



**REVISION BIBLIOGRAFICA Y CASO EJEMPLO PARA LA ESTIMACIÓN DE
VULNERABILIDAD SÍSMICA Y SU POTENCIAL RIESGO DE FALLA EN
EDIFICACIONES DE HASTA TRES NIVELES POR MEDIO DE MÉTODOS
CUALITATIVOS.**

Autores

Laura Melisa Castaño Castaño

Alejandro Gallego Higinio

Asesor

Juan Carlos Vélez Cadavid

Doctor en ingeniería de materiales

Universidad De Antioquia

Facultad De Ingeniería – Escuela Ambiental De Postgrados

Especialización En Análisis Y Diseño De Estructuras

Medellín

2022

Cita	(Castaño Castaño & Gallego Higinio, 2022)
Referencia	Castaño Castaño, L. M., & Gallego Higinio, A. (2022). <i>Revisión bibliográfica y caso ejemplo para la estimación de la vulnerabilidad sísmica y su potencial riesgo de falla en edificaciones de hasta tres niveles por medio de métodos cualitativos - 2022</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte X.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano / Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Juan Carlos Velez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de Contenido

Justificación.....	5
Objetivos	7
General.....	7
Específicos.....	7
Marco teórico	8
Riesgo sísmico	8
Peligrosidad sísmica:	9
Vulnerabilidad sísmica:	9
Vulnerabilidad estructural:	10
Vulnerabilidad NO estructural:	10
Vulnerabilidad funcional:	10
Perdidas sísmicas:	11
Sismo Resistencia:.....	13
ESTADO DEL ARTE	13
Métodos para evaluar la vulnerabilidad	13
Métodos analíticos.....	14
MODELOS HISTÉRICOS DEL HORMIGÓN ARMADO	15
2A. INDICADORES DE DAÑO A NIVEL DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	17
2B. INDICADORES DE DAÑO A NIVEL DE ESTRUCTURA.	18

TITULO A.10. EVALUACIÓN E INTERVENCIÓN DE EDIFICACIONES CONSTRUIDAS ANTES DE LA VIGENCIA DE LA PRESENTE VERSIÓN DEL REGLAMENTO.	18
MÉTODOS SUBJETIVOS	19
MÉTODO DEL ÍNDICE PRIORITARIO	25
METODOLOGÍA DE HURTADO Y CARDONA	26
MÉTODO FEMA 154	29
MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD.....	37
SELECCIÓN DE PARÁMETROS.....	43
ESTRUCTURACION Y CONFIGURACION ESTRUCTURAL DEL CASO EJEMPLO	55
Aspectos geométricos.....	55
Aspectos constructivos	55
Aspectos Estructurales.....	56
Aspectos del suelo	57
Aplicación del método del índice de vulnerabilidad.....	57
ORGANIZACIÓN DEL SISTEMA.....	60
CALIDAD DEL SISTEMA RESISTENTE	61
RESISTENCIA CONVENCIONAL	61
POSICION DEL EDIFICIO Y LA CIMENTACION	62
DIAFRAGMAS HORIZONTALES	63
CONFIGURACION EN PLANTA	64

DISTANCIA MAXIMA ENTRE MUROS	65
TIPOS DE CUBIERTA.....	66
ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES.....	66
ESTADO DE CONSERVACION	67
Referencias.....	70

Justificación

La diversidad social y económica de Colombia ha dado paso al incremento de la población de manera presurosa, y de esta manera aumentado la mala práctica de la construcción de edificaciones en especial de baja altura, que no permiten contar con condiciones mínimas de seguridad para la sociedad.

En sectores de condiciones sociales desfavorables es muy común el hecho de no contar con la asesoría de profesionales para la práctica, se construye a partir de los mínimos recursos, materiales reciclados y con bajos estándares de calidad, dejando en evidencia no solo a los ojos de profesionales, sino también de personas sin conocimientos previos enfocados a la construcción, del estado de la vulnerabilidad estructural en que se encuentra la edificación y por ende el riesgo que representa para sus habitantes.

Esto representa una gran problemática, tanto para la planificación y control de los entes territoriales, como un riesgo latente desde el punto de vista de estabilidad estructural; es muy evidente encontrar desde criterios visuales las edificaciones potenciales al fallo en caso de la eventualidad de un sismo, es por esto que desde la implementación de métodos Cualitativos actuales que serán motivo de la presente revisión bibliográfica sean aplicables para la valoración de la vulnerabilidad sísmica, con el fin de realizar la evaluación que posteriormente permita determinar cuál edificación es más propensa a sufrir pérdidas en sus capacidades mecánicas, sufrir posibles daños y determinar su potencial falla en caso de algún evento sísmico o un evento que no pueda ser previsto con anterioridad

Objetivos

General

- Realizar una revisión bibliográfica y caso ejemplo de la identificación de la vulnerabilidad ante eventos sísmicos de edificaciones de baja altura por medio de método cualitativos, con el fin de estimar los posibles daños y sus características más desfavorables.

Específicos

- Presentar los conceptos básicos para identificar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, desde los métodos cualitativos.
- Llevar a cabo la revisión bibliográfica relacionada con los métodos utilizados para determinar la Vulnerabilidad sísmica de una edificación.
- Realizar un caso ejemplo usando el método cualitativo del Índice de Vulnerabilidad.

Marco teórico

Para el estudio de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones será importante definir algunos conceptos claves en el tema, entre los cuales se encuentran: riesgo sísmico, vulnerabilidad, riesgo, métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, entre otros que serán importantes tener presentes para mejor interpretación del presente documento.

Riesgo sísmico

El concepto de riesgo sísmico se puede considerar desde tres puntos de vista (Vere, 1973):

- El riesgo geofísico que se refiere a la probabilidad de repetición de un terremoto catastrófico en una región específica.
- El riesgo técnico, que se refiere a la probabilidad de que falle un tipo de estructura particular
- El riesgo de seguro, que se refiere a la probabilidad de que las reclamaciones se atengan a una cantidad determinada. El grupo de trabajo de la UNESCO reunido en París (25-28 de abril de 1972) para el estudio estadístico de los peligros naturales llegó a la definición de que “un riesgo es una posibilidad de pérdida; el riesgo sísmico se refiere a la posibilidad de pérdidas provocadas por sismos y que un peligro natural es un estado de riesgo debido a la posibilidad de que se produzca una calamidad natural”

El riesgo sísmico es la probabilidad de que las consecuencias sociales o económicas producidas por un terremoto igualen o excedan valores predeterminados, para una localización o área geográfica dada. (Alicante, 2015)

$$\text{RIESGO SISMICO} = \text{PELIGROSIDAD} * \text{VULNERABILIDAD} * \text{PERDIDAS}$$

Peligrosidad sísmica:

Es la probabilidad de que el valor de un cierto parámetro que mide el movimiento del suelo (intensidad; aceleración,) sea superado en un determinado periodo de tiempo (t), también llamado periodo de exposición. La peligrosidad sísmica solo depende de la localización geográfica del emplazamiento mientras que la vulnerabilidad sísmica y las pérdidas dependen de las características constructivas de la zona y de sus características socio-económicas. (Alicante, 2015)

Vulnerabilidad sísmica:

Es la cuantificación del daño o grado de daño que se espera sufra una determinada estructura o grupo de estructuras, sometida o sometidas a la acción dinámica de una sacudida del suelo de una determinada intensidad. (Alicante, 2015)

El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable en estudios sobre riesgo sísmico y para la mitigación de desastres por terremotos. Se entiende por riesgo sísmico, el grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante un lapso de tiempo que transcurre en la exposición a un evento de sismo. Por otra parte, la mitigación de los desastres a nivel de ingeniería, tiene como fin mejorar el comportamiento sísmico de los edificios de una zona, con el objetivo de reducir costos causados por los daños presentados en un terremoto. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

Por lo presentado es evidente que, para mitigar el riesgo sísmico de una zona, es necesario reducir la amenaza, la vulnerabilidad y el costo de reparación de las edificaciones afectadas. El conocimiento de la amenaza sísmica existente permite considerar un adecuado diseño de las nuevas estructuras y el sitio donde pueden ser construidas. Sin embargo, poco puede hacerse para reducir la amenaza a la que están expuestas las estructuras existentes, por lo que, si el objetivo es disminuir el riesgo, se requiere una intervención directa sobre la vulnerabilidad. (Bonet, 2003)

Vulnerabilidad estructural:

Correspondiente a la susceptibilidad o exposición de elementos estructurales a sufrir daños debido a un sismo, caracterizado por el deterioro físico de elementos vitales para el soporte de la edificación, pudiendo ser las Cimentaciones, columnas, vigas, muros y losas. (Aguilar & Mudarra, 2018).

Vulnerabilidad NO estructural:

Este tipo de vulnerabilidad se encuentra de igual manera asociado a la susceptibilidad o exposición de elementos que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica, pero sin embargo son evaluados de acuerdo al deterioro físico y su principal característica es que usualmente son componentes arquitectónicos, pero que cumplen una función importante dentro de las instalaciones. (Aguilar & Mudarra, 2018)

Vulnerabilidad funcional:

Definida como la susceptibilidad de la edificación para continuar prestando el servicio para el que fue concebido, este tipo de vulnerabilidad se encuentra asociada más que todo a los Grupos de Importancia IV, Catalogadas como Edificaciones Indispensables (AIS, Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente, 2012) *Son aquellas edificaciones de atención a la comunidad que deben funcionar durante y después de un sismo, y cuya operación no puede ser trasladada rápidamente a un lugar alternativo. Ya que estas deben desarrollar un adecuado desempeño estructural, pero están expuestas a un colapso funcional que puede ser incluso más delicado que una falla en los elementos de la estructura (Cardona, Septiembre - Octubre 1989).*

La vulnerabilidad funcional puede ser consecuencia del aumento de demanda en sus servicios, más sin embargo existen diferentes factores causantes o contribuyentes a el incremento o alteración funcional de la estructura, dentro de los cuales esta la distribución de las áreas de servicio, dotación de las instalaciones, relación de espacios, sistemas de comunicación y señalización e incluso la concepción de un plan de emergencia para la atención de la ciudadanía en caso de la eventualidad de un sismo. (Barbat, 1998)

Perdidas sísmicas:

Es la valoración de los costes materiales y pérdidas humanas producidas por la ocurrencia de un terremoto, teniendo en cuenta la vulnerabilidad de las edificaciones e infraestructuras. (Alicante, 2015)

