se obtienen valores de vulnerabilidad mínimos de 0.1, es decir, de un 10% de daño en la estructura, por lo tanto, clasifica como vulnerabilidad baja (con daño moderado) según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se presenta una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual muestra valores que sugieren que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.59, es decir, implica un 59% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se encuentra una diferencia de 49% entre los valores mínimos de vulnerabilidad, aunque la mayoría de los valores experimentales oscilan entre 0.98-1. Al realizar una comparación entre este rango de valores experimentales con los mismos valores, pero en el modelo teórico, se observa una semejanza alta entre los valores de vulnerabilidad que arrojan ambas gráficas. El gráfico nos permite deducir, además, que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior

izquierda de la curva del modelo teórico, teniendo en cuenta esto podemos afirmar que los valores del modelo experimental se hallan en la parte límite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican teóricamente.

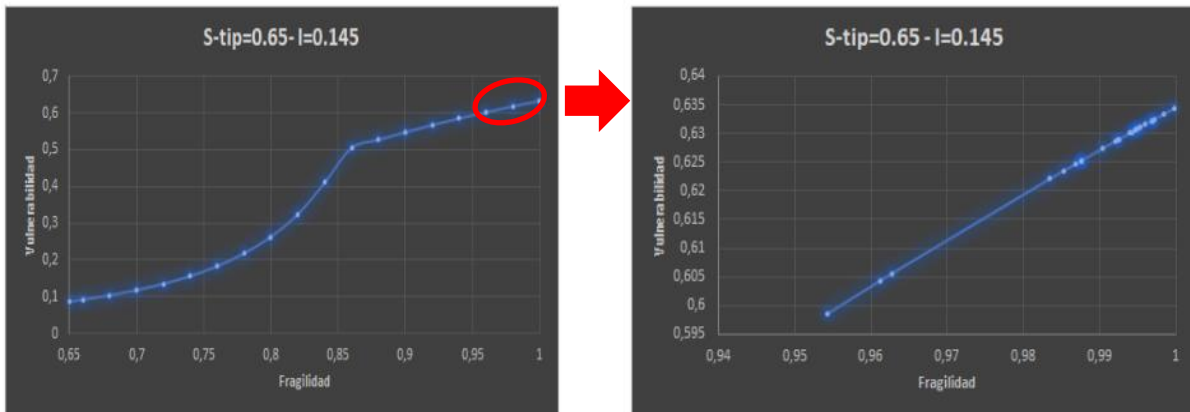


Figura 15. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Como síntesis, se puede afirmar que, para esta tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, para intensidades muy bajas, siempre la vulnerabilidad será media, mientras que partiendo de valores de fragilidad mayores a 0.86, la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se encuentran en la parte más alta de los posibles valores teóricos, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación.

10.1.1.4 Edificaciones reforzadas GI - GII (Intensidad=0.145).

En el siguiente gráfico (Figura 16) se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de edificaciones reforzadas GI – GII a una intensidad constante (0.145). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento cóncavo creciente,

en un principio de pendiente suave y luego se ve un crecimiento exponencial hasta un punto de quiebre en fragilidad=0.86, a partir de ahí, adopta un comportamiento lineal ascendente. Se obtiene que para una fragilidad de 0.2 (valor mínimo para la tipología de edificaciones reforzadas GI - GII) se alcanzan valores de vulnerabilidad mínimos de 0.02, es decir, aproximadamente un 2% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad baja (con daño leve) según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se aprecia una curva de comportamiento creciente no lineal, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.03, es decir, representa el 3% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad bajo (con daño moderado) según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una diferencia de 1% entre los valores mínimos de vulnerabilidad. Al analizar las gráficas, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte media baja de la curva del modelo teórico, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte media de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican en teoría, aunque hay que tener en cuenta, que en este caso, el volumen de datos evaluados en el modelo experimental es muy pequeño, por lo cual se requiere más información para que la interpretación sea concluyente.

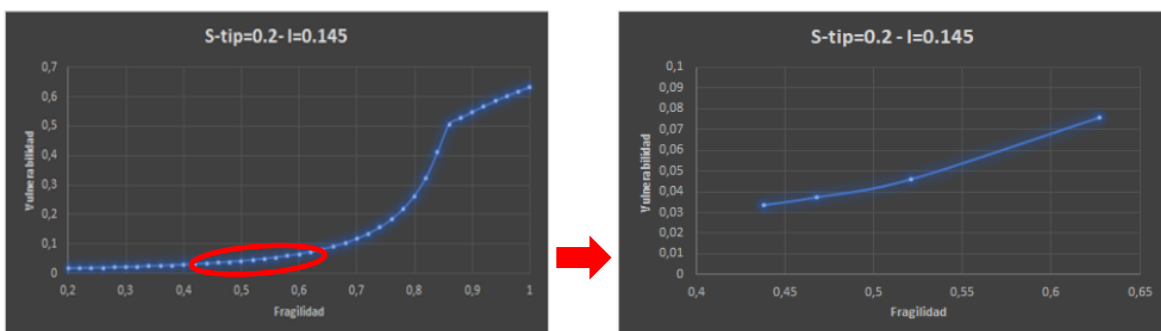


Figura 16. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.145 en edificaciones reforzadas GI-GII. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se puede decir que, en esta tipología de edificaciones reforzadas GI-GII, para muy bajas intensidades el nivel de vulnerabilidad será medio en la mayoría de los casos. Otros pueden presentar vulnerabilidad alta, pero ya dependería más que todo de los otros parámetros de fragilidad. En cuanto a las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte media baja de los posibles valores teóricos, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan algunas deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación, sin embargo, su vulnerabilidad es baja.

10.1.2 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades bajas.

A continuación, se presentarán los comparativos entre los resultados teóricos y los experimentales, para valores de intensidad constante bajos (0.335), esto para los tipos de construcciones (estructuras ligeras, con confinamiento deficiente e híbridas) que presentan estos niveles de intensidad:

10.1.2.1 Estructuras ligeras (Intensidad=0.335).

Según el gráfico que se ve en la Figura 17, se aprecian un modelo teórico y un modelo experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras ligeras a una intensidad constante (0.335). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, aparece una curva con un comportamiento lineal ascendente, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.8 (valor mínimo para la tipología de estructuras ligeras) se alcanzan un valor de vulnerabilidad mínimo de 0.66, es decir, representa un 66% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica como vulnerabilidad alta conforme a la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del

gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual presenta valores que sugieren que la vulnerabilidad mínima de una edificación de esta tipología es de 0.77, por lo tanto, representa un 77% de daño en la estructura, a partir de lo cual se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. Al realizar la comparación entre ambos modelos, se obtiene una diferencia de 11 % entre los valores de vulnerabilidad, esto producto a que los datos de fragilidad experimentales oscilan todos entre 0.99 - 1. Si se observa el valor mínimo experimental (0.99) y se compara con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos se obtiene una alta semejanza entre los valores de vulnerabilidad de ambas gráficas. Al analizar la gráfica, se encuentra además que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda de la curva del modelo teórico, a partir de lo cual se puede afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte límite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican teóricamente.

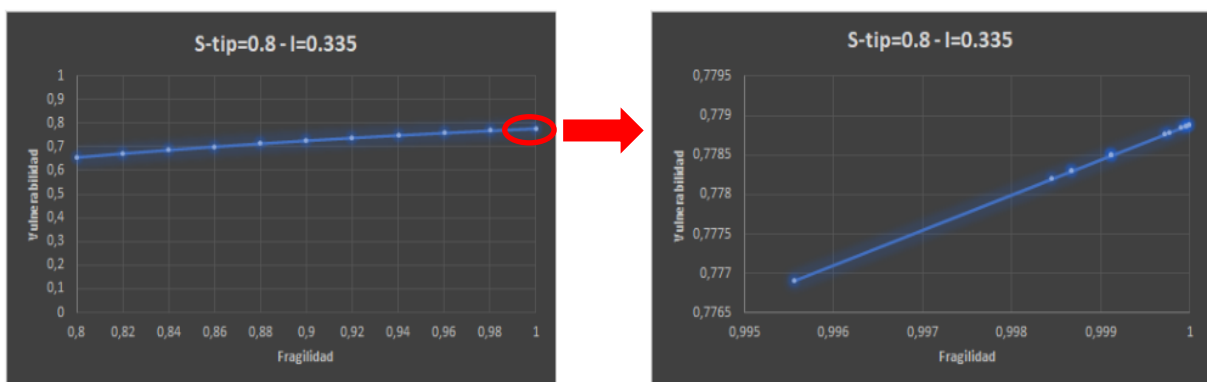


Figura 17. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.335 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se puede decir que, en esta tipología de estructuras ligeras, para bajas intensidades siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte más alta de los posibles valores teóricos, lo que significa que además de la tipología constructiva, estas construcciones

presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación.

10.1.2.2 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (Intensidad=0.335).

Partiendo de la Figura 18, se observan un modelo teórico y un modelo experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas a una intensidad constante (0.335). En el modelo teórico, que se encuentra en el lado izquierdo de la imagen, se aprecia una curva con un comportamiento lineal ascendente, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.65 (valor mínimo para la tipología de estructuras confinamiento deficiente e híbridas) se alcanza un valor de vulnerabilidad mínima de 0.46, es decir, que representa un 46% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad media conforme a la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual presenta valores que indican que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.77, es decir, representa el 77% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una diferencia de 31 % en los valores de vulnerabilidad, debido a que los datos de fragilidad experimentales se encuentran todos entre 0.99 - 1. Si se observa el valor mínimo experimental (0.99) y se compara con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos vemos una gran similitud entre los valores de vulnerabilidad de ambas gráficas. Si se analiza la gráfica detalladamente, se obtiene también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda de la curva del modelo teórico, por lo tanto podemos afirmar que los valores del modelo experimental están ubicados en la parte límite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que en teoría se pronosticaron, aunque se debe tener en cuenta que el volumen de datos evaluado en el modelo experimental es

pequeño, por lo cual no es del todo concluyente la interpretación.

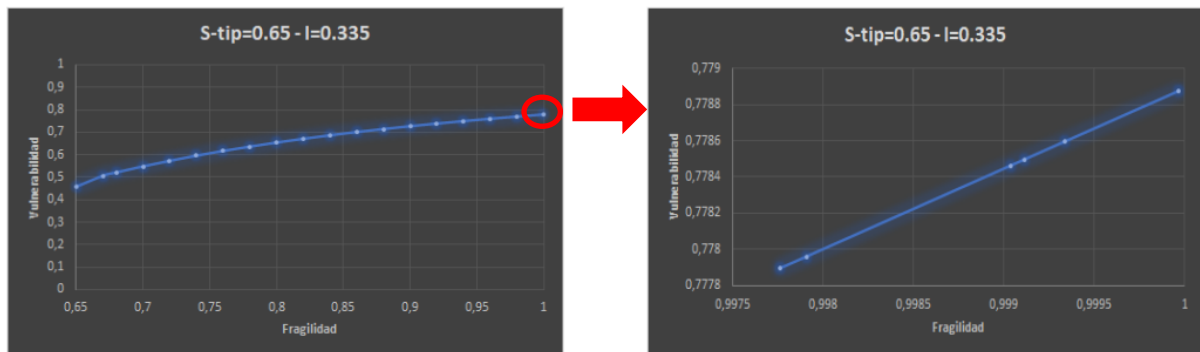


Figura 18. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.335 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Para resumir, se obtiene que, para esta tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, para bajas intensidades casi siempre la vulnerabilidad será alta, exceptuando algunos casos en que puede ser media. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se encuentran en la parte más alta de los posibles valores teóricos, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación, aunque hay que tener en cuenta que se evaluaron muy pocos datos.

10.1.3 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades medias.

A continuación, se presentarán los comparativos entre los resultados teóricos y los experimentales, para valores de intensidad medios constantes (0.525), esto para los tipos de construcciones (construcciones simples, estructuras ligeras y con confinamiento deficiente e híbridas) que presentan estos niveles de intensidad:

10.1.3.1 Construcciones simples (Intensidad=0.525).

En la siguiente grafica (Figura 19) se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de construcciones simples a una intensidad constante (0.525). En el modelo teórico, que se ubica en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal ascendente, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.9 (valor mínimo para la tipología de construcciones simples) se alcanza un valore de vulnerabilidad mínima de 0.86, es decir, presenta un 86% de daño en la estructura, por lo cual se clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se aprecia una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual presenta un valor que sugiere que la vulnerabilidad mínima de una edificación de esta tipología es de 0.88, es decir, representa un 88% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto conforme a la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se encuentra una diferencia de 2 % en los valores de vulnerabilidad, esto debido a que los datos de fragilidad experimentales oscilan todos entre 0.99 - 1. Al observar el valor mínimo experimental (0.99) y compararlo con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos se obtiene una alta semejanza entre los valores de vulnerabilidad de ambas gráficas. Si se analiza la gráfica con detalle, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda de la curva del modelo teórico, por lo tanto se puede decir que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte limite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican en teoría, aunque teniendo en cuenta que solo se evaluaron dos datos en el modelo experimental, por lo cual el volumen de datos es muy pequeño como para dar una interpretación concluyente.

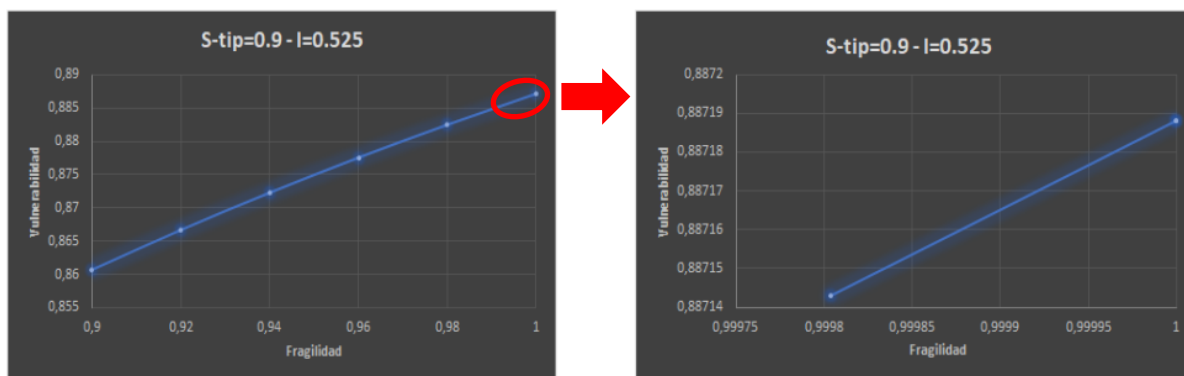


Figura 19. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.525 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se tiene que, para esta tipología de construcciones simples, para intensidades medias siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte más alta de los posibles valores teóricos, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación, aunque en este caso, con solo dos datos experimentales no se puede afirmar completamente esto.

