Propuesta de adaptación del manual FEMA P-154 al contexto colombiano para la evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica de edificaciones conforme a la NSR-10

Elvis Fernando Mendoza Villarreal

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniería civil

Director
Orlando Daniel Arroyo Amell, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2026

Dedicatoria

Deseo dedicar este logro, en primer lugar, a mi familia, por su apoyo incondicional, su comprensión y por ser el pilar fundamental que me motivó a seguir adelante en cada etapa de este proceso.

A los amigos que hice durante mi formación de pregrado, quienes, al igual que mi familia, se convirtieron en un respaldo importante y necesario a lo largo de este camino.

A mi director de trabajo de grado, por su orientación, paciencia y valiosos aportes académicos, los cuales enriquecieron significativamente el desarrollo de esta investigación.

Y finalmente, a mí mismo, por la perseverancia, el compromiso y la disciplina que hicieron posible alcanzar este importante logro académico.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi director de trabajo de grado, por su orientación, dedicación y valiosos aportes académicos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

A los docentes que hicieron parte de mi proceso de formación profesional, por compartir sus conocimientos y contribuir significativamente a mi crecimiento académico.

A la institución universitaria, por brindarme los espacios, recursos y herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de pregrado, por el apoyo brindado, el trabajo en equipo y los aprendizajes compartidos a lo largo de este proceso.

Finalmente, agradezco a mi familia, por su respaldo constante, comprensión y motivación, los cuales fueron esenciales para alcanzar este logro.

INTRODUCCIÓN 13

1. OBJETIVOS 14
1.1 Objetivo General 14

1.2 Objetivos Específicos 14

2. CUERPO DEL TRABAJO 15
2.1 Marco Referencial 15

2.1.1 Marco teórico 15

2.1.1.1 Riesgo y vulnerabilidad sísmica 15

2.1.1.2 Evaluación rápida y FEMA P-154 16

2.1.1.3 Curvas de fragilidad y modelación probabilística. 17

2.1.2 Estado del Arte 18

2.1.2.1 Evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica a nivel internacional 18

2.1.2.2 Investigaciones en Colombia 18

2.1.3 Marco legal 19

2.2 Métodología. 21

2.2.1 Fase 1 21

2.2.1.1 Búsqueda bibliográfica 21

2.2.1.2 Clasificación de tipologías estructurales 23

2.2.1.3 Sistematización y organización de la información tipológica. 25

2.2.2 Fase 2 26

2.2.2.1 Construcción de curvas de fragilidad 26

2.2.2.2 Cálculo de los puntajes Z y factores modificadores 27

2.2.3 Fase 3 29

2.2.3.1 Diseño del formato físico 30

2.2.3.1.1 Procedimiento de diligenciamiento de la ficha 30

2.2.3.2 Formato digital 31

2.2.4 Fase 4 34

2.2.4.1 Aplicación de la ficha mediante salida técnica 34

2.2.4.2 Análisis comparativo y validación de resultados 35

2.3 Conclusiones y recomendaciones 35

REFERENCIAS 38

ANEXOS 42

Lista de tablas

Tabla 1. Matriz de comparación entre metodologías. 22

Tabla 2. Clasificación de material. 24

Tabla 3. Clasificación del sistema estructural. 24

Tabla 4. Clasificación de ductilidad. 24

Lista de figuras

Figura 1. Construcción de curva de fragilidad para un CR/MR/DMI/H:3 26

Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de puntajes de vulnerabilidad 29

Figura 3. Ejemplo de diligenciamiento de la ficha en formato físico. 31

Figura 4. Ejemplo de aplicación de la herramienta digital para la evaluación de vulnerabilidad sísmica. 33

Figura 5. Tabla de resultados. 35

Lista de apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. FEMA P-154

Apéndice B. AeDES GNDT.

Apéndice C. Mapa Vs30 SGC.

Apéndice D. FEMA P-155.

Apéndice E. Título-A-NSR-10.

Apéndice F. Risk UE.

Apéndice G. Enlace del formato digital. Ver apéndice G.

Apéndice H. Repositorio de github donde se subió el código para la creación del formato digital. Ver apéndice H.

Apéndice I. Creación de curvas de fragilidad y puntajes.

Apéndice J. Formulario para zona sísmica alta.

Apéndice K. Formulario para zona sísmica intermedia.

Apéndice L. Formulario de zona sísmica baja.

Apéndice M. Georeferenciación del mapa VS30 en QGIS.

Apéndice N. Rasterización del mapa VS30 en QGIS.

Apéndice O. Raster del mapa VS30 en formato .TIFF.

Apéndice P. Código de programación para transformación de ráster a formato cvs en Python.

Apéndice Q. Transformación de Transformación de raster a formato cvs en Python.

Apéndice R. Mapa Vs30 en formato CVS.

Apéndice S. Código de programación ficha digital.

Apéndice T. Requerimientos para exportar el código a github.

Apéndice U. Tabla de evaluación de edificaciones de la prueba piloto.

Apéndice V. Registro de tipologías estructurales evaluadas en campo mediante la ficha de evaluación física.

Glosario

Amenaza sísmica: Probabilidad estadística de que se produzca o exceda una cierta intensidad sísmica o aceleración del suelo en un sitio específico durante un período de tiempo determinado.

Datos numéricos: Información cuantificable utilizada para caracterizar variables estructurales y sísmicas dentro de procesos de evaluación de vulnerabilidad.

Inspección visual rápida: Metodología basada en observación directa de la edificación para estimar su vulnerabilidad sísmica de forma rápida y estandarizada.

Vulnerabilidad sísmica: Consiste en el grado de susceptibilidad que tienen las personas, las edificaciones, los sistemas sociales, económicos y ambientales para sufrir daños ante la ocurrencia de un evento.

Curva de fragilidad: Describe la probabilidad de que una edificación alcance o supere un determinado estado de daño (leve, moderado, severo o colapso), en función de una medida de intensidad sísmica, como la aceleración pico del suelo (PGA) o la aceleración espectral (Sa). (Rodriguez, 2025)

Tipologias constructivas: Clasificación de edificaciones segpun su sistema estructural, material predominante y características constructivas.

Resumen

Título: Propuesta de adaptación del manual FEMA P-154 al contexto colombiano para la evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica de edificaciones conforme a la NSR-10[*]

Autor: Elvis Fernando Mendoza Villarreal[**]

Palabras Clave: Amenaza sísmica, evaluación rápida, tipologías constructivas, vulnerabilidad sísmica, FEMA P-154.

Descripción:

Colombia se localiza en una región de alta amenaza sísmica, donde la ocurrencia de eventos telúricos ha generado daños recurrentes en las edificaciones y en la población. Estas afectaciones se presentan principalmente en zonas donde las construcciones fueron ejecutadas antes de la implementación de la normativa sismorresistente vigente, lo que incrementa de manera significativa la vulnerabilidad estructural frente a futuros sismos. Ante este escenario, se hace necesaria la aplicación de una estrategia de prevención que permita evaluar de forma rápida y preliminar el comportamiento sísmico de las edificaciones. A nivel internacional, se han desarrollado metodologías de prevención de daños como el manual FEMA P-154, el cual ha sido ampliamente utilizado para la evaluación rápida de estructuras, considerando tipologías constructivas propias del contexto donde es aplicado. Sin embargo, dicha metodología no puede ser aplicada de forma directa a Colombia, debido a que las tipologías constructivas del país difieren de aquella las cuales fue originalmente diseñada, por lo que en el presente proyecto se propone la adaptación del FEMA P-154 a estas tipologías existentes mediante la creación de una ficha técnica de inspección visual rápida que integra variables estructurales, condiciones del suelo y niveles de amenaza sísmica, permitiendo la estimación preliminar del nivel de vulnerabilidad de las edificaciones. Adicionalmente, se desarrolló una herramienta digital que facilita la aplicación del método y la sistematización de resultados. Los resultados evidencian que la metodología adaptada permite identificar de manera eficiente edificaciones potencialmente críticas, constituyéndose en una herramienta útil para procesos de priorización en la gestión del riesgo sísmico. No obstante, el método puede presentar limitaciones asociadas a la inspección visual, especialmente en edificaciones con múltiples fachadas o configuraciones complejas, donde la identificación precisa de sus características estructurales puede verse afectada. Este aporte contribuye al fortalecimiento de estrategias de evaluación a gran escala en el contexto colombiano, apoyando la toma de decisiones en planificación territorial y mitigación del riesgo.