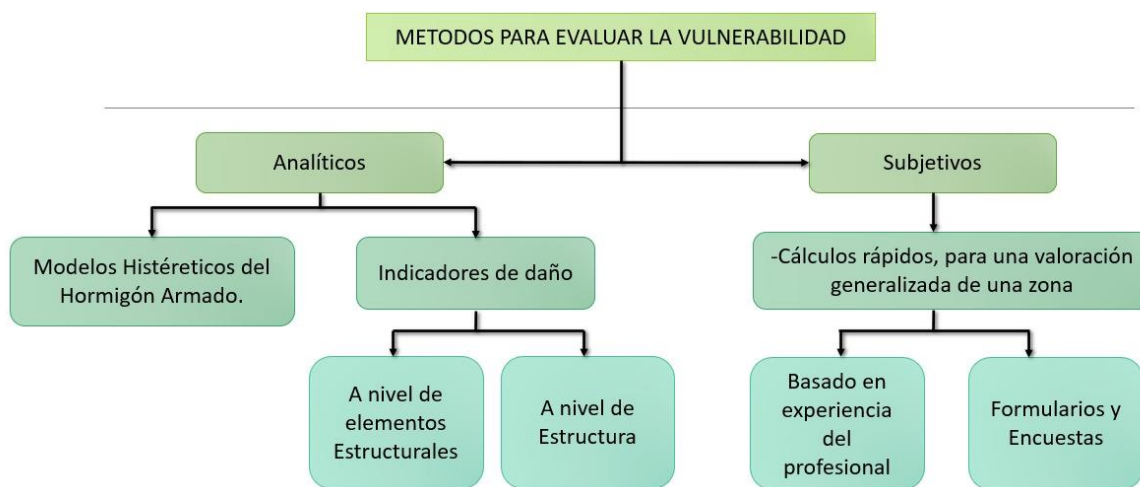
Sismo Resistencia:

La sismo resistencia es una propiedad o atributo con la que se dota a una edificación, mediante la aplicación de técnicas de diseño de su configuración geométrica y la incorporación en su constitución física, de componentes estructurales especiales que la capacitan para resistir las fuerzas que presentan durante un movimiento sísmico. Lo que se traduce en protección de la vida de los ocupantes y de la integridad del edificio mismo. (SENA, 2008)

Aunque se presentan daños, en el caso de un sismo muy fuerte, una edificación sismo resistente no colapsará y contribuirá a que no haya pérdida de vidas ni pérdida total de la propiedad. (SENA, 2008)

ESTADO DEL ARTE**Métodos para evaluar la vulnerabilidad****Figura 2**

Mapa conceptual métodos para evaluar la vulnerabilidad(Elaboración propia)



Métodos analíticos

La evaluación de la vulnerabilidad de edificios existentes por medio de los métodos analíticos se basa en los mismos principios utilizados para el diseño de construcciones, esto quiere decir que los edificios poco dúctiles como los construidos en mampostería o muros estructurales que no son construidos con el refuerzo adecuado, son aquellos elementos que llegan a presentar grandes deformaciones durante los terremotos, pueden ser evaluados bajo cargas estáticas y en el rango elástico debido a que dichas estructuras no tienen la capacidad de experimentar grandes deformaciones plásticas sin antes fallar. Por el contrario, cuando un pórtico de hormigón armado se somete a movimientos sísmicos fuertes, alguna de sus vigas y columnas pueden llegar a tener deformaciones muy importantes en el rango plástico y, por lo tanto, un análisis dinámico elástico llega a ser un requisito indispensable para valuación confiable de su vulnerabilidad. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

La literatura disponible para la evaluación de estructuras existentes por métodos analíticos se concentra, primordialmente, en la modelización de edificios de hormigón armado y se diferencian entre sí por (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994):

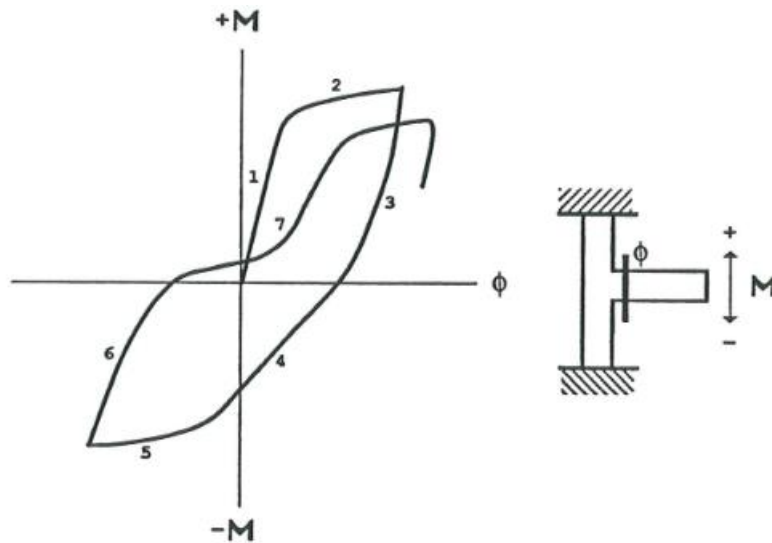
1. El modelo mecánico utilizado para representar el comportamiento histérico del hormigón armado.
2. El indicador de daño utilizado para cuantificar la degradación de los elementos estructurales de la estructura misma.

MODELOS HISTÉRICOS DEL HORMIGÓN ARMADO

El modelo utilizado debe ser capaz de reproducir las deformaciones cíclicas inelásticas experimentada por sus elementos debido a las cargas dinámicas aplicadas. La selección de este modelo depende básicamente en dos principios fundamentales, la precisión que se espera de los resultados y el costo total del análisis. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

Figura 3

Comportamiento histérico del hormigón armado (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)



1. Proceso de carga, el comportamiento es elástico hasta el punto de plastificación
2. Comportamiento inelástico
3. Proceso de descarga, luego del cual queda una deformación permanente como consecuencia del daño producido durante la fase anterior
4. Proceso de carga en el otro sentido, el comportamiento es elástico hasta el punto de plastificación
5. comportamiento inelástico
6. Proceso de descarga
7. Proceso de Carga en una dirección en el cual se excedido previamente e punto de la plastificación. Este consiste de dos ramas: la primera representa la fase durante la cual se cierran las grietas y en la segunda se observa un incremento considerable de la rigidez, al entrar de nuevo el material en el rango elástico.

Esta desviación de la rama de carga elástica se observa en la práctica, únicamente en los elementos sometidos a grandes esfuerzos de cortantes

2A. INDICADORES DE DAÑO A NIVEL DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

Los indicadores de daño son las funciones que permiten relacionar la respuesta calculada para una estructura, con el daño de la misma y pueden ser definidos a nivel de estructura o elementos individuales. Los indicadores de daño definidos a nivel de la estructura hacen uso de la respuesta global de la misma como, por ejemplo, los desplazamientos de los pisos, el cortante en la base, el trabajo realizado por las cargas aplicadas, etc. El cálculo de estos indicadores es generalmente simple, sin embargo, no proporcionan la información suficiente para aquellas estructuras en las que el daño tiende a ser localizado. Los indicadores de daño definidos a nivel de los elementos estructurales hacen uso de la respuesta calculada para dichos elementos como por ejemplo las rotaciones en la rótula plástica la degradación de la capacidad de carga etc. Estos indicadores proveen información más detallada sobre el daño de la estructura, sin embargo, tienden a ser más difíciles de calcular. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

El indicador de daño más ampliamente utilizado es la ductilidad de rotación, la cual es el factor entre la máxima rotación en el extremo del elemento y la rotación para el punto de plastificación.

Otro indicador de daño comúnmente utilizado es la ductilidad de curvatura, la cual se define de forma similar a la anterior, con la diferencia de que la variable de rotación se reemplaza por la variable de curvatura. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

Los indicadores de daño también deben ser capaces de estimar la fatiga producida por las cargas cíclicas para lo cual se propone el factor de daño DR que se define como la relación entre la rigidez de la rama elástica y la rigidez secante reducida para el máximo desplazamiento. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

2B. INDICADORES DE DAÑO A NIVEL DE ESTRUCTURA.

Los indicadores de daño a nivel de la estructura no proporcionan la información suficiente para los casos en los cuales el daño de la estructura tiende a ser localizado. sin embargo, para propósitos generales, cómo pueden ser la evaluación del riesgo sísmico o la toma de decisiones, se hace necesario disponer de un único valor que refleje la calidad o la vulnerabilidad global de la estructura. Un procedimiento utilizado los casos para los que se ha hecho un análisis detallado del daño en los elementos estructurales, es el de combinar, de alguna forma los índices de daño obtenidos para dichos elementos y calcular un índice global de daño para toda la estructura. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

TITULO A.10. EVALUACIÓN E INTERVENCIÓN DE EDIFICACIONES CONSTRUIDAS ANTES DE LA VIGENCIA DE LA PRESENTE VERSIÓN DEL REGLAMENTO.

Capitulo que consiste en establecer criterios y procedimientos para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una edificación, diseñadas y construidas antes de la versión del presente reglamento (AIS, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010 , 2010). Mediante:

- Determinación del índice de sobreesfuerzo individual de todos los elementos estructurales de la edificación.
- Formulación de hipótesis de secuencia de falla basado en la línea de menor resistencia.
- Definición del índice de sobreesfuerzo general de la edificación.
- Determinación del Índice de flexibilidad general de la edificación. (AIS, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010 , 2010)

El índice de sobreesfuerzo corresponde a el cociente entre las solicitaciones equivalentes y las resistencias efectivas. El índice de sobreesfuerzo de los elementos corresponde al calculado para cada uno de los elementos estructurales, mientras que el índice de sobreesfuerzo de la estructura corresponde al mayor de los obtenidos durante el análisis de los elementos teniendo en cuenta la importancia dentro de la resistencia general de la edificación.

El índice de flexibilidad está dado por el cociente entre la deflexión o deriva obtenida del análisis de la estructura y la permitida por el reglamento, este índice refleja la susceptibilidad de la estructura a tener deflexiones o derivas excesivas con respecto a las permitidas por el reglamento. El índice de flexibilidad de piso corresponde al cálculo anteriormente descrito para cada uno de los pisos, mientras que el índice de flexibilidad de la estructura corresponde a el mayor de los índices de piso.

MÉTODOS SUBJETIVOS

Debido a que el número de edificios que existen en una zona urbana puede llegar a ser muy grande, se ha visto la necesidad de desarrollar métodos que permitan un cálculo rápido de la vulnerabilidad. En teoría, estos métodos no son desarrollados para obtener una valoración precisa de la vulnerabilidad edificios sino, más bien, para dar una idea sobre el comportamiento sísmico que se pueden esperar de toda una zona urbana como herramienta imprescindible en los planes de mitigación de desastres.

Una de las características más importantes de estos métodos es la de introducir la opinión subjetiva del experto y la utilización de datos empíricos como fuente de conocimiento para la evaluación de la vulnerabilidad

Generalmente, los métodos subjetivos hacen uso de formularios de encuesta o de levantamiento, los cuales son rellenados por el personal capacitado durante las investigaciones de campo. existen básicamente dos tipos de formularios: de levantamiento de daños y de levantamiento de vulnerabilidad. los primeros se utilizan para recoger los datos de daño de las estructuras después de ocurrir un terremoto. estos datos se utilizan para múltiples propósitos como por ejemplo para saber a cuánto ascienden las pérdidas materiales o para el estudio de la vulnerabilidad a las estructuras por medio de un análisis estadístico. (Caicedo, Barbat, Canas, & Aguiar, 1994)

Los segundos se utilizan para recoger los datos sobre las características de las estructuras, tales como, sus dimensiones, tipo de material etc., necesarios para la determinación de la vulnerabilidad.