10.1.3.2 Estructuras ligeras (Intensidad=0.525).

Se observa en la Figura 20 un modelo teórico y uno experimental, en los que se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras ligeras a una intensidad constante (0.525). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal ascendente, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.8 (valor mínimo para la tipología de estructuras ligeras) se obtienen un valor de vulnerabilidad mínimo de 0.82, es decir, aproximadamente un 82% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se tiene una curva de comportamiento lineal ascendente, que arroja valores que sugieren que la vulnerabilidad

mínima de una edificación de este tipo es de 0.88, es decir, representa el 88% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se aprecia una diferencia de 6 % en los valores de vulnerabilidad, debido a que los datos de fragilidad experimental oscilan todos entre 0.98 - 0.999. Si se observa el valor mínimo experimental (0.98) y se compara con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos se obtiene una gran semejanza entre los valores de vulnerabilidad de ambas gráficas. Si se analiza con detalle la gráfica, se encuentra además que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda de la curva del modelo teórico, por lo que se puede afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte límite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican teóricamente.

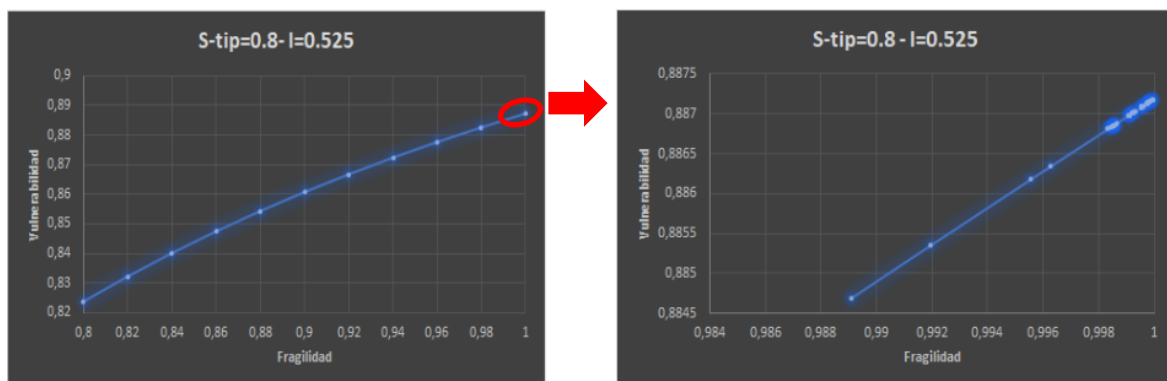


Figura 20. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.525 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En síntesis, se puede afirmar que, para esta tipología de estructuras ligeras para intensidades medias siempre la vulnerabilidad será alta. En cuanto a las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas están ubicadas en la franja más alta de los posibles valores teóricos, por lo que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan

deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación.

10.1.3.3 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (Intensidad=0.525).

En la Figura 21 se observan un modelo teórico y un modelo experimental, en los que se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas a una intensidad constante (0.525). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se tiene una curva con un comportamiento creciente no lineal, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.65 (valor mínimo para la tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima de 0.73, es decir, presenta un 73% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal ascendente, que muestra valores que indican que la vulnerabilidad mínima de una edificación de esta tipología es de 0.86, es decir, significa un 86% de daño en la estructura, por lo cual, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una diferencia de 13 % en los valores de vulnerabilidad. Si se analiza el valor mínimo experimental (0.92) y se compara con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos se obtiene una gran similitud entre los valores de vulnerabilidad de ambas gráficas. Al analizar la gráfica, se encuentra además que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda de la curva del modelo teórico, por lo que se puede afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte límite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad pronosticados teóricamente.

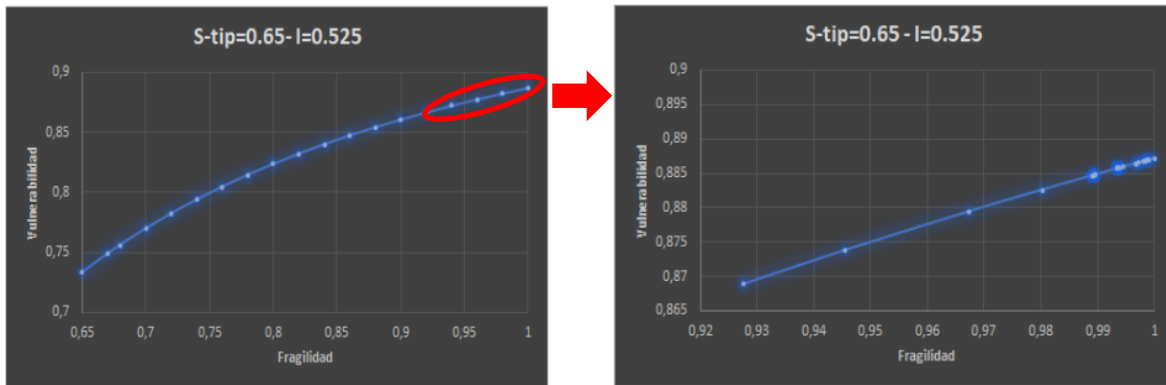


Figura 21. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.525 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Como síntesis, se tiene que, para esta tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, para intensidades medias siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte más alta de los posibles valores teóricos, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan algunas deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación.

10.1.4 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades altas.

A continuación, se presentarán los comparativos entre los resultados teóricos y los experimentales, para valores de intensidad altos constantes (0.715), esto para los tipos de construcciones (estructuras ligeras, con confinamiento deficiente e híbridas) que presentan estos niveles de intensidad:

10.1.4.1 Estructuras ligeras (Intensidad=0.715).

En el siguiente grafico (Figura 22) se tienen un modelo teórico y un modelo experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras ligeras a una intensidad constante (0.715). En el modelo teórico, que se encuentra en el lado

izquierdo de la imagen, se tiene una curva con un comportamiento lineal ascendente, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.8 (valor mínimo para la tipología de estructuras ligeras) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima de 0.93, es decir, representa un 93% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se aprecia una curva de comportamiento lineal ascendente, que presenta valores que sugieren que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.95, es decir, representa el 95% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una diferencia de 2 % en los valores de vulnerabilidad. Si se observa el valor mínimo experimental (0.99) y se compara con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos vemos una gran semejanza entre los valores de vulnerabilidad de ambas gráficas. Si se analiza la gráfica, se observa también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda de la curva del modelo teórico, por lo que se puede decir que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte límite y más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronosticaron teóricamente, aunque se debe tener en cuenta también, que en el modelo experimental se evaluaron muy pocos datos, por lo cual el análisis requiere más información para ser concluyente.

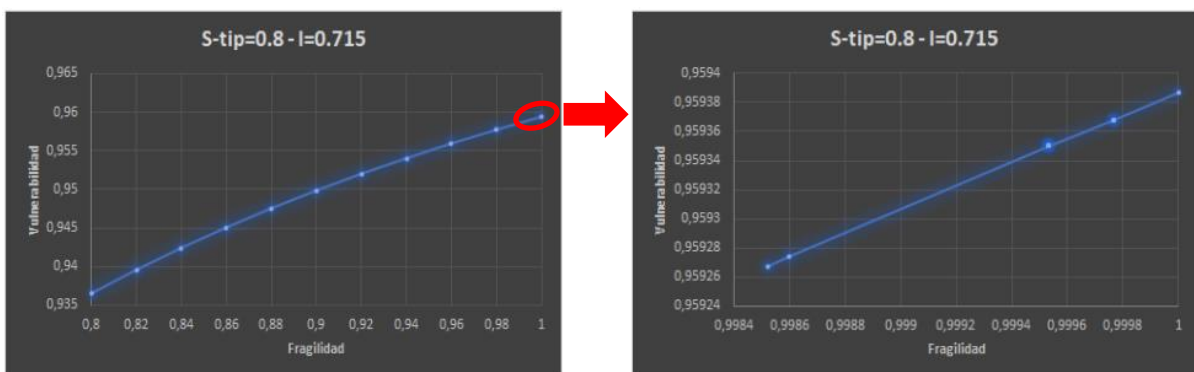


Figura 22. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.715 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se tiene que, para esta tipología de estructuras ligeras, para intensidades altas siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte más alta de los posibles valores teóricos, lo que quiere decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación, aunque hay que tener en cuenta que los valores de vulnerabilidad que presentan ambos modelos son muy cercanos entre sí y a este nivel de intensidad la tipología es más determinante en estos.

10.1.4.2 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (Intensidad=0.715).

En la Figura 23, se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas a una intensidad constante (0.715). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento creciente convexo, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.65 (valor mínimo para la tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima de 0.9, es decir, aproximadamente un 90% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual presenta valores que sugieren que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.95, es decir, representa el 95% de daño en la estructura, por lo cual, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una diferencia de 5 % en los valores de vulnerabilidad. Si se analizan los valores mínimos experimentales (0.98) y se compara con este valor aproximado en la gráfica de datos teóricos vemos una similitud entre los valores de

vulnerabilidad de ambas gráficas. Al observar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte superior izquierda, aunque no hasta el límite de la curva del modelo teórico, por lo que se puede afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican en teoría, aunque se debe tener en cuenta también, que en el modelo experimental se evaluaron muy pocos datos, por lo cual el análisis requiere más información para ser concluyente.

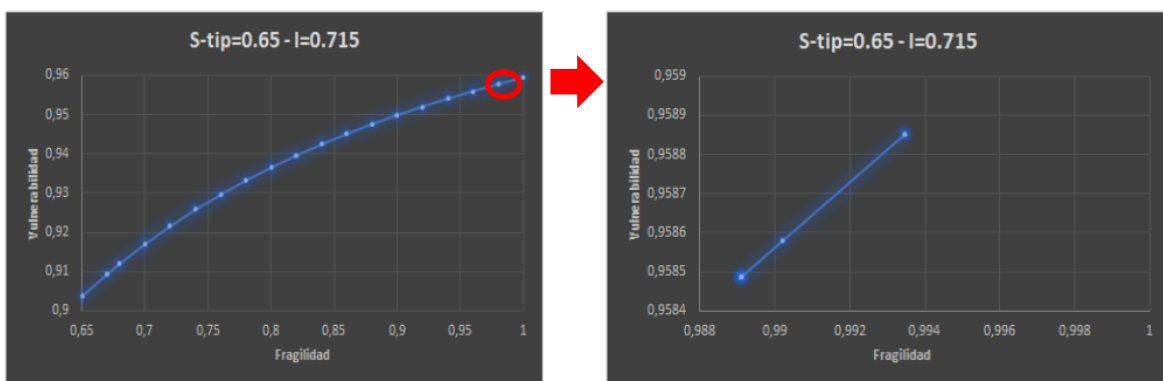


Figura 23. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.715 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En síntesis, se plantea que, para esta tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, para intensidades altas siempre la vulnerabilidad será alta. En cuanto a las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se encuentran en la parte más alta de los posibles valores teóricos, por lo que se puede decir que además de la tipología constructiva, estas construcciones presentan deficiencias en las demás variables que constituyen la fragilidad, como lo son los servicios públicos, altura, edad, conservación y vida útil de la edificación, aunque en este caso, los valores de vulnerabilidad que arrojan ambos modelos son muy cercanos entre sí y a este nivel de intensidad la tipología es más determinante en estos.

10.1.5 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidades muy altas.

A continuación, se presentarán los comparativos entre los resultados teóricos y los experimentales, para valores de intensidad muy altos constantes (0.905), esto para los tipos de construcciones (construcciones simples, estructuras ligeras, con confinamiento deficiente e híbridas y reforzadas GI-GII) que tienen estos niveles de intensidad:

10.1.5.1 Construcciones simples (Intensidad=0.905).

Se observan un modelo teórico y uno experimental en la Figura 24, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de construcciones simples a una intensidad constante (0.905). En el modelo teórico, que se ubica en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal ascendente, en la que se obtiene que para una fragilidad de 0.9 (valor mínimo para la tipología de construcciones simples) se presentan valores de vulnerabilidad mínima de 0.99, es decir, aproximadamente un 99% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual presenta valores que sugieren que la vulnerabilidad mínima de una edificación de esta tipología es de 0.99, es decir, representa el 99% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. Se encuentra también analizando la gráfica que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja en la parte más alta de la curva, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran en la parte más alta de los valores de vulnerabilidad y fragilidad pronosticados teóricamente, aunque el valor mínimo y máximo de vulnerabilidad sería el mismo el cualquier tramo de las curvas de ambos modelos (99%).

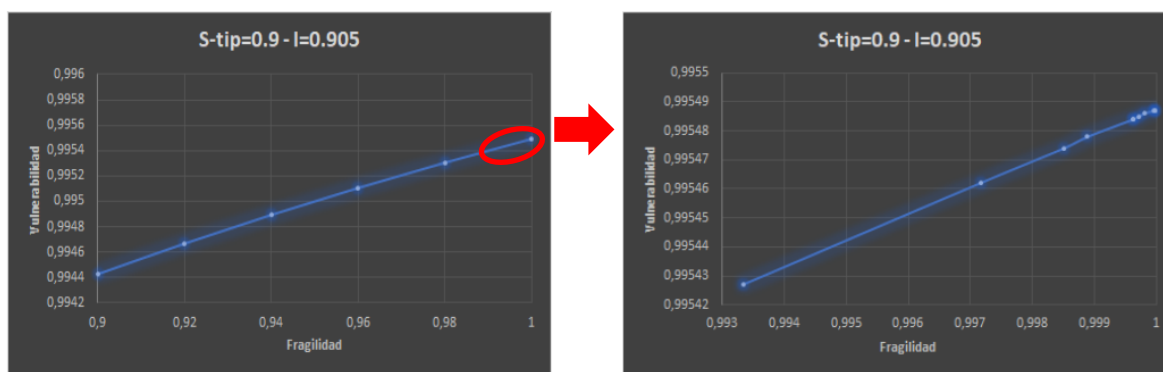


Figura 24. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se tiene que, para esta tipología de construcciones simples, para intensidades muy altas siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte más alta de los posibles valores teóricos, por lo que se podrían presentar algunas deficiencias en los otros parámetros de fragilidad además de la tipología constructiva, aunque lo importante es tener en cuenta que la tipología influye mucho en el valor de vulnerabilidad a esta intensidad, aun desconociendo el estado de los otros parámetros que componen la fragilidad.