---

[*] Trabajo de grado.

[**] Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Orlando Daniel Arroyo Amell, Ph.D. Profesor Titular – Escuela Ingeniería Civil.

Abstract

Title: Proposal for the Adaptation of the FEMA P-154 Manual to the Colombian Context for Rapid Seismic Vulnerability Assessment of Buildings in Accordance with NSR-10. [*]

Author: Elvis Fernando Mendoza Villarreal[**]

Key Words: Seismic hazard, rapid evaluation, building typologies, seismic vulnerability, FEMA P-154.

Description:

Colombia is located in a region of high seismic hazard, where the occurrence of seismic events has caused recurrent damage to buildings and the population. These impacts are mainly observed in areas where constructions were carried out prior to the implementation of current seismic-resistant regulations, significantly increasing structural vulnerability to future earthquakes. In this context, it is necessary to implement preventive strategies that allow for the rapid and preliminary assessment of the seismic performance of buildings. At the international level, damage prevention methodologies such as the FEMA P-154 manual have been widely used for rapid structural assessment, considering construction typologies specific to the context in which they are applied. However, this methodology cannot be directly applied in Colombia, as the country's construction typologies differ from those for which it was originally designed. Therefore, this project proposes the adaptation of FEMA P-154 to existing Colombian typologies through the development of a rapid visual inspection form that integrates structural variables, soil conditions, and seismic hazard levels, allowing a preliminary estimation of building vulnerability. Additionally, a digital tool was developed to facilitate the application of the method and the systematization of results. The findings show that the adapted methodology efficiently identifies potentially critical buildings, making it a useful tool for prioritization processes in seismic risk management. However, the method may present limitations associated with visual inspection, particularly in buildings with multiple facades or complex configurations, where the accurate identification of structural characteristics may be affected. This contribution supports the strengthening of large-scale evaluation strategies in the Colombian context, aiding decision-making in territorial planning and risk mitigation.

[*] Degree work

[**] Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Advisor: Orlando Daniel Arroyo Amell, Ph.D., Full Professor – School of Civil Engineering.

Introducción

Colombia se ubica en una de las regiones de mayor amenaza sísmica del continente americano debido a la interacción de las placas Nazca, Caribe y Suramericana, lo que ha generado eventos telúricos de alto impacto y pérdidas significativas en infraestructura y vidas humanas. Se estima que cerca del 87% de la población habita en zonas de amenaza sísmica alta o intermedia, y que aproximadamente el 65% del parque edificatorio fue construido antes de la implementación de normativas sismorresistentes, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a futuros sismos. En este contexto, resulta necesario contar con herramientas que permitan identificar de manera ágil edificaciones potencialmente críticas.

A nivel internacional, metodologías como el manual FEMA P-154 han sido ampliamente utilizadas para la evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica mediante inspección visual. Sin embargo, su aplicación directa en Colombia presenta limitaciones debido a diferencias en tipologías constructivas y en el marco normativo definido por la NSR-10.

En este marco, la investigación plantea la adaptación del FEMA P-154 al contexto colombiano, mediante el desarrollo de una ficha técnica que integra variables representativas del entorno nacional. El estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado con componente cuantitativo, a partir del análisis comparativo entre FEMA P-154 y la NSR-10, y la formulación de un sistema de puntuación basado en curvas de fragilidad para tipologías estructurales representativas del país.

Estas curvas, modeladas mediante una distribución log-normal, permiten estimar la probabilidad de daño estructural y transformarla en un puntaje estandarizado tipo Z. La propuesta constituye una herramienta orientada a la identificación de edificaciones críticas y al fortalecimiento de la gestión del riesgo sísmico y la planificación territorial.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Adaptar la metodología del manual FEMA P-154 para la evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones según la normatividad colombiana.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar las variables relevantes en la construcción de curvas de fragilidad log-normales en tipologías estructurales colombianas considerando el estado de daño por colapso en función de la intensidad sísmica (Sa).

Desarrollar una ficha de evaluación rápida ajustada a las condiciones sísmicas y constructivas de Colombia, incorporando puntajes basados en la escala Z y las curvas de fragilidad identificadas, que permita una valoración preliminar de la vulnerabilidad estructural.

Evaluar la aplicabilidad y validez del instrumento propuesto mediante una prueba piloto o estudio de caso, contrastando los resultados obtenidos con los criterios de desempeño estructural establecidos en la NSR-10 y en experiencias previas documentadas.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

2.1.1 Marco teórico

2.1.1.1 Riesgo y vulnerabilidad sísmica

El riesgo sísmico se entiende como el resultado de la interacción entre tres componentes fundamentales: amenaza, vulnerabilidad y exposición, relación que suele expresarse de manera conceptual como:

$$R = A \times V \times E$$

Donde R representa el riesgo, A la amenaza, V la vulnerabilidad y E la exposición. La amenaza corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de determinada intensidad en un sitio específico, asociada a las características tectónicas, geológicas y sismológicas del territorio (Baker, 2021).

La vulnerabilidad representa el grado de susceptibilidad de las edificaciones y sistemas a sufrir daños ante un sismo. En el ámbito estructural, depende de factores como el sistema resistente, la calidad de los materiales, el año de construcción, el cumplimiento de la normativa sismorresistente y las condiciones del suelo (FEMA, 2015). Desde un enfoque cuantitativo, puede modelarse mediante curvas de fragilidad, que relacionan la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño con un parámetro de intensidad sísmica, generalmente bajo una distribución log-normal. (Porter, 2007).

La exposición se refiere a la presencia de población, infraestructura y bienes en zonas susceptibles a amenaza sísmica. (Crowley, 2020). La interacción de estos tres componentes constituye la base de la gestión del riesgo sísmico, orientada a la reducción de impactos mediante estrategias de mitigación y prevención (Rivero, 2017). En este contexto, las evaluaciones rápidas

de edificaciones permiten identificar de forma preliminar estructuras críticas y priorizar intervenciones, apoyando la toma de decisiones en gestión del riesgo.

2.1.1.2 Evaluación rápida y FEMA P-154

Los métodos de evaluación rápida son herramientas preliminares orientadas a identificar, en corto tiempo y con recursos limitados, edificaciones potencialmente vulnerables ante eventos sísmicos. Su objetivo no es reemplazar un análisis estructural detallado, sino priorizar aquellas construcciones que requieren estudios más rigurosos conforme a la normativa vigente. (FEMA, 2015)

Estos procedimientos se basan en inspecciones visuales exteriores y en la recopilación de información básica sobre el sistema estructural, configuración geométrica, irregularidades, año de construcción, condiciones del suelo y posibles deficiencias constructivas. A partir de estos parámetros se asignan puntajes que reflejan el comportamiento sísmico esperado, fundamentados en criterios estadísticos y en el desempeño histórico de distintas tipologías estructurales. (FEMA, 2015) (Crowley H. &., 2010)

El manual FEMA P-154 (Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards) es uno de los referentes más utilizados en este ámbito. Su metodología clasifica las edificaciones según tipologías estructurales y asigna un puntaje base ajustado mediante modificadores asociados a características específicas de vulnerabilidad. El resultado corresponde a un índice que permite determinar si la edificación requiere una evaluación detallada. (FEMA, 2015)

Diversos estudios han aplicado el FEMA P-154 en contextos internacionales, evidenciando su utilidad como instrumento de gestión del riesgo sísmico en escenarios urbanos con grandes inventarios edificatorios (Cunalata, 2022) (Harirchian, 2019). No obstante, su aplicación directa

en otros países presenta limitaciones debido a diferencias tipológicas, materiales predominantes y marcos normativos. En consecuencia, su adaptación al contexto colombiano constituye una estrategia pertinente para fortalecer los procesos de evaluación rápida, integrando criterios de la NSR-10 y tipologías estructurales nacionales.

2.1.1.3 Curvas de fragilidad y modelación probabilística.

Una curva de fragilidad describe la probabilidad de que una edificación alcance o supere un determinado estado de daño (leve, moderado, severo o colapso) en función de una medida de intensidad sísmica, como la aceleración pico del suelo (PGA) o la aceleración espectral (Sa) (Rodriguez, 2025). En el marco de la modelación probabilística, estas curvas representan funciones de probabilidad condicional que relacionan la demanda sísmica con la capacidad estructural, incorporando la incertidumbre asociada tanto a la acción sísmica como a la respuesta del sistema.