En la actualidad la pérdida de bienes materiales y de vidas humanas se encuentra en descenso a pesar del avance que hay en la ingeniería estructural y sísmica. Todo esto a pesar de que los diferentes códigos sísmicos a lo largo del mundo sean cada vez más exigentes, la población continúa aumentando de manera vertiginosa y con este las malas prácticas de la Ingeniería y la construcción.

Los principales estudios de amenaza y vulnerabilidad se han llevado a cabo desde la 1990 a cargo de entes muy importantes, tanto de carácter público como privado, tales como la Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Integral S.A, INGEOMINAS, por solicitud de ISA y EEPPM, utilizados para la elaboración de importantes proyectos como la Hidroeléctrica del río Cauca, entre otros. Este desarrollo cronológico a permitido fundamentar e introducir a la ciudad de Medellín en un marco tectónico y sísmico del departamento a partir de información básica, pero de gran importancia que permitiría la creación de planes de contingencia por el caso de una eventualidad de tipo sísmico. (Microzonificación, 2006)

En 1993 se publicó el “Catalogo Histórico Sísmico para Medellín” que contiene 93 páginas, dentro de las cuales incluye la compilación de los sismos ocurridos en la ciudad, sino también de los daños ocurridos tras el paso de ellos. Este libro fue realizado por planeación metropolitana, Alcaldía de Medellín, Proyecto prevención de desastres, Programa de las naciones unidas para el desarrollo PNUD. (Microzonificación, 2006)

“Estudio de la amenaza, zonificación geotécnica, vulnerabilidad y riesgo sísmico para Medellín”, fue llevado a cabo por la Universidad EAFIT con la financiación de PNUD, para la elaboración más específica de la amenaza sísmica en la ciudad, durante el cual

se realizó una recopilación geológica y geotécnica de los suelos presentes en la ciudad de Medellín y se dispone esto para realizar unos lineamientos para la elaboración de una futura microzonificación, también se llevaron a cabo estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico para luego llegar a la conclusión de que “Un sismo de periodo de retorno de 32 años y una probabilidad de ocurrencia del 80% en 50 años, similar al ocurrido en 1979, podría generar en una ciudad con las características de Medellín de 1992, unas pérdidas valoradas en 300 millones de Dólares. (Microzonificación, 2006)

La “Microzonificación sísmica del Valle de Áburrea y definición de riesgo por movimientos de masa e inundación en el Valle de Áburrea” tuvo lugar entre 2001 y 2002, llevada a cabo por el GSM para el Área metropolitana. Se llevaron a cabo estudios de neotectónica específicamente en las fallas ubicadas en el suroccidente del valle, para luego dar lugar a la evaluación de amenaza sísmica a lo largo de todo el valle, lo que permitió identificar la diferencia de amenaza entre los municipios de suroccidente y del nororiente. Con la ayuda de estudios geológicos se obtuvo un mapa con la geología detallada en escala 1:10.000 y una microzonificación en cada uno de los municipios, junto con la selección de los lugares donde había una mayor posibilidad de deslizamientos o inundaciones y unas respectivas pruebas sociológicas en esos sectores. Además, se instaló la Red Acelerográfica del Valle de Áburrea. (Microzonificación, 2006)

Figura 4

Marco conceptual de un enfoque holístico para la evaluación del riesgo de desastres

(Carreño et al.,2007^a;Cardona & Barbat,2000;Carreño et al.,2007b)

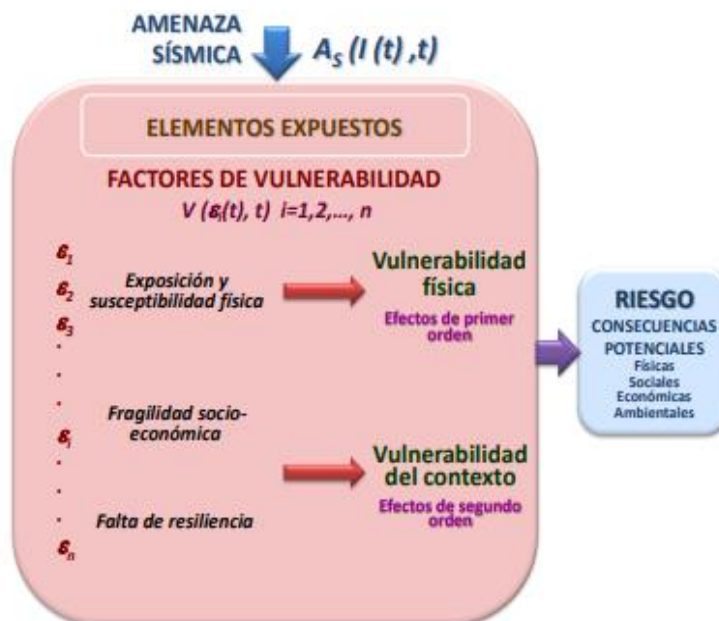


Figura. 4. Marco conceptual de un enfoque holístico para la evaluación del riesgo de desastres

(Carreño et al.,2007^a;Cardona & Barbat,2000;Carreño et al.,2007b)

En el VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica llevado a cabo en Bogotá el pasado 27 de mayo de 2015, se expone la “Estimación holística del riesgo sísmico – nuevos enfoques”

Mediante este artículo se expone la utilización de la teoría de los conjuntos difusos, para la estimación del riesgo sísmico, de una manera interdisciplinaria, que incluye la estimación del daño en la estructura, las pérdidas económicas, el número de víctimas, todo esto esquematizado en la siguiente figura. (Cardona & C, 2015)

A si mismo se han presentado diferentes estudios que dan prioridad a Edificaciones pertenecientes a determinados Grupos de Importancia, como lo es el caso de los edificios Educativos construidos antes de la normativa vigente, con el fin de que las autoridades puedan brindar una respuesta programada para la adaptación sismorresistente de los edificios que así lo requieran. (Pizarro, Tonrello, Aguera, & Gioacchini, Vol26, N.3,2021)

En la revista Internacional de Ingeniería de estructuras se plantea por medio de dos métodos cualitativos, la evaluación de el nivel de seguridad sismorresistente de 4 colegios ubicados en el Centro-Norte de la provincia de Mendoza, en Argentina, donde se encuentra un alto riesgo sísmico. En este estudio se considera la aplicación del Índice de Vulnerabilidad adecuado a los edificios educacionales y la “Determinación visual rápida” del FEMA, lo anterior con el fin de darle mayor valides a los estudios. (Pizarro, Tonrello, Aguera, & Gioacchini, Vol26, N.3,2021)

MÉTODO DEL ÍNDICE PRIORITARIO

Mediante la aplicación del método del Índice Prioritario, se llevo a cabo un inventario de escuelas de Medellín, Itagüí y Sabaneta. Este estudio permitió priorizar en un periodo corto de tiempo un grupo de 82 edificaciones, identificando aquellas que tienen una mayor vulnerabilidad y que por lo tanto requieren de una evaluación de vulnerabilidad sísmica detallada. (Zora & Acevedo, (2019))

El índice prioritario fue propuesto por Hassan y Sözen (1997) para edificios de concreto reforzado de baja altura, con niveles bajos en el detallamiento del refuerzo y con la mayoría de los muros de mampostería simple. El índice prioritario se calcula con información simple que se puede obtener en un trabajo de campo: áreas de secciones transversales de elementos estructurales y áreas de piso. Hassan y Sözen (1997) definieron el índice prioritario (PI) como la suma del índice de muro (WI) y el índice de columna (CI):

$$PI = WI + CI \quad (1)$$

El índice de muro es la relación entre el área transversal efectiva de muro en la dirección más débil en la base del edificio y el área total de piso por encima de la base de la estructura. El índice de columna es la relación del área transversal efectiva de columna en la base de la estructura con respecto al área de piso total por encima de la base. Se consideran áreas efectivas el 100% del área de muros de concreto reforzado,

el 10% del área de muros no reforzados y el 50% del área de columnas; estos porcentajes representan el aporte de resistencia y rigidez de cada elemento estructural. Las ecuaciones 2 y 3 corresponden a los índices de muro y de columna, donde ΣA_C es el área total de sección transversal de columnas en el nivel inferior, ΣA_{CR} representa el área total de sección transversal de muros de concreto reforzado en el nivel inferior en la dirección más débil, ΣA_{NR} representa el área total de sección transversal de muros de mampostería no reforzada en el nivel inferior en la dirección más débil y ΣA_{PT} es el área total de piso por encima de la base del edificio. (Zora & Acevedo, (2019))

$$WI = \frac{\Sigma A_{CR} + \frac{\Sigma A_{NR}}{10}}{A_{PT}} * 100 \quad (2)$$

$$CI = \frac{\Sigma A_C}{A_{PT}} * 100 \quad (3)$$

El Índice Prioritario define tres niveles de daño de acuerdo al valor del índice de la siguiente manera: daño severo o colapso ($PI \leq 0,25$), daño moderado ($0,25 \leq PI \leq 0,50$) y daño leve o sin daño ($PI > 0,50$).

METODOLOGÍA DE HURTADO Y CARDONA

Fue llevada a cabo por los ingenieros Hurtado y Cardona en 1990 como proposición para el cálculo de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de 1 y 2 niveles, basándose en:

- Determinar la longitud de los muros resistentes a cargas laterales en las direcciones principales
- Calcular la resistencia a cortante utilizando la menor longitud de muros con la ecuación

$$VR = L e v \quad (1)$$

Donde:

VR Cortante resistente

L Longitud de los muros

e Espesor de los muros

v Valor de la resistencia a cortante de los muros

- Calcular el peso de la edificación que es resistido por la estructura. W
- Calcular el coeficiente sísmico resistente, CSR correspondiente a la relación entre la resistencia a cortante más desfavorable y el peso de la estructura
- A partir del espectro de respuesta escogido, determinar el valor del coeficiente sísmico exigido a la estructura, CSE
- Calcular la demanda de la ductilidad, DD, mediante la ecuación

$$DD = \frac{CSE}{CSR} \quad (2)$$

- Determinar la capacidad de ductilidad CD según la tipología estructural, tomando como base el valor R_o del NSR-98. Recomendando un valor de 1.0 para mampostería no confinada y 1.5 para mampostería confinada.
- Clasificar y dibujar los daños de una manera cualitativa de acuerdo con la escala de la tabla 1, que se encuentra basada en fundamentos teóricos.