10.1.5.2 Estructuras ligeras (Intensidad=0.905).

En el siguiente gráfico (Figura 25) se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras ligeras a una intensidad constante (0.905). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal ascendente, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.8 (valor mínimo para la tipología de estructuras ligeras) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima de 0.99, es decir, aproximadamente un 99% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual arroja valores que indican

que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.99, es decir, representa el 99% de daño en la estructura, por lo cual, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja entre la parte media y alta de la curva, por lo que se puede decir que los valores del modelo experimental se encuentran de la parte media hacia arriba de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se plantearon teóricamente, pero se puede ver que el valor mínimo es un dato aislado y la mayoría de datos están en el rango de 0.98-1. Aun así, el valor mínimo y máximo de vulnerabilidad sería el mismo el cualquier tramo de las curvas de ambos modelos (99%).

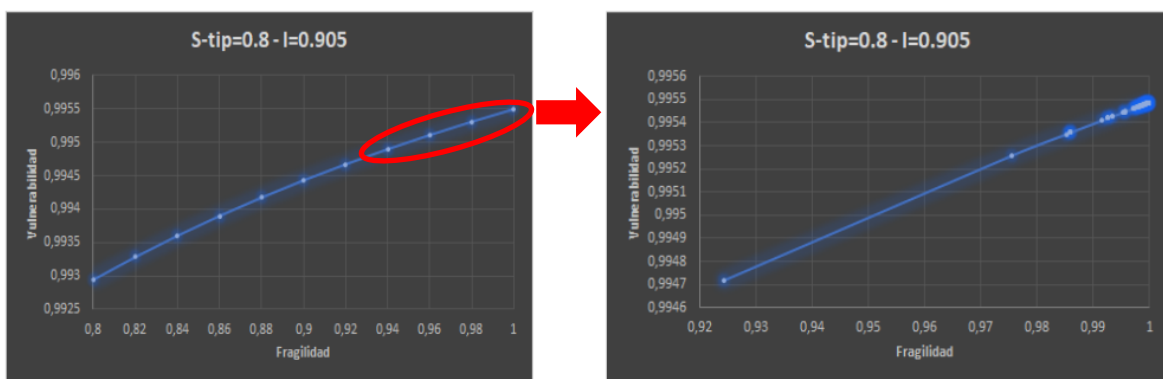


Figura 25. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Como síntesis, se puede afirmar que, para esta tipología de estructuras ligeras para intensidades muy altas siempre la vulnerabilidad será alta. En cuanto a las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican en la parte más alta de los posibles valores teóricos, por lo que, se podrían presentar algunas deficiencias en los otros parámetros de fragilidad, aunque lo más notable de la gráfica es analizar que la tipología influye mucho en el valor de vulnerabilidad a esta intensidad, aun sin saber el estado de otros parámetros que componen la fragilidad.

10.1.5.3 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (Intensidad=0.905).

En el siguiente gráfico (Figura 26) se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas a una intensidad constante (0.905). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento creciente convexo, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.65 (valor mínimo para la tipología de estructuras confinamiento deficiente e híbridas) se presentan valores de vulnerabilidad mínima de 0.98, es decir, aproximadamente un 98% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.99, es decir, representa el 99% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja desde la parte media de la curva, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran de la parte media hacia arriba de los valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican en teoría, pero se puede ver que el valor mínimo es un dato aislado y la mayoría de los datos están en el rango de 0.95-1.

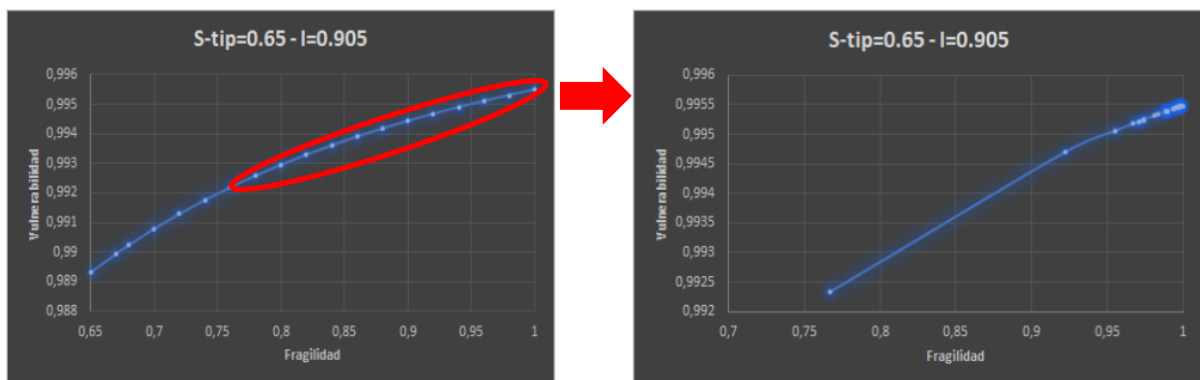


Figura 26. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se puede afirmar que, para esta tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, para intensidades muy altas siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican desde la parte media hasta el resto de la curva de los posibles valores teóricos, por lo tanto, tiene una alta coincidencia el modelo experimental respecto al modelo teórico, y muestra la alta influencia de la tipología en los valores de vulnerabilidad a altas intensidades y mostrando la baja relevancia de los otros parámetros de fragilidad en el modelo.

10.1.5.4 Edificaciones reforzadas GI - GII (Intensidad=0.905).

En la imagen que se mostrara a continuación (Figura 27), se observan un modelo teórico y uno experimental, en los que se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de edificaciones reforzadas GI - GII a una intensidad constante (0.905). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento logarítmico, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.2 (valor mínimo para la tipología de reforzadas GI – GII) se presentan valores de vulnerabilidad mínima de 0.88, es decir, aproximadamente un 88% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal ascendente, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima de una edificación de este tipo es de 0.98, es decir, representa el 98% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. Se observa una diferencia de 10% en los valores mínimo de vulnerabilidad entre ambos modelos. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja desde la parte media de la curva, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran de la parte media hacia arriba de los valores de vulnerabilidad y

fragilidad que se pronostican en teoría, pero se puede ver se evaluaron solo dos datos en el modelo experimental, lo cual no es suficiente para una interpretación concluyente y se requieren más información.



Figura 27. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 0.905 en edificaciones reforzadas GI - GII. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Como síntesis, se tiene que, para esta tipología de edificaciones reforzadas GI -GII, para intensidades muy altas siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, estas se ubican desde la parte media hasta el resto de la curva de los posibles valores teóricos, por lo tanto, tiene una alta coincidencia el modelo experimental respecto al modelo teórico, y muestra la alta influencia de la tipología en los valores de vulnerabilidad a altas intensidades y mostrando la baja relevancia de los otros parámetros de fragilidad en el modelo, aunque el poco volumen de datos del modelo no permite hacer una interpretación confiable.

10.1.6 Vulnerabilidad y fragilidad a intensidad máxima.

A continuación, se presentarán los comparativos entre los resultados teóricos y los experimentales, para valores de intensidad máxima constantes (1), esto para los diferentes tipos de construcciones (construcciones simples, estructuras ligeras, con confinamiento deficiente e híbridas, mampostería reforzada, edificaciones reforzadas GI – GII y reforzamiento especial GII - GIV). Este es el único nivel de intensidad en las hay datos en todas las tipologías:

10.1.6.1 Construcciones simples (Intensidad=1).

Se tiene un modelo teórico y uno experimental, como se puede apreciar en la Figura 28, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de construcciones simples a una intensidad constante (1). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal constante, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.9 (valor mínimo para la tipología de construcciones simples) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima y máxima de 1, es decir, aproximadamente un 100% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, que se ubica al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal constante, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima y máxima de una edificación de este tipo es de 1, es decir, representa el 100% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se tiene una coincidencia total y evidente entre los valores de vulnerabilidad, ya que alcanzan el máximo porcentaje de vulnerabilidad posible. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja prácticamente en toda la curva del modelo teórico, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran casi exactamente en los rangos de valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronosticaron teóricamente.

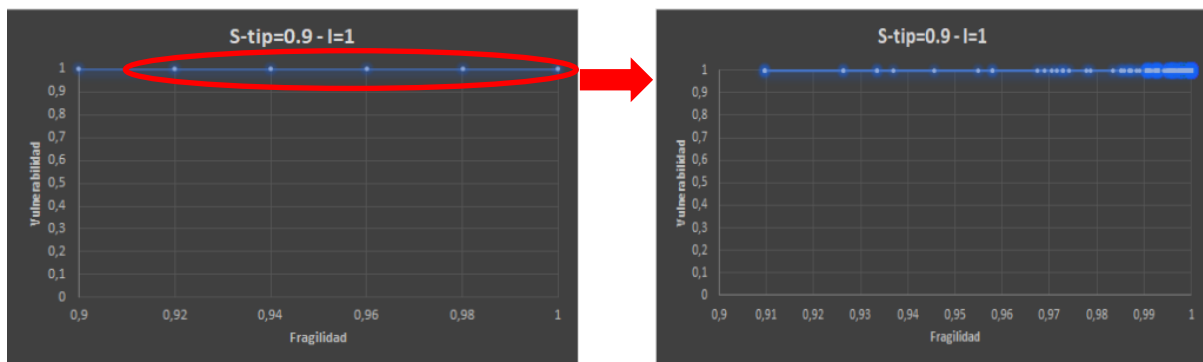


Figura 28. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en construcciones simples. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se tiene que, para esta tipología de construcciones simples, para intensidades máximas siempre la vulnerabilidad será la más alta posible. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, la mayoría se ubican en un rango de valores entre 0.98- 1. Aun así, la vulnerabilidad no varía en ningún punto de la curva por la tipología de edificación, por lo cual la relevancia es los otros parámetros de fragilidad a esta intensidad es nula.

10.1.6.2 Estructuras ligeras (Intensidad=1).

En la siguiente Figura 29 se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras ligeras a una intensidad constante (1). En el modelo teórico, que se ubica en el lado izquierdo de la imagen, se tiene una curva con un comportamiento lineal constante, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.8 (valor mínimo para la tipología de estructuras ligeras) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima y máxima de 1, es decir, aproximadamente un 100% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal constante, que cual arroja valores que sugieren que la vulnerabilidad mínima y máxima es de una edificación de este tipo es de 1, es decir, representa el 100% de daño en la estructura, por lo cual, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una coincidencia total y evidente entre los valores de vulnerabilidad, ya que alcanzan el máximo porcentaje de vulnerabilidad posible. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja prácticamente en toda la curva del modelo teórico, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran casi exactamente en los rangos de valores de vulnerabilidad y

fragilidad que se pronostican en teoría.

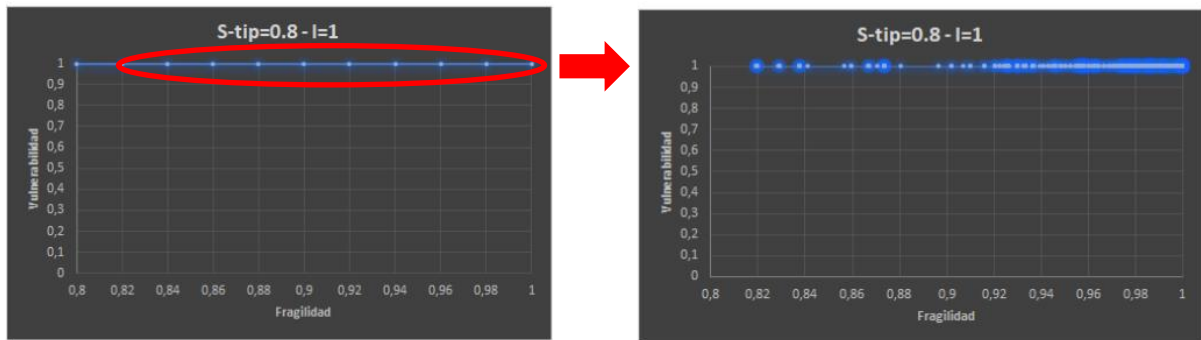


Figura 29. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en estructuras ligeras. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Como síntesis, se puede decir que, para esta tipología de estructuras ligeras, para intensidades máximas siempre la vulnerabilidad será siempre la más alta. En cuanto a las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, la mayoría se ubican en un rango de valores entre 0.92- 1. Aun así, la vulnerabilidad no varía en ningún punto de la curva por la tipología de edificación, por lo cual la relevancia es los otros parámetros de fragilidad a esta intensidad es nula.

10.1.6.3 Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (Intensidad=1).

En la siguiente imagen (Figura 30) se tienen un modelo teórico y uno experimental, en los que se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras con confinamiento deficiente e híbridas a una intensidad constante (1). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se aprecia una curva con un comportamiento lineal constante, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.65 (valor mínimo para la tipología de estructuras confinamiento deficiente e híbridas) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima y máxima de 1, es decir, aproximadamente un 100% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, que se ubica al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal constante, que presenta valores que indican que la vulnerabilidad

mínima y máxima de una edificación de este tipo es de 1, es decir, representa el 100% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una coincidencia total y evidente entre los valores de vulnerabilidad, ya que alcanzan el máximo porcentaje de vulnerabilidad posible. Si se analiza la gráfica, se encuentra además que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja prácticamente en toda la curva del modelo teórico, por lo que se puede decir que los valores del modelo experimental se encuentran casi exactamente en los rangos de valores de vulnerabilidad y fragilidad que pronosticados en teoría.

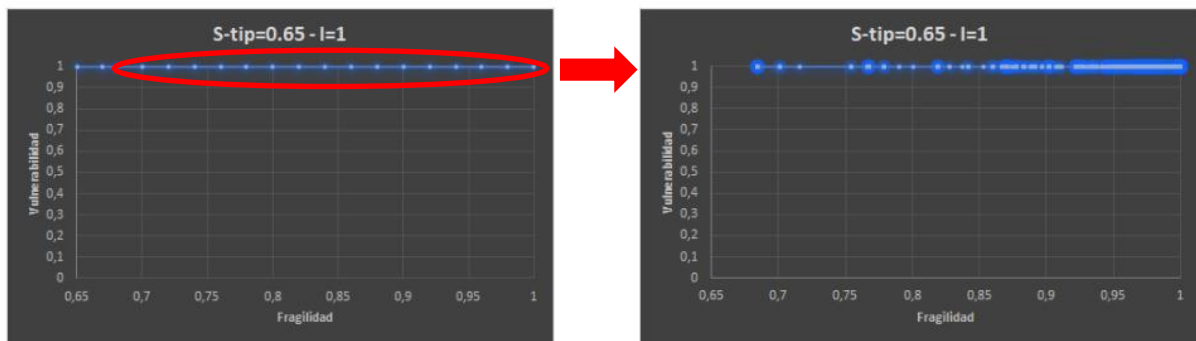


Figura 30. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas. En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En síntesis, se tiene que, para esta tipología de construcciones simples, para intensidades máximas siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, la mayoría se ubican en un rango de valores entre 0.85- 1. Aun así, la vulnerabilidad no varía en ningún punto de la curva por la tipología de edificación, por lo cual la relevancia es los otros parámetros de fragilidad a esta intensidad es nula.