Generalmente, se asume que la capacidad estructural sigue una distribución log-normal, lo que permite expresar la probabilidad de excedencia mediante la función de distribución acumulada de una variable normal estándar. En este contexto, la probabilidad de daño se obtiene a partir del puntaje Z, calculado mediante la transformación logarítmica de la relación entre la demanda sísmica y la capacidad media, considerando la desviación estándar del modelo. (Chang, 2018) (Dagnino, 2014). Esta formulación permite estandarizar los resultados y comparar el desempeño sísmico entre diferentes tipologías estructurales. Su incorporación en el procedimiento metodológico facilita la transformación de la probabilidad de daño en un puntaje cuantitativo de vulnerabilidad, coherente con el enfoque probabilístico del riesgo sísmico.

2.1.2 Estado del Arte

2.1.2.1 Evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica a nivel internacional

El FEMA P-154 es una de las metodologías más difundidas a nivel internacional para la evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica mediante inspección visual. Su aplicación en países como Ecuador (Cunalata, 2022), Perú (Calixto, 2023), Pakistán (Khan, 2019), Afganistán (Raoufy, 2023) y Turquía (Harirchian, 2019) ha permitido evaluar grandes inventarios edificatorios, priorizando estructuras con mayor probabilidad de daño. Los estudios reportan que el sistema de puntuación facilita la identificación preliminar de edificaciones críticas y la optimización de recursos para evaluaciones detalladas. Asimismo, el método ha demostrado capacidad para diferenciar entre tipologías estructurales con distintos niveles de desempeño sísmico.

No obstante, se ha evidenciado que los parámetros de vulnerabilidad y factores de ajuste requieren modificaciones cuando la metodología se aplica en contextos normativos y constructivos diferentes al estadounidense, especialmente en regiones con sistemas estructurales no contemplados originalmente. Esto resalta la necesidad de adaptar el método a condiciones locales.

2.1.2.2 Investigaciones en Colombia

En Colombia, la gestión del riesgo sísmico ha avanzado con la implementación del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), que establece criterios técnicos para el diseño y evaluación de edificaciones. En este contexto, diversas investigaciones han abordado la caracterización de la amenaza sísmica, la modelación de la vulnerabilidad estructural y la estimación probabilística de pérdidas.

Se destacan los estudios asociados al Modelo Nacional de Riesgo Sísmico, así como aquellos orientados al desarrollo de curvas de fragilidad para tipologías estructurales representativas, como mampostería no reforzada y confinada, pórticos de concreto reforzado y

sistemas de muros estructurales. Estos trabajos incorporan enfoques probabilísticos y metodologías basadas en desempeño, permitiendo estimar niveles de daño y pérdidas económicas bajo distintos escenarios. (Arroyo, 2025) (Feliciano, 2022) (Rivera, 2020)

No obstante, la mayoría de estos estudios se basan en análisis detallados que requieren información específica, modelación numérica avanzada y recursos especializados, lo que limita su aplicación a gran escala en contextos urbanos.

A pesar de estos avances, no se identifica una herramienta estandarizada de evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica de alcance nacional, que permita realizar procesos de tamizaje preliminar de manera eficiente en grandes inventarios edificatorios. Esta brecha entre modelos analíticos detallados y herramientas simplificadas evidencia la necesidad de desarrollar metodologías adaptadas al contexto colombiano.

En este marco, la ciudad de Bucaramanga se presenta como un caso de estudio pertinente, debido a su ubicación en una zona de alta amenaza sísmica y su influencia por el Nido Sísmico de Bucaramanga, una de las zonas de sismicidad intermedia más activas del país. (Chicangana & & Vargas-Jiménez, 2008). Adicionalmente, su parque edificatorio heterogéneo, con construcciones previas y posteriores a la normativa sismorresistente, evidencia una alta variabilidad en la vulnerabilidad estructural.

2.1.3 Marco legal

La presente investigación se enmarca en el conjunto de disposiciones constitucionales, legales y reglamentarias que regulan la gestión del riesgo de desastres y la construcción sismorresistente en Colombia.

La Constitución Política de Colombia (1991) establece como fin esencial del Estado la protección de la vida y los bienes, así como la obligación de prevenir y controlar los riesgos

asociados a fenómenos naturales, constituyendo el fundamento jurídico para la reducción del riesgo sísmico. (De Colombia, 1991)

En materia de gestión del riesgo, la Ley 1523 de 2012 adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), definiendo la gestión del riesgo como un proceso orientado al conocimiento, reducción y manejo de desastres. En este marco, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se reconoce como un componente clave para la toma de decisiones. (Colombia C. d., LEY 1523 DE 2012 Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de, 2012)

El Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD) 2015–2030, adoptado mediante el Decreto 308 de 2016 y actualizado por el Decreto 978 de 2024, establece lineamientos para la evaluación, mitigación y reducción del riesgo en infraestructura y población (Departamento Administrativo de la Presisdencia de la República, 2016) (Decreto 978 de 2024 Por medio del cual se adopta la segunda actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de desastres, y se dictan otras disposiciones., 2024).

En cuanto a la regulación estructural, la Ley 400 de 1997 y el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Decreto 926 de 2010 y sus actualizaciones) establecen los criterios para el diseño y evaluación de edificaciones, siendo este último el principal referente normativo en el país. (Colombia C. d., 1997)

De manera complementaria, el Decreto 2157 de 2017 regula los planes de gestión del riesgo en entidades públicas y privadas, mientras que el Decreto 1401 de 2023 (AIS 410-23) introduce lineamientos para la reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas informales. (Colombia P. d., 2017) (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA, 2023)

Finalmente, la Ley 388 de 1997 establece la incorporación de la gestión del riesgo en los instrumentos de ordenamiento territorial, lo que refuerza la necesidad de contar con herramientas técnicas que permitan evaluar la vulnerabilidad estructural en grandes inventarios edificatorios. (Congreso de la República de Colombia, 1997)

2.2 Métodología.

2.2.1 Fase 1

Se realiza una revisión bibliográfica de metodologías internacionales para la evaluación de vulnerabilidad sísmica, con el fin de analizar sus fundamentos conceptuales, procedimientos, criterios de clasificación estructural y estimación de daño.

2.2.1.1 Búsqueda bibliográfica

Se identificaron bases de datos científicas y técnicas relevantes, incluyendo Scopus, Web of Science, Google Scholar y repositorios institucionales de organismos internacionales. La búsqueda se realizó mediante operadores booleanos (AND, OR), utilizando palabras clave como “Rapid Visual Screening”, “Seismic Vulnerability Assessment”, “Seismic Risk Assessment” y “Fragility Curves”.

El proceso de selección incluyó la revisión de título, resumen y palabras clave, seguida del análisis de objetivos, metodología y conclusiones, con el fin de determinar la pertinencia de cada documento.

Como resultado, se seleccionaron tres metodologías internacionales para su análisis comparativo:

FEMA P-154

GNDT- Formato AeDES

RISK-UE

La selección se basó en su reconocimiento técnico, enfoque en evaluación simplificada y aplicabilidad en grandes inventarios edificatorios. Posteriormente, se realizó un análisis comparativo mediante una matriz bibliográfica que incluyó aspectos como objetivo operativo, fase de aplicación, salida técnica, metodología de campo, clasificación estructural, factores de ajuste, inclusión del riesgo y personal requerido (Tabla 1). (Baggio, y otros, 2007) (Milutinovic & & Trendafiloski, 2003)

Tabla 1. Matriz de comparación entre metodologías.