Tabla 1. Clasificación de los daños en función de la demanda de la ductilidad

Categoría y estado de daños	Criterio con relación al valor de la demanda de ductilidad (DD)
1. Ninguno	$DD < 0.50 CD$
2. Menores	$0.50 CD < DD < 0.75 CD$
3. Moderados	$0.75 CD < DD < 1.00 CD$
4. Mayores	$1.00 CD < DD < 1.50 CD$
5. Totales	$1.50 CD < DD < 2.00 CD$
6. Colapso	$2.00 CD < DD$

- ✓ Ninguno: Sin Daños.
- ✓ Menores: Daños menores en elementos arquitectónicos.
- ✓ Moderados: Daños generalizaos en los elementos arquitectónicos y daños menores en los elementos estructurales.
- ✓ Mayores: Daños generalizados en elementos estructurales y arquitectónicos.
- ✓ Totales: Daños en la estructura no reparables, por lo tanto, la edificación debe ser demolida y reemplazada.
- ✓ Colapso: Edificación total o parcialmente colapsada por inestabilidad.

Esta metodología fue adoptada en Colombia desde sus inicios para evaluar la vulnerabilidad de casas de uno y dos niveles con los requerimientos de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1984 (CCCSR-84). Tiene una fácil adaptación a los

efectos sísmicos regionales y efectos locales pero no considera las diferentes irregularidades en planta y en altura, habiendo la posibilidad de ajustarse con la NSR-98 en los coeficientes que modifican el coeficiente de disipación de energía básico R_b . (Maldonado & Chio, 2008).

MÉTODO FEMA 154

Es una metodología para la evaluación visual rápida de edificios debido a una amenaza sísmica potencial (RVS), la técnica fue desarrollada por un grupo de personas relacionadas con el sector de la construcción, como lo fueron oficiales e inspectores de edificios, agencias de gobierno y propietarios de edificios del sector privado, lo que llevo a tener un equipo de interdisciplinario, y que la evaluación pueda desarrollarse a cualquier tipo de edificios, mas sin embargo su principal propósito radica en :

- Edificios diseñados y construidos antes del amparo de diseños sísmicos pertinentes.
- Edificios cuya cimentación se encuentre sobre suelos blandos.
- Edificios con características que contribuyen de manera negativa en su posible respuesta sísmica.

Tras la identificación de los edificios con características probablemente peligrosas, debe ser evaluado por un profesional con experiencia en diseño sísmico, para llegar a la conclusión de si es o no potencialmente peligroso. (Maldonado & Chio, 2008).

El método RVS se encuentra fundamentada en estudios de evaluación de las características principales de las edificaciones, con ayuda de un formulario que se

diligencia desde la parte exterior de la edificación, en el cual se incluyen la información que permite la identificación del edificio, tales como ubicación, número de pisos, año de construcción, uso, tamaño, el tipo de suelo y otras variables relacionadas con el comportamiento sísmico, para luego desarrollar un puntaje numérico.

Escala:										Dirección _____			
										Otras características _____			
Nº pisos _____		Año de Const _____		Observador _____		Fecha _____		Área total planta (m ²) _____					
Nombre del edificio _____		Norma de ejecución _____		FOTO									
OCUPACIÓN DEL SUELO				TIPO						Número de Personas			
Asamblea Comercial Emerg.	Gobierno Histórico Industrial	Oficina Residencial Escuela		A Roca dura	B Roca promedio	C Suelo denso	D Suelo Fuerte	E Suelo suave	F Suelo pobre	0-10 101-1000	11-100 1000+		
PUNTAJÓN BÁSICA, MODIFICADORES, Y PUNTAJÓN FINAL, S													
TIPO DE EDIFICIO	S1 (MRF)	S2 (BR)	S3 (LM)	S4 (RC SW)	S5 (URM INF)	C1 (MRF)	C2 (SW)	C3 (URM INF)	PC1 (TU)	PC2 (FD)	RM1 (RD)	RM2 (RD)	URM
Puntuación básica	4,6	4,8	4,6	4,8	5,0	4,4	4,8	4,4	4,4	4,6	4,8	4,6	4,6
Altura media) De 4-7 pisos)	0,2	0,4	N/A	0,2	-0,2	0,4	-0,2	-0,4	N/A	-0,2	-0,4	-0,2	-0,6
Gran Altura (más de 7 pisos)	1,0	1,0	N/A	1,0	1,2	1,0	0,0	-0,4	N/A	-0,2	0,0	0,0	N/A
Irregularidad vertical	-2,0	-2,0	N/A	-2,0	-2,0	-1,5	-2,0	-2,0	-1,5	-2,0	-1,5	-1,5	-1,5
Irregularidad horizontal	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
Pre-Reglamento	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Posterior al Reglamento	0,4	0,6	N/A	0,6	N/A	0,6	0,4	N/A	0,2	N/A	0,2	0,4	0,4
Suelo tipo C	-0,8	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,6	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2	-0,4	-0,2	-0,4
Suelo tipo D	-1,4	-1,2	-1,0	-1,4	-0,8	-1,4	-0,8	-0,8	-0,8	-1,0	-0,8	-0,8	-0,8
Suelo tipo E	-2,0	-2,0	-2,0	-2,2	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-1,8	-2,0	-1,4	-1,6	-1,4
PUNTAJÓN FINAL, S													
COMENTARIOS										Requiere Evaluación Detallada			
										Sí NO			

Figura 1. Formulario para determinar la vulnerabilidad usando el método FEMA

Después de determinar un presupuesto y un costo estimado se procede a tomar la decisión de realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica con este procedimiento, en una determinada localidad o a un grupo de edificios, es necesario plantear el desarrollo de un pre-planteamiento que debe incluir la descripción completa de todas las edificaciones a las cuales se les vaya a realizar el estudio y el detalle del proceso con el periodo en que se va a entrenar a los evaluadores. (Maldonado & Chio, 2008)

Con el fin de verificar la veracidad de la información suministrada por los diferentes evaluadores, se debe revisar con ayuda de los datos existentes de las edificaciones, las diferentes bases de datos los tipos de suelo que se encuentran en el área a evaluar. Seguidamente debe hacerse una revisión de los planos existentes si se encuentran disponibles, verificar al año, tipo de construcción e irregularidades (FEMA 154, 1988).

Para llenar el formulario se debe realizar una observación de la parte exterior y desde todos los lados posibles, para realizar un bosquejo de la planta y el exterior, para proseguir con la información sobre la identificación del edificio, la ocupación, es decir, el uso y el número de habitantes, el tipo de suelo y luego continuar con la identificación del sistema estructural resistente a cargas laterales y los materiales de la edificación que permitan dar un puntaje de peligrosidad estructural inicial que ira siendo modificado a manera que se tienen en cuenta las demás características que pueden afectar la edificación (Maldonado & Chio, 2008), finalmente se determinan el número de pisos para llegar a la puntuación final S (Score) y tomar la decisión de si se requiere o no de un estudio más detallado de la estructura. (FEMA 154, 1988).

En caso de que se tenga acceso al interior de la edificación, es posible constatar el tipo de construcción y las diferentes irregularidades en planta que se hagan presente.

Con el fin de evidenciar la calidad de la evaluación en caso de ser posible dejar en una grabadora de voz lo observado e incluso tomar una fotografía de la edificación.

(FEMA 154, 1988).

Tipos De Edificaciones:

- S1: Edificios de acero, pórticos resistentes a momento.
- S2: Edificios de acero, pórticos arriostrados.
- S3: Edificios de acero livianos.
- S4: Edificios de acero, pórticos con paredes de hormigón vaciados in situ resistentes a cortante.
- S5: Edificios de acero, pórticos con mampostería no reforzada y muros vaciados.
- C1: Edificios de hormigón, pórticos resistentes a momento.
- C2: Edificios con paredes de hormigón, resistentes a cortante.
- C3: Edificios de hormigón, pórticos con mampostería no reforzada y muros vaciados
- PC1: Edificios con sistema tilt-up.
- PC2: Edificios en hormigón prefabricado, pórticos.
- RM1: Edificios con mampostería reforzada, piso flexible y diafragmas en el techo.
- RM2: Edificios con mampostería reforzada, piso rígido y diafragmas en el techo.
- URM: Edificios con mampostería no reforzada, muros cargueros.

Información Del Suelo:

- Tipo A: Roca dura.
- Tipo B: Roca.
- Tipo C: Roca suave y suelo denso.
- Tipo D: Suelo rígido.
- Tipo E: Suelo blando.
- Tipo F: Suelo pobre.

Planificación Pre-Planteamiento:

- Identificar cuáles son los edificios que requieren evaluación o a simple vista son los mejores demandantes.
- Es viable considerar zonas con una elevada densidad de edificios, pues son las que tienden a tener mayor riesgo sísmico.
- Es importante considerar las zonas antiguas y con gran patrimonio histórico con mampostería no reforzada (URM).
- Revisar los mapas de los perfiles de suelos.
- Adquirir información que pueda dar previo aviso acerca de la potencialidad de las fallas o los posibles deslizamientos.
- En caso de presentarse la oportunidad, comunicarse con los diseñadores y constructores para realizar ajustes en cuanto se termine la evaluación del método como tal.

Formulario De Recolección De Datos:

- Los formularios se encuentran diseñados para 3 tipos de amenaza sísmica: alta, intermedia o baja.
- La puntuación final S (Score) por lo general da como resultado valores que oscilan entre 0 y 7, teniendo en cuenta a mayor puntaje es mejor el desempeño sísmico de la edificación.
- Cuando la puntuación final S tiene un valor inferior a 2, se determina que es necesaria la evaluación detallada de la estructura.

Tipo De Suelo:

- En caso que el suelo sea Tipo F, no se puede emplear esta metodología.
- Si no se posee la información suficiente para determinar el tipo de suelo, debe tomarse como referencia la más cercana.
- Determinar suelo Tipo D en caso de que no se posea ningún tipo de información de la geología local.
- Si los edificios cuentan con 1 o 2 niveles, o poseen una altura inferior a los 8 metros, puede asumirse un suelo tipo D.

Tipos De Ocupación:

- Asamblea: Lugares de reunión pública, donde cabe la posibilidad de que 300 o más personas se reúnan en una misma habitación. Ejemplos: Teatros, auditorios, centros comunitarios, iglesias y salas de espectáculos.

- Comercio: Empresas minoristas y mayoristas, instituciones financieras, restaurantes, parqueaderos y almacenes de luz.
- Servicios de emergencia: Cualquier instalación que pueda necesitarse en caso de una gran catástrofe, incluidas las estaciones de policías, bomberos, hospitales y centros de comunicaciones.
- Gobierno: Constituido por los locales estatales y federales que no sean relacionados con emergencias.
- Histórico: Están sujetos a la variación, pues dependen de las ordenanzas.
- Industria: Las fábricas, plantas de ensamblaje, grandes almacenes y la industria pesada de instalaciones.
- Oficinas: Edificios típicos, algunas residencias modificadas.
- Residencial: Edificios residenciales, tales como, casas, adosados, dormitorios, hoteles, moteles, apartamentos, condominios, asilos.
- Escuela: Instalaciones educativas públicas y privadas desde jardín de infancia hasta universidades.