10.1.6.4 Estructuras con mampostería reforzada (Intensidad=1).

En el siguiente gráfico (Figura 31) se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de estructuras con mampostería reforzada a una intensidad constante (1). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal constante, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.4 (valor mínimo para las estructuras con mampostería reforzada) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima y máxima de 1, es decir, aproximadamente un 100% de daño en la estructura, por lo tanto, clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, que se ubica al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal constante, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima y máxima de una edificación de este tipo es de 1, es decir, representa el 100% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una coincidencia total y evidente entre los valores de vulnerabilidad, ya que alcanzan el máximo porcentaje de vulnerabilidad posible. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja prácticamente en toda la curva del modelo teórico, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran casi exactamente en los rangos de valores de vulnerabilidad y fragilidad que se plantearon teóricamente.

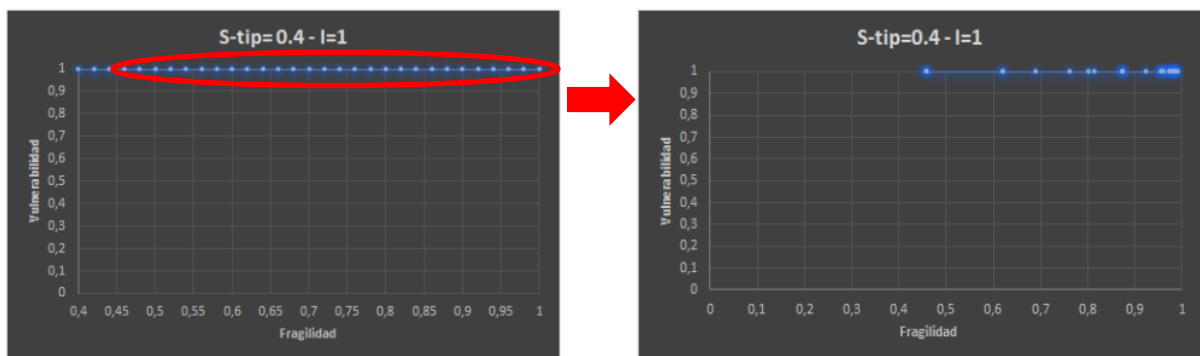


Figura 31. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en estructuras con mampostería reforzada En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Como síntesis, se tiene que, para esta tipología de construcciones simples, para intensidades máximas siempre la vulnerabilidad será la más alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, la mayoría se ubican en un rango de valores entre 0.9-1. Aun así, la vulnerabilidad no varía en ningún punto de la curva por la tipología de edificación, por lo cual la relevancia es los otros parámetros de fragilidad a esta intensidad es nula.

10.1.6.5 Edificaciones reforzadas GI - GII (Intensidad=1).

Se observan un modelo teórico y uno experimental, en la Figura 32 en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de edificaciones reforzadas GI-GII a una intensidad constante (1). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se tiene una curva con un comportamiento lineal constante, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.2 (valor mínimo para la tipología de edificaciones reforzadas GI-GII) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima y máxima de 1, es decir, aproximadamente un 100% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal constante, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad mínima y máxima de una edificación de este tipo es de 1, es decir, representa el 100% de daño en la estructura, por lo cual, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se aprecia una coincidencia total entre los valores de vulnerabilidad, ya que alcanzan el máximo porcentaje de vulnerabilidad posible. Si se analiza la figura con detalle, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja prácticamente en toda la curva del modelo teórico, con lo cual se puede decir que los valores del modelo experimental se encuentran casi exactamente en los rangos de valores de vulnerabilidad y fragilidad que se plantearon en el modelo teórico.

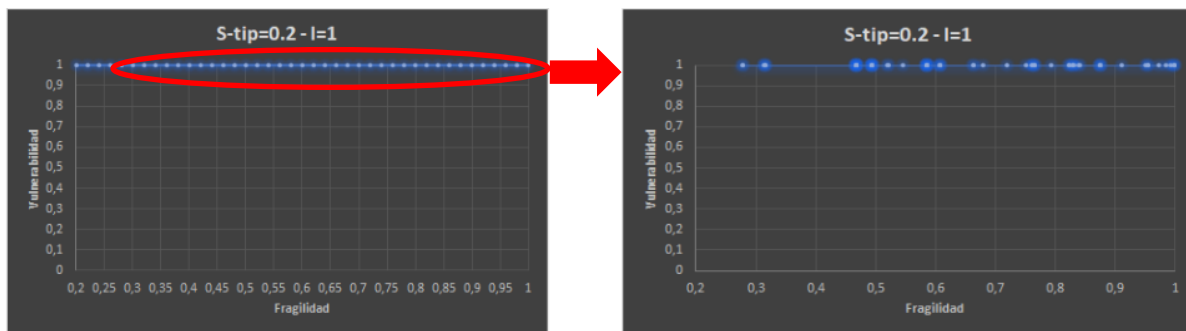


Figura 32. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en edificaciones reforzadas GI - GII En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

Se puede afirmar con base a lo anterior, que para esta tipología de edificaciones reforzadas GI -GII, para intensidades máximas siempre la vulnerabilidad será la más alta posible. En cuanto a las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, se observa en la gráfica que tienen una distribución aleatoria y sin ninguna tendencia de rango de valores. Debido a la tipología de edificación la vulnerabilidad no varía en ningún punto de la curva, por lo cual la relevancia es los otros parámetros de fragilidad a esta intensidad es nula.

10.1.6.6 Edificaciones con reforzamiento especial GII - GIV (Intensidad=1).

En el siguiente gráfico (Figura 33) se observan un modelo teórico y uno experimental, en los cuales se tiene la vulnerabilidad Vs la fragilidad, para una tipología de edificaciones con reforzamiento especial GII - GIV a una intensidad constante (1). En el modelo teórico, ubicado en el lado izquierdo de la imagen, se observa una curva con un comportamiento lineal constante, en la que se encuentra que para una fragilidad de 0.1 (valor mínimo para la tipología de edificaciones con reforzamiento especial GII – GIV) se obtienen valores de vulnerabilidad mínima y máxima de 1, es decir, aproximadamente un 100% de daño en la estructura, por lo cual clasifica como vulnerabilidad alta según la metodología del SGC. En el modelo experimental, ubicado al lado derecho del gráfico, se observa una curva de comportamiento lineal constante, la cual arroja valores que indican que la vulnerabilidad

mínima y máxima de una edificación de este tipo es de 1, es decir, representa el 100% de daño en la estructura, por lo tanto, se clasifica en un nivel de vulnerabilidad alto según la metodología del SGC. En la comparación entre ambos modelos, se observa una coincidencia total y evidente entre los valores de vulnerabilidad, ya que alcanzan el máximo porcentaje de vulnerabilidad posible. Al analizar la gráfica, se encuentra también que el rango de valores de la curva del modelo experimental encaja prácticamente en toda la curva del modelo teórico, con lo cual podemos afirmar que los valores del modelo experimental se encuentran casi exactamente en los rangos de valores de vulnerabilidad y fragilidad que se pronostican en teoría.

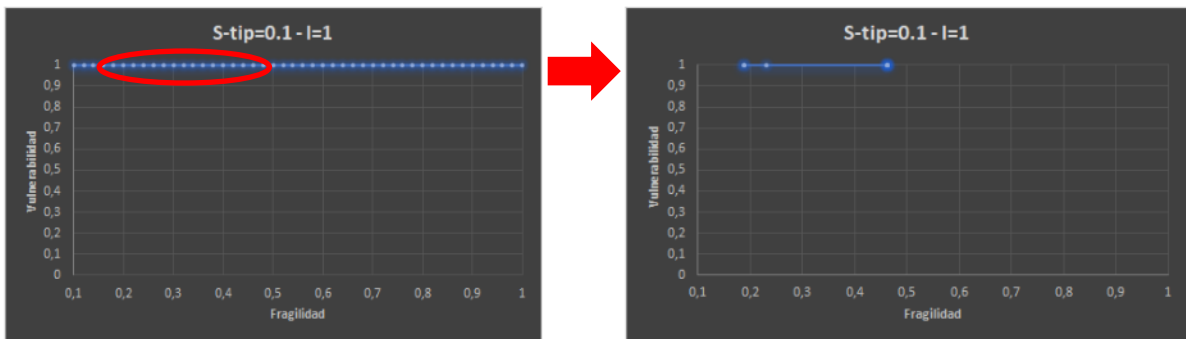


Figura 33. Vulnerabilidad vs Fragilidad para intensidades de 1 en edificaciones con reforzamiento especial GII - GIV En la derecha se observa el modelo teórico, a la izquierda, el modelo experimental.

En resumen, se puede decir que, para esta tipología de construcciones con reforzamiento especial GI-GII, para intensidades máximas siempre la vulnerabilidad será alta. En el caso de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, se observa en la gráfica que se evaluó un bajo volumen de datos, aunque aun así todos los datos arrojan valores de vulnerabilidad 1. Debido a la tipología de edificación la vulnerabilidad no varía en ningún punto de la curva, por lo cual la relevancia es los otros parámetros de fragilidad a esta intensidad es nula.

10.2 Vulnerabilidad y fragilidad en modelo teórico para todas las tipologías combinadas en cada nivel de intensidad

En la siguiente sección se presentan modelos teóricos con curvas de vulnerabilidad Vs fragilidad, en donde se grafican todas las tipologías a una determinada intensidad, con el fin de poder observar los cambios por cada tipología de manera conjunta, para comparar como en teoría varía la vulnerabilidad dependiendo de cada una, además permite observar lo que se denominarían puntos de quiebres entre tipologías que disparan los valores de vulnerabilidad. A continuación, se muestran cada curva desde la intensidad más baja hasta la más alta:

10.2.1 Total de tipologías combinadas en intensidades muy bajas.

Se observa en la Figura 34 un modelo teórico realizado a partir de una combinación de todas las tipologías según sus límites de fragilidad y los valores de vulnerabilidad que arrojan a una intensidad muy baja (0.145). En la gráfica se ve un comportamiento cóncavo creciente en la curva y que presenta un punto de quiebre en un valor de fragilidad=0.86. Además, se aprecia una tendencia directamente proporcional entre los datos de fragilidad y vulnerabilidad, siendo el valor mínimo de vulnerabilidad aproximado de 1% en la fragilidad mínima registrada y de 63% de vulnerabilidad en la fragilidad máxima registrada. Se puede afirmar que a esta intensidad las construcciones simples y algunas estructuras ligeras presentaran siempre un nivel alto de vulnerabilidad según la metodología del SGC. Algunas estructuras ligeras y construcciones con confinamiento deficiente e híbridas mostraran un nivel de vulnerabilidad medio y estructuras con mampostería reforzada, edificaciones reforzadas GI – GII y con reforzamiento especial GII – GIV, presentaran niveles de vulnerabilidad bajos. Hay que tener en cuenta que en este modelamiento teórico solo se evaluó la fragilidad según la tipología, es decir, no se consideraron los otros parámetros de fragilidad.

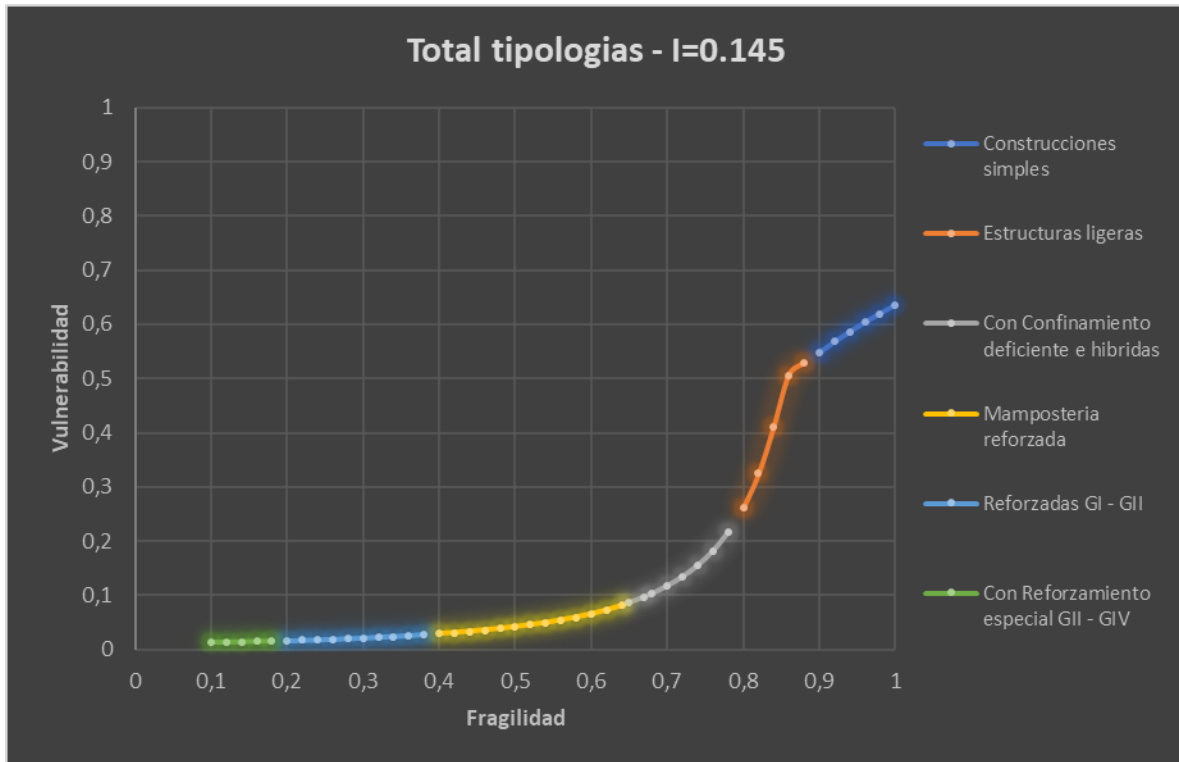


Figura 34. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.145.