Dimensión de comparación	RISK-UE	GNDT AeDES	FEMA P-154
Objetivo operativo	Generar modelos de vulnerabilidad y fragilidad para predecir daños en escenarios de riesgo a nivel urbano.	Evaluar usabilidad y seguridad post-sismo para decidir el reingreso de habitantes o medidas de emergencia.	Realizar un triaje preventivo (RVS) para identificar edificios con alto riesgo de colapso requieren estudios a fondo.
Fase de aplicación	Planificación previa: Mitigación y gestión de desastres a largo plazo.	Emergencia inmediata: Días o semanas después de un terremoto.	Prevención: Identificación rápida de riesgos en grandes inventarios antes de un sismo.
Salida técnica principal	Funciones de fragilidad y curvas de capacidad (Sa vs sd).	Juicio de usabilidad (A a F) y propuesta de contramedidas inmediatas.	Una puntuación final (S) estima el logaritmo de la probabilidad de colapso ante un sismo máximo.
Metodología de campo	No es una herramienta de inspección visual rápida de calle, sino un modelo analítico de ingeniería.	Inspección visual detallada de componentes (muros, techos, escaleras) que toma varias horas.	Cribado Visual Rápido desde el exterior, con una duración de 15 a 30 minutos por edificio.
Clasificación de edificios	Matriz BTM: 65 modelos basados en material, tipo estructural y 3 niveles de altura.	Edificios ordinarios(vivienda/servicios); Excluye monumentos, iglesias y naves industriales.	17 tipos definidos por sistema lateral y material, ajustados por 5 niveles de sismicidad regional.
Factores de ajuste	Niveles de diseño: Pre-code, Low, Moderate y High-code.	Modificadores de mantenimiento, irregularidades y posición en agregados	Modificadores de Puntuación: Tipo de suelo(A-F), irregularidades verticales/en planta y año de construcción.
Inclusión de riesgos	Se centra en comportamiento estructural y la pérdida económica.	Incluye riesgo externo (caída de escombros cercanos) y fallos en redes de distribución.	Evalúa riesgos no estructurales (parapetos, chimeneas, revestimientos pesados y potencias de golpeteo(pounding).
Personal requerido	Investigadores y consultores de ingeniería estructural.	Inspectores técnicos (arquitectos o ingenieros) con capacitación especifica.	Nivel 1: Personal capacitado (bomberos, estudiantes, técnicos), Nivel 2: Ingenieros estructurales.

El análisis comparativo permitió identificar que el FEMA P-154 presenta una estructura metodológica sistemática, parámetros claramente definidos y un esquema de puntuación adaptable a diferentes contextos constructivos.

En consecuencia, se determinó que esta metodología ofrece mayor viabilidad para su adaptación al contexto colombiano, constituyéndose como la base técnica para el desarrollo del manual ajustado en la presente investigación.

2.2.1.2 Clasificación de tipologías estructurales

Con el fin de garantizar la compatibilidad entre la metodología y el contexto constructivo nacional, se trabajó con tipologías estructurales previamente definidas junto con sus parámetros de curvas de fragilidad.

Estas tipologías, suministradas por el director de tesis, provienen de estudios del Modelo Nacional de Riesgo Sísmico de Colombia, en los cuales se han caracterizado sistemas estructurales representativos mediante funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad. La clasificación de las tipologías estructurales se realizó considerando los siguientes criterios:

- Material estructural predominante.
- Sistema estructural resistente a cargas.
- Nivel de ductilidad según normativa nacional.
- Número de pisos.

Para facilitar la organización, cada criterio se representó mediante una nomenclatura abreviada, permitiendo construir códigos tipológicos que sintetizan las características estructurales de cada edificación.

Tabla 2. Clasificación de material.

Material	Código
Adobe	AD
Bareque	BQ
Mampostería de arcilla cocida	MA
Mampostería en bloque de concreto	MC
Concreto reforzado	CR
Acero	AC
Madera	MD

Tabla 3. Clasificación del sistema estructural.

Sistema estructural	Código
Muros no reforzados	MNR
Muros confinados	MC
Muros reforzados	MR
Pórticos resistentes a momento	PRM
Pórticos resistentes a momento + mampostería	PRMM
Pórticos arriostrados	PA
Sistema combinado	SC

Tabla 4. Clasificación de ductilidad.

Sistema estructural	Código
Dúctil	DU
No dúctil	ND

Adicionalmente, para ciertos sistemas estructurales se consideraron los niveles de disipación de energía establecidos en la normativa sismorresistente colombiana, los cuales permiten diferenciar el comportamiento sísmico esperado:

- DES: Disipación especial de energía.
- DMO: Disipación moderada de energía.
- DMI: Disipación mínima de energía.

En algunos casos, las tipologías de la base de datos se clasifican únicamente como dúctiles, sin especificar el nivel de disipación. Estas se mantuvieron sin modificación, respetando la información original.

Para la identificación de las configuraciones estructurales, se empleó una nomenclatura tipológica basada en la combinación de los criterios definidos previamente, representados mediante un código alfanumérico:

Tipología = Material estructural/ Sistema estructural/ Nivel de ductilidad /H: # de pisos

Por ejemplo, la tipología CR/PRM/DES/H:3 corresponde a una edificación de concreto reforzado (CR), con pórticos resistentes a momento (PRM), capacidad de disipación especial (DES) y tres pisos. Esta nomenclatura permite sintetizar de manera sistemática las características estructurales y facilitar su manejo dentro de la base de datos.

2.2.1.3 Sistematización y organización de la información tipológica.

Para el desarrollo de la investigación se utilizó una base de datos en formato Excel, suministrada por el director de tesis, que contiene la clasificación de tipologías estructurales colombianas junto con sus parámetros de curvas de fragilidad(media y desviación estándar), derivados de estudios del Modelo Nacional de Riesgo Sísmico (MNRS) el cual emplea un modelo analítico en el que se modelan edificios representativos de cada tipología, definida por el material, el sistema estructural, el nivel de ductilidad y el número de pisos. Para ello, se generan modelos estructurales cuyas propiedades geométricas, mecánicas y de detallado sismorresistente son consistentes con el nivel de ductilidad correspondiente (DES, DMO, DMI o ND), representando así diferentes capacidades de disipación de energía y comportamiento no lineal. Posteriormente, estos modelos se someten a análisis sísmicos no lineales utilizando registros acelerográficos

seleccionados y escalados de acuerdo con la amenaza sísmica obtenida mediante un análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA).

La base de datos incorpora los criterios de clasificación estructural definidos previamente. Debido a la extensión del conjunto de tipologías, la tabla completa se presenta en el Apéndice A.

2.2.2 Fase 2

Se construyeron las curvas de fragilidad para cada tipología estructural a partir de sus parámetros estadísticos (media y desviación estándar), asumiendo una distribución log-normal, ampliamente utilizada en la modelación probabilística del daño sísmico.

Con base en el estado de daño último, se calcularon los puntajes Z, los cuales representan la relación entre la demanda sísmica y la capacidad estructural. Adicionalmente, se determinaron factores modificadores asociados al tipo de suelo y a la altura de la edificación, considerando tres niveles de sismicidad: alto, intermedio y bajo.

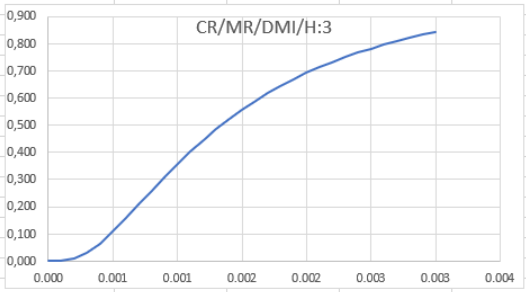
2.2.2.1 Construcción de curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad para cada tipología estructural se construyeron a partir de los parámetros estadísticos asociados a estas, específicamente la media y la desviación estándar, asumiendo una distribución log-normal. Para este propósito, se emplearon las curvas de fragilidad correspondientes al estado de daño completo (DS4), el cual representa el nivel más severo de afectación estructural.

Con base en estos parámetros se calcularon las probabilidades de excedencia para distintos valores de aceleración espectral (Sa), generando una tabla de valores Sa-Probabilidad para cada tipología estructural. Posteriormente, las curvas fueron representadas gráficamente en Microsoft Excel, utilizando Sa en el eje horizontal(X) y la probabilidad de excedencia en el eje vertical (Y) (Ver figura 1).

Figura 1. Construcción de curva de fragilidad para un CR/MR/DMI/H:3

				m	d
T de la curva	0,1	138	CR/MR/DMI/H:3	1,34	0,801
	0,000	0,000			
	0,100	0,001			
	0,200	0,009			
	0,300	0,031			
	0,400	0,066			
	0,500	0,109			
	0,600	0,158			
	0,700	0,209			
	0,800	0,260			
	0,900	0,310			
	1,000	0,357			
	1,100	0,403			
	1,200	0,445			
	1,300	0,485			
	1,400	0,522			
	1,500	0,556			
	1,600	0,588			
	1,700	0,617			
	1,800	0,644			
	1,900	0,669			
	2,000	0,691			
	2,100	0,713			
	2,200	0,732			
	2,300	0,750			
	2,400	0,767			
	2,500	0,782			
	2,600	0,796			
	2,700	0,809			
	2,800	0,821			
	2,900	0,832			
	3,000	0,843			



Nota. Autoría propia.