Modificadores De Puntuación:

- Los edificios de mediana altura contienen entre 4 y 7 niveles.
- Los edificios de gran altura tienen más de 7 pisos.
- La irregularidad vertical corresponde a edificios escalonados, en ladera o sobre suelos blandos.
- La irregularidad en planta incumbe a edificios con esquinas reentrantes o con presencia de grandes excentricidades.

- Pre- reglamento aplica únicamente a edificaciones situadas en zona de amenaza sísmica intermedia o alta.
- Posterior al reglamento aplica a todas las edificaciones diseñadas y construidas antes de la vigencia del reglamento que rige en esos momentos, incluidas las ampliaciones en planta o altura.
- Tipos de suelo C, D y E.

Puntuación Final S (Score):

- Correspondiente a la suma algebraica de la puntuación básica brindada por el tipo de edificación y los modificadores correspondientes de cada edificio.
- Determinar si se requiere o no de una evaluación detallada.
- El resultado de la puntuación S corresponde a la probabilidad de colapso aproximada de la estructura, si la puntuación $S = 3$, entonces existe la probabilidad aproximada de 1 en 1000 de colapsar ante movimientos sísmicos iguales o superiores al MCE.

MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

El método propuesto por Benedetti y Petrini surgió a causa de los múltiples sismos ocurridos en Italia, que más tarde fue adoptado por el Gruppo Nazionale per la difesa dai Terremoti (GNDT) desde el año de 1984, con el principal motivo de identificar la vulnerabilidad sísmica de forma rápida en edificaciones, teniendo una importante acogida en países como España, Ecuador, Venezuela, Chile y México. (Maldonado & Chio,

2008). El método se encuentra basado principalmente por expertos y permite a partir de los parámetros más relevantes la edificación, identificar la predisposición de una estructura a sufrir daño tras un evento sísmico (Benedetti & Petrini, 1984), las principales características que contribuyen a disminuir la resistencia sísmica son:

- Configuración en planta y en elevación.
- Tipo de cimentación.
- Elementos estructurales y no estructurales.
- Estado de conservación y calidad de los materiales.
- Altura entre pisos.
- Cubierta o techo.
- Año de construcción
- Distribución y espaciamiento entre muros.

La principal característica de este método, es que se puede implementar para edificios en hormigón armado y en mampostería no estructural, sistema más típico en las edificaciones de baja altura que hacen parte de la presente revisión bibliográfica y caso ejemplo.

La vulnerabilidad del edificio Iv es asignada de la forma convencional, haciendo uso de un índice que diferencia a las edificaciones que se rigen por una normatividad sísmica vigente y las que por el contrario tienen características de baja calidad, para de manera rápida determinar la capacidad de la estructura a soportar una sollicitación sísmica.

Cada uno de los parámetros que se evalúan se les asigna una calificación que va desde la A, como muy buena, hasta D, como la peor de ellas, cada una de estas variables consta de un valor numérico con su respectiva importancia asumida con anterioridad (K_i) por expertos en el tema, que varía dependiendo del parámetro. De la misma manera cada parámetro posee un peso que ha sido atribuido (W_i) que es el reflejo de la importancia de cada uno a la hora de evaluar el sistema resistente de la edificación. (Maldonado & Chio, 2008).

Esta metodología evalúa la vulnerabilidad para edificaciones de mampostería y de hormigón reforzado, y cada uno de estos tendrá sus pesos y clases particulares.

Tabla 1

Clasificación y peso de ponderación de ítems de vulnerabilidad para edificaciones de hormigón reforzado. (CNR, 1993)

N°	PARÁMETRO	K_i (A)	K_i (B)	K_i (C)	PESO W_i
1	Organización del sistema resistente.	0	1	2	4
2	Calidad del sistema resistente.	0	1	2	1
3	Resistencia convencional.	-1	0	1	1
4	Posición del edificio y cimentación.	0	1	2	1
5	Diafragma horizontales.	0	1	2	1
6	Configuración en planta.	0	1	2	1
7	Configuración en elevación.	0	1	3	2
8	Conexión entre elementos críticos.	0	1	2	1
9	Elementos de baja ductilidad.	0	1	2	1
10	Elementos no estructurales.	0	1	2	1
11	Estado de conservación.	0	1	2	2

Ecuación para el cálculo de la vulnerabilidad para edificios de hormigón reforzado.

$$I_v = \frac{(\sum_{i=1}^{11} K_i * W_i) + 1}{34} * 100 \quad (4)$$

El objetivo final se encuentra en determinar el porcentaje de daño (%D), basado en levantamiento de estructuras tras la ocurrencia de terremotos, para la creación de una base de datos de los mismos, bajo diferentes niveles de intensidad. Las funciones de vulnerabilidad se muestran en la siguiente ecuación.

$$\%D = a + b * I_v + c * I_v^2 + d * I_v^3 \quad (5)$$

Donde los valores correspondientes de a, b, c y d representan coeficientes obtenidos mediante regresiones experimentales y bases de datos, dependiendo de la intensidad del evento sísmico como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2

Valores de los coeficientes de las funciones de regresión para estructuras de Hormigón reforzado (CNR, 1993)

INTENSIDAD	a	b	c	d	Correlación (%)
VII	3.6	0.00027	0.00087	0	68.1
VIII	-6.1	1.1	0.0115	0.00013	96.1
IX	-49.8	6.2	-0.14	0.0019	91.5

Tabla 3

Clasificación y peso de ponderación de ítems de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería. (Benedetti & Petrini, 1984)

N°	PARÁMETRO	K_i (A)	K_i (B)	K_i (C)	K_i (D)	PESO W_i
1	Organización del sistema resistente.	0	5	20	45	1
2	Calidad del sistema resistente.	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional.	0	5	25	45	1.5
4	Posición del edificio y cimentación.	0	5	25	45	0.75
5	Diafragma horizontales.	0	5	15	45	1
6	Configuración en planta.	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación.	0	5	25	45	1
8	Conexión entre elementos críticos.	0	5	25	45	0.25
9	Elementos de baja ductilidad.	0	15	25	45	1
10	Elementos no estructurales.	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación.	0	5	25	45	1

La puntuación total es obtenida de la suma ponderada de cada parámetro, multiplicado por su respectivo peso, así la ecuación para hallar el índice de vulnerabilidad en edificios de mampostería es:

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i * W_i \quad (6)$$

Y el porcentaje de daño al igual en el cálculo de los edificios de hormigón reforzado depende de bases de datos y del levantamiento de estructuras después de terremotos

$$D\% = a_1 * I_v + a_2 * I_v^2 + a_3 * I_v^3 \quad (7)$$

Los valores de los coeficientes a_1, a_2, a_3 respectivamente se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 4

Valores de los coeficientes de las funciones de regresión para estructuras de mampostería. (Benedetti & Petrini, 1984)

INTENSIDAD	a_1	a_2	a_3	Correlación (%)
VI	0.0048	-0.0014	0.000086	80
VII	0.0170	-0.0025	0.00014	89
VIII	-0.0047	0.0012	0.00019	88
IX	-0.15	0.028	-0.000039	91

SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Organización del sistema resistente

El principal objetivo de este parámetro es el de estimar la eficacia de la construcción según su sistema de mampostería, clasificándolo de acuerdo a su vulnerabilidad en:

- Calificación A: Edificaciones de mampostería confinada en todas las plantas.
- Calificación B: Edificios con vigas de confinamiento sin columnas o columnas sin vigas y columnas de confinamiento no presentes en todas las plantas.
- Calificación C: No tiene confinamiento, solo hay presencia de muros ortogonales bien fijos.
- Calificación D: Edificaciones con paredes ortogonales no ligados.

Calidad del sistema resistente.

Es el encargado de la calificación de la calidad correspondiente a la mampostería según lo homogéneo que se encuentre el material a lo largo del muro, ya que dependiendo de esta característica se evidencia si la distribución de esfuerzos peligrosos para la estructura se encuentra de manera equitativa. (Benedetti & Petrini, 1984)

- Calificación A: Mampostería de muy buena calidad, con piezas homogéneas y con buen estado del ligamento.
- Calificación B: Mampostería en excelente calidad, con piezas no muy homogéneas, pero con buen ligamento.

- Calificación C: Mampostería de mala calidad, con piezas homogéneas o no homogéneas y buen ligamento.
- No cumple con ningún requerimiento.

Resistencia convencional.

Este parámetro supone que el comportamiento de la estructura es en forma de “cajón”, a partir de una ecuación se evalúa el cortante resistente, utilizando el concepto de coeficiente Sísmico (C) mediante:

$$C = \frac{\alpha_o * \tau_k}{q * N} * \sqrt{1 + \frac{q * N}{1.5 * \alpha_o * \tau_k * (1 + \gamma)}} \quad (8)$$

En Dónde:

$\alpha_o = \frac{A}{A_T}$; A corresponde a el mínimo entre Ax y Ay.

$\gamma = \frac{B}{A}$; B corresponde al máximo valor entre Ax y Ay.

$q = \frac{(A+B)*h}{A_T} * P_m + P_s$; Peso de cada piso

N: Número de pisos.

A_T : Área total en planta [m²].

Ax y Ay: Área resistente de los muros en dirección “x” y “y” [m²].

τ_k : Resistencia a cortante de la mampostería $\left[\frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}\right]$.

h: Altura promedio entre pisos [m].

P_m : Peso específico de la mampostería $\left[\frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}\right]$.

P_s : Peso por unidad de área del diafragma $\left[\frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}\right]$.

La puntuación obtenida de este parámetro se obtiene de la relación entre el coeficiente sísmico (C) y el coeficiente sísmico de resistencia (\hat{C}) (Benedetti & Petrini, 1984), en Colombia este último corresponde al espectro elástico de aceleración S_a , que depende de su periodo de aceleración, el tipo de suelo, la importancia de la edificación y su coeficiente de amplificación del suelo, para recibir estas clasificaciones:

- Calificación A: Relación $\alpha = \frac{C}{S_a} \geq 1$.
- Calificación B: Relación $1 > \alpha = \frac{C}{S_a} \geq 0.6$.
- Calificación C: Relación $0.6 > \alpha = \frac{C}{S_a} \geq 0.4$.
- Calificación D: Relación $\alpha = \frac{C}{S_a} < 0.4$.

Posición del edificio y la cimentación:

Es el encargado de la clasificación de las principales influencias del suelo y la cimentación en relación a la sollicitación sísmica.

Pudiendo tomar datos a simple vista, siendo: la pendiente del terreno, ubicación de cota de la cimentación con respecto al edificio, la presencia de empujes laterales debido a taludes o terraplenes cercanos, calificándose de la siguiente manera:

- Calificación A: Terreno con pendiente inferior o igual al 10%, cimentación superficial en la misma cota del terreno y sin evidencia de empuje lateral.