10.2.2 Total de tipologías combinadas en intensidades bajas.

Se puede observar en la Figura 35 un modelo teórico realizado a partir de una combinación de todas las tipologías según sus límites de fragilidad y los valores de vulnerabilidad que arrojan a una intensidad baja (0.335). En la gráfica se ve un comportamiento creciente con un cambio de concavidad entre valores de fragilidad (0.6-0.7). Además, se ve claramente una tendencia directamente proporcional entre los datos de fragilidad y vulnerabilidad, siendo el valor mínimo de vulnerabilidad aproximado de 7% en la fragilidad mínima registrada y de 78% de vulnerabilidad en la fragilidad máxima registrada. Se puede afirmar que a esta intensidad las construcciones simples, estructuras ligeras y la mayoría de las estructuras con confinamiento deficiente e híbridas presentaran siempre un nivel alto de vulnerabilidad según la metodología del SGC. Aquellas de mampostería reforzada y reforzadas GI – GII mostraran un nivel de vulnerabilidad medio. Edificaciones con reforzamiento especial GII – GIV,

presentaran niveles de vulnerabilidad bajos. Hay que tener en cuenta que en este modelamiento teórico solo se evaluó la fragilidad según la tipología, es decir, no se consideraron los otros parámetros de fragilidad.

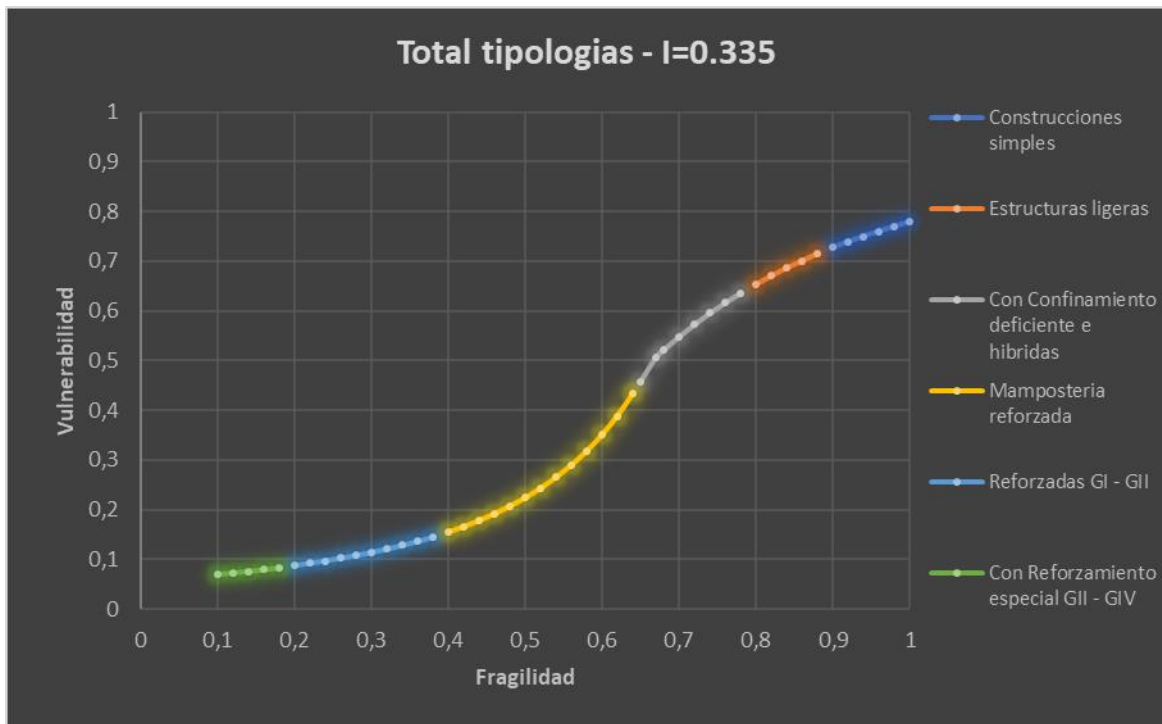


Figura 35. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.335.

10.2.3 Total de tipologías combinadas en intensidades medias.

En la Figura 36 se aprecia un modelo teórico realizado a partir de una combinación de todas las tipologías según sus límites de fragilidad y los valores de vulnerabilidad que arrojan a una intensidad media (0.525). En la gráfica se ve un comportamiento creciente con un cambio de concavidad entre valores de fragilidad (0.5-0.6). Además, se ve claramente una tendencia directamente proporcional entre los datos de fragilidad y vulnerabilidad, siendo el valor mínimo de vulnerabilidad aproximado de 17% en la fragilidad mínima registrada y de 78% de vulnerabilidad en la fragilidad máxima registrada. Se puede afirmar que a esta intensidad las construcciones simples, estructuras ligeras, estructuras con confinamiento deficiente e

híbridas y algunas con mampostería reforzada presentaran siempre un nivel alto de vulnerabilidad según la metodología del SGC. Edificaciones reforzadas GI – GII y con reforzamiento especial GII – GIV, presentaran niveles de vulnerabilidad medios. Hay que tener en cuenta que en este modelamiento teórico solo se evaluó la fragilidad según la tipología, es decir, no se consideraron los otros parámetros de fragilidad.

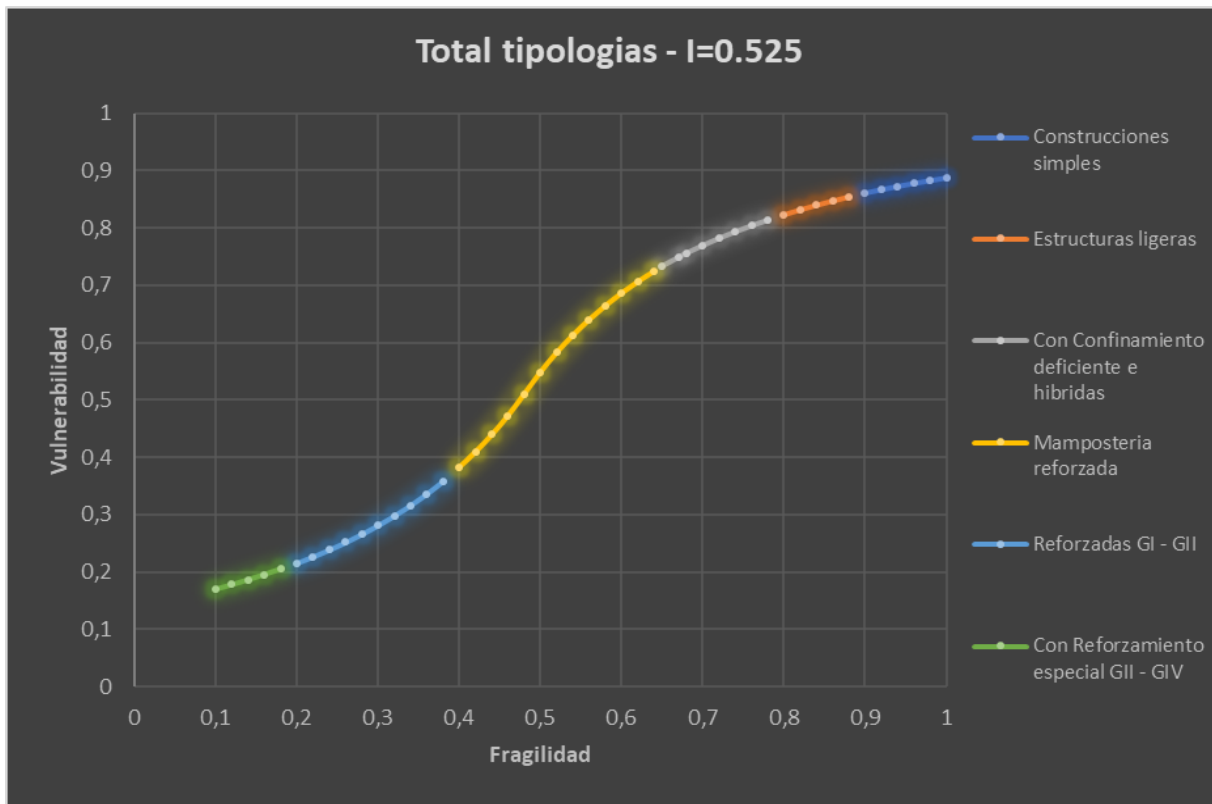


Figura 36. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.525.

10.2.4 Total de tipologías combinadas en intensidades altas.

En la Figura 37 se observa un modelo teórico realizado a partir de una combinación de todas las tipologías según sus límites de fragilidad y los valores de vulnerabilidad que arrojan a una intensidad alta (0.715). En la gráfica se ve un comportamiento con un intervalo lineal creciente hasta un punto de quiebre en fragilidad=0.28, después se observa que la curva

adopta un comportamiento logarítmico. Se ve una tendencia directamente proporcional entre los datos de fragilidad y vulnerabilidad, siendo el valor mínimo de vulnerabilidad aproximado de 31% en la fragilidad mínima registrada y de 96% de vulnerabilidad en la fragilidad máxima registrada. Se puede afirmar que a esta intensidad las construcciones simples, estructuras ligeras, estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, mampostería reforzada y algunas edificaciones reforzadas GI – GII, presentaran siempre un nivel alto de vulnerabilidad según la metodología del SGC. Edificaciones con reforzamiento especial GII – GIV, presentaran niveles de vulnerabilidad medios. Hay que tener en cuenta que en este modelamiento teórico solo se evaluó la fragilidad según la tipología, es decir, no se consideraron los otros parámetros de fragilidad.

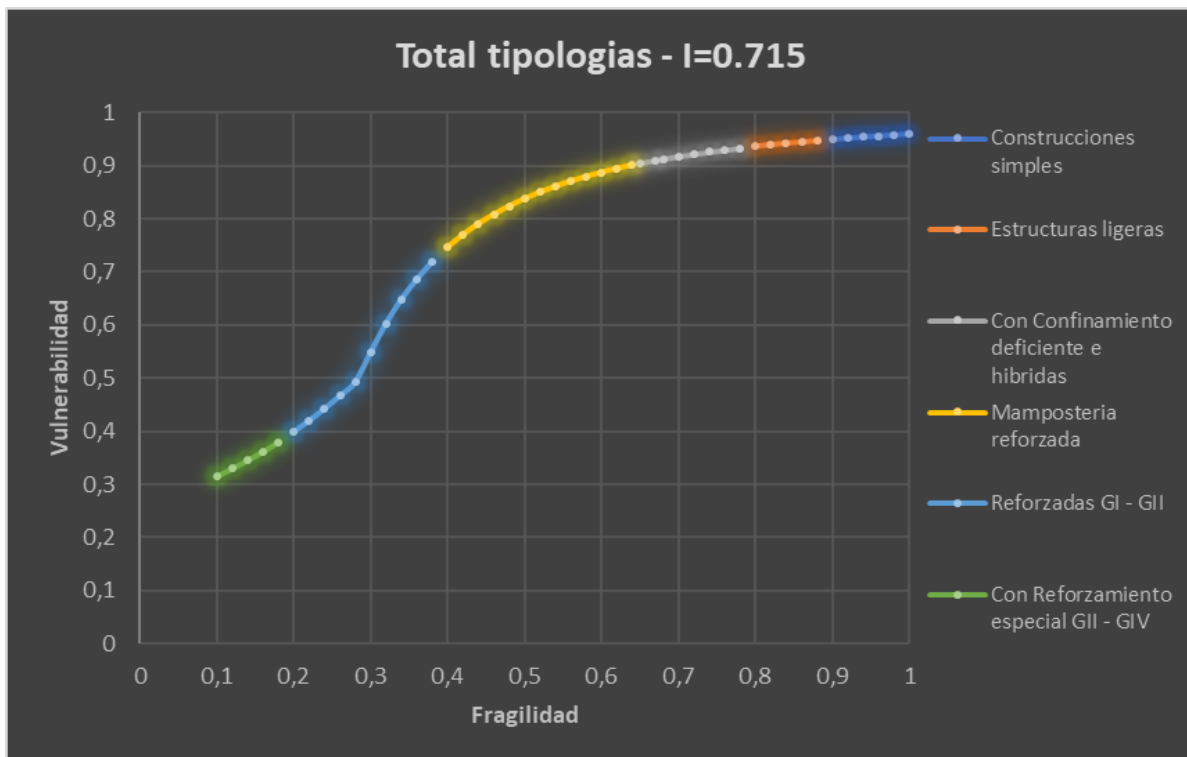


Figura 37. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.715.

10.2.5 Total de tipologías combinadas en intensidades muy altas.

Se puede observar en la Figura 38 un modelo teórico realizado a partir de una combinación de todas las tipologías según sus límites de fragilidad y los valores de vulnerabilidad que arrojan a una intensidad muy alta (0.905). En la gráfica se ve un comportamiento logarítmico de la curva. Se ve una tendencia directamente proporcional entre los datos de fragilidad y vulnerabilidad, siendo el valor mínimo de vulnerabilidad aproximado de 53% en la fragilidad mínima registrada y de 99% de vulnerabilidad en la fragilidad máxima registrada. Se puede afirmar que a esta intensidad todos los tipos de construcciones presentarían siempre un nivel alto de vulnerabilidad según la metodología del SGC. Hay que tener en cuenta que en este modelamiento teórico solo se evaluó la fragilidad según la tipología, es decir, no se consideraron los otros parámetros de fragilidad.