2.2.2.2 Cálculo de los puntajes Z y factores modificadores

El cálculo de los puntajes Z se basó en la lógica del procedimiento del FEMA P-154 (Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards), adaptado al contexto colombiano. A diferencia del método original, no se incorporaron modificadores asociados a condiciones pre-code y post-code, ya que la capacidad estructural fue representada mediante el nivel de ductilidad incluido en la nomenclatura tipológica. En consecuencia, los puntajes Z se determinaron en función del tipo de suelo y el número de pisos.

Para el tipo de suelo, se consideraron las categorías B, C, D y E establecidas por la normativa colombiana, así como tres niveles de amenaza sísmica (alta, intermedia y baja), representados mediante las ciudades de Bucaramanga, Bogotá y Cartagena, respectivamente.

El cálculo de los puntajes de vulnerabilidad se realizó a partir de la aceleración espectral (Sa) obtenida del espectro elástico para cada ciudad, en función del período estructural asociado a

cada tipología. Con el fin de evaluar escenarios severos, el valor de Sa fue amplificado mediante un factor de 1.5, representando niveles de demanda cercanos al colapso. Este valor amplificado se utilizó como parámetro de entrada para estimar la probabilidad de colapso. La adopción de este factor se encuentra respaldada por diversos estudios nacionales e internacionales, en los que se emplea para representar la demanda sísmica correspondiente al escenario de sismo máximo creíble.

Dicha probabilidad se obtuvo mediante interpolación en tablas Sa–probabilidad generadas a partir de las curvas de fragilidad. Posteriormente, se transformó en puntaje Z utilizando la función INV.NORM.ESTAND de Excel, correspondiente a la distribución normal estándar.

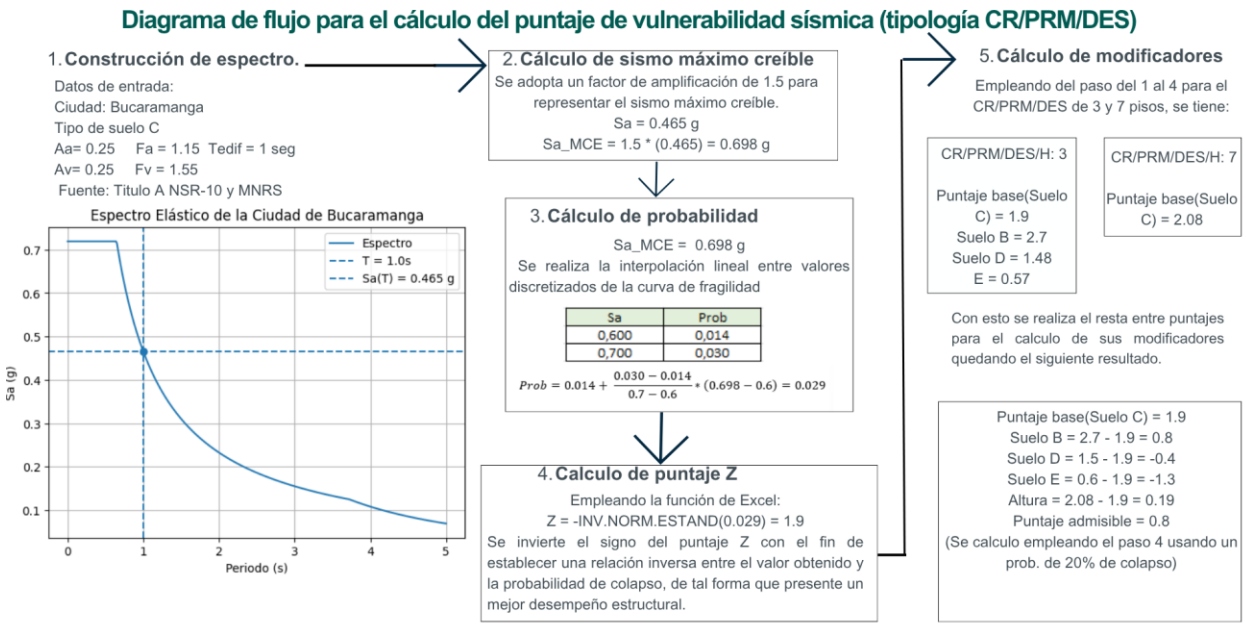
El procedimiento se aplicó para tipologías representativas de 3 y 7 pisos. A partir de estos resultados, se definió un puntaje base correspondiente a suelo tipo C y tres pisos. Los modificadores por tipo de suelo y altura se calcularon como la diferencia respecto a este puntaje base. Para facilitar la interpretación, se invirtió el signo de los puntajes, de modo que valores mayores indican menor probabilidad de colapso.

Adicionalmente, se establecieron criterios de evaluación según el nivel de disipación de energía. Las tipologías con disipación especial (DES) se evaluaron en zonas de amenaza alta, las de disipación moderada (DMO) en amenaza intermedia y las de disipación mínima (DMI) en amenaza baja. En contraste, tipologías sin clasificación específica de ductilidad (DU, ND) se evaluaron en los tres niveles de amenaza, calculándose igualmente sus correspondientes puntajes base y modificadores. Esto permite que la metodología pueda aplicarse también a edificaciones con comportamiento no dúctil, siempre que sus características estructurales sean representativas de las tipologías ND definidas en el MNRS, como ocurre con algunas edificaciones construidas bajo normativas anteriores. Asimismo, la diferenciación de las tipologías según su nivel de

disipación de energía (DES, DMO y DMI) permitió establecer puntajes específicos para cada condición de ductilidad, criterio que fue incorporado en la ficha de evaluación rápida, tanto física como digital.

Finalmente, se adoptó un puntaje mínimo admisible asociado a una probabilidad de colapso del 20%, en coherencia con el enfoque del FEMA P-154. Las edificaciones con valores inferiores a este umbral se consideran potencialmente vulnerables y requieren evaluación estructural detallada. El procedimiento se resume mediante un diagrama de flujo con un ejemplo representativo (Ver figura 2).

Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de puntajes de vulnerabilidad



Nota. Este procedimiento constituye la base metodológica para el cálculo de los puntajes de vulnerabilidad en todas las tipologías estructurales evaluadas.

2.2.3 Fase 3

En esta fase se desarrolló la herramienta de evaluación rápida de vulnerabilidad sísmica, materializada en una ficha de inspección, tanto en formato físico como digital, con el propósito de facilitar la recolección sistemática de información en campo y su posterior procesamiento.

2.2.3.1 Diseño del formato físico

La ficha de evaluación fue diseñada como un instrumento para la recolección sistemática de información en campo, integrando los parámetros definidos en la metodología, como tipología estructural, tipo de suelo, número de pisos y la asignación de puntajes base y modificadores.

Se desarrollaron tres versiones de la ficha, correspondientes a niveles de sismicidad alta, intermedia y baja, permitiendo incorporar directamente los puntajes y modificadores definidos para cada escenario, así como los diferentes niveles de ductilidad presentado en las base de datos. Estos se organizan en tablas según el nivel de ductilidad de las tipologías estructurales, facilitando la identificación y asignación del puntaje por parte del evaluador.