- Calificación B: Corresponde al terreno con penitente entre el 20% y el 30%, cimentación superficial con diferencia de cota menor a 1 metro con respecto al edificio y sin presencia de empuje lateral
- Calificación C: Terreno suelto con pendientes entre el 10% y el 30% o terrenos estables con pendientes entre 30% y el 50%, cimentación superficial con diferencia de cota inferior a 1 metro con respecto al edificio, con peligro de empuje lateral.
- Calificación D: Terreno suelto con pendientes mayores al 30% o terreno estable con pendiente superior al 50%, con cimentación superficial con diferencia de cota mayor a 1 y con peligro de empuje lateral.

Diafragmas Horizontales:

Parámetro que garantiza la calificación entre las conexiones de los elementos horizontales, que sea pertinente para la correcta distribución de esfuerzos.

- Calificación A: Edificios con losas de cualquier tipo, que se encuentren es capacidad de satisfacer las siguientes condiciones:
 1. Uniformidad de cota en toda la losa en el plano.
 2. Relación entre área de vacíos y área total inferior al 30%.
 3. Conexión adecuada.
- Calificación B: Edificios como los de la calificación A, pero que no cumple con al menos una de las condiciones.
- Calificación C: Edificios con características de la calificación A, pero que no cumple con 2 de las condiciones nombradas.

- Calificación D: Edificios con las características de la calificación A, que no cumple con ninguna de las condiciones nombradas.

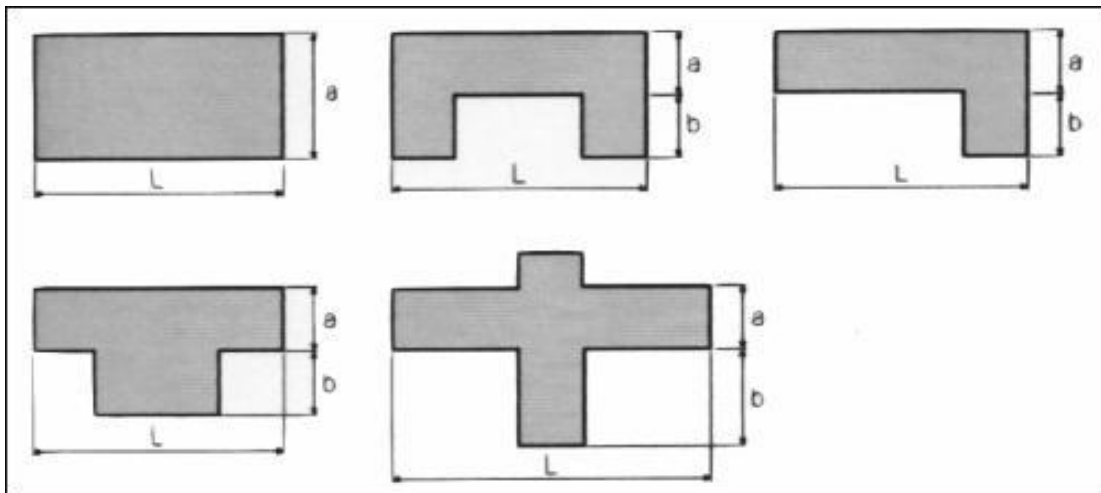
Configuración en planta:

La forma geométrica que tiene la planta del edificio es determinante en el comportamiento sísmico, convirtiéndose en un factor primordial para definir la vulnerabilidad de una estructura ante una sollicitación sísmica, haciéndose necesario el cálculo de dos parámetros $\beta_1 = a/L$ y $\beta_2 = b/L$

Figura 2

Configuraciones en planta en estructura.

(<http://webserver2.ineter.gob.ni/sis/vulne/cali/6.6.2.7-indice-vul.htm>)



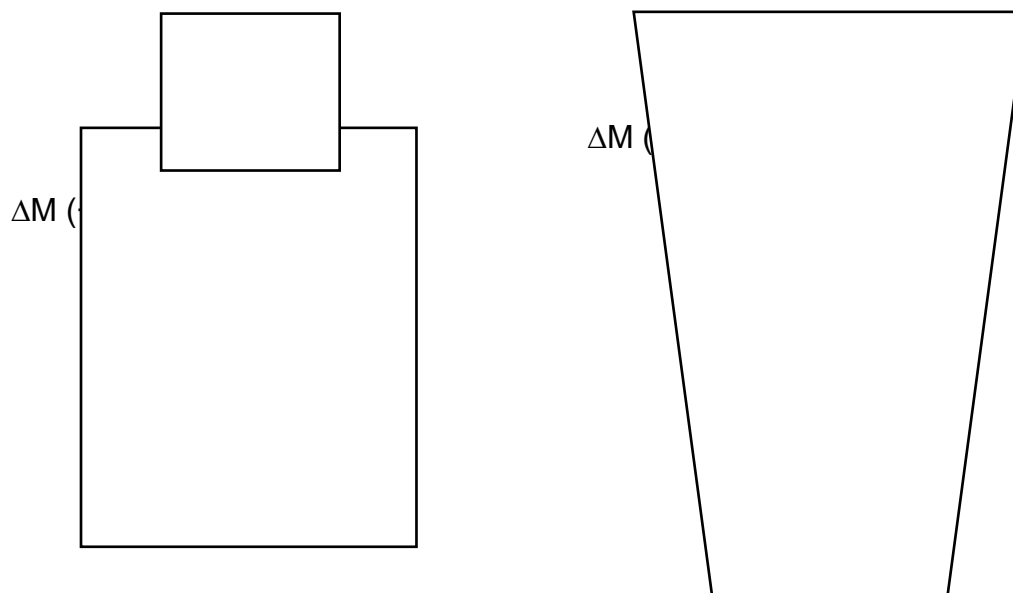
- Calificación A: Edificios con $\beta_1 \geq 0.8$ ó $\beta_2 \leq 0.1$.
- Calificación B: Edificios con $0.8 > \beta_1 \geq 0.6$ ó $0.1 < \beta_2 \leq 0.2$.
- Calificación C: Edificios con $0.6 > \beta_1 \geq 0.4$ ó $0.2 < \beta_2 \leq 0.3$.
- Calificación D: Edificios con $0.4 > \beta_1$ ó $\beta_2 > 0.3$.

Configuración en elevación:

Este parámetro es el encargado de calificar la edificación dependiendo de la variación de la geometría en altura entre dos niveles consecutivos, pudiendo tener valor positivos o negativos dependiendo de su crecimiento o decrecimiento. $[\pm \Delta M/M]$

Figura 3

Estructuras en elevación con crecimiento o disminución de masa.



En la figura anteriormente citada, la del lado izquierdo pertenece a un ΔM (-) pues se encuentra disminuyendo, mientras que la del lado derecho tiene un ΔM (+) pues aumenta la masa.

- Calificación A: Edificación con $[-\Delta M/M] < 10\%$ o edificación de un solo nivel.
- Calificación B: $10\% < [-\Delta M/M] < 20\%$.
- Calificación C: $[-\Delta M/M] > 20\%$.
- Calificación D: $[-\Delta M/M] > 0\%$.

Distancia máxima entre muros:

Este parámetro evalúa la estabilidad que tiene la edificación por medio de la cantidad de muros transversales u otros muros, ya que aportan rigidez que puede o no ser provechoso para la estructura, calificándolo de la siguiente manera.

- Calificación A: Edificación con $L/S < 15$.
- Calificación B: Edificación con $15 \leq L/S < 18$.
- Calificación C: Edificación con $18 \leq L/S < 25$.
- Calificación D: Edificación con $L/S \geq 25$.

Donde:

L: Espaciamiento de los muros transversales.

S: Espesor del muro que está entre los transversales.

Se debe escoger el valor más desfavorable de toda la estructura.

Tipo de cubierta:

Califica la capacidad que puede tener el tipo de cubierta de la edificación en caso de una sollicitación sísmica, de esta manera:

- Calificación A: Edificio con cubierta estable y provista de viga cumbreira o edificio de cubierta plana.
- Calificación B: Edificio con cubierta estable y bien conectada a los muros, pero sin viga cumbreira.
- Calificación C: Edificio con cubierta inestable y viga cumbreira.
- Calificación D: Edificio con cubierta inestable, pero sin viga cumbreira.

Elementos no estructurales:

Ante un sismo puede darse la caída de los diferentes elementos no estructurales que conforman la edificación, que podrían afectar una vida, pero como se está evaluando la vulnerabilidad de la estructura no tiene un grado de relevancia importante el caso en el que dañe a una persona, y por consiguiente las dos primeras calificaciones son iguales:

- Calificación A: Edificaciones sin barandales y sin cornisas, edificaciones con balcones que hagan parte del diafragma horizontal o sin balcones.
- Calificación B: Edificaciones sin barandales y sin cornisas, edificaciones con balcones que hagan parte del diafragma horizontal o sin balcones.
- Calificación C: Edificaciones con elementos no estructurales de pequeña dimensión no muy bien vinculados en la fachada.
- Calificación D: Estructuras con chimeneas, fachada mal vinculada, parapetos o diferentes adornos que presenten inconvenientes o probabilidades de peligro ante la ocurrencia de un sismo, balcones vinculados a la estructura después de la construcción de la misma no de muy adecuada manera.

Estado de conservación:

En este parámetro solo hay presentes una de las características que evalúa el estado de conservación:

- Calificación A: Muros en excelente estado, sin perturbaciones visibles.

- Calificación B: Muros con presencia de pequeñas fisuras, sin tomar en cuenta las fisuras ocasionadas por sismos anteriores.
- Calificación C: Muros con fisuras de abertura media correspondientes a 2 o 3 milímetros producidas por sismos o bien edificaciones que en sus muros halla presencia de fisuras, pero sin un deterioro muy importante.
- Calificación D: Muros en los cuales se evidencia gran deterioro o fisuras de aberturas superiores a los 3 milímetros.

Tabla 5

Comparación de Métodos basados en Índices de vulnerabilidad (Elaboración Propia)

Métodos Cualitativos para el cálculo de la vulnerabilidad sísmica	
Índice Prioritario	Índice de Vulnerabilidad
<ul style="list-style-type: none"> -Área de secciones transversales de elementos estructurales. -Áreas de piso 	<ul style="list-style-type: none"> - Organización del sistema resistente - Calidad del sistema resistente - Resistencia convencional <ul style="list-style-type: none"> - Posición del edificio y cimentación - Diagramas horizontales <ul style="list-style-type: none"> - Configuración en planta -Configuración en elevación -Conexión entre elementos críticos -elementos de baja ductilidad <ul style="list-style-type: none"> - elementos no Estructurales -Estado de conservación

ESTRUCTURACION Y CONFIGURACION ESTRUCTURAL DEL CASO EJEMPLO

La configuración del edificio influye en su capacidad y comportamiento ante eventos sísmico el tamaño su forma en planta y en altura además de sus componentes estructurales tiene un efecto significativo en su comportamiento ocasionando graves daños ante eventuales ataques sísmicos.