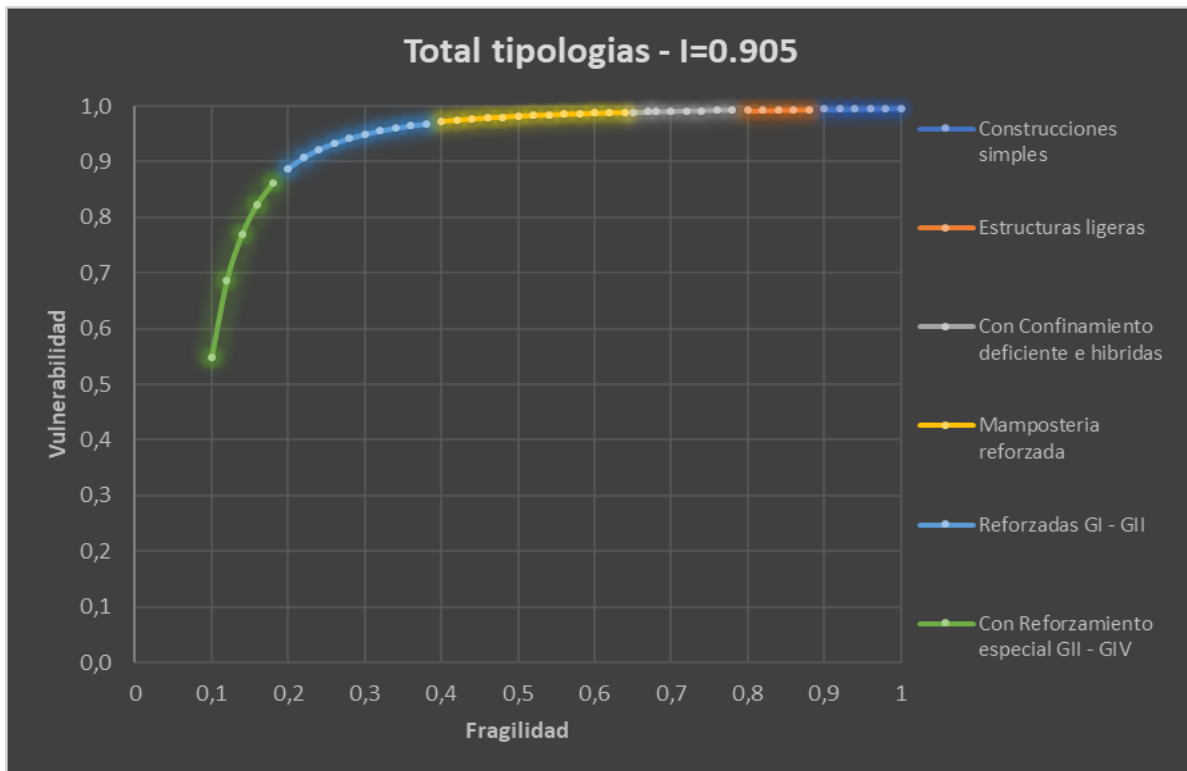


Figura 38. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 0.905.

10.2.6 Total de tipologías combinadas en la máxima intensidad.

Se puede observar en la Figura 39 un modelo teórico realizado a partir de una combinación de todas las tipologías según sus límites de fragilidad y los valores de vulnerabilidad que arrojan a una intensidad máxima (1). En la gráfica se ve un comportamiento lineal constante de la curva. Se ve una tendencia directamente proporcional entre los datos de fragilidad y vulnerabilidad, siendo el valor mínimo y máximo de vulnerabilidad 1 en todas las fragilidades utilizadas. Se puede afirmar que a esta intensidad todos los tipos de construcciones presentaran siempre el nivel máximo de vulnerabilidad posible según la metodología del SGC. Hay que tener en cuenta que en este modelamiento teórico solo se evaluó la fragilidad según la tipología, es decir, no se consideraron los otros parámetros de fragilidad, aunque en este caso, a esta intensidad, termina por ser irrelevante y cualquier tipología tendrá este valor de vulnerabilidad.

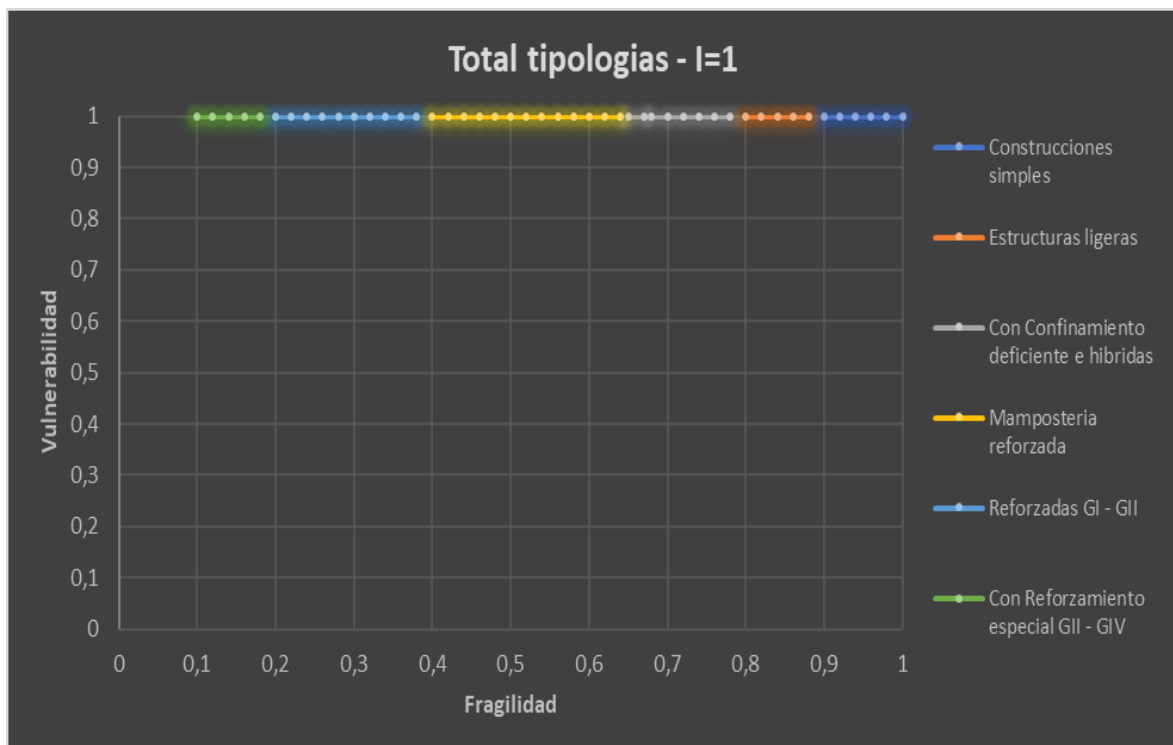


Figura 39. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías combinadas a una intensidad de 1.

10.3 Vulnerabilidad y fragilidad en modelo teórico para todas las tipologías e intensidades combinadas

Se presenta ahora un compilado con todas las tipologías e intensidades estudiadas a partir de valores teóricos, para poder analizar el comportamiento de los valores de vulnerabilidad según los cambios de intensidad en cada tipología, para establecer conclusiones definitivas y ubicar los puntos de quiebre en la vulnerabilidad a partir de la intensidad y la fragilidad. A continuación, se presenta la curva teórica total (Figura 40):

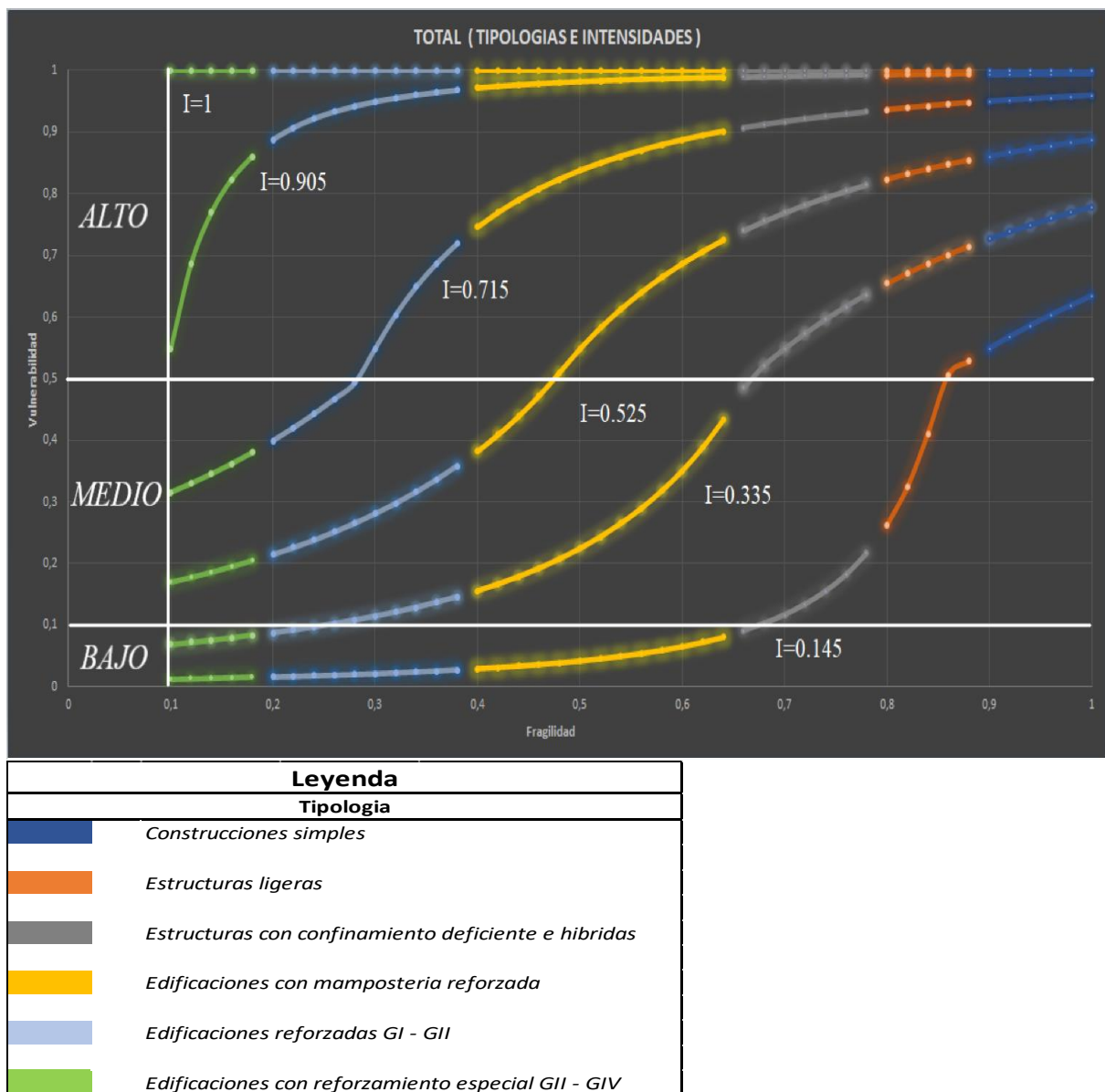


Figura 40. Vulnerabilidad vs Fragilidad para tipologías e intensidades combinadas y su distribución en los niveles de vulnerabilidad establecidos por la metodología del Servicio Geológico Colombiano.

Se aprecian en la gráfica todas las intensidades y tipologías evaluadas de manera combinada y su distribución en los diferentes niveles de vulnerabilidad. Se puede afirmar según lo observado que las construcciones simples a cualquier intensidad siempre obtendrán una valoración de vulnerabilidad alta. Las estructuras ligeras presentaran siempre niveles de vulnerabilidad altos, excepto a una intensidad muy baja, donde en algunos casos puede llegar a ser valorado como nivel medio. Las estructuras con confinamiento deficiente e híbridas clasificaran en nivel alto de vulnerabilidad, excepto en algunos casos con valores de intensidad baja. En intensidades muy bajas en donde se clasifican como nivel medio de vulnerabilidad. Estructuras con mampostería reforzada presentaran niveles altos de vulnerabilidad en intensidades máximas, muy altas y altas, y en la mayoría de los casos en intensidades medias. Puede clasificar en niveles de vulnerabilidad medios en intensidades medias en algunos casos, así como en intensidades bajas. En intensidades muy bajas, serán clasificadas en un nivel de vulnerabilidad bajo. Edificaciones reforzadas GI-GII clasificaran en niveles de vulnerabilidad altos en intensidad máximas y muy altas, y en algunos casos en intensidades altas. En otros casos, puede presentar niveles de vulnerabilidad medios en intensidad altas y bajas. En intensidades medias, la vulnerabilidad será de nivel medio y si se dan valores de intensidad muy bajos, el nivel de vulnerabilidad será bajo. Finalmente, en construcciones con reforzamiento especial GII -GIV, en intensidades máximas y muy altas, el nivel de vulnerabilidad será alto. En intensidades altas y medias, se clasificará como nivel medio de vulnerabilidad y en intensidades bajas y muy bajas, la vulnerabilidad será de nivel bajo.

11. Discusión

En este proyecto se trabajó detalladamente con datos cuantitativos y cualitativos para examinar y resolver la pregunta de investigación planteada, que básicamente cuestionaba si la metodología del Servicio Geológico Colombiano era confiable para la evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad en construcciones frente a fenómenos naturales como los movimientos en masa. El análisis de los modelos creados a partir de valores numéricos de vulnerabilidad, fragilidad de construcciones e intensidad de un movimiento en masa mediante la metodología planteada por el SGC y la posterior interpretación mediante datos cualitativos, permitió encontrar algunos vacíos o problemas que impiden una eficiente y correcta valoración de estas variables al momento de realizar una evaluación por parte por las instituciones o grupos que aplican esta metodología.

En el desarrollo del trabajo, la variable de estudio principal es la vulnerabilidad, la cual está compuesta en su cálculo por la intensidad y la fragilidad. Las metodologías anteriores calculaban la vulnerabilidad solo con base a la fragilidad, los ejercicios de evaluación del riesgo tenían en cuenta que la vulnerabilidad solo dependía exclusivamente de la fragilidad y por lo tanto se hacían inventarios de construcciones básicamente como procedimiento para determinar la vulnerabilidad. Las nuevas metodologías señalan que la vulnerabilidad depende, no solo de la fragilidad, sino que también implica la intensidad del fenómeno.

En los resultados del modelo teórico se puede analizar que la intensidad tiene un peso importante en el cálculo de la vulnerabilidad. Siguiendo la clasificación realizada para los niveles de intensidad, se encuentra que, tanto en los niveles de intensidad máximos como en los niveles muy altos, la importancia de la fragilidad queda prácticamente anulada en todas las construcciones, ya que, independientemente del valor de la fragilidad, estos determinan un

nivel alto de vulnerabilidad, por lo tanto, en este caso, la intensidad gobierna completamente la vulnerabilidad. En el rango de nivel de intensidad alto – medio, se encontró también este comportamiento de que la vulnerabilidad se dispara en todas las construcciones, a excepción de las edificaciones reforzadas GI – GII y con reforzamiento especial GII – GIV, con unas cuantas fluctuaciones en algunos casos. Se puede afirmar que en estas edificaciones la tipología adquiere un peso importante en el nivel de vulnerabilidad, pero dependerá también del estado de los otros factores involucrados en el cálculo de la fragilidad, para que incluso las edificaciones anteriormente nombradas puedan clasificar en un nivel alto de vulnerabilidad. Con base a todo lo anterior, se puede decir que existe una sobrevaloración de la intensidad al aplicar la metodología en algunas tipologías de construcciones, ya que intensidades altas, están definiendo por completo un nivel de vulnerabilidad alto.