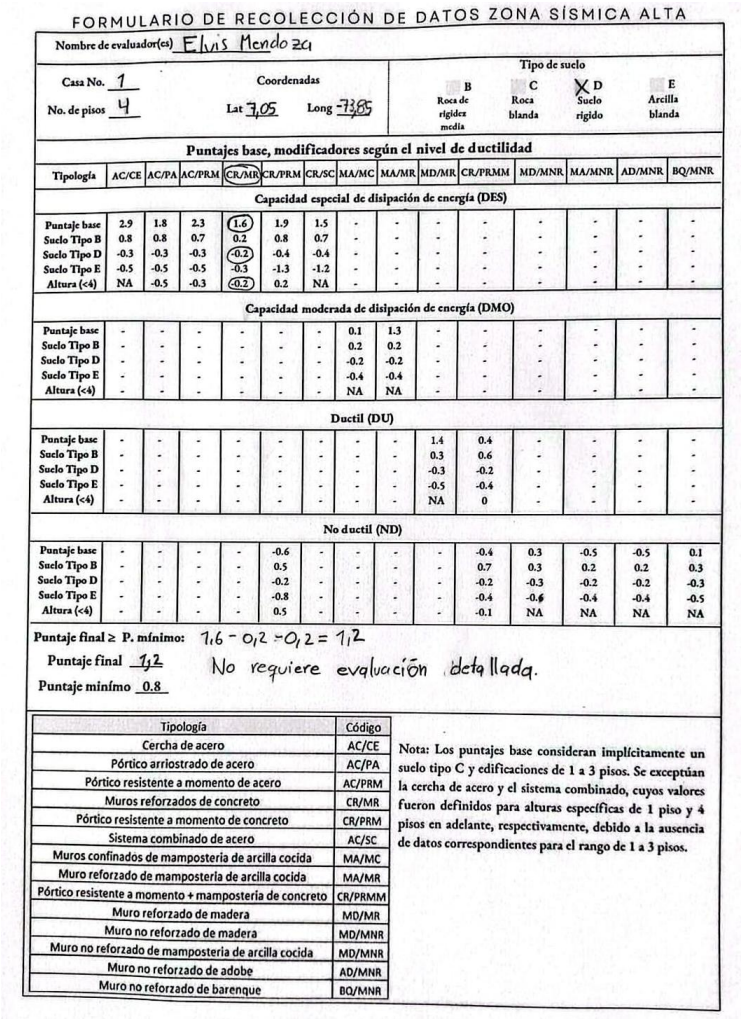
El diseño prioriza la claridad y rapidez en su diligenciamiento, incluyendo campos para la identificación de la edificación, características estructurales y resultado de la evaluación. Adicionalmente, se incorpora un puntaje mínimo de referencia y una tabla de nomenclatura tipológica, lo que permite una aplicación ágil y consistente en campo.

2.2.3.1.1 Procedimiento de diligenciamiento de la ficha

Para garantizar la correcta aplicación de la herramienta, se definió un procedimiento de diligenciamiento orientado a la recolección y procesamiento de información para la estimación de la vulnerabilidad sísmica. En primer lugar, se registran los datos generales del levantamiento, incluyendo el evaluador y la identificación de la edificación (ID, número de pisos y localización geográfica). Posteriormente, se define el tipo de suelo (categorías B a E), excluyendo el tipo A debido a su baja representatividad en el contexto de estudio. A continuación, se identifica la tipología estructura según la nomenclatura establecida, así como su nivel de ductilidad, a partir de la cual se seleccionan el puntaje base y los modificadores correspondientes. El puntaje final se

obtiene mediante la suma de estos valores y se compara con el umbral mínimo establecido. En caso de no superarlo, la edificación se considera potencialmente vulnerable y se recomienda una evaluación estructural detallada. Este procedimiento permite una aplicación ágil y sistemática de la herramienta, facilitando la clasificación preliminar de la vulnerabilidad sísmica.

Figura 3. Ejemplo de diligenciamiento de la ficha en formato físico.



FORMULARIO DE RECOLECCIÓN DE DATOS ZONA SÍSMICA ALTA

Nombre de evaluador(es): Elvis Mendoza

Casa No. 1 — No. de pisos 4 — Coordenadas: Lat 7,05 Long -73,85

Tipo de suelo: B Roca de rigidez media; C Roca blanda; X D Suelo rígido; E Arcilla blanda

Puntajes base, modificadores según el nivel de ductilidad

Tipología	AC/CE	AC/PA	AC/PRM	CR/MR	CR/PRM	CR/SC	MA/MC	MA/MR	MD/MR	CR/PRMM	MD/MNR	MA/MNR	AD/MNR	BQ/MNR
Capacidad especial de disipación de energía (DES)														
Puntaje base	2.9	1.8	2.3	1.6	1.9	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Suelo Tipo B	0.8	0.8	0.7	0.2	0.8	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-
Suelo Tipo D	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.4	-0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
Suelo Tipo E	-0.5	-0.5	-0.5	-0.3	-1.3	-1.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Altura (<4)	NA	-0.5	-0.3	-0.2	0.2	NA	-	-	-	-	-	-	-	-
Capacidad moderada de disipación de energía (DMO)														
Puntaje base	-	-	-	-	-	-	0.1	1.3	-	-	-	-	-	-
Suelo Tipo B	-	-	-	-	-	-	0.2	0.2	-	-	-	-	-	-
Suelo Tipo D	-	-	-	-	-	-	-0.2	-0.2	-	-	-	-	-	-
Suelo Tipo E	-	-	-	-	-	-	-0.4	-0.4	-	-	-	-	-	-
Altura (<4)	-	-	-	-	-	-	NA	NA	-	-	-	-	-	-
Ductil (DU)														
Puntaje base	-	-	-	-	-	-	-	-	1.4	0.4	-	-	-	-
Suelo Tipo B	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	0.6	-	-	-	-
Suelo Tipo D	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.3	-0.2	-	-	-	-
Suelo Tipo E	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.5	-0.4	-	-	-	-
Altura (<4)	-	-	-	-	-	-	-	-	NA	0	-	-	-	-
No ductil (ND)														
Puntaje base	-	-	-	-	-0.6	-	-	-	-	-0.4	0.3	-0.5	-0.5	0.1
Suelo Tipo B	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-	0.7	0.3	0.2	0.2	0.3
Suelo Tipo D	-	-	-	-	-0.2	-	-	-	-	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
Suelo Tipo E	-	-	-	-	-0.8	-	-	-	-	-0.4	-0.6	-0.4	-0.4	-0.5
Altura (<4)	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-	-0.1	NA	NA	NA	NA

Puntaje final ≥ P. mínimo: 1,6 - 0,2 - 0,2 = 1,2

Puntaje final 1,2 — No requiere evaluación detallada.

Puntaje mínimo 0.8

Tipología	Código
Cercha de acero	AC/CE
Pórtico arriostrado de acero	AC/PA
Pórtico resistente a momento de acero	AC/PRM
Muros reforzados de concreto	CR/MR
Pórtico resistente a momento de concreto	CR/PRM
Sistema combinado de acero	AC/SC
Muros confinados de mampostería de arcilla cocida	MA/MC
Muro reforzado de mampostería de arcilla cocida	MA/MR
Pórtico resistente a momento + mampostería de concreto	CR/PRMM
Muro reforzado de madera	MD/MR
Muro no reforzado de madera	MD/MNR
Muro no reforzado de mampostería de arcilla cocida	MD/MNR
Muro no reforzado de adobe	AD/MNR
Muro no reforzado de barenque	BQ/MNR

Nota: Los puntajes base consideran implícitamente un suelo tipo C y edificaciones de 1 a 3 pisos. Se exceptúan la cercha de acero y el sistema combinado, cuyos valores fueron definidos para alturas específicas de 1 piso y 4 pisos en adelante, respectivamente, debido a la ausencia de datos correspondientes para el rango de 1 a 3 pisos.

2.2.3.2 Formato digital

La ficha de evaluación rápida fue implementada en un entorno digital utilizando Python y la librería Streamlit, con el propósito de facilitar la recolección, procesamiento y almacenamiento de la información en campo.

La herramienta incorpora un módulo de geolocalización del tipo de suelo basado en un mapa de velocidades de onda de corte (Vs30) proporcionado por el Servicio Geológico Colombiano. Este fue previamente procesado en QGIS y transformado a formato CSV para su integración en la aplicación.

El módulo de geolocalización proporciona una estimación preliminar del tipo de suelo y está sujeto a las limitaciones de la resolución del mapa Vs30 y de la precisión del GPS convencional. Por ello, no pretende reemplazar estudios de microzonificación sísmica, sino ofrecer una referencia rápida para la evaluación preliminar, especialmente en municipios donde esta información no está disponible. Estas limitaciones representan una oportunidad de mejora, sin afectar el alcance de la metodología propuesta.

La implementación se desarrolló como una aplicación web en Streamlit Community Cloud, vinculada a un repositorio en GitHub (véase Apéndice H) que permite su despliegue y actualización continua.