La vulnerabilidad sísmica de una estructura es una propiedad particular de si misma y depende de la peligrosidad del lugar. Los aspectos que afectan la vulnerabilidad sísmica de una edificación se encuentran los siguientes:

Aspectos geométricos

- Configuración geométrica irregular en la planta y en el alzado de la edificación.
- Grandes luces y pocas columnas.
- Distribución asimétrica o impropia de elementos de fachada.
- Uso excesivo de espacios abiertos.
- Ubicación asimétrica del núcleo de escaleras y de ascensores.
- Distribución errática de la tabiquería.

Aspectos constructivos

- Encofrado deficiente.
- Mala calidad de los materiales utilizados en la construcción.
- Protección deficiente contra el fuego.

- Incompatibilidad de los materiales utilizados.
- Falta de inspección eficiente.
- Mano de obra defectuosa.
- Uniones defectuosas de elementos prefabricados.
- Falta de unión apropiada entre los elementos estructurales y los tabiques de mampostería.
- Soldaduras defectuosas.
- Defectos del vaciado y del curado del concreto.
- Refuerzo inadecuado en las conexiones o juntas de los elementos de concreto armado.
- Falta de recubrimiento propiciando la corrosión.
- Conexiones metálicas defectuosas.

Aspectos Estructurales

- Tipología estructural,
- Tipo de material: acero, concreto armado, madera, albañilería, etc.
- Deficiencia en la estimación de las cargas.
- Deficiencia en el análisis y diseño estructural.
- Ductilidad disponible.
- Problemas torsionales.
- Cambios bruscos de rigidez: pisos blandos, columna corte, efecto de látigo
- Deformación lateral excesiva entre niveles contiguos.

- Distribución asimétrica de rigideces.
- Geometría irregular de la planta.
- Detalles de refuerzo estructural deficientes en las conexiones y armado de elementos estructurales
- Golpeteo o colindancia de edificaciones contiguas.
- Apoyos de vigas o tramos en puentes de tamaño insuficiente.

Aspectos del suelo

- Sismicidad de la zona
- Distancia a la fuente sísmica
- Magnitud del terremoto
- Características geotécnicas locales.
- Asentamientos del terreno.
- Licuefacción del suelo.
- Inestabilidad de taludes.
- Avalanchas.

Aplicación del método del índice de vulnerabilidad

El método realiza una calificación subjetiva de la edificación mediante encuestas, apoyándose en cálculos simplificados he identificado los parámetros más relevantes que controlan el daño estructural, su principal ventaja es que permite evaluar la vulnerabilidad sísmica en una zona urbana que no implique costos elevados para el desarrollo de la

investigación, fundamentada en datos reales de campo que permiten una alta credibilidad.

Se realizó el cálculo del índice de vulnerabilidad de una edificación en el municipio de Marinilla Antioquia barrio los rosales calle 40 N°30-155 , donde claramente presenta grandes deficiencias desde los aspectos geométricos, constructivos estructurales y de tipo de suelos, los cuales fueron mencionados anteriormente.

La edificación cuenta en su fachada principal con un solo nivel y en su fachada posterior con tres niveles esto debido a que se encuentra ubicada en zona de ladera y de alta pendiente para lo cual la hace más susceptible y de alto riesgo. En el trabajo de campo se pudo recolectar toda la información necesaria para la aplicación del caso ejemplo, medidas de campo , inspección de los parámetros a evaluar y registro fotográfico, con el fin de aplicar el método del índice de vulnerabilidad.

Figura 6

Fachada principal caso ejemplo



Figura 7

Fachada posterior caso ejemplo



ORGANIZACIÓN DEL SISTEMA

B	Edificios con vigas de confinamiento sin columnas o columnas sin vigas y columnas de confinamiento no presentes en todas las plantas.
---	---

	
<p>Basados en la inspección de campo realizada y considerando la organización del sistema estructura del caso ejemplo se evidencia un sistema combinado de vigas y columnas, adicionalmente muros de mamposteria que trabajan en conjunto.</p>	

N o.	PÁRAMETRO	PES O	CALIFICACIO N	Ki
1	Organización del sistema resistente.	1	B	5

CALIDAD DEL SISTEMA RESISTENTE

C	Mampostería de mala calidad, con piezas homogéneas o no homogéneas y buen ligamento.
---	--



La edificación evaluada cuenta con mampostería e: 12 cms en ambas direcciones y teniendo en cuenta que hace parte del sistema estructural con piezas de mala calidad se determina una calificación C.

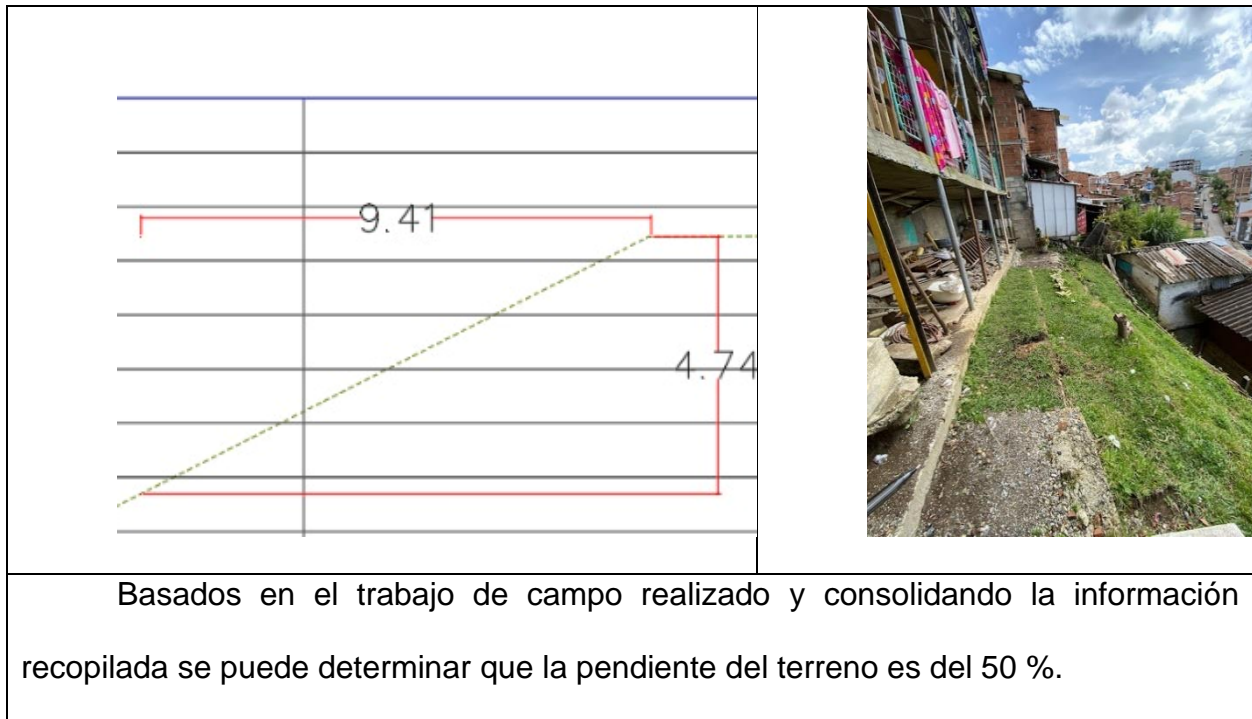
RESISTENCIA CONVENCIONAL

Material	Esfuerzo Cortante T/m^2
Ladrillo macizo, calidad regular	9
Piedra mal tallada	2
Ladrillo macizo, buena calidad	18
Bloque ladrillo, mortero cemento	18
Mamposteria nueva, ladrillo macizo	20
Mamposteria nueva, ladrillo/Bloque Hueco	18

Planta	Muros X	Muros
N°	m^2	Y m^2
1	2.64	2.07
2	2.77	2.5
Σ	5.41	4.58

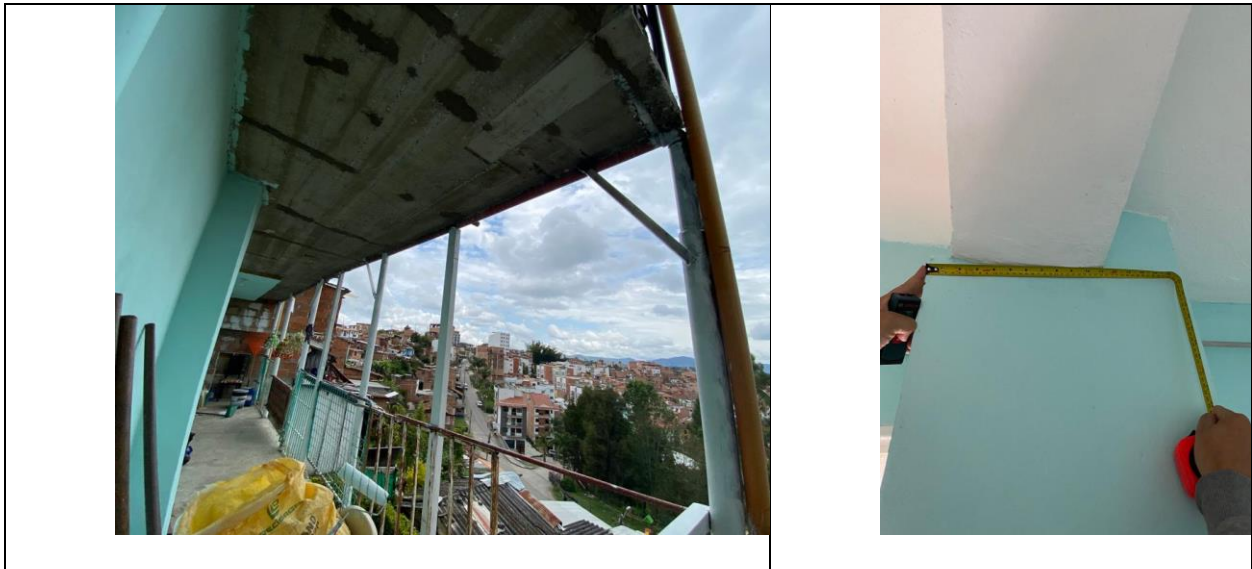
POSICION DEL EDIFICIO Y LA CIMENTACION

D	Terreno suelto con pendientes mayores al 30% o terreno estable con pendiente superior al 50%, con cimentación superficial con diferencia de cota mayor a 1 y con peligro de empuje lateral.
---	---