En el caso de los niveles de intensidad bajos y muy bajos, se puede afirmar, que es la fragilidad la variable que más peso tiene en el cálculo de la vulnerabilidad, ya que independiente de que sea en un bajo nivel de intensidad, algunas construcciones clasifican en un nivel de vulnerabilidad alto, como es el caso de las construcciones simples, mientras que a ese mismo nivel de intensidad, una edificación con reforzamiento especial GII – GIV, clasificara en un bajo nivel de vulnerabilidad, por lo cual, se puede decir que a medida que disminuyen los valores de intensidad, la fragilidad adquiere una importancia mayor en los niveles de vulnerabilidad y que además, estas construcciones no son aptas para cualquier movimiento en masa.

En construcciones de tipologías de fragilidad media a muy altas, en niveles de intensidades medias y bajas, e incluso aun en intensidades muy bajas en el caso de las construcciones simples, las vulnerabilidades son altas, por lo tanto, no se deberían evaluar desde un principio ya que eso conlleva perdidas de dinero, tiempo y otros recursos.

En síntesis, se puede afirmar que las tipologías que se encuentran en el límite entre vulnerabilidad alta y media van a tender hacia valores altos en la medida que los otros parámetros de fragilidad van a aportarle. En el análisis del modelo teórico, basándose solamente en la tipología, sin tener en cuenta los otros parámetros mencionados, una construcción estaría en el límite indicado o incluso se encontraría totalmente en un nivel de vulnerabilidad media, pero ya en la evaluación de los datos experimentales, al realizar el cálculo con los otros parámetros de fragilidad, las construcciones se dispararán a un nivel de vulnerabilidad alto. Por otro lado, los resultados arrojados por la comparación entre los modelos teóricos y experimentales también sugieren que se presenta una sobrevaloración en algunos parámetros de fragilidad, y por lo tanto en los niveles de vulnerabilidad de las construcciones.

En los modelos teóricos, se ve además que, en intensidades medias y bajas, algo más del 50% de las construcciones son clasificadas en un nivel alto de vulnerabilidad, con excepción de construcciones con fragilidades muy bajas y extremadamente bajas (Ver Tabla 8 en Anexo 3). Un menor número de construcciones, se clasificarán en un nivel de vulnerabilidad medio y solo unas cuantas se valorarán en un nivel bajo de vulnerabilidad, según su tipología, como ya se mencionó de manera más específica en la interpretación de los resultados. Es interesante esta afirmación ya que solo las construcciones clasificadas en un nivel bajo de vulnerabilidad presentan daños leves o moderados ante un evento, mientras que el resto,

según las valoraciones cualitativas de la metodología del SGC, tendrán daños graves e incluso el colapso total en su estructura, algunas hasta en intensidades bajas y muy bajas. A partir lo mencionado anteriormente, se puede afirmar que, según el modelo teórico, no todas las construcciones que sean evaluadas mediante la metodología del SGC, ante la ocurrencia de movimientos en masa con intensidades medias a bajas, se clasificaran siempre en vulnerabilidad alta y que esto dependerá de su tipología.

Por otra parte, el modelo experimental indica que la gran mayoría de construcciones evaluadas en las zonas de estudio en el municipio de Medellín, se van a los extremos y arrojan valores de vulnerabilidad y fragilidad muy altos, en algunos casos, se alejan demasiado de los valores que en teoría deberían presentar, según su tipología. A partir de esta idea, se infirió que esto se debe a que muchas de esas construcciones tienen deficiencias y casi condiciones precarias en los otros parámetros que componen su fragilidad. En la Tabla 4, se observa que las estructuras ligeras fueron la tipología más dominante en las construcciones evaluadas en Medellín, con el 69,96% del total del volumen de datos, y que junto a las estructuras con confinamiento deficiente e híbridas y las construcciones simples, conformaron el 99% de las construcciones evaluadas, es decir, que, de las construcciones evaluadas en las zonas de estudio, el 99% no son aptas, casi para cualquier movimiento en masa. Pero el dato más llamativo, es que, en las zonas de estudio, el 99,1% de las construcciones se encuentran en un nivel de vulnerabilidad alto y que solamente el 0,9 %, que fueron específicamente 4 edificaciones reforzadas GI – GII en un nivel de intensidad muy bajo, conforman las construcciones clasificadas en un nivel bajo de vulnerabilidad, mientras que ninguna se clasificó en un nivel medio.

CONSTRUCCIONES EVALUADAS			NIVEL DE VULNERABILIDAD					
Tipología	# Construcciones por tipología	%	Alto	%	Medio	%	Bajo	%
Construcciones simples	1173	9,72%	1173	100%	0	0%	0	0%
Estructuras ligeras	8446	69,96%	8446	100%	0	0%	0	0%
Estructuras con confinamiento deficiente e híbridas	2342	19,40%	2342	100%	0	0%	0	0%
Estructuras con mampostería reforzada	31	0,26%	31	100%	0	0%	0	0%
Edificaciones reforzadas GI - GII	73	0,60%	69	94,5%	0	0%	4	5,5%
Edificaciones con reforzamiento especial GII - GIV	7	0,06%	7	100%	0	0%	0	0%
Total construcciones evaluadas	12072	100,00%	12068	99,1%	0	0%	4	0,9%

Tabla 4. Tabla de número y porcentaje de construcciones evaluadas por tipología y nivel de vulnerabilidad.

Estos resultados se presentan bajo el modelo propuesto en este trabajo, en el que se buscaba evaluar los datos de otra manera ya que en el modelo convencional los resultados son aún más conservadores y homogéneos en la categorización de los niveles de vulnerabilidad. En los valores experimentales de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín, tomando en cuenta todas las tipologías, a excepción de las edificaciones con reforzamiento especial GII – GIV, hay algunas que alcanzan valores muy altos de fragilidad (0.98-1), por lo cual el porcentaje de peso del factor de fragilidad por tipología varía en cada una (Figura 41). El porcentaje de incidencia mínimo en construcciones simples es de un 90,9%, en estructuras ligeras de un 80,8%, en estructuras con confinamiento deficiente e híbridas es de un 65,6%, en estructuras con mampostería reforzada de un 40,8% y en edificaciones reforzadas GI - GII de un 20,2%. En el caso de las edificaciones con reforzamiento especial GII – GIV, el porcentaje de incidencia del factor de fragilidad de tipología es de 21,7%, debido a que el máximo valor de fragilidad evaluado es de 0.4611, y la fragilidad mínima de esta tipología es 0.1. En resumen, se puede decir que hay construcciones donde la tipología tiene un peso importante en el cálculo de la fragilidad de estas, por lo tanto, provoca que estas inmediatamente se valoren en vulnerabilidad alta.

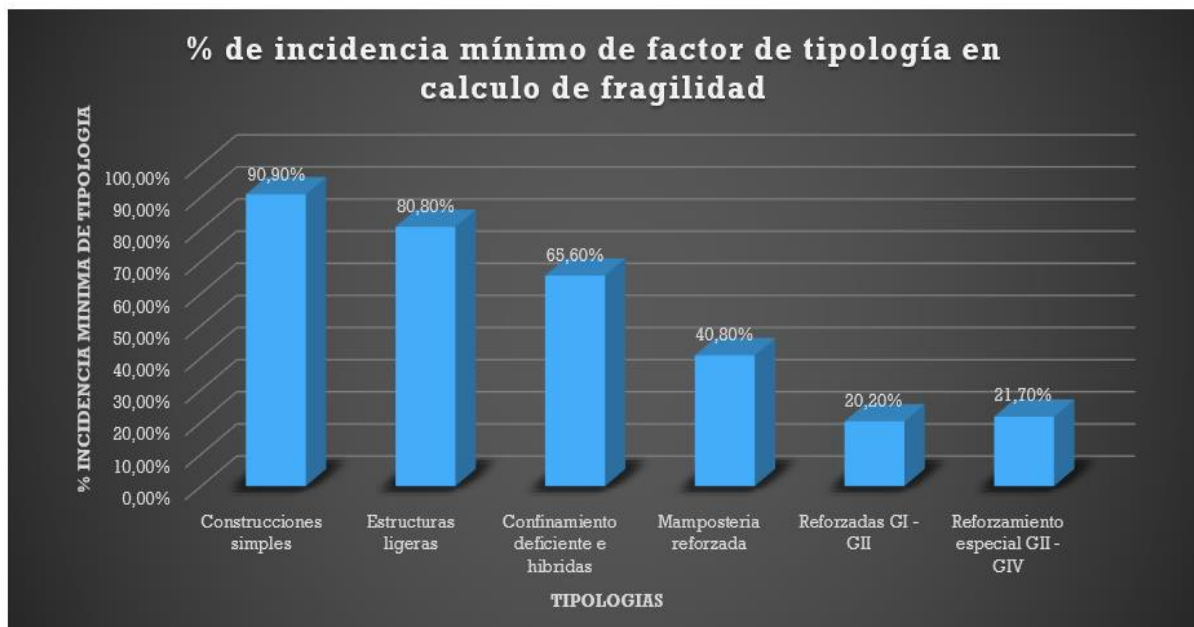


Figura 41. Grafico de barras de porcentajes de incidencia mínimo de factor de tipología en el cálculo de la fragilidad en cada una.

Según la interpretación de los resultados, es factible decir que efectivamente en la metodología usada por el SGC se presenta cierto sesgo al momento de categorizar el riesgo en las construcciones, esto debido principalmente a que esta cae en una sobrevaloración de algunos parámetros que determinan la fragilidad de una construcción, y en otros casos cuando las intensidades son muy altas, también la vulnerabilidad tendrá una dependencia total de la intensidad, y discrimina la fragilidad, ya que no es normal que tantas construcciones evaluadas experimentalmente se disparen en sus valores de vulnerabilidad, independientemente de la tipología. En síntesis, se puede afirmar que la metodología del SGC es conservadora para la evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad en construcciones, ya que se sobrevaloran en muchos casos algunas variables, específicamente la fragilidad y la intensidad, y que por lo tanto, afectan directamente los valores de vulnerabilidad, pero los resultados no son concluyentes como para afirmar que aplicando la metodología, los movimientos en masa con intensidades medias a bajas generan vulnerabilidades y riesgos altos, en todas las construcciones independientemente de la tipología, ya que desde el punto

de vista teórico, esta condición se cumple solamente para tres tipologías, al tiempo que en los datos experimentales no se tuvieron datos de todas las tipologías a intensidades medias y bajas, a excepción de 4 edificaciones reforzadas GI– GII, que además clasificaron en vulnerabilidad baja, por lo tanto, la hipótesis del trabajo no es válida.

A pesar de que hubo limitación para la evaluación del modelo experimental debido a que no se contaba con un alto volumen de datos en todas las variables cuantitativas utilizadas y que por lo tanto no se pudieron realizar todas las comparaciones posibles con los modelos teóricos, principalmente aquellos que agrupan todas las tipologías e intensidades, los modelos planteados en este trabajo pueden ser tenidos en cuenta para analizar y deliberar que cambios se pueden hacer en los procedimientos utilizados para la evaluación del riesgo en el municipio de Medellín. Un punto importante para resaltar es que los resultados obtenidos bajo estos modelos basado en la metodología del SGC, brindan un enfoque más general y cualitativo en la evaluación de la fragilidad y por ende, de la vulnerabilidad, si bien se usan algunos datos cuantitativos en el cálculo de la intensidad del movimiento y algunos en la fragilidad, no se utilizan otro tipo de variables y datos más detallados y específicos, principalmente aquellos relacionados con la parte técnica y estructural de las construcciones, que si se toman en cuenta en otras metodologías.

Será bueno a futuro realizar proyectos que permitan comparar las metodologías utilizadas en Colombia con las metodologías internacionales, con el fin de construir nuevos procedimientos que posibiliten mejorar la metodología actual y responder nuevas preguntas que surgen de los resultados obtenidos, tales como ¿realmente todas las construcciones simples tendrán un colapso total de su estructura a cualquier intensidad?, ¿ las edificaciones con reforzamiento especial GII-GIV nunca presentaran daños graves o inclusive sufrir el colapso total ante intensidades bajas y muy bajas? ¿este alto número de construcciones

valoradas en un nivel de alta vulnerabilidad puede indicar una tendencia igual o parecida en el resto de las construcciones del municipio de Medellín? Y otras que pueden surgir. Finalmente, como ya se mencionó, un alto porcentaje de las construcciones evaluadas en el municipio de Medellín están en un nivel de vulnerabilidad alto a cualquier nivel de intensidad, por lo que estas construcciones ante la ocurrencia de un evento se encuentran un alto riesgo de sufrir el colapso total, por lo que será fundamental profundizar en este tema y trabajar en nuevos proyectos, plantear nuevos modelos y analizar otras variables tanto geológicas como estructurales para aprender a sortear las dificultades que puedan traer en el futuro fenómenos naturales como los movimientos en masa en el municipio de Medellín.

12. Conclusiones

- A pesar de haberse obtenido resultados con base a datos cuantitativos, en la metodología del SGC se da un enfoque un poco más cualitativo y general al momento de evaluar la vulnerabilidad y fragilidad en las construcciones, lo que puede influir en una sobrevaloración de algunos parámetros y variables, la intensidad en algunos casos, ciertos parámetros de fragilidad en otros, lo que conlleva a que un alto número de construcciones se clasifiquen en vulnerabilidad alta.
- Desde el punto de vista de los resultados teóricos, la metodología del SGC es conservadora a la hora de evaluar y categorizar la vulnerabilidad de las construcciones, principalmente porque aún en intensidades medias o bajas en algunas construcciones se disparan los niveles de vulnerabilidad, dependiendo de su tipología, específicamente tres (construcciones simples, estructuras ligeras y estructuras con confinamiento deficiente e híbridas). , lo que quiere decir que estas tres tipologías no son recomendables para laderas como las de las zonas de estudio, que abundan en gran parte del departamento de Antioquia.
- El modelo planteado en el trabajo permite obtener resultados más fáciles de analizar y menos homogéneos al momento de evaluar la vulnerabilidad y la fragilidad, a diferencia del modelo convencional que propone la metodología del SGC.
- Todas las curvas construidas, tanto en el modelo teórico como en el experimental, muestran un comportamiento directamente proporcional entre la vulnerabilidad y la fragilidad, a cualquier nivel de intensidad. Además, todas presentan un comportamiento creciente, excepto, aquellas en las que se evaluó con intensidad=1, ya que muestran una tendencia lineal constante.
- Ninguna tipología planteada por el SGC a la luz de la metodología es capaz de resistir un movimiento en masa de intensidad mayor a 0.905.