El funcionamiento inicia con la geolocalización de la edificación mediante un botón que detecta automáticamente las coordenadas y asigna el tipo de suelo. Posteriormente, el usuario selecciona la tipología estructural, el nivel de amenaza sísmica y el número de pisos.

Para tipologías con niveles de disipación definidos (DES, DMO, DMI), la herramienta asigna automáticamente el nivel de ductilidad según la sismicidad. En otros casos (DU, ND), este debe ser ingresado manualmente.

A partir de esta información, el sistema calcula automáticamente el puntaje final, mostrando los valores y modificadores asociados. Adicionalmente, permite almacenar múltiples evaluaciones y exportarlas en formato Excel para su análisis posterior.

Esta implementación digital optimiza el proceso de evaluación, reduciendo errores, agilizando resultados y facilitando la gestión de la información en campo.

Figura 4. Ejemplo de aplicación de la herramienta digital para la evaluación de vulnerabilidad sísmica.



En la figura 4 se presenta un ejemplo de aplicación de la herramienta digital, utilizando el mismo caso evaluado previamente con la ficha en formato físico. En este se muestran las etapas de ingreso de información, incluyendo la geolocalización para la identificación del tipo de suelo, la selección de la tipología estructural, el nivel de amenaza sísmica y el número de pisos.

Una vez ingresados estos parámetros, la herramienta calcula automáticamente el puntaje final y muestra los factores modificadores asociados. Los resultados coinciden con los obtenidos manualmente, lo que valida la consistencia del procedimiento y el correcto funcionamiento de la aplicación.

Este ejemplo evidencia la facilidad de uso de la herramienta y su capacidad para automatizar el proceso de evaluación, reduciendo errores y mejorando la eficiencia.

2.2.4 Fase 4

En esta fase se validó la herramienta de evaluación rápida mediante su aplicación en edificaciones representativas, con el fin de analizar su aplicabilidad y coherencia frente al desempeño estructural.

2.2.4.1 Aplicación de la ficha mediante salida técnica

La recolección de información se realizó mediante un recorrido en campo en la ciudad de Bucaramanga. Durante este, se identificaron aproximadamente 30 edificaciones, de las cuales se seleccionaron aquellas con características estructurales diferenciadas, con el fin de garantizar una muestra variada. Este enfoque corresponde a un muestreo dirigido, adecuado para una prueba piloto orientada a evaluar la aplicabilidad del instrumento.

Las tipologías identificadas incluyeron pórticos resistentes a momento en concreto reforzado y acero, mampostería confinada, sistemas combinados, muros estructurales y cerchas de acero, permitiendo evaluar la herramienta en diversas configuraciones.

Para cada edificación se registraron variables como número de pisos, tipo de suelo, tipología estructural y nivel de ductilidad, aplicando la ficha en formato físico y digital. Esto permitió obtener los puntajes de vulnerabilidad y verificar el funcionamiento de la herramienta en condiciones reales.

Durante la evaluación se evidenciaron limitaciones propias de la inspección visual, especialmente en edificaciones con configuraciones complejas o fachadas que dificultan la identificación del sistema estructural. En estos casos, se adoptaron criterios conservadores para la clasificación, con el fin de no subestimar la vulnerabilidad. Estas limitaciones son consistentes con metodologías de evaluación rápida como el FEMA P-154.

2.2.4.2 Análisis comparativo y validación de resultados

Como resultado de la aplicación de la herramienta, se obtuvieron los puntajes de vulnerabilidad para cada edificación evaluada. Estos se presentan en la Ilustración 4, junto con información relevante como tipología estructural, número de pisos, tipo de suelo y puntaje final.

Figura 5. Tabla de resultados.

Fecha	Latitud	Longitud	Tipología	Zona	Nivel	Suelo	Pisos	So	Ms	Mp	Score	Smin	Resultado
2026-03-27 14:37:30	7,1367	-73,1208	Muro confinado de masposteria de arcilla cocida MA/MC	Alta	DMO	C	3	0,1	0	0	0,1	0,8	Requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:37:49	7,13657	-73,1209	Muro confinado de masposteria de arcilla cocida MA/MC	Alta	DMO	C	3	0,1	0	0	0,1	0,8	Requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:38:12	7,13652	-73,1209	Muro confinado de masposteria de arcilla cocida MA/MC	Alta	DMO	C	2	0,1	0	0	0,1	0,8	Requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:40:53	7,13582	-73,1209	Pórtico resistente a momento de concreto CR/PMR	Alta	DES	C	5	1,9	0	0,2	2,1	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:41:24	7,13577	-73,1209	Muro reforzado de masposteria de arcilla cocida MA/MR	Alta	DMO	C	3	1,3	0	0	1,3	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:42:50	7,13555	-73,1209	Pórtico resistente a momento de concreto CR/PMR	Alta	DES	C	6	1,9	0	0,2	2,1	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:45:40	7,13532	-73,1207	Muro confinado de masposteria de arcilla cocida MA/MC	Alta	DMO	C	3	0,1	0	0	0,1	0,8	Requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:46:27	7,13541	-73,1204	Pórtico resistente a momento de concreto CR/PMR	Alta	DES	C	6	1,9	0	0,2	2,1	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:50:51	7,13524	-73,1203	Sistema combinado de concreto CR/SC	Alta	DES	C	16	1,5	0	0	1,5	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:54:51	7,13421	-73,1202	Cercha de acero AC/CE	Alta	DES	C	1	2,9	0	0	2,9	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 14:56:03	7,13378	-73,1201	Pórtico resistente a momento de concreto CR/PMR	Alta	DES	C	6	1,9	0	0,2	2,1	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:05:30	7,13025	-73,1196	Sistema combinado de concreto CR/SC	Alta	DES	C	15	1,5	0	0	1,5	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:09:45	7,1285	-73,1197	Cercha de acero AC/CE	Alta	DES	C	1	2,9	0	0	2,9	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:10:05	7,1285	-73,1197	Pórtico resistente a momento de concreto CR/PMR	Alta	DES	C	1	1,9	0	0	1,9	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:14:08	7,12743	-73,12	Muros reforzados de concreto CR/MR	Alta	DES	C	11	1,6	0	-0,2	1,4	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:14:56	7,12736	-73,12	Pórtico resistente a momento de acero AC/PRM	Alta	DES	C	6	2,3	0	-0,3	2	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:17:28	7,12736	-73,12	Cercha de acero AC/CE	Alta	DES	C	1	2,9	0	0	2,9	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:28:10	7,12356	-73,1165	Muros reforzados de concreto CR/MR	Alta	DES	C	17	1,6	0	-0,2	1,4	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:33:31	7,12162	-73,1161	Sistema combinado de concreto CR/SC	Alta	DES	C	25	1,5	0	0	1,5	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:35:52	7,12115	-73,1162	Cercha de acero AC/CE	Alta	DES	C	1	2,9	0	0	2,9	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:48:18	7,12065	-73,1127	Pórtico resistente a momento de concreto CR/PMR	Alta	DES	C	7	1,9	0	0,2	2,1	0,8	No requiere evaluación detallada
2026-03-27 15:50:11	7,12096	-73,1122	Muros reforzados de concreto CR/MR	Alta	DES	C	9	1,6	0	-0,2	1,4	0,8	No requiere evaluación detallada

Nota: Ficha digital.

A partir de los resultados obtenidos, se realizó un análisis comparativo para evaluar la consistencia y validez del instrumento propuesto. En términos generales, las edificaciones con menor capacidad de disipación de energía, como la mampostería confinada de baja ductilidad, obtuvieron los menores puntajes de evaluación, indicando un mayor nivel de vulnerabilidad. Por el contrario, los pórticos resistentes a momento y los muros de concreto reforzado alcanzaron puntajes superiores al umbral establecido, reflejando un mejor desempeño sísmico esperado.

Estos resultados son coherentes con los criterios de desempeño estructural establecidos en la NSR-10, donde se reconoce que la ductilidad constituye uno de los principales mecanismos para reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones. Asimismo, coinciden con los resultados presentados por Maldonado y Chio (Rondòn, 2005) para la ciudad de Bucaramanga, quienes identifican un mejor comportamiento esperado en edificaciones aporticadas de concreto reforzado

y una mayor vulnerabilidad en edificaciones de mampostería, especialmente cuando presentan menores niveles de ductilidad.