DIAFRAGMAS HORIZONTALES

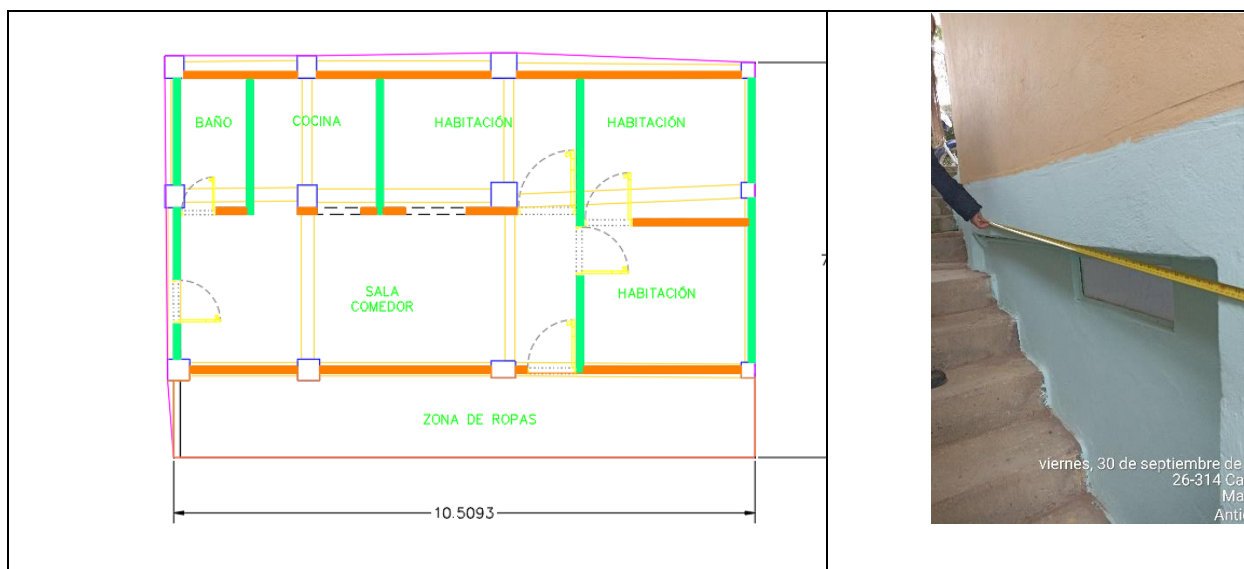
C	Edificios con características de la calificación A, pero que no cumple con 2 de las condiciones nombradas.
---	--



En la visita de campo realizada se identifica claramente la inadecuada conexión entre los elementos estructurales, losas con deficiencias en procesos constructivos. La relación de vacíos no es aplicable debido a la inexistencia de los mismo para lo cual se determina una calificación C.

CONFIGURACION EN PLANTA

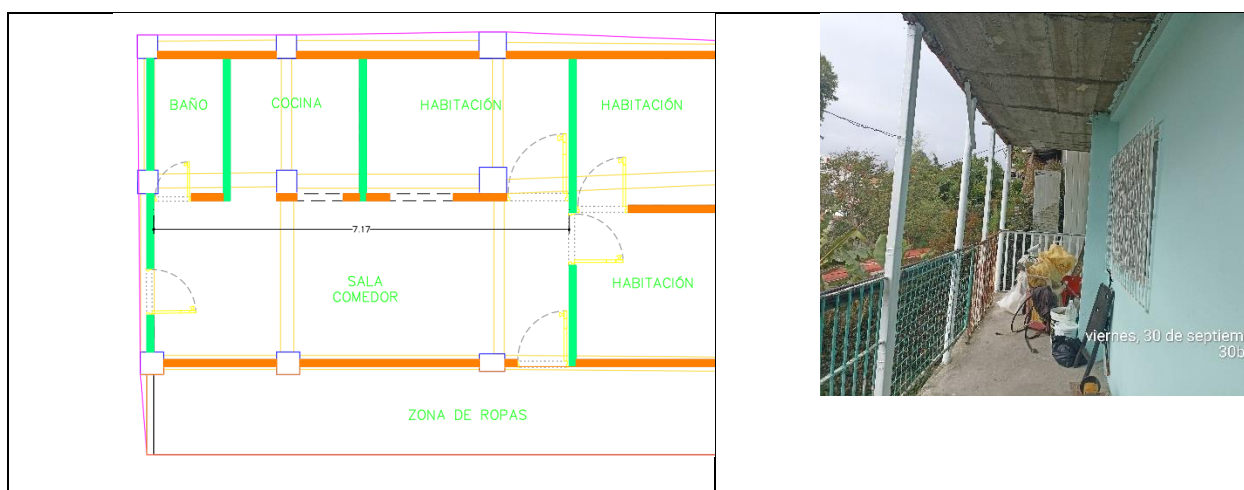
B	Edificios con $0.8 > \beta_1 \geq 0.6$ ó $0.1 < \beta_2 \leq 0.2$.
---	---



Se determina el parámetro de configuración en planta con base en el trabajo de campo y posterior análisis de la relación de sus dimensiones.

DISTANCIA MAXIMA ENTRE MUROS

D	Edificios con $L/S \geq 25$
---	-----------------------------



Se evalúan todas las distancias entre muros en relación a su espesor y debe calificar con el mas desfavorable.

TIPOS DE CUBIERTA

D	Edificio con cubierta inestable, pero sin viga cumbreira.
---	---



Se identifica una cubierta sin vigas cumbreira en algunos puntos apoyada en la mampostería y en otros casos en perfiles metálicos con claras deficiencias, la cubierta se califica como inestable.

ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

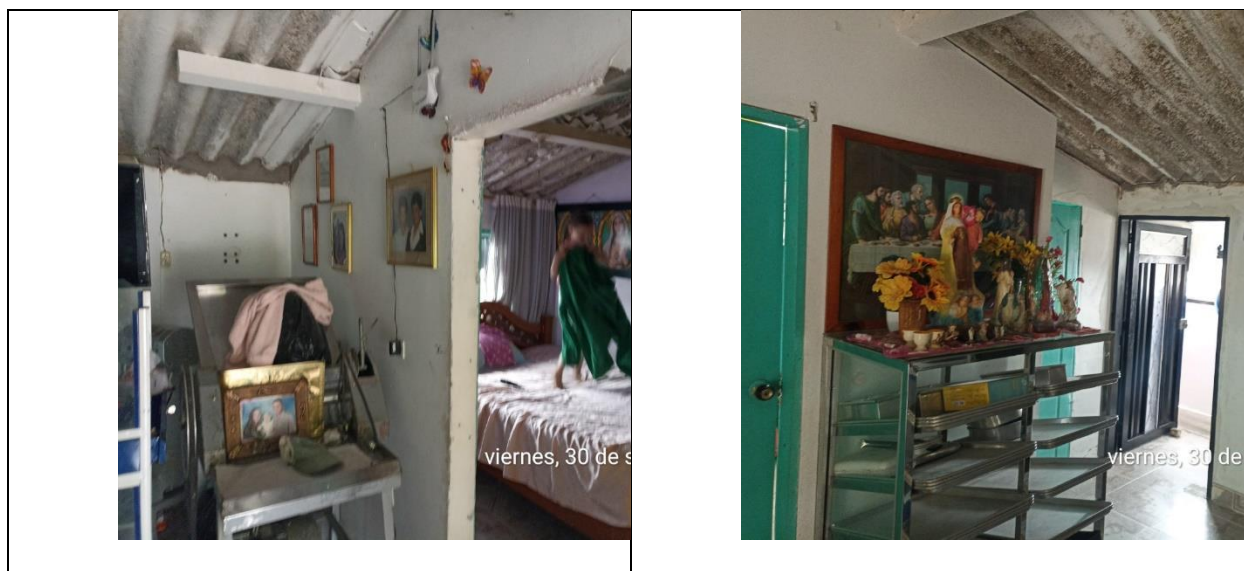
D	<p>Estructuras con chimeneas, fachada mal vinculada, parapetos o diferentes adornos que presenten inconvenientes o probabilidades de peligro ante la ocurrencia de un sismo, balcones vinculados a la estructura después de la construcción de la misma no de muy adecuada manera.</p>
---	--



Se identifica claramente la existencia de parapetos y fachada mal vinculada, adicionalmente se aprecian pésimas conexiones que presentan alta probabilidad de peligro.

ESTADO DE CONSERVACION

C	<p>Muros con fisuras de abertura media correspondientes a 2 o 3 milímetros producidas por sismos o bien edificaciones que en sus muros halla presencia de fisuras, pero sin un deterioro muy importante.</p>
---	--



Se identifica la presencia de fisuras en varios muros de mampostería en la edificación para lo cual se determina una calificación C

El índice de vulnerabilidad resulta un parámetro que ayuda a identificar edificaciones sísmicamente peligrosas

Referencias

- Aguilar, G., & Mudarra, C. (2018). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica mediante el método de Índice de Vulnerabilidad de la I.E Liceo Trujillo-2018. Trujillo - Perú.
- AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010* .
Cápítulo A.10.
- AIS. (2012). *Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogota.
- Alicante, U. d. (04 de 05 de 2015). *Universidad de alicante*. Obtenido de
<https://web.ua.es/es/urs/peligrosidad/peligrosidad-sismica.html>
- Barbat, H. A. (1998). *El Riesgo sísmico en el diseño de edificios*. España: Madrid :
Calidad siderúrgica, 1998.
- Benedetti, D., & Petrini, V. (1984). *Sulla vulnerabilità sísmica di edifici in muratura: Prioste di un método di valutazione*. Roma: Lindustria delle Costruzioni.
- Bonet, R. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicacion a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Cataluña, España.
- Caicedo, C., Barbat, A., Canas, J., & Aguiar, R. (1994). *Vulnerabilidad Sísmica en Edificios*. Barcelona, España.
- Cardona. (Septiembre - Octubre 1989). Seminario Internacional de Planteamiento, Diseño, Reparación y Administración de Hospitales en Zonas sísmicas, JICA - CISMID - OPS,. Lima.
- Cardona, O., & C, M. (2015). *Estimacion Holistica del Riesgo Sísmico Nuevos Enfoques*. Bogota, Colombia.
- CNR. (1993). *Determinazione del rischio sísmico a fini urbanistici in Lombardia, comune di Toscolano Maderno*. Milán: Instituto di Recerca Sul Rischio Sísmico.

FEMA 154, R. A.-2. (1988). *Rapid visual screening of building for potencial seismic hazard*. Washington.

<http://webserver2.ineter.gob.ni/sis/vulne/cali/6.6.2.7-indice-vul.htm>. (s.f.).

Maldonado, E., & Chio, G. (2008). *Vulnerabilidad Sísmica en centros urbanos*. Santander.

Microzonificación, C. (2006). *Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La estrella, Caldas*. Medellín.

Pizarro, N., Tonrello, M., Aguera, N., & Gioacchini, G. (Vol26, N.3,2021). Vulnerabilidad Sísmica de Edificios Educativos. comparación de dos métodos cualitativos. Casos Estudio. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*.

SENA. (2008). *Guía de Estudio Sismo Resistencia*. Medellín.

Vere, J. (1973). *The statistical estimation of earthquake risk*. Nueva Zelanda.

Zora, F., & Acevedo, A. ((2019)). Índice de vulnerabilidad sísmica de escuelas del Área Metropolitana de Medellín, Colombia. *EIA*, 195-207.