- Según la información obtenida por el convenio No. 4600076515 de 2018 y la evaluación de ella, se encontró que de las construcciones evaluadas una gran mayoría están en vulnerabilidades altas (99,1%) según la clasificación de la metodología del SGC.

- La mayor tipología evaluada a partir de la información del convenio No. 4600076515 de 2018 son las estructuras ligeras (8446 en total), estas poseen una fragilidad mínima de 0.8 y tienen vulnerabilidad alta frente a movimientos en masa de incluso de intensidad = 0.145 (muy bajo), pero según los resultados del modelo teórico pueden variar entre media y alta, ya que no solo la tipología comprende la fragilidad.

- La mayoría de las construcciones evaluadas puede que presenten condiciones precarias en los otros parámetros de fragilidad, además de la tipología, lo cual provoca que se eleven sus valores de vulnerabilidad respecto a los que deberían tener según esta, por lo tanto, se puede afirmar que el parámetro de tipología tiene un peso importante en el cálculo de la vulnerabilidad en construcciones muy frágiles, mientras que, en edificaciones mejor construidas, los otros parámetros de fragilidad adquieren un mayor peso, en el cálculo total de la fragilidad y por ende en la vulnerabilidad de las construcciones.

- La falta de otros datos y variables cuantitativos, especialmente aquellos asociados con el componente estructural y de ingeniería de las construcciones, puede ser una de las causas que conllevar a una valoración desajustada en la evaluación de la vulnerabilidad por parte del SGC.

13. Recomendaciones

Acatando los objetivos de este trabajo, se presentan recomendaciones para la metodología que usa el Servicio Geológico Colombiano para la evaluación de la vulnerabilidad y la fragilidad en construcciones por movimientos en masa rápidos:

- La metodología del Servicio Geológico Colombiano debería complementarse con una mayor inclusión de otros datos técnicos y estructurales de las construcciones y analizar más detalladamente el impacto de los movimientos en masa a estas, es decir, un estudio más específico en las variables que determinan la vulnerabilidad de una construcción.
- Se invita a las Escuelas de Ciencias y de Ingeniería de la universidad EAFIT a profundizar más en este tema mediante futuros trabajos y proyectos de grado que permitan tener una mayor visión y conocimientos en el estudio de la vulnerabilidad, amenaza y riesgo en el municipio de Medellín, ya que es una zona susceptible a fenómenos naturales como los movimientos en masa.
- Será útil en el futuro para aquellos proyectos que aborden este tema plantear y utilizar diferentes modelos a los que se han usado en este trabajo, para que se puedan comparar e identificar otros factores de análisis que a lo mejor no se han tenido en cuenta aun, para que de esa manera se pueda aumentar la matriz de conocimiento respecto al tema y mejorar la forma de evaluar y analizar las variables que se han estudiado en este trabajo, principalmente la fragilidad de las edificaciones y las tipologías de construcciones.
- En caso de seguir aplicando la metodología, a partir de las gráficas y conclusiones de este trabajo, no sería necesario levantar información detallada de ciertas tipologías para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo, ya que esto implicaría pérdida de recursos recolectando datos intrascendentes, ya que solo con la fragilidad por

tipología se obtiene la vulnerabilidad en estos casos.

14. Bibliografía

Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA. (2007). Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) - Alcaldía de Medellín. (2017). Armonización de la microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá e inclusión de los corregimientos de Medellín. En revision.

Cruden, D. M. 1991. A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 43: 27-29

Du, J., Yin, K., Lacasse, S. & Nadim, F. (2013). Quantitative vulnerability estimation for individual landslides. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris.

Du, J., Yin, K., Lacasse, S. & Nadim, F. (2014). Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: application to the metropolitan area of San Salvador. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19, 1251-1264.

Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. Engineering Geology, 102:85 –98.

Garzón Iral, J. M., Valencia Palacio, E., & Muñoz Cossío, J. A. (2012). *Evaluación de la vulnerabilidad y consecuencias por deslizamiento en la Conexión Vial Aburrá-Río Cauca entre las abscisas km 04+ 000 y km 39+ 000* (Bachelor's thesis, Universidad de Medellín).

Grupo de Sismología de Medellín. GSM. (1999). Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín. Sistema Municipal para la Prevención y Atención de Desastres, Alcaldía de Medellín.

INGEOMINAS. (2002). Catálogo nacional de movimientos en masa. Bogotá

INGEOMINAS; (2007). Memorias Plancha 147 (inédito).

Inteinsa, S. A., & Solingral, S. A. (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.

JAM Ingeniería y Medio Ambiente E.U. (2007). *Estudio para definir la metodología para la zonificación y reducción de riesgo por FRM, con aplicación a una zona piloto localizada en la cuenca de la quebrada Camelias, en Manizales*. Texto metodología de evaluación de riesgo por FRM a nivel de detalle. Ministerio de Vivienda.

LEY N° 1523. Diario Oficial 48411 de abril 24 de 2012.

Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M. & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125-134.

Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. Decreto 1077 de 2015. Bogotá.

Prieto, J. A., Ramos, A. M., & Villadiego, J. R. (2006). Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial: Aplicación carretera Bogotá-Villavicencio (Colombia).

Prieto, Et al. (2018). Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter.

Puerto, M. (2004) Comparación de metodologías de estimación de riesgo HAZUS vs RN-COL. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2013. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa Esc. 1:100.000. Bogotá D.C., 135p.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2015. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, D.C.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2017. Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Bogotá D.C.

Universidad EAFIT, Alcaldía Medellín (2018). Convenio de asociación para la identificación del riesgo de detalle en algunas zonas del Municipio de Medellín. Medellín.

Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S. & Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3), 251-256.

Varnes, D. J., 1958 Landslide Types and Processes, in Special Report29: Landslides and Engineering Practice (E.B. Ecke, ed.) HBR, National Research Council, Washington D. C. pp 20-47.

ANEXOS

ANEXO 1

Base de datos de valores numéricos de fragilidad, intensidad y vulnerabilidad según su tipología. (Carpeta Anexo 1 - Archivos en Excel).

ANEXO 2

Intensidad

Se presentan a continuación las tablas relacionadas con los parámetros que se utilizaron para el cálculo de la intensidad de un movimiento en masa en una construcción:

Relacion presion de impacto de deslizamiento/ Presion horizontal limite de la estructura	If - Pre
< 0.1	0.05
0.1 - 0.2	0.20
0.2 - 0.4	0.40
0.4 - 0.7	0.70
0.7 - 1.0	0.90
≥ 1.0	1.00

Tabla 5. Parámetro de intensidad por presión de impacto. Relación presión deslizamiento/presión límite estructura. Fuente: Du et al., 2014.

La presión límite de la estructura de la tabla anterior se puede estimar a partir de los datos de la Tabla 6, indicados por Du et al. (2014), en términos de las presiones de falla para diferentes tipos de estructuras.

Tipología		Presión límite de la estructura (kPa)
F	Construcciones simples (F)	1
E	Estructuras ligeras (E)	5
D	Con confinamiento deficiente e híbridas (D)	8
C	Mampostería reforzada (C)	11
B	Reforzadas GI y GII (B)	18
A	Con reforzamiento especial GII y GIV (A)	20

Tabla 6. Presión de falla según tipología de estructura.

Relación Profundidad del deslizamiento / Altura edificación	If - Prof
<0.2	0.10
0.2 - 0.4	0.30
0.4 - 0.6	0.50
0.6 - 0.8	0.70
0.8 - 1.0	0.90
≥ 1.0	1.00

Tabla 7. Parámetro de intensidad relación profundidad/altura de la estructura.

ANEXO 3

Factores de fragilidad

Se presentan a continuación los factores o parámetros que se utilizan para el cálculo de la fragilidad en construcciones:

Factor de fragilidad por tipo de estructura (S tip).

Para el tipo de estructura se consideran los factores de resistencia, modificados de Du et al. (2013) a partir de las tipologías establecidas por autores anteriores, se establecen las siguientes características descritas en la tabla 8 (EAFIT 2018).

Tipología	Fragilidad	S-Tip	
F	Construcciones simples (F)	Muy alta	1.00
E	Estructuras ligeras (E)	Alta	0.90
D	Con confinamiento deficiente e híbridas (D)	Media	0.70
C	Mampostería reforzada (C)	Baja	0.50
B	Reforzadas GI y GII (B)	Muy baja	0.30
A	Con reforzamiento especial GII y GIV (A)	Extremadamente baja	0.10

Tabla 8. Factores de fragilidad por tipología de estructuras Heinimann, 1999, en Du et al., 2013.

Factor de fragilidad por altura de la estructura (Salt).

La fragilidad de la estructura en función de su número de pisos se aprecia a renglón seguido (Tabla 9). Los valores de los parámetros se dan con base en la propuesta de Li et al. (2010), modificados de acuerdo con la cultura constructiva del país.

Tipología	Número de pisos	S- alt
E, F	≥ 2	0.90
D	≥ 4	0.90
D	2 y 3	0.60
Demás tipologías y alturas		0.05

Tabla 9. Factor de fragilidad por altura de la edificación.

Factor de fragilidad por conservación de la estructura (Scon).

El estado de conservación se evalúa a partir de la inspección visual de las edificaciones y se califica de acuerdo con los valores del parámetro de fragilidad propuesto por Du et al. (2013-2014) (Tabla 10).

Estado de conservación	Descripción	Separación grietas (mm)	S-con
Ninguno	No se observan deformaciones, agrietamiento o envejecimiento	0	0,00
Leve	solo se observan daños superficiales leves en los acabados	0-0,5	0,05
Moderado	Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera del (pandeo)	1,0-5,0	0,50
Fuerte	Inclinación del elemento fuera de su plano vertical	5,0-10,0	0,75
Severo	Unidades de mampostería con fallas por aplastamiento.	>10,0	1,00

Tabla 10.Fragilidad por conservación (Du et al., 2013).

Factor de fragilidad por edad de la estructura (Sed).

El parámetro de fragilidad relativo a la edad de la edificación se estima a partir de la relación de los años de servicio con respecto a la vida útil de diseño de la edificación (servicio/vida útil). Los valores de este parámetro corresponden a los propuestos por Du et al. (2013-2014) (Tabla 11).

Relación años de servicio / vida útil	S-ed
≤ 0.1	0.05
0.1- 0.4	0.10
0.4 - 0.6	0.30
0.6 - 0.8	0.50
0.8 - 1.0	0.70
1.0 - 1.2	0.80
>1.2	1.00

Tabla 11.Factor de fragilidad por edad de la edificación Du et al., 2013.

El profesional a cargo de la evaluación del riesgo deberá determinar la edad de las edificaciones y su periodo de diseño, en caso de que estas tengan un diseño formal. En el

evento de que no se hallará información sobre el periodo de diseño de la edificación, el profesional podrá calcular la vida útil de la estructura con base en sus características, a partir de información secundaria debidamente soportada. Se recomienda emplear los valores de vida útil en función del tipo de edificación (Tabla 12).

TIPOLOGÍA	VIDA ÚTIL
A y B	50 Años
C y D	30 Años
E	15 Años
F	1 - 2 Años

Tabla 12. Vida útil en función del tipo de edificación.

Factor de fragilidad por acueducto ($S_{\text{acueducto}}$).

El parámetro de fragilidad relativo al sistema de acueducto de la construcción se estima a partir de los valores de operador de la red, el tipo de material y el tipo de conexión. Este factor de fragilidad fue agregado a la metodología de fragilidad por construcciones, con base en la experiencia en proyectos anteriores y debido a la importancia de la prestación de servicios públicos como factor determinante en la reducción de la vulnerabilidad, en las tablas 13, 14 y 15 se evidencian las características de cada ítem (EAFIT 2018).

Operador de Red	S operador de red
EPM	0.01
Comunal	0.5
Individual	0.9
No aplica*	0

*Tabla 13. Operador acueducto *El ítem "No aplica", hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).*

Material	S material
PVC	0.1
Acero	0.7
Concreto	0.6
Hierro Dúctil	0.4
Polietileno	0.1
No aplica*	0

Tabla 14. Material acueducto (EAFIT 2018).

Conexión	S conexión
Aérea	0.8
Embebida en tierra	0.01
No aplica*	0

Tabla 15. Conexión. *El ítem "No aplica", hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).

Finalmente, se calcula el valor del factor de fragilidad por acueducto mediante la siguiente formula:

$$S_{Acueducto} = 1 - (1 - S_{Operador\ red}) (1 - S_{Material}) (1 - S_{Conexión})$$

Ecuación 6. Ecuación para evaluar el parámetro por servicio de acueducto.

Factor de fragilidad por alcantarillado (S_Alcantarillado)

El parámetro de fragilidad relativo al sistema de alcantarillado de la construcción se estima a partir de los valores del estado de la red, el tipo de descarga, el material y la descarga del sistema de agua lluvias (cuando existe). Este factor de fragilidad fue agregado a la metodología de fragilidad por construcciones, con base en la experiencia en proyectos anteriores y debido a la importancia de la prestación de servicios públicos como factor determinante en la reducción de la vulnerabilidad, en las figuras 16, 17, 18 y 18 se describen las características.

Estado	S Estado
Fuga	0.8
Buenas Condiciones	0.01
No aplica*	0

Tabla 16. Estado alcantarillado. *El ítem "No aplica", hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).

Tipo de Descarga	S tipo de descarga
En talud	0.8
En depósitos fluviales	0.7
En sistema no convencional	0.5
Pozo séptico	0.3
En red EPM	0.01
No aplica*	0

Tabla 17. Tipo de descarga. *El ítem "No aplica", hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).

Material	S material
PVC	0.1
Concreto	0.6
Polietileno	0.1
No aplica*	0

Tabla 18. Material alcantarillado. *El ítem "No aplica", hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).

Tipo de Descarga	S tipo de descarga (lluvias)
Libre	0.4
En red EPM	0.01
No aplica*	0

Tabla 19. Tipo de descarga. *El ítem "No aplica", hace referencia cuando la vivienda no tiene redes de este servicio público (EAFIT 2018).

Finalmente, se calcula el valor del factor de fragilidad por alcantarillado mediante la siguiente formula:

$$S_{\text{Alcantarillado}} = 1 - (1 - S_{\text{Estado}}) (1 - S_{\text{tipode descarga A.R.}}) (1 - S_{\text{material}}) (1 - S_{\text{Tipo de descarga lluvias}})$$

Ecuación 7. Ecuación para evaluar el parámetro por servicio de alcantarillado.