En cuanto al tipo de suelo, todas las edificaciones evaluadas se localizaron sobre suelo tipo C, de acuerdo con la clasificación establecida en la NSR-10 y con la información del mapa Vs30 del Servicio Geológico Colombiano. Esta clasificación resulta consistente con el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica, el cual ubica al departamento de Santander dentro de una de las zonas de mayor amenaza sísmica del país, justificando la necesidad de considerar este parámetro dentro de la metodología propuesta.

Adicionalmente, la priorización obtenida mediante la ficha presenta concordancia con el enfoque de FEMA P-154, en el que las edificaciones con sistemas estructurales de menor capacidad resistente o menor ductilidad obtienen menores puntajes y son clasificadas como prioritarias para una evaluación estructural detallada. Aunque los puntajes numéricos no son directamente comparables debido a las diferencias metodológicas, la tendencia observada en la clasificación de las tipologías estructurales es consistente entre ambos procedimientos.

Finalmente, la comparación entre la ficha física y la herramienta digital evidenció una coincidencia en la clasificación de todas las edificaciones evaluadas y en los puntajes asignados, validando la correcta implementación computacional del instrumento. En conjunto, estos resultados demuestran que la herramienta presenta un comportamiento consistente con la normativa colombiana, con el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica del SGC y con metodologías de evaluación rápida ampliamente utilizadas en la literatura, respaldando su aplicabilidad dentro del alcance de una prueba piloto.

2.3 Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo permitió adaptar la metodología del FEMA P-154 al contexto colombiano, incorporando condiciones normativas, sísmicas y constructivas definidas en la NSR-10. Esta adaptación se fundamenta en el uso de curvas de fragilidad log-normales y el estado de daño por colapso, lo que permite representar de manera coherente el comportamiento sísmico de distintas tipologías estructurales.

Como resultado, se desarrolló una ficha de evaluación rápida basada en puntajes tipo Z, constituyéndose como una herramienta práctica para la estimación preliminar de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones del contexto nacional.

La aplicación mediante una prueba piloto evidenció resultados consistentes con los principios de la ingeniería sísmica, la NSR-10 y metodologías de referencia como el FEMA P-154, validando la funcionalidad y aplicabilidad de la herramienta en escenarios reales. Sin embargo, la precisión de la evaluación puede verse afectada por las limitaciones inherentes a la inspección visual, particularmente cuando la configuración de la fachada impide identificar con claridad el sistema estructural. Por ello, se recomienda complementar la información obtenida en campo con registros técnicos disponibles en curadurías urbanas y oficinas de planeación, favoreciendo una caracterización más confiable de las edificaciones.

No obstante, los resultados se derivan de una muestra limitada, por lo que no constituyen una validación estadística completa. En este sentido, se propone como trabajo futuro la aplicación de la herramienta a un mayor número de edificaciones de distintas tipologías estructurales y ubicadas en diferentes zonas de amenaza sísmica, con el fin de fortalecer la validación del modelo y ampliar su alcance. Asimismo, se plantea incorporar variables adicionales, como la presencia de suelos blandos y las irregularidades estructurales, condiciones frecuentes en edificaciones de

construcción informal en Colombia. Esto permitiría desarrollar un segundo nivel de evaluación, siguiendo el enfoque propuesto por el FEMA P-154, para lograr una caracterización más detallada y precisa de la vulnerabilidad sísmica.

Referencias Bibliográficas

Arroyo, O., Bonett, R., Vidales, F., Ocampo, J. J., Feliciano, D., Carrillo, J., & & Novoa, D. (2025). Seismic fragility assessment of reinforced concrete wall buildings in Colombia: Insights and implications for earthquake-resistant design. Earthquake Spectra, 41(1), 354-380.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA. (2023). AIS 410-23: EVALUACIÓN Y REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA EN VIVIENDAS DE MAMPOSTERÍA. Bogota.

Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Della Bella, M., Di Pasquale, G., & ... & Zuccaro, G. (2007). Field manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES). European Commission—Joint Research Centre—Institute for the Protection and Security of the Citizen, EUR, 22868.

Baker, J., Bradley, B., & & Stafford, P. (2021). *Seismic hazard and risk analysis. Cambridge University Press.*

Calixto, V., Cruz, C., & & Huaco, G. (October de 2023). Seismic vulnerability of state educational infrastructures in Cercado de Lima, using the FEMA 154 methodology. In 2023 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI) (pp. 1-7).

Chang, K. M., Blanco, G. M., & & Sanchez, D. C. (2018). Construcción de curvas de fragilidad para edificaciones sin información estructural en Cuba. Ciencia en su PC, 1(1), 86-95.

Chicangana, G., & & Vargas-Jiménez, C. (2008). Seismotectonic Analysis of the Bucaramanga Seismic Nest, Colombia. Resúmenes extendidos del 7th International Simposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008), 2, 128-131.

Colombia, C. d. (1997). Ley 400 de 1997, por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo resistentes.

Colombia, C. d. (24 de Abril de 2012). LEY 1523 DE 2012 Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de.

Colombia, P. d. (2017). Decreto 2157 de 2017 Por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y.

Congreso de la República de Colombia. (18 de Julio de 1997). Ley 388 de 1997: Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones.

Crowley, H., & & Pinho, R. (2010). Revisiting Eurocode 8 formulae for periods of vibration and their employment in linear seismic analysis. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 39(2), 223-235.

Crowley, H., Despotaki, V., Rodrigues, D. S., Toma-Danila, D., Riga, E., & ... & Gamba, P. (2020). Exposure model for European seismic risk assessment. Earthquake Spectra, 36(1_suppl), 252-273.

Cunalata, F., & & Caiza, P. (2022). Estado del arte de estudios de vulnerabilidad sísmica en Ecuador. Revista Politécnica, 50(1), 55-64.

Dagnino, J. (2014). La distribución normal. Revista chilena de anestesia, 43(2), 116-121.

De Colombia, C. P. (1991). onstitución Política Cle Colombia-1991.

Decreto 978 de 2024 Por medio del cual se adopta la segunda actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de desastres, y se dictan otras disposiciones. (2 de Agosto de 2024).

Departamento Administrativo de la Presisdencia de la República. (24 de Febrero de 2016). Decreto 308 de 2016 Por medio del cual se adopta el Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres.

Feliciano, D., Arroyo, O., Cabrera, T., Contreras, D., Valcárcel Torres, J. A., & & Gómez Zapata, J. C. (2022). Seismic risk scenarios for the residential buildings in the Sabana Centro province in Colombia. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 2022, 1-33.

FEMA, P. (2015). Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook.(2015). Federal management agency and American society of civil engineers.

Harirchian, E., & & Lahmer, T. (October de 2019). Earthquake hazard safety assessment of buildings via smartphone app: A comparative study. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 652, No. 1, p. 012069). IOP Publishing.

Khan, S. U., Qureshi, M. I., Rana, I. A., & & Maqsoom, A. (2019). Seismic vulnerability assessment of building stock of Malakand (Pakistan) using FEMA P-154 method. SN Applied Sciences, 1(12), 1625.

Milutinovic, Z. V., & & Trendafiloski, G. S. (2003). Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of current buildings, 1-111.

Porter, K., Kennedy, R., & & Bachman, R. (2007). Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering. Earthquake spectra, 23(2), 471-489.

Raoufy, A. A., Kheyroddin, A., & & Naderpour, H. (2023). Seismic Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Hospital Buildings Using Rapid Visual Screening Method According to FEMA P-154 criteria and Iranian Code# 364. Civil Infrastructure Researches,.

Rivera, M. M., García, J., Espitia, J. S., Eraso, J. F., Torres, J. A., Cuevas, M. G., & ... & Parra, F. J. (2020). Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia.

Rivero, A. C., Pacheco, A. D., Garcia, P. G., & & Vera, M. N. (2017). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo ante eventos naturales. Factores socialmente construidos. Journal of Science and Research, 2(6), 22-28.

Rodriguez, G. (25 de Enero de 2025). Obtenido de https://www.centrogeotecnico.com/blog-geotecnia-geomecanica/curvas-de-fragilidad-la-clave-para-disenar-estructuras-mas-seguras-ante-sismos.html

Rondòn, E. M., & Cho, G. C. (2005). Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga. Revista UIS Ingenierías, 4(2), 99-